

修士論文

Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の交換に
向けた量産品の性能評価と PMT モジュールの改良

名古屋大学理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻
学籍番号 262001204
氏名 中野友也

2022/1/21

概要

Belle II 実験は素粒子標準理論の精密検証や新物理現象の探索を行う国際共同実験であり、 B 中間子を大量に生成しその崩壊を精密測定することを主な目的としている。Time of Propagation (TOP) カウンターは Belle II 実験で使用されている粒子識別装置であり、粒子が発するチェレンコフ光の伝搬時間差を測定することで粒子識別を行う。

TOP カウンターでは、光検出器として Micro Channel Plate (MCP)-PMT を採用している。MCP-PMT は高い時間分解能を持つ一方で、光電面寿命により量子効率 (QE) が低下するという特性を持つ。一部の PMT は 2022 年に寿命を迎えると予測されているため、2022 年のシャットダウン期間中にそれらを交換する計画である。本研究では、交換に向けて量産された 176 本の PMT に対して以下の 2 項目について研究を行った。

一つ目は量産された PMT の全数性能評価である。従来の性能評価手法を改良し、より精密な性能評価を可能にした。QE の評価結果を図 1 に示す。また、評価の結果 4 本の PMT が要求を満たさず製造元に返品した。また、増幅率の印加電圧依存性を測定し、個々の PMT に対して運転に最適な印加電圧を決定する指標を作った。さらに、測定結果を活用して TOP カウンター内での PMT の配置を決定した。QE が高い PMT を優先的に採用し、TOP カウンターの性能が最大かつ均等になるような PMT の配置を実現した。

二つ目は PMT モジュールの改良である。MCP-PMT はモジュールに組み上げて搭載されるが、このとき PMT と読み出し基板の間に隙間ができる。この隙間が原因となって磁場中で MCP-PMT が回転することがあり、検出光子数の減少を招く。PMT の交換に伴いモジュールも刷新するため、隙間をシリコンシムで埋めた改良型モジュールを開発し使用する。隙間の大きさは PMT の個体差によって変化するため、PMT ごとに適切なシムの厚さを $50\text{ }\mu\text{m}$ の精度で決定する必要がある。また、モジュールの組み立てを予定通り進めるためには、PMT 全数に対してシムの厚さを短時間で決定できる手法が必要である。本研究ではサンプルの PMT を用いて磁場中での回転を防ぐために必要なシムによる反発力の大きさを測定した。さらに、PMT の厚さを $1.2\text{ }\mu\text{m}$ の精度で自動測定する装置を製作し、その測定結果から PMT 全数に対して最適なシムの厚さを導出する手法を開発した。

本研究により量産された MCP-PMT の高精度な性能評価と PMT の回転を防止する改良型モジュールの開発を達成し、高性能な MCP-PMT を長期間安定して運用することを可能にした。

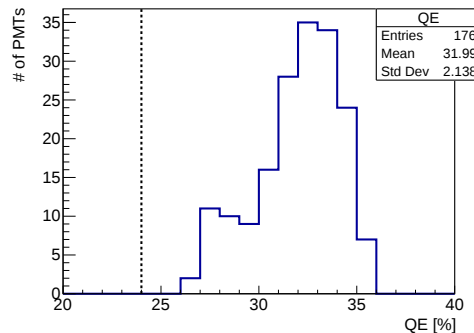


図 1: QE の測定結果。点線で示される要求値を全ての PMT が満たしている。

目次

第 1 章 Belle II 実験 TOP カウンター	1
1.1 Belle II 実験	1
1.1.1 Belle II 実験で目指す物理	1
1.1.2 SeperKEKB 加速器および Belle II 検出器	2
1.2 TOP カウンター	4
1.2.1 TOP カウンターの構造	4
1.2.2 TOP カウンターの粒子識別原理	6
1.2.3 磁場による PMT やモジュールの回転	6
1.3 TOP カウンター用 MCP-PMT	7
1.3.1 MCP-PMT の概要	7
1.3.2 MCP-PMT の基本特性	7
1.3.3 MCP-PMT の寿命と寿命改善策	9
1.3.4 初期量産型 PMT の交換計画	11
1.4 本研究の目的	12
第 2 章 量産された MCP-PMT の性能評価	13
2.1 性能評価の概要と主な評価項目	13
2.2 寸法検査と放電チェック	13
2.3 QE 測定	14
2.4 基本特性の測定	17
2.4.1 増幅率	18
2.4.2 時間分解能	20
2.4.3 収集効率	22
2.5 磁場特性の測定	23
2.6 性能評価結果のまとめ	25
2.6.1 取り換えの対象になった本数	25
2.6.2 以前の量産品との性能の違い	25
2.6.3 TOP カウンターでの MCP-PMT の配置の決定	27
第 3 章 PMT モジュールの改良	29
3.1 改良案の現状と研究課題	29
3.1.1 先行研究で示された改良案	29
3.1.2 シム方式の課題点	29
3.1.3 PMT モジュール改良の計画と本研究の研究内容	30
3.2 最適なシリコンシムの厚さの決定	30

3.2.1	PMT の厚さ測定	30
3.2.2	シムの厚さ測定	32
3.2.3	シムの厚さと PMT にかかる負荷の大きさの関係	33
3.2.4	テストモジュールを用いたシムの厚さの決定と実用性の検証	34
3.3	PMT 全数に対してシリコンシムの厚さを決定する手法の確立	35
3.3.1	PMT の厚さとシムの厚さの相関関係	36
3.3.2	量産された PMT 全数に対する厚さの自動測定	36
3.4	改良型モジュール組み立て手順の確立	37
第 4 章 結論		39

第1章 Belle II 実験 TOP カウンター

1.1 Belle II 実験

1.1.1 Belle II 実験で目指す物理

新物理現象を探索する手法の一つに、標準理論を精密に検証するという方法がある。実験で測定された物理量と標準理論で予言される物理量の間に大きな乖離があれば、標準理論では説明できない現象が存在する証拠になる。また、実験値と理論値が一致している場合は、提唱された新物理理論を棄却することができる。

標準理論を検証するために用いられる物理量の一つがCKM行列である。CKM行列はクォークに作用する弱い相互作用を記述する、 3×3 のユニタリー行列である。CKM行列 V_{CKM} は式1.1のように表記され、行列の各要素がクォークごとの結合を表す。CKM行列のユニタリー性から式1.3が成立し、複素平面上に三角形を描くことができる。 $\bar{\rho} + i\bar{\eta} = -V_{ud}V_{ub}^*/V_{cd}V_{cb}^*$ とにおいて、複素平面上の $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、 $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ を頂点に持つ図1.1のような三角形をユニタリー三角形と呼ぶ。

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + 1 + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} = 0 \quad (1.3)$$

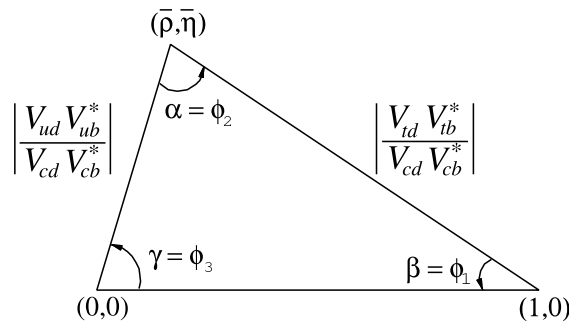


図 1.1: ユニタリー三角形の概形 [1]

ユニタリー三角形を用いることでCKM行列を検証でき、その結果を図1.2に示す。今のところ新物理を示す証拠は発見されておらず、より高精度な測定による検証が必要であ

る。CKM 行列において b クォークに作用する成分を検証するには、 B 中間子の崩壊現象を用いることが有効である。 B 中間子の崩壊では b クォークが弱い相互作用をするため、 V_{ub} や V_{cb} を測定することができる。

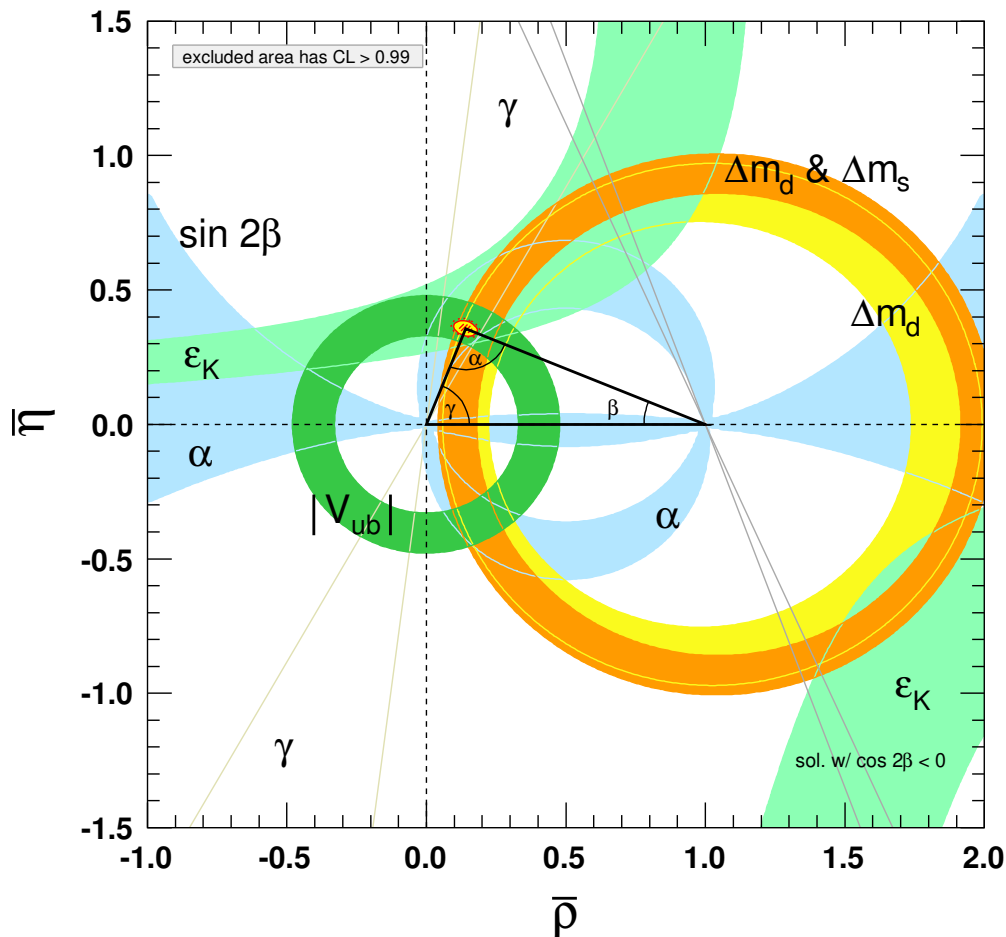


図 1.2: ユニタリー三角形の検証結果 [1]

Belle II 実験は標準理論の検証が可能な素粒子実験の一つであり、 B 中間子の大量生成を通して標準理論を検証することができる。また、世界最高のルミノシティによる高統計量での測定が特徴的な実験であり、物理量の測定誤差を低減することで新物理探索の感度向上を目指している。瞬間ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で物理データを取得し、 50 ab^{-1} の統計量を得る計画である。

1.1.2 SeperKEKB 加速器および Belle II 検出器

Belle II 実験では SuperKEKB 加速器で様々な粒子を生成し、それらの飛跡やエネルギー等の物理量を Belle II 検出器で測定している。加速器と検出器の概要を図 1.3 に示す。

SuperKEKB 加速器は電子陽電子加速器であり、7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる。重心系エネルギーは $\sqrt{s} = 10.58$ GeV であり、 $\Upsilon(4S)$ の共鳴エネルギーに相当

する。 $\Upsilon(4S)$ は 96 % 以上の確率で B 中間子対に崩壊するため、SuperKEKB 加速器は B 中間子対を効率よく生成することができる。Belle II 検出器は電子・陽電子の衝突点の周りに配置された粒子検出器の総称である。複数種類の内部検出器から構成され、粒子に関する様々な物理量を測定する。内部検出器の名称と役割は以下の通りである。

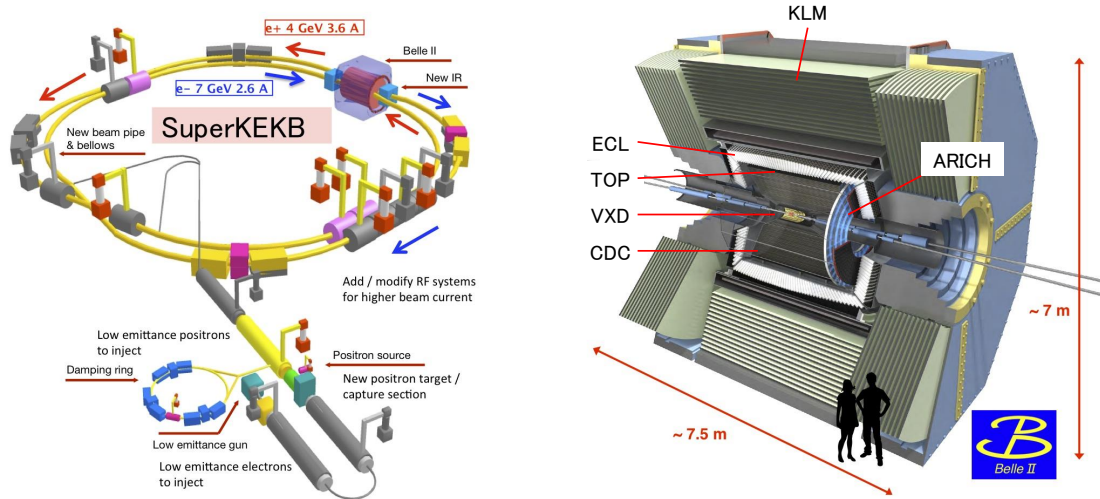


図 1.3: SuperKEKB 加速器（右）と Belle II 検出器（左） [3]

VXD

崩壊点検出器 (Vertex Detector) の略称であり、衝突点付近に設置されている。VXD は半導体を利用した荷電粒子検出器であり、荷電粒子が通過した際に発生する電子・ホール対を読み出すことで粒子を観測する。信号が発生した位置から粒子の軌跡を計算し、崩壊点を再構成する。

CDC

中央飛跡検出器 (Central Drift Chamber) の略称であり、荷電粒子の飛跡を検出する装置である。ビーム軸を中心とする円筒形の空間内にガスが充填されているほか、ワイヤーが高電圧を印加した状態で張られている。荷電粒子が CDC に入射するとガスが電離し、ワイヤーが作る電位に沿って飛行する。ガス分子は周りのガス分子を電離しながら飛行し、電荷が増幅された信号がワイヤーで読み出される。信号が読み出されたワイヤーの位置情報から荷電粒子の飛跡を再構成している。また、CDC には 1.5 T の磁場がかけられており、荷電粒子の飛跡は磁場によって曲げられる。このときの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。

ECL

電磁カロリメーター (Electromagnetic Calorimeter) の略称であり、粒子のエネルギーを測定する装置である。CsI(Tl) 結晶を用いた全吸収型カロリメーターで、Belle II 検出器を取り囲むように設置されている。電子や光子が結晶へ入射すると電磁相互作用により電磁シャワーが発生し、エネルギー損失が起こる。損失したエネルギーは結晶によってシンチレーション光に変換され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ことができる。

KLM

ミュー粒子・中性 K 中間子検出器 (K_L -Muon Detector) の略称であり、 K_L 中間子と μ 粒子を識別する装置である。Belle II 検出器の最外部に設置され、鉄板と荷電粒子検出器を幾重にも重ね合わせた構造を持つ。KLM に入射した粒子が荷電粒子である場合、発生したシャワーの形状から μ 粒子と荷電ハドロンを区別する。また、中性粒子である K_L 中間子が入射した場合、鉄板の核子と強い相互作用で反応し荷電粒子を発生させる。この荷電粒子を荷電粒子検出器で観測し K_L 中間子の検出を行う。

ARICH

エアロゲル・リングイメージ型チェレンコフ (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) 検出器の略称であり、Belle II 検出器のエンドキャップ部に配置された粒子識別装置である。2 種類のエアロゲルがエンドキャップ部を覆うように設置されているほか、20 cm 離れた位置に光検出器が置かれている。エアロゲルに粒子が高速で入射するとチェレンコフ放射が発生し、リングイメージが光検出器に投影される。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し、粒子識別を行っている。屈折率の異なる 2 種類のエアロゲルを輻射体に用いることにより、チェレンコフ放射の発生位置の違いによるリングイメージの半径の変化を抑制する工夫が施されている。

TOP カウンター

チェレンコフ光の伝播時間 (Time of Propagation) から粒子識別を行う装置であり、Belle II 検出器の円筒部を囲むようにして 16 台が設置されている。構造や検出原理についての説明は次節で取り扱う。

1.2 TOP カウンター

TOP カウンターはリングイメージ型チェレンコフ検出器の一種であり、石英板と光検出器を基本構造としている。石英板を通過した粒子が発生させるチェレンコフ光を光検出器で捉えリングイメージを再構成することで、 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、粒子識別原理およびその性能について述べる。

1.2.1 TOP カウンターの構造

TOP カウンターは大きく分けて Quartz Bar Box (QBB)、石英輻射体、光検出器と読み出し回路の 3 つに区分される。

QBB

石英輻射体、光検出器、読み出し回路を収めるアルミ製の筐体である。石英輻射体を支えるハニカム構造や、読み出し回路の冷却機構、光検出器の接着面を撮影する CCD カメラなどが内蔵されている。

石英輻射体

図 1.4 のように 1250 mm × 450 mm × 20 mm の石英板 2 枚と、集光ミラー、プリズムが光学接着された構造をしている。石英板で発生したチェレンコフ光は全反射を繰り返しながらプリズムへ到達し、その先にある光検出器で読み出される。できるだけ多くのチェレンコフ光子をリングイメージを崩すことなく読み出すために、石英板や光学接着には以下の要求が課せられている。

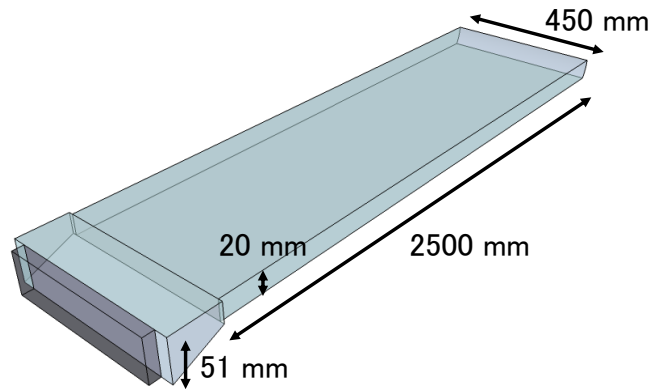


図 1.4: 石英輻射体のイメージ図

	項目	要求値
石英輻射体	表面研磨精度	5 Å
	内部透過率	$\geq 98.5 \text{ \%}/\text{m}$
	内部表面反射率	$\geq 99.90 \text{ \%}$
光学接着	相対位置	$\leq 100 \text{ }\mu\text{m}$
	相対角度	$\leq 0.2 \text{ mrad}$

表 1.1: 石英輻射体に課せられた要求

光検出器と読み出し回路

光検出器には MCP-PMT を使用する。MCP-PMT の構造や検出原理などは 1.3 節で説明する。MCP-PMT 4 本を 1 組のモジュールとして組み上げ、8 組のモジュールが 1 台の TOP カウンターに搭載されている。各モジュールの裏側には、読み出し回路と印加電圧 (HV) 供給用の HV ボードが搭載されている。

モジュールは MCP-PMT 4 本、波長カットフィルター、読み出し基板、PEEK パーツで構成される。波長カットフィルターは 350 nm 以下の波長の光をカットするもので、波長分散効果による粒子識別性能低下を防ぐ効果がある。MCP-PMT は波長カットフィルター

にシリコンゴム TSE3032 で接着され、波長カットフィルターと石英輻射体のプリズムは TSE3032 製のオプティカルクッキーで接着される。読み出し基板には MCP-PMT のピンを挿すソケットがあり、4 本の MCP-PMT の信号を 1 枚の読み出し基板で読み出す。

1.2.2 TOP カウンターの粒子識別原理

TOP カウンターの石英板を高速な粒子が通過すると、チェレンコフ光を発する。チェレンコフ光は石英板内を全反射を繰り返しながら端面の光検出器に到達するが、粒子が入射してから光子が伝播するまでの時間差と光子の検出位置からリングイメージを再構成できる。粒子の運動方向とチェレンコフ光のなす角 θ_c は、石英の屈折率 n と粒子の速度 β を用いて

$$\theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1.4)$$

と表せる。また、粒子の質量 m は運動量 p と速度 β を用いて

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad (1.5)$$

と表せるので、TOP カウンターで測定した θ_c と他検出器で測定された p の値を用いて粒子の種類を識別することができる。このときの TOP カウンターの粒子識別性能 S は、近似的に

$$S = (\Delta\text{TOF} + \Delta\text{TOP}) \frac{\sqrt{N}}{\sigma_t} \quad (1.6)$$

と表される。ここで、 ΔTOF は粒子の飛行時間差、 ΔTOP はチェレンコフ光子の伝播時間差、 N は検出した光子数、 σ_t は TOP カウンターの時間分解能である。この式から、高い粒子識別性能を実現するためには N や σ_t が重要であることが分かる。

1.2.3 磁場による PMT やモジュールの回転

TOP カウンターのインストール後に磁場動作試験が実施され、モジュールの一部で回転による接着の剥離が発覚した [4]。モジュールが回転すると HV ボードや読み出し回路との電氣的接続が切れてしまい、信号の読み出しが不可能になってしまう。この問題への対策として、モジュール PEEK パーツと QBB の間にある隙間にアセタール樹脂 (POM) 製のシムを挿入した。モジュールが動くような隙間を埋めることで磁場による回転を防ぐことに成功した。

また、モジュールの内部で MCP-PMT が回転してしまう問題も発覚した。MCP-PMT が磁場を受けて回転すると、波長カットフィルターとの接着が剥がれて検出可能な光子数が減少してしまう。減少する光子数の割合は数% (20 個程度に対して数個の減少) であるため致命的な問題とは見なされず、対策を施す時間的余裕もなかったことから MCP-PMT が回転した状態のままで運転され続けている。その一方で簡単に効果的な対策が研究され、MCP-PMT と読み出し基板の間にある隙間にシリコン製のシムを挿入する手法が提案された。先行研究により、この手法が有効であることがわかっている。

1.3 TOP カウンター用 MCP-PMT

1.3.1 MCP-PMT の概要

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。図 1.5 に示すように角型の PMT であり、敷き詰めた際の有感面積が広いことが特徴である。MCP-PMT の内部構造を図 1.6 に示す。この PMT には 2 枚の MCP が搭載されており、MCP に入射した電子が MCP 内壁との衝突を繰り返すことで 2 次電子増幅を行う。光電子は最終的におよそ $10^5 - 10^6$ 倍程度に増幅されてアノードで読み出される。PMT の厚さ (光電面からピンの根元までの寸法) のカタログ値は 13.1 mm であるが、ピンの根元に放電防止用のシリコンポッティングが塗られているため実際はカタログ値よりも厚いものも存在する。シリコンポッティングは手作業で塗られているため凹凸が存在し、また個体差が存在する。

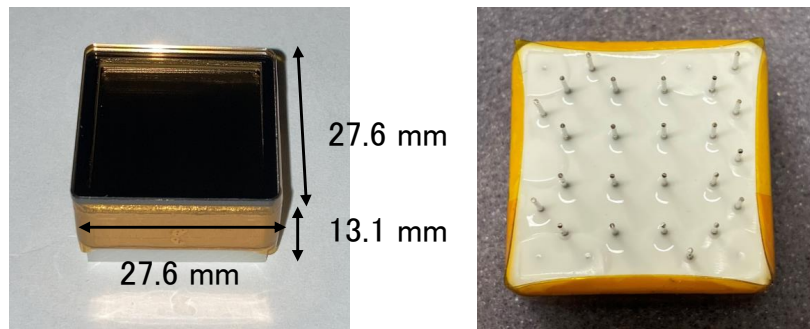


図 1.5: MCP-PMT の外観、光電面側 (左) とポッティング側 (右)

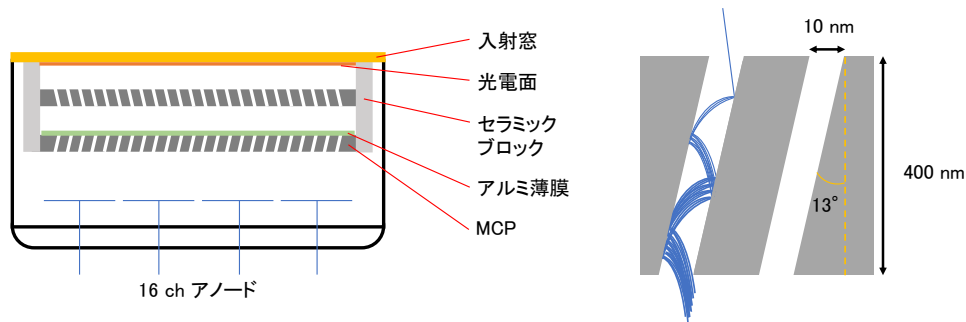


図 1.6: MCP-PMT の内部構造 (左) と MCP の構造 (右)

1.3.2 MCP-PMT の基本特性

MCP-PMT が光子を検出する原理に関連して、特に重要なパラメーターについて解説する。典型的な性能を表 1.2 に示すが、実際の性能は個体によって大きく変わりうることに注意されたい。

項目	値
型番	R10754-07-M16(N)
光電面の材質	マルチアルカリ (NaKSbCs)
有感面積	$23.0 \times 23.0 \text{ mm}^2$
チャンネル数	4×4 チャンネル
量子効率 (QE)	29.3% (ピーク波長での値)
増幅率	$O(10^5) - O(10^6)$
時間分解能	34.3 ps
収集効率	$\sim 60\%$

表 1.2: MCP-PMT の典型的な性能

量子効率 (QE : Quantum Efficiency)

QE は光子が光電面に入射したときに光電効果が起こる確率である。QE は入射光の波長に対して依存性があり、図 1.7 (a) のように 360 nm 付近で最大となる。また、製造時に生じる光電面のムラの影響で、QE の面分布が一樣でない場合がある。

収集効率

収集効率は光電子が MCP の穴へ入射し増幅される確率である。MCP の開口率は約 60% であり、収集効率もおおよそ同程度の値となる。

時間分解能

一般的に 2 次電子増幅の過程では電極から 2 次電子が複数個飛び出すが、その方向にはばらつきがあり、結果としてアノードにたどり着くまでの飛行距離がばらつく。このばらつきが PMT の時間分解能を悪化させる要因の一つになっている。MCP-PMT では MCP の微細な穴の中で 2 次電子増幅が進行するため、2 次電子の飛行距離のばらつきが小さく抑えられる。そのため、信号の時間分布は図 1.7 (b) のようになり、 ~ 30 ps の高い時間分解能を達成することができる。

増幅率

増幅率は光電子が MCP で増幅されるときに倍率である。MCP-PMT では、2 段の MCP を用いて光電子をおおむね $O(10^5) - O(10^6)$ 倍に増幅する。増幅率には図 1.7 (c) のような印加電圧依存性があり、増幅率 (Gain) は印加電圧 (HV) を用いて

$$\text{Gain} = \exp(\text{Slope} \cdot \text{HV} + \text{Const}) \quad (1.7)$$

と近似できる。我々は増幅率が 2×10^6 になる時の印加電圧を標準電圧と定義しており、性能評価を行う際の印加電圧の基準にしている。

磁場特性

TOP カウンターは 1.5 T の磁場が印加されている環境下で運転される。MCP-PMT の側管はコバール合金で作られており、磁場を受けて回転しようとする力が働く。PMT やモジュールが回転してしまうと光学接着の剥離を招き検出可能な光子数が減少したり、電氣的な接触不良を起こして測定不可能になったりするなどの悪影響が出る。

また、PMT 内部での電子の飛跡も磁場で曲げられてしまうため、MCP-PMT の光子検出能力に変化が生じる可能性がある。特に、増幅率が大きく影響される。MCP 内部での電子の飛跡が曲げられることで、MCP 内壁との衝突回数や 2 段目 MCP に入射する際の電子飛跡の広がり方が変化し増幅率が変化する。磁場の有無による増幅率の変化を図 1.7 (d) に示す。TOP カウンターでは磁場の中では、増幅率は磁場のない時の増幅率の 0.3 倍程度になる。TOP カウンターでは磁場がある状態で 3×10^5 の増幅率になる印加電圧で運転している。

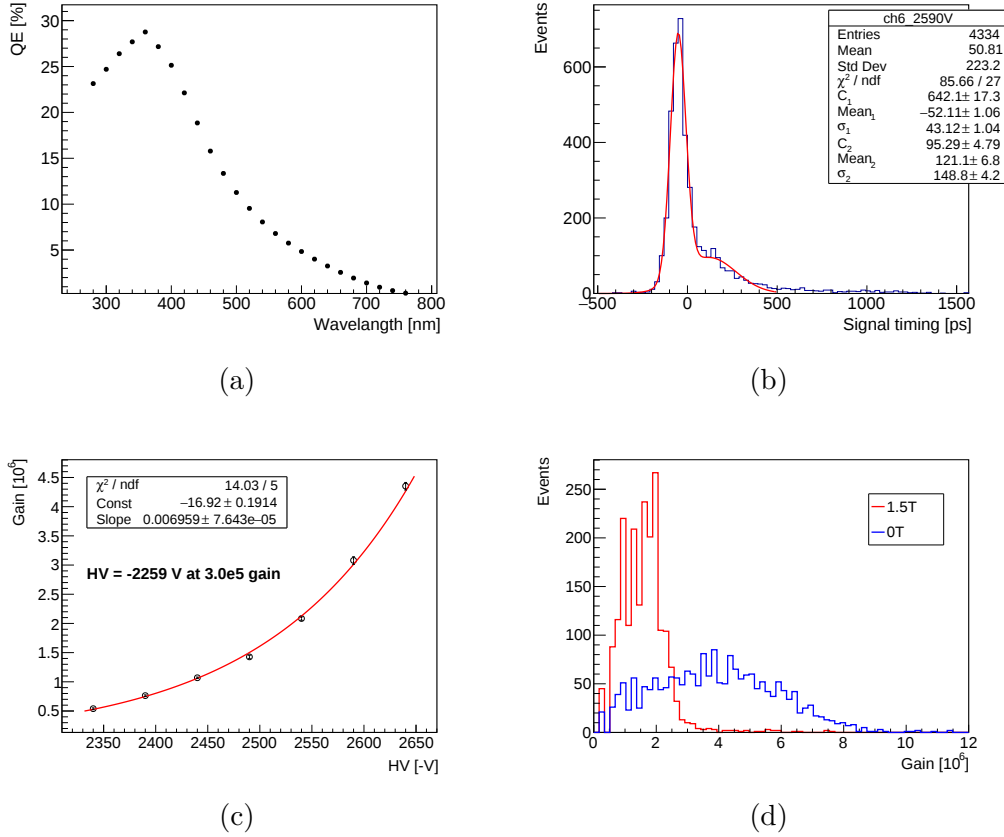


図 1.7: PMT の基本特性の例。QE の波長依存性 (a)、回路の測定誤差を含む信号の時間的広がり (b)、増幅率の印加電圧依存性 (c)、磁場の有無による増幅率の変化 (d)。

1.3.3 MCP-PMT の寿命と寿命改善策

MCP-PMT の特性として、出力し続けた信号電荷量 (積算出力電荷量) に応じて QE が低下することが報告されている。これは、MCP 表面に付着したまま残留しているガスが信号の電荷によって飛び出し、光電面と相互作用するためである。我々は、波長 400 nm の光に対する QE について製造時と比較した相対値が 0.8 に達する時の積算出力電荷量を MCP-PMT の寿命と定義しており、 $[C/\text{cm}^2]$ の単位を持つ。相対 QE R は積算出力電荷量 Q と寿命 τ を用いて、

$$R = 1 - 0.2 \left(\frac{Q}{\tau} \right)^2 \quad (1.8)$$

と表せる。

MCP-PMT を TOP カウンターで長期間運用する場合を考える。QE 低下により PMT が検出できる光子数が減少すると、TOP カウンターの性能は低下してしまう。そのため、TOP カウンターの性能を維持するためには寿命を迎えた 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。多数の MCP-PMT の頻繁な交換は非常に大きなコストがかかり非現実的である。また、寿命による QE 低下はチェレンコフ光子の信号だけでなく背景事象由来の光子によっても引き起こされるため、PMT を延命するために背景事象が少ない状態での運転を強いられる。このような状況ではビーム強度などが制限される可能性がある。

MCP-PMT の短い寿命は Belle II 実験に悪影響をもたらす。そこで、我々は MCP-PMT にいくつかの寿命改善策を講じている。TOP カウンター用 MCP-PMT は寿命改善策の違いによって大きく 3 種類に分けられる。それぞれの寿命と現在インストールされている本数を表 1.3 で表す。

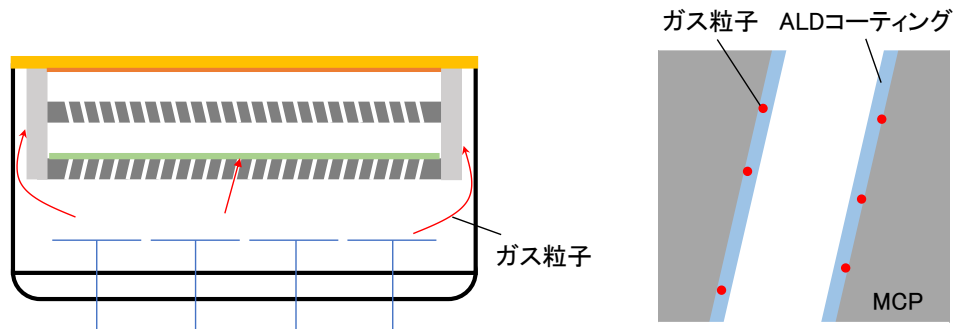


図 1.8: アルミニウム薄膜とセラミックブロックによるガス遮蔽の様子（左）と ALD によるガス粒子封じ込めの様子（右）

- 初期量産型
初期量産型には図 1.8 左図のような対策を施している。後段 MCP の上部にアルミニウム薄膜を設置することでイオン化した粒子が光電面に到達することを抑制する。また、MCP と側管の間にセラミックブロックを設置し、中性ガスへの対策も施している。
- ALD 型
初期量産型で行われている寿命改善策に加えて、MCP 表面に Atomic Layer Deposition (ALD) コーティングを施した型である。ALD コーティングの様子を図 1.8 右図に示す。付着していたガスが ALD 層に閉じ込められることで残留ガスの放出が抑制され、寿命が改善される。
- 寿命改善 ALD 型
ALD 型よりも長い寿命を実現するため、PMT 内部の真空引きを強化するなどして寿命改善を図った型である。

型	本数 [本]	寿命 [C/cm^2]
初期量産型	224	~1.1 (平均)
ALD 型	220	~10.4 (平均)
寿命改善 ALD 型	68	>13.6 (最小値)

表 1.3: MCP-PMT の本数と寿命

1.3.4 初期量産型 PMT の交換計画

Belle II 実験では、計画されているビーム強度などから将来的な MCP-PMT の積算出力電荷量を予想することができる。MCP-PMT の寿命をもとに QE の推移を試算したものが図 1.9 であり、初期量産型 PMT は 2022 年頃に QE が 0.8 を下回ると予想された。そこで、2022 年の Belle II シャットダウン期間中に初期量産型 PMT を寿命改善型 PMT に置き換えることが計画されている。現在インストールされている初期量産型 PMT の個数は 224 本だが、予備として保有していて交換に使用できる PMT の本数は 75 本であり新たに量産が必要である。我々は 2022 年の PMT 交換に間に合うよう寿命改善型 PMT の量産を継続し、176 本の量産が完了した。今回量産された PMT は、以前の寿命改善 ALD 型 PMT と製造方法の一部を変更したものである。我々は製造方法の違いで「シリーズ」に分けており、それぞれの内訳を以下の表 1.4 に表す。

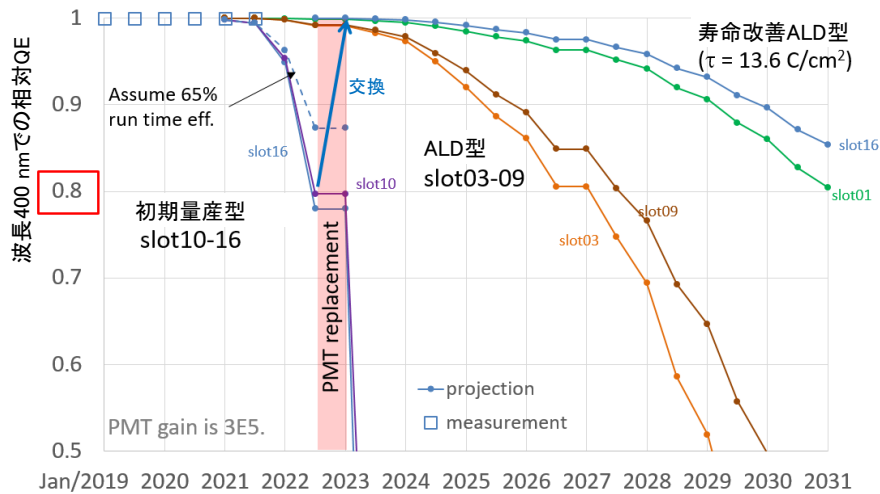


図 1.9: 運転計画に基づく MCP-PMT の相対 QE の推移

また、量産した PMT に使用する 56 台のモジュールも新調する計画であり、必要な部品の量産が完了している。新しいモジュールでは PMT が磁場中で回転する問題への対策を施す。PMT と読み出し基板の間にシリコンシムを挿入する手法が採用される計画で、挿入するシムの量産がすでに完了している。隙間の大きさに対して調節できるように厚さの違うシムを複数量産した。

シリーズ	本数 [本]	特徴
KT シリーズ	75	従来の量産品の予備
MT シリーズ	134	製造工程の効率化によりコスト削減を図った
NT シリーズ	42	ALD 膜を厚くすることで長寿命化を図った

表 1.4: シリーズの内訳と特徴。後述する性能評価の結果、返品した球は除いて本数を数えている。

1.4 本研究の目的

Belle II 実験 TOP カウンターは粒子から発生されるチェレンコフ光を利用して粒子識別を行う検出器であり、光検出器として MCP-PMT512 本が使用されている。その中でも初期量産型 PMT は寿命が短いため、2022 年に寿命改善 ALD 型に交換する計画である。この計画に関連して、私は二つのテーマで研究を行った。

一つ目は新たに量産された MCP-PMT の性能評価である。私は PMT ごとの性能の個体差を精度良く測定し、そのデータをもとに TOP カウンターへ搭載する PMT やその配置を決定した。このような配置の決め方によって TOP カウンターの性能を最大かつ均等に近づけることができる。また、PMT の寿命を正確に知ることによって PMT の将来的な QE 低下を予測することができる。この予測は Belle II 実験の運転計画を左右しうる重要な要素の一つである。新たに量産された PMT は製造方法が以前と異なっており、寿命も変化している可能性がある。そこで私は新しい量産品に対しても寿命測定を行い、QE 低下の予測の信頼性の向上を目指す。

二つ目は PMT モジュールの改良である。PMT の交換に合わせてモジュールも新調する計画であり、磁場中で PMT が回転しないようシリコンシムを挿入する。この手法の有効性は先行研究で示されているものの、PMT の厚さには個体差があり個々の PMT に対して最適なシムの厚さを決定する手法は確立されていなかった。シムの厚さが不適切な場合、回転を止めることができなかつたり、新たな不具合の原因になり得る。そのためこの手法で回転への対策を施すためには、使用する PMT に対して最適なシムの厚さを決定する手法を確立することが不可欠である。私は、PMT の厚さを測定する装置とその測定結果から使用するシムの厚さを求める手法を開発した。

第2章 量産されたMCP-PMTの性能評価

2.1 性能評価の概要と主な評価項目

MCP-PMTの交換に向けて176本のPMTが新しく量産された。TOPカウンターに搭載する前に、量産したPMTがTOPカウンターに問題なく使用できることを確認する必要がある。またPMTの性能を個体ごとに精度よく測定することで、どのPMTの配置や運用する際の印加電圧を決めることができる。そこで私は、PMTの全数測定による性能評価を行った。全数測定の評価項目とその要求値を表2.1に示す。全数測定の手法は先行研究によって確立されており、本研究でも同じ手法で性能評価を行った。本章では新たに量産されたPMTの全数測定結果をまとめ、性能が要求に満たないPMTは製造元に返品し作り直しを依頼した。また、性能評価の結果をもとにTOPカウンターにインストールするPMTの選定を行った。

項目		要求値
寸法調査	光電面に傷がない	
	ピンが曲がっておらず、長さが適切	
	シリコンポッティングが薄すぎない	
放電チェック	放電しない	
QE測定	QE (*)	> 24 % (ピーク波長)
基本特性の測定	増幅率 (*)	
	時間分解能 (*)	< 50 ps
	収集効率 (*)	低すぎない
磁場特性の測定	増幅率比 (*)	
	時間分解能	磁場によって変化しない
	収集効率	磁場によって変化しない

表 2.1: 全数測定の評価項目とその要求値。(*) 印は具体的な測定値を記録する。

2.2 寸法検査と放電チェック

寸法検査ではPMTの外観と寸法が適切であることを確認した。入射窓に傷がないこと、ポッティングが薄すぎないことを目視で確認した。この結果、図2.1のようにポッティングが薄いPMTが2本見つかり、製造元にポッティングの塗りなおしを依頼した。

続いて、図2.2のような専用の治具を用いてPMTの寸法を確認した。この治具では以下の項目を確認できるような設計がされている。寸法検査は全ての量産品が合格であった。

- ピンが曲がっていないこと。
- すべてのピンの直径が 0.6 mm より細いこと。ピンの直径は 0.5 mm に設計されている。
- ピンがポッティングから 2.86 mm 以上飛び出ていること。
- 入射窓表面からピン先端までの寸法が 16.35 mm 以上、16.95 mm 以下であること。

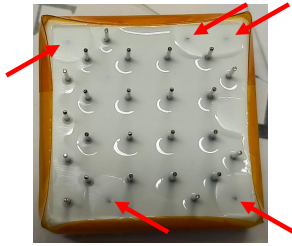


図 2.1: ポッティングが薄い PMT の例。矢印で示す部分で不要なピンが目視できる。

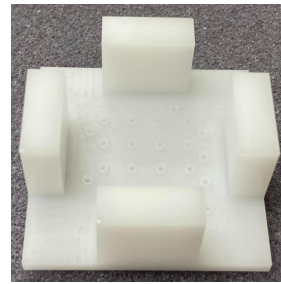


図 2.2: 寸法検査で使用する治具。

放電チェックでは製造元から提示された標準電圧 (増幅率が 2×10^6 になる電圧) より 100 V 高い電圧を PMT に印加して、放電が起きないか確認した。また、PMT からのダークノイズの波形と個数を測定し、問題が見られないことを確認した。放電チェックの結果、1 本の PMT が放電を起こしたため製造元に返品した。また、放電チェックで放電を起こさなかったがその後の測定中に放電を起こした PMT が 1 本あった。これも製造元に返品した。

2.3 QE 測定

QE 測定では図 2.3 に示すセットアップで PMT の QE の波長依存性を測定した。キセノンランプの光を分光器で分光しスリットで光の照射範囲を 1 mm 四方に絞った後、ND フィルターで 1 光子まで減光した。この光を PMT に照射して光電面と MCP 間に流れる電流量をピコアンメーターで測定した。電流の測定誤差はおよそ 0.1% から 1.0% である。PMT の架台は可動式になっており PMT を 18×18 点でスキャンするほか、フォトダイオードに光を照射するように設計されている。PMT の電流量 I_{PMT} とフォトダイオードの電流量 I_{PD} 、既に分かっているフォトダイオードの QE から、PMT の QE が

$$QE_{\text{PMT}} = \frac{I_{\text{PMT}}}{I_{\text{PD}}} \cdot QE_{\text{PD}} \quad (2.1)$$

と計算される。図 2.4 はピーク波長 (360 nm) での QE 面分布である。外周部分を除いた 16×16 点の平均値を PMT の QE として記録し、PMT 全数で測定した結果を図 2.5 に示す。全ての量産品が要求 (24% 以上) を満たしていることを確認した。

また、PMT は時間経過とともに QE が変動することがある。蒸着された光電面の状態が安定するまでの過程で QE 特性が変化することがある。また、PMT 内部の真空状態が維

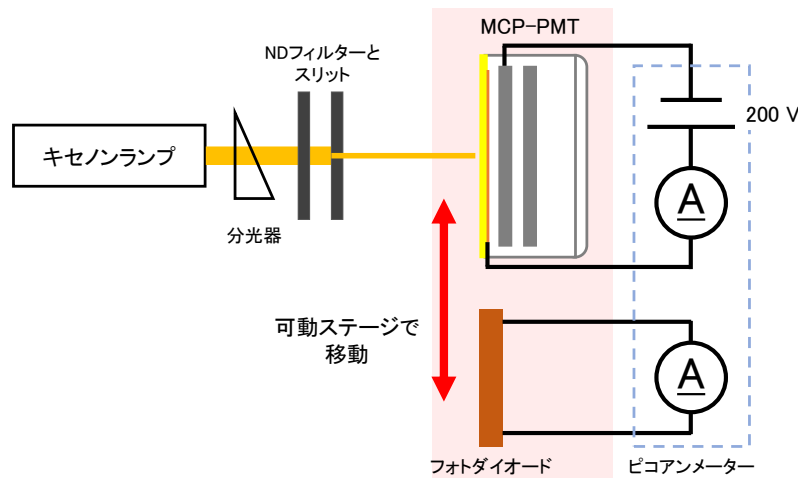


図 2.3: QE 測定のセットアップ

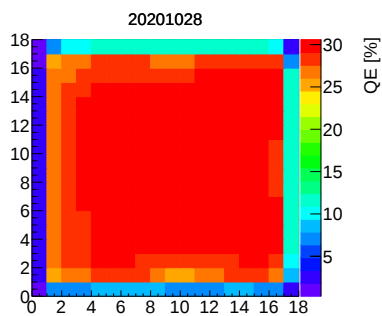


図 2.4: 360 nm の光に対する QE 面分布の例。縦軸と横軸は測定点の番号を表す。

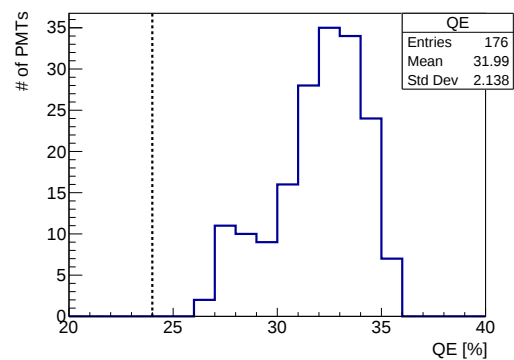


図 2.5: 360 nm の光に対する QE の全数測定結果。点線は量産品への要求 24% を表す。

持されていない場合、侵入した空気によって QE が低下する。このような QE 変動の有無を確認するため、数か月の期間を空けて量産品の QE 再測定を実施した。その結果、QE が低下した PMT が複数本見つかった。QE 変動の例を図 2.6 に示す。この PMT では全ての波長に対して QE の低下が見られ、長波長の光に対する QE ほど相対 QE が低くなった。最初の測定から直近の測定まで 265 日が経過し、その間に 360 nm の光に対する相対 QE が 0.946 まで低下した。QE がこの速度で低下し続けると仮定した場合の絶対 QE の推移を図 2.6 に表す。また、相対 QE を光電面の位置ごとに計算したものが図 2.7 である。光電面全体が一様に変化しており、真空漏れで見られるような局所的な QE 低下はなかった。

この測定結果が正しいことを確認するため、製造日が同じ PMT 同士で QE の推移を比較した。製造日が同じ PMT は光電面の個体差が小さくなりやすく、また測定日時が近いことにより測定ベンチ由来の測定結果の揺らぎの影響を除くことができる。比較を行った結果を図 2.8 に示す。測定日を横軸に、360 nm での相対 QE を縦軸にしてプロットを作成した。

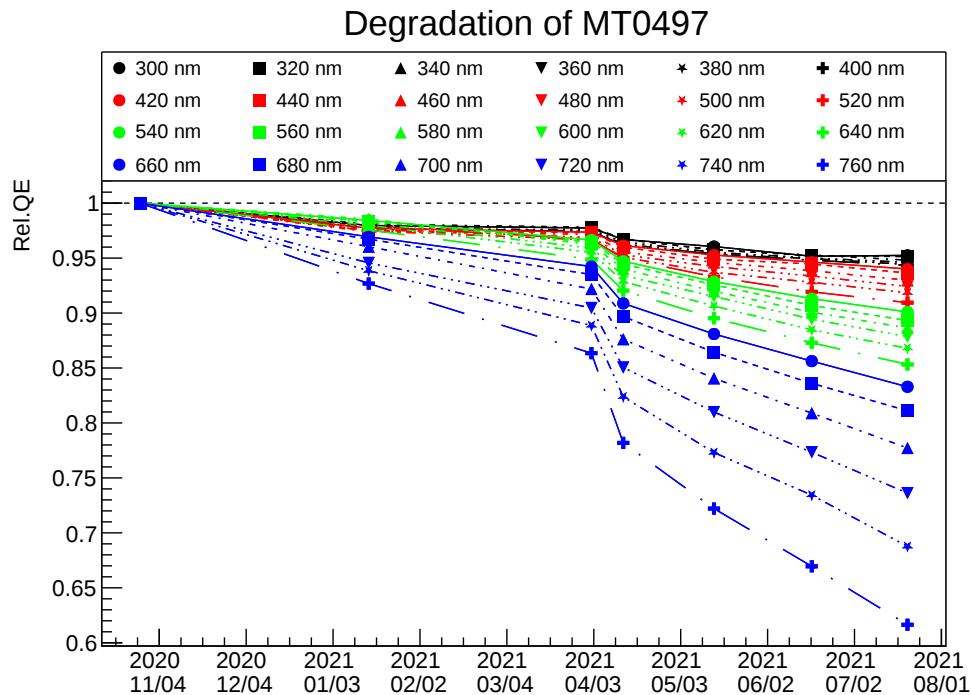


図 2.6: 時間経過による QE 変動の例。光の波長ごとに QE の相対的な変動を計算した。

測定時期の変化による QE の揺らぎはあるものの、QE が低下している PMT は測定揺らぎを逸脱した推移であることがわかった。

このような PMT について製造元に返送し調査を依頼した。QE をクロスチェックした結果、我々の測定結果が再現された。また QE 低下の原因について問い合わせたところ、光電面のアルカリ金属が移動した結果 QE 特性が変化したと推測されるとの回答を得た。移動しやすい金属は長波長の QE に影響を与えやすいため、長波長に対する QE が大きく変動したことを定性的に説明可能との指摘も得られた。金属の移動による QE 変化はある程度の期間を経て収束すること、現在の絶対 QE は要求を上回っていることから、これらの PMT は良品であるとの結論に至った。しかし、今後さらに QE が低下する可能性も否

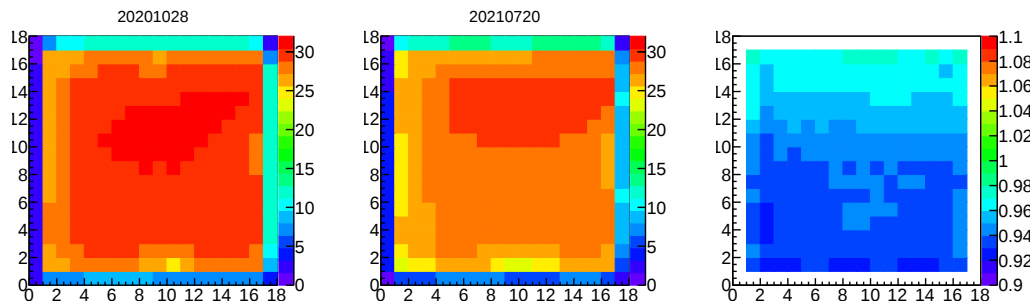


図 2.7: 製造直後の QE 面分布 (左) と再測定時の QE 面分布 (中央) および外周を除いた面分布の相対値 (右)

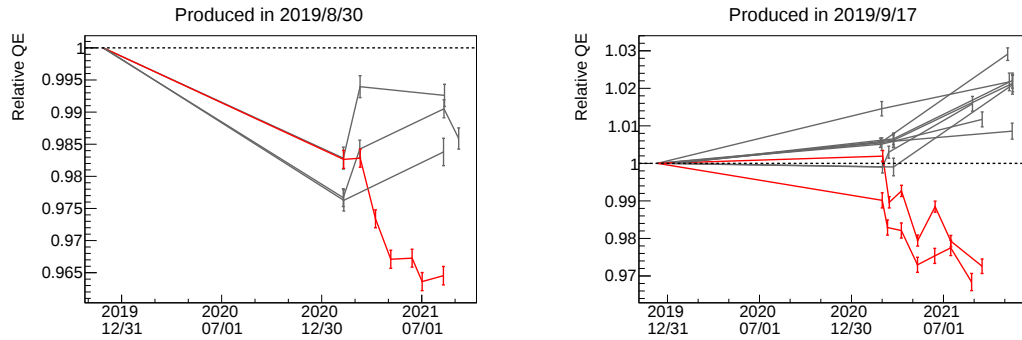


図 2.8: QE が低下した PMT と共通の製造日である PMT で QE の推移を比較した結果。赤線が QE が低下した PMT の推移、灰色は低下していない PMT の推移。

定できないため、このような PMT は TOP カウンターへ搭載しないことを決定した。

また、前量産の予備である PMT についても QE 変動が疑われたため、再測定を実施した。先の結果から QE 変動の有無は製造バッチなどに依存しないことが判明したため、使用予定の PMT の全数を再測定した。その結果、QE が大幅に低下して要求値を下回る PMT が 2 本見つかった。これらの QE 面分布を確認すると図 2.9 のように QE が局所的に低下しており、真空漏れが疑われた。製造元での測定でも同様の測定結果が確認されたため返品の対象となった。

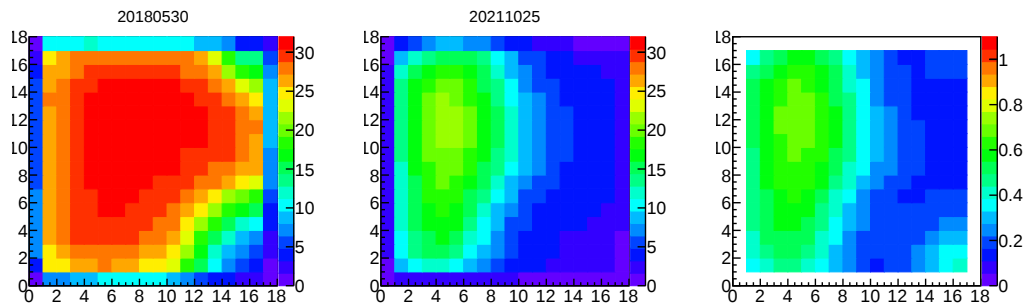


図 2.9: 真空漏れが疑われる PMT の面分布、製造直後 (左) と再測定時 (中央) および外周を除いた相対値 (右)。

2.4 基本特性の測定

基本特性の測定では、図 2.10 のようなセットアップで磁場のない環境下での PMT の性能評価を行った。波長 400 nm のレーザー光を ND フィルターで 1 光子まで減光したのちビームスプリッターで分割し、一方は MCP-PMT へ、もう一方は参照用 PMT へ照射した。MCP-PMT の信号は 16 のチャンネルごとに取り出され ADC と TDC で記録される。読み出し回路において可変アンプと呼ばれる部分は信号を増幅しつつ 2 つに分ける回路で、増幅率を 3 段階で変更できるアンプである。MCP-PMT の印加電圧に応じて可変

アンプの増幅率を変化させ、印加電圧に関わらずおおむね同じ信号電荷量で測定できるようにした。この測定では印加電圧を変えながら信号を測定し、性能の印加電圧依存性を測定した。

参照用 PMT には浜松ホトニクス社ラインフォーカス型 PMT H7195PX を使用した。この PMT は QE が $20 \pm 5\%$ 、収集効率が $80 \pm 10\%$ である。

また、MCP-PMT の信号に似た波形のテストパルスを作成し、MCP-PMT 用ソケットから入力した。テストパルスの電荷量や信号タイミングを変えながら測定することでキャリブレーションを行った。あるチャンネルでのキャリブレーション結果の例を図 2.11 に示す。キャリブレーションは ADC と TDC のデジタル値を電荷量と時間に変換するために必要であるほか、時間分解能の測定結果から読み出し回路の分解能由来の成分を取り除くためにも用いられる。

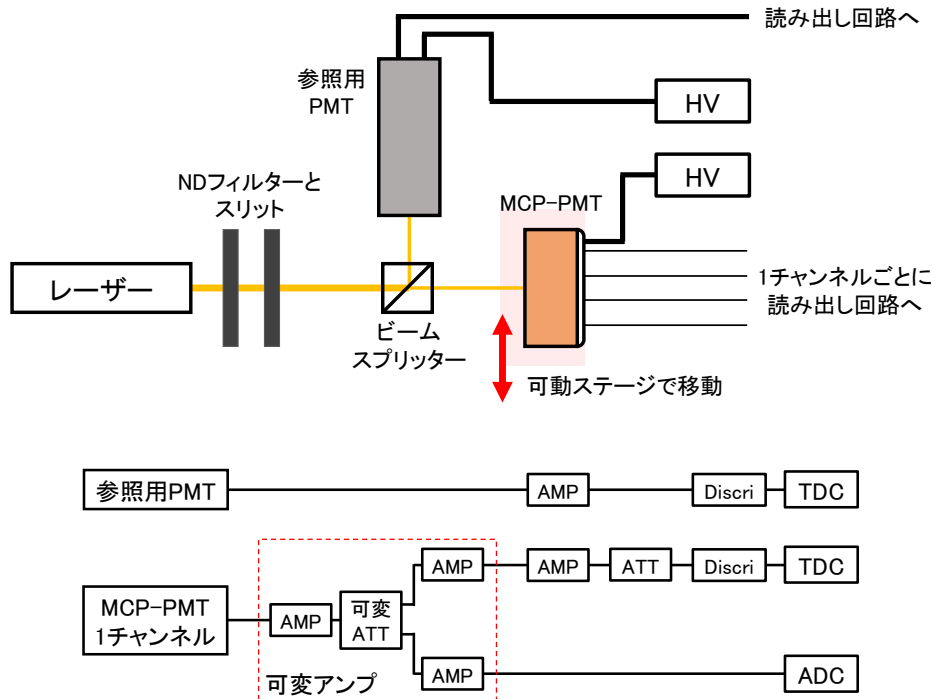


図 2.10: 基本特性の測定のセットアップ（上）と読み出し回路の回路図（下）。AMP はアンプ、ATT はアッテネーター、Discri はディスクリミネーターを意味する。

2.4.1 増幅率

ADC での測定値から信号の電荷量を導出し、増幅率を計算した。

キャリブレーションでは電荷量 0.88 pC のテストパルスを $0 - 10 \text{ dB}$ だけ減衰させて入力した。変換式は式 2.2 のように記述され、入力した信号電荷量と ADC 出力の関係からフィッティングして変換式を導出した。ここで、 Q が信号電荷量、ADC は信号入力時の ADC 出力値、Pedestal は信号を入力していない時の ADC 出力値、 p_1, p_2, p_3 はフィッティングパラメーターである。この式で導出した信号電荷量を素電荷で割ると増幅率が計算で

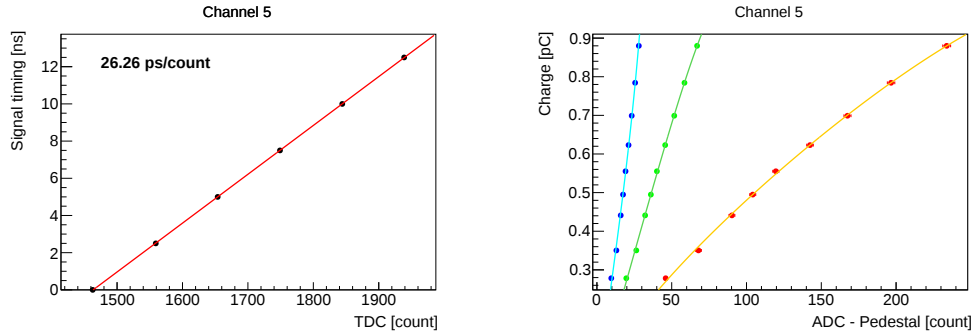


図 2.11: TDC 線形性の確認（左）と ADC のキャリブレーションを可変アンプの設定ごとに実施した結果（右）

きる。

$$Q = p_1 \cdot (\text{ADC} - \text{Pedestal})^{p_2} + p_3 \cdot (\text{ADC} - \text{Pedestal})^5 \quad (2.2)$$

直近の測定では製造元での測定結果と一致しない結果になることがたびたびあった。その原因を調査した結果、図 2.12 のように時間経過によって ADC の出力値が変化していることが判明した。これは読み出し回路に用いているアンプの出力特性が変化したからである。今までは昔の測定データから求めた変換式を使い続けたため、正しい信号電荷量が計算できていなかったことがわかった。そこで一定期間ごとのキャリブレーションデータに対してフィッティングをやり直し、測定時期に応じて関数を使い分けることにした。変換関数の違いによる増幅率の計算結果の変化を図 2.13 に示す。ヒストグラムが等幅ではないが、これは変換関数が曲線で与えられているためである。これは製造元で 2×10^6 の増幅率になるように設定された印加電圧を用いた測定結果であり、新しい変換関数を使用した計算が製造元での測定結果を再現していることが確認できた。

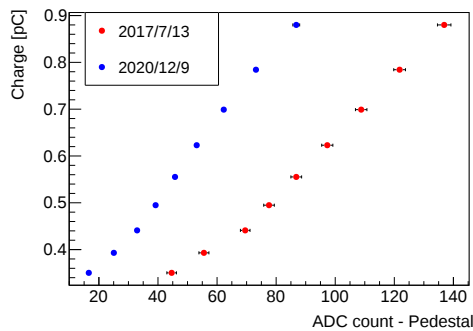


図 2.12: 測定時期の違いによる測定結果の変化の例

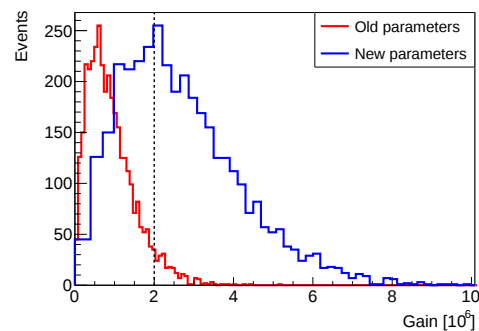


図 2.13: 同じ測定データに対して異なる変換関数を使用した際の計算結果

印加電圧と増幅率の関係は近似式 2.3 で表される。各 PMT ごとにフィッティングを行い、関数のパラメーターを記録した。このパラメーターは PMT を TOP カウンターで運

転する際に必要である。

$$\text{Gain} = \exp(\text{Slope} \cdot \text{HV} + \text{Const}) \quad (2.3)$$

ほとんどの量産品では製造元での測定結果を再現できたが、製造元での測定結果と異なる増幅率が計算された PMT が 2 本あった。これらの PMT について製造元での再測定をした結果こちらの測定が正しいことが確認され、基準電圧が修正された。修正された PMT の例を図 2.14 に示す。修正前後での増幅率の測定結果の他に、製造元から提示された基準電圧を「+」で表している。

また、標準電圧での増幅率をチャンネルごとに計算して増幅率の面分布を調べた。図 2.15 のように増幅率のばらつきが大きい PMT が 2 本見つかり、製造元に返品した。

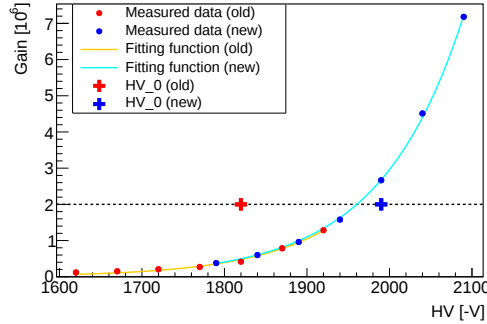


図 2.14: 基準電圧を修正した PMT の例

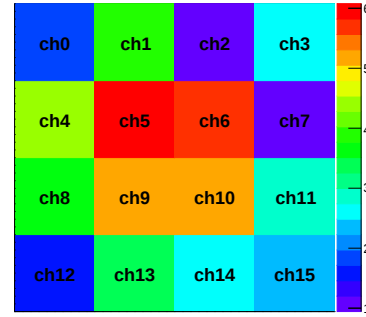


図 2.15: チャンネルごとの増幅率が大きくばらついている PMT の例

2.4.2 時間分解能

TDC での測定値のばらつきから時間分解能を計算した。この計算では Timewalk と呼ばれる効果を考慮する必要がある。アナログ波形から信号タイミングを取得する際、信号の電圧がある閾値以上に達した瞬間の時刻が記録される。このとき、図 2.16 のように元の信号の電荷量の違いから波形が閾値を超えるタイミングに差が生じる。この効果を Timewalk と呼んでいる。MCP-PMT の時間分解能を精密測定するためには Timewalk を補正して正しい信号タイミングを取得する必要がある。本研究では ADC と TDC の測定値の 2 次元分布から Timewalk 補正関数を導出し時間分解能の計算に使用した。Timewalk 補正関数は ADC のカウント値が小さい領域では

$$\text{TDC} = \frac{C_1}{\text{ADC} - \text{Pedestal}} + C_2 \quad (2.4)$$

の形で表される。 C_1 と C_2 は定数である。また、ADC のカウント値が大きい領域は ADC についての多項式関数で表される。Timewalk 補正の例を図 2.17 に示す。

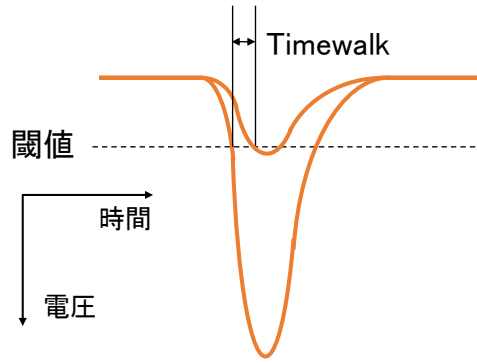


図 2.16: Timewalk のイメージ図

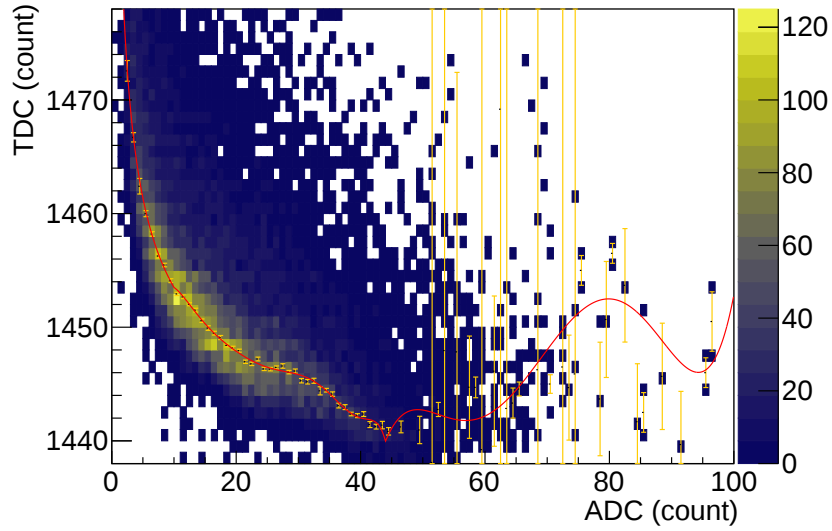


図 2.17: ADC-TDC 分布と Timewalk 補正関数の例

TDC 値から Timewalk 補正関数の値を差し引いた数値を信号の時間分布としてヒストグラムを作成し、式 2.5 のような 2 つのガウス関数の和の形でフィッティングした。

$$f_{\text{fit}}(t) = g_1(t) + g_2(t) \quad (2.5)$$

$$g_{(1,2)} = C_{(1,2)} \exp \left(-\frac{(t - \mu_{(1,2)})^2}{2\sigma_{(1,2)}^2} \right) \quad (2.6)$$

2 つめのガウス分布は光電子が MCP 上で反跳してから入射したことに由来する分布である。時間分解能は式 2.5 の σ_1 に相当するが、この値はレーザーや読み出し回路の時間不確かさを含んでいるためこれらの成分を差し引く必要がある。レーザーの時間不確かさはスペックシート上で 17 ps である。読み出し回路の時間不確かさはキャリブレーションデータを利用して計算した。テストパルスを 10 dB に減衰させて測定したデータの時間分布

を可変アンプの増幅率を変えるごとに計算し、読み出し回路の時間不確かさとした。しかし、一部の測定データでは接触不良等が原因で正しいキャリブレーションデータが得られず、読み出し回路の時間不確かさが計算できなくなっていた。また、測定ベンチの PMT ソケットを改良したが、この改良を境に正しいキャリブレーションデータが測定できなくなってしまった。改良を行った時点で TDC の線形性や ADC の分布が正常であることを確認したが、電荷量の小さい信号に対する TDC 分布は確認がされていなかった。そのため、読み出し回路の時間不確かさを計算するためのデータが正常に測れているかの確認が不十分なまま全数測定が進められてしまった。

本研究ではこの問題を解決するため、バックアップ用のデータシートを作成した。ソケットの改良を行う前のデータでは正しい測定ができたキャリブレーションデータを用いて読み出し回路の時間不確かさを計算しデータシートを作成した。ソケット改良後のデータに対しては信号電荷量の大きい測定データは正しく測定できていることを利用して、そのようなデータから読み出し回路の時間不確かさを計算した。この手法により、全ての測定データに対して時間分解能を計算することが可能になった。

図 2.18 に時間分解能の全数測定結果を示す。製造された全ての PMT は時間分解能に対する要求を満たすことが確認できた。

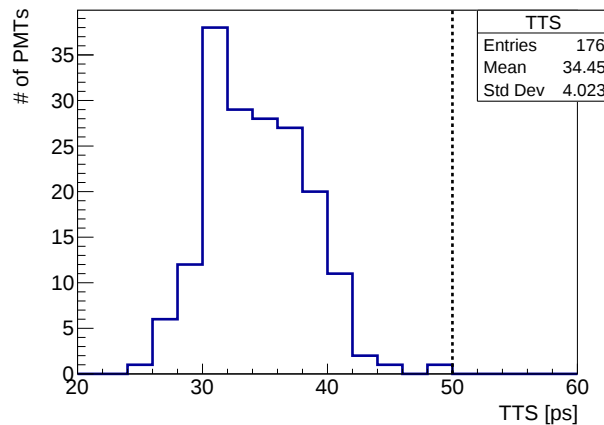


図 2.18: 時間分解能の全数測定結果。要求値 50 ps 以下を点線で表示した。

2.4.3 収集効率

MCP-PMT の信号数と参照用 PMT の信号数の比から収集効率を推定した。MCP-PMT の収集効率は式 2.7 で表される。ここで、収集効率を CE、信号数を N 、ビームスプリッターで取り出される光子数の割合を P で表し、MCP-PMT に関するパラメーターには「mcp」のラベルが、参照用 PMT に関するパラメーターには「ref」のラベルが書かれている。

$$CE_{\text{mcp}} = \frac{N_{\text{mcp}}}{N_{\text{ref}}} \cdot \frac{CE_{\text{ref}} QE_{\text{ref}} P_{\text{ref}}}{QE_{\text{mcp}} P_{\text{mcp}}} \quad (2.7)$$

ビームスプリッターで取り出される光子数の割合や参照用 PMT の性能を精度良く把握していないため、信号数の比を計算して収集効率が十分であるかの確認だけを行った。1 本

の PMT は QE 測定で十分高い QE を示していたにも関わらず収集効率が低かった。正常な PMT と比較した結果を図 2.19 に示す。この PMT は要求を満たさないとして製造元に返品した。

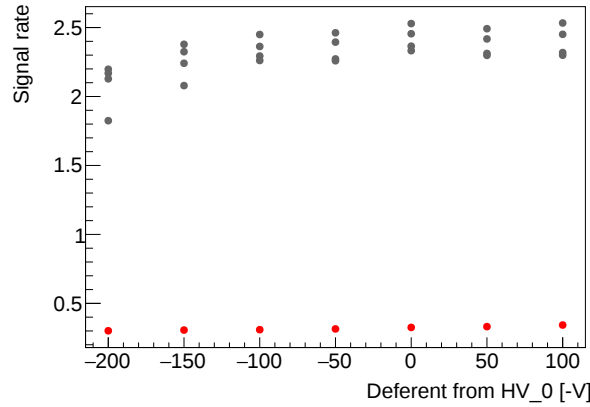


図 2.19: 収集効率の低い PMT と正常な PMT での比較

2.5 磁場特性の測定

TOP カウンターが受ける磁場を再現して MCP-PMT の性能評価を行い、磁場特性を測定した。電磁石は KEK 北カウンターホールにあるファンタスク電磁石を使用した。測定のセットアップを図 2.20 に示す。MCP-PMT を測定器に取り付け、電磁石内に挿入することで測定を行った。可動ステージが磁場中で使用できないため、磁場の影響を受けない場所に可動ステージを設置し、アームを伸ばして光の入射位置を移動させた。レーザー光量をモニターするために磁場中でも測定可能な MPPC を使用した。

磁場のない状態と磁場を印加した状態の 2 通りで測定を行い、キャリアレーションデータを用いて増幅率と時間分解能を計算した。時間分解能の計算では 2.4.2 節と同様に timewalk 補正を行った。ただし、全領域を式 2.4 で補正した。Timewalk 補正後に式 2.5 でフィッティングすることで時間分解能を求めた。また、こちらの測定では時間分解能を精密に測定する必要がないため、読み出し回路の不定性を差し引く計算をしていない。

図 2.21 に磁場の有無による性能変化を示す。前節までの測定結果を受けて返品により取り換えられた 4 本の PMT については磁場測定が未実施であるため、ヒストグラムに含まれていないことに注意されたい。本研究により、量産された PMT は磁場によって増幅率がおよそ 0.3 倍に変化することが分かった。この結果は先行研究と一致するものであり、今回の量産品の磁場特性が以前の量産品とほぼ同じであることが確認できた。また磁場の有無による増幅率の相対値は PMT ごとに記録され、TOP カウンターで運転する際の印加電圧を決定するために使用される。

時間分解能は磁場中でわずかに向上するという結果が得られた。

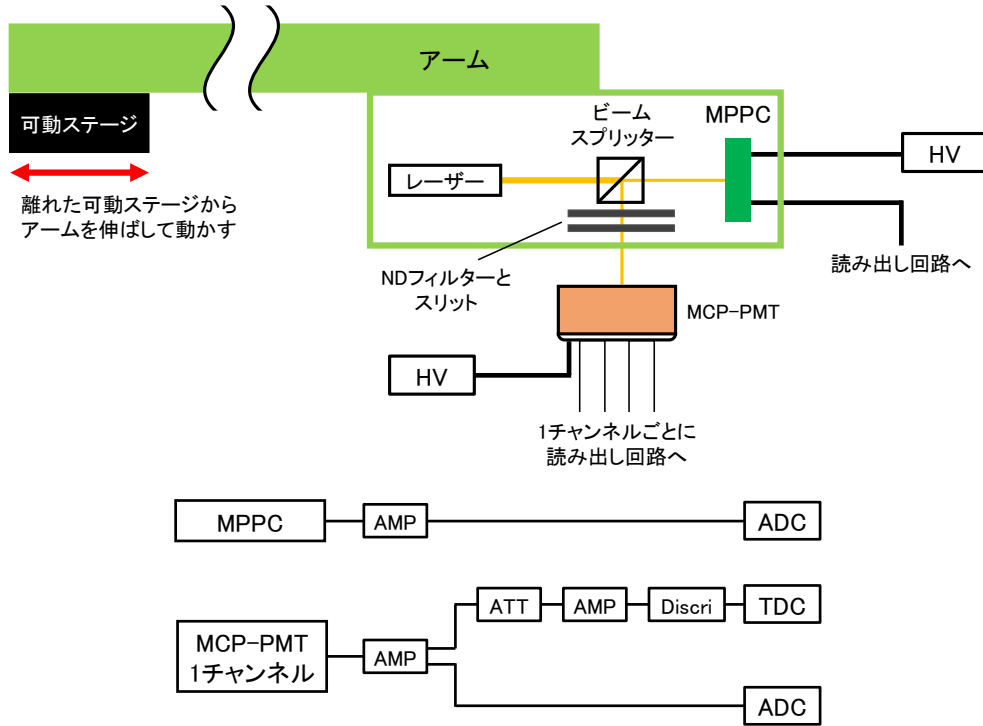


図 2.20: 磁場特性測定ベンチのセットアップ（上）と読み出しの回路図（下）

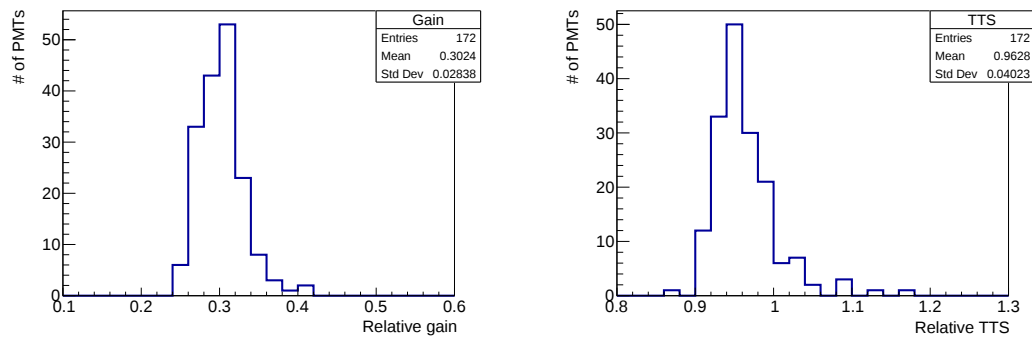


図 2.21: 磁場を印加したときの増幅率の相対値（左）と時間分解能の相対値（右）

2.6 性能評価結果のまとめ

2.6.1 取り換えの対象になった本数

以上の全数測定の結果を表 2.2 にまとめる。量産した 176 本の PMT のうち 4 本が要求を満たさず、製造元に返品し新しい量産品に取り換えた。また、前量産の予備として保管していた PMT のうち 2 本が QE 低下を理由に取り換えの対象になった。取り替えた PMT の性能評価は現在進行中である。

取り換え理由	取り換えた本数
放電	1 本
QE が要求未満に低下	2 本
増幅率のばらつきが大きい	2 本
収集効率が低い	1 本

表 2.2: 取り換えられた PMT の一覧

2.6.2 以前の量産品との性能の違い

今回新たに量産した PMT は、以前の量産品から製造方法の一部を変更している。この変更が PMT の性能に与える影響を調べるため、評価結果をシリーズごとに規格化したヒストグラムを作成しシリーズごとの性能の比較を行った。

QE

360 nm の光に対する QE で比較した結果を図 2.22 に示す。KT シリーズと比較して、MT・NT シリーズは QE が高い傾向にあることが分かる。また全てのシリーズで平均 QE が 30 % を超えており、以前の量産品での平均値 28.5 % を上回る結果である。これは、MCP-PMT の製造を重ねるうちに知見や技能が蓄積された結果高品質の光電面を安定して製造できるようになったからであると考えられる。一方、シリーズの中で最も高い QE は 35-36% であるという特徴はどのシリーズでも共通であった。これは、この種類の光電面で得られる最大の QE がこの値である可能性を示唆している。

印加電圧

基本特性の測定結果から求めた基準電圧 (2×10^6 の増幅率を得るために必要な印加電圧) の大きさを比較した。結果を図 2.23 に示す。KT シリーズよりも、MT・NT シリーズは低い印加電圧で十分な増幅率を得られることがわかった。これは、MCP の製造工程を変更したことが影響していると考えられる。MCP に施した ALD コーティングによって基準電圧が低くなったことが先行研究で示されている [5]。NT シリーズは ALD 層を厚くする改良が施されており、本研究で NT シリーズの基準電圧が低くなった原因は ALD 層に関係している可能性が考えられる。

時間分解能

時間分解能で比較した結果を図 2.24 に示す。どのシリーズでも同程度の時間分解能であり、製造方法の変化が時間分解能に影響を及ぼさないことが示された。

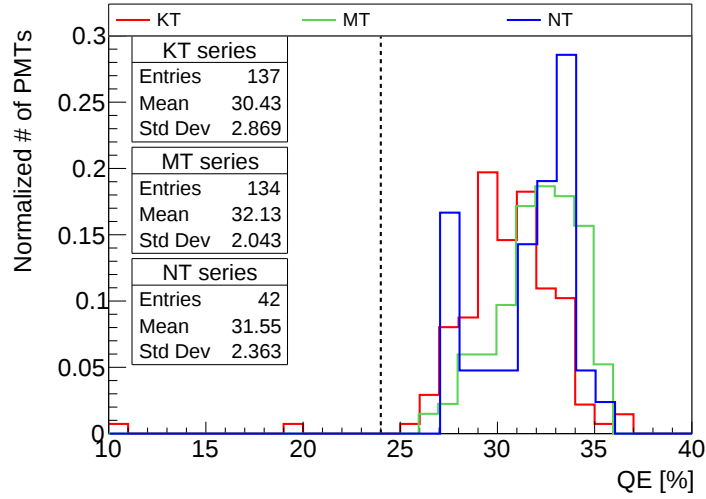


図 2.22: 各シリーズごとに集計した、360 nm の光に対する QE

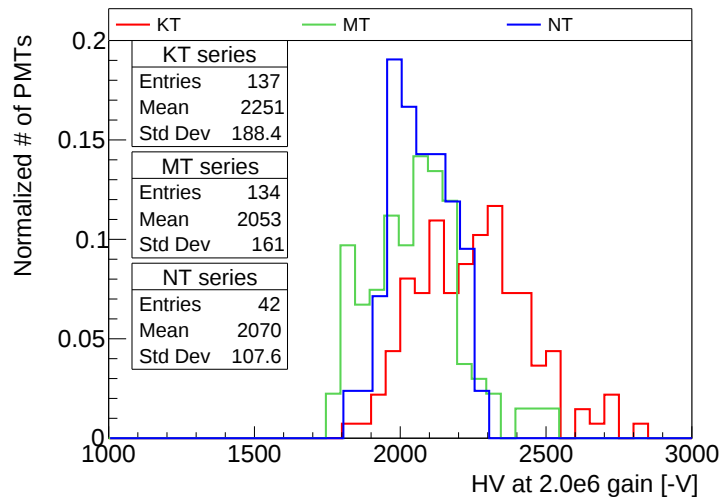


図 2.23: 各シリーズごとの標準電圧

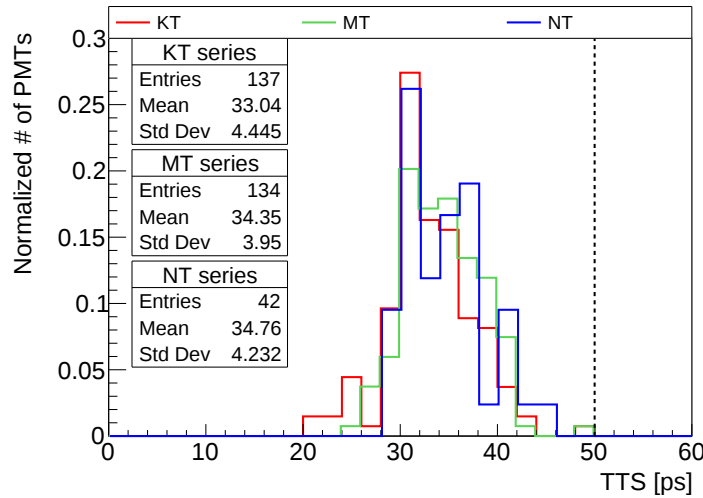


図 2.24: 各シリーズごとの時間分解能

2.6.3 TOP カウンターでの MCP-PMT の配置の決定

この節では MCP-PMT を TOP カウンターにインストールする際の配置について議論する。MCP-PMT の性能には個体差が存在するため、配置の仕方によっては TOP カウンター間の性能差や TOP カウンター内での性能の偏りが生じる場合がある。このような事態を避けるためには、PMT の性能をもとに配置を決定する必要がある。

また、NT シリーズの PMT は背景事象が多い環境下で増幅率が飽和することが知られている [7]。Belle II 実験で予想される背景事象数では増幅率の飽和は起こらないと考えられているが、今後の運転では背景事象が増加する可能性もある。そこで、NT シリーズの PMT を背景事象数が少ない場所に割り振るため、現在運転されている TOP カウンターでの背景事象数をもとに NT シリーズの配置を決定した。配置に対する要求は以下の通りである。

- A. 性能が比較的劣る PMT や性能が不安定な PMT の使用を避ける。
- B. NT シリーズの PMT を信号レートが高い TOP カウンターへ割り振らない。TOP カウンター全 7 スロットのうち 3 スロットは背景事象数が多いため、NT シリーズを配置しない。
- C. TOP カウンター間で QE と時間分解能を均一にする。
- D. PMT のシリーズや製造日をまばらに配置する。
- E. 1 台の TOP カウンターの中で QE や時間分解能の偏りがないようにする。

この要求を実現するために、本研究では以下のような手順で配置を決定した。

まず、TOP カウンターに使用する PMT を選定した。使用する本数 224 本に対して量産品の本数は 251 本であり、要求 A を満たさない PMT を候補から除外した。以下に除外した理由と本数を示す。

- 返品して取り替えられた PMT のうち性能評価が未完了のもの、6 本が該当。
- 取り扱い上の不注意で光電面に傷が付いた PMT、1 本が該当。
- 時間経過に伴う QE の変動 (2.3 節参照) がみられる PMT、16 本が該当。
- QE が比較的低い PMT。ピーク波長での QE が 27% を下回った 4 本が該当。

これらの理由により 計 27 本が除外され、TOP カウンターで使用する 224 本の PMT が決定した。

次に、MCP-PMT を 7 台の TOP カウンターに振り分けた。要求 B に従い、NT シリーズの PMT を背景事象が少ない 4 スロットに割り振った後で他の PMT を割り振った。このとき、製造日が近い PMT を別々の TOP カウンターへ割り振った。製造日が同じ PMT は互いに同程度の性能になることが多いため、これらを別々に割り振ることで要求 C を満たすような割り振りが可能になる。NT シリーズが割り振られなかったスロットへは優先的に製造日の近い MT シリーズの PMT を配置し、残りを全体で均等に割り振った。割り振りを行った後 QE が揃うように微調整を行った結果、図 2.25 のように TOP カウンター間の性能を均一にすることができた。最後に、TOP カウンター内での配置を決定した。乱数を利用することで要求 D・E を満たす配置を実現した。1 台の TOP カウンターでの QE 分布を図 2.26 に示す。

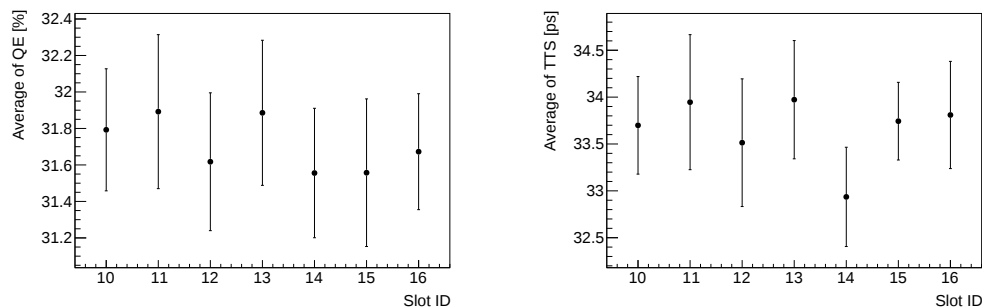


図 2.25: TOP カウンターごとの QE (左) と時間分解能 (右)

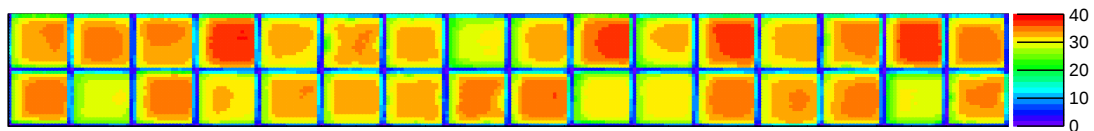


図 2.26: TOP カウンター 1 台中の QE 面分布

第3章 PMT モジュールの改良

3.1 改良案の現状と研究課題

3.1.1 先行研究で示された改良案

TOP カウンターの磁場動作試験を行った際に PMT モジュール中の MCP-PMT が回転し波長カットフィルターとの接着がはがれてしまう問題が発覚した。この問題により PMT の検出可能光子数が数% 低下すると予想されたが、致命的な問題とはみなされず対策を施さずに運転されてきた。しかし、PMT 交換の機会を利用してこの問題を解決することを考え、実用的な対策についての研究が行われた。先行研究の結果、図 3.1 のように PMT と読み出し基板の間に空いている隙間にシリコンシムを挿入することで PMT の回転を止められることが判明した [4]。本章ではシリコンシムによる PMT の回転を防ぐ手法を「シム方式」と呼称し、シム方式を取り入れた PMT モジュールの改良について議論する。

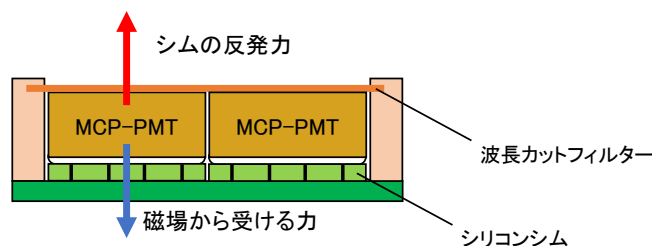


図 3.1: シム方式のイメージ図

3.1.2 シム方式の課題点

シム方式を実現するためには課題点が存在する。それは、PMT の厚さに個体差が存在することである。PMT のシリコンポッティングは手作業で塗られており、PMT ごとの個体差が大きいことが知られている。PMT の厚さが異なるとモジュールを組んだ時の隙間の大きさも異なるため、回転を防ぐために適切なシムの厚さは PMT ごとに異なる。隙間の大きさに対してシムが薄すぎる場合は PMT の回転を止めることができず、反対にシムが厚すぎる場合は PMT やモジュールに過大な負荷がかかり故障の原因になりうる。そのため、個々の PMT に対して最適な厚さのシムを選択する手段の確立が必要である。

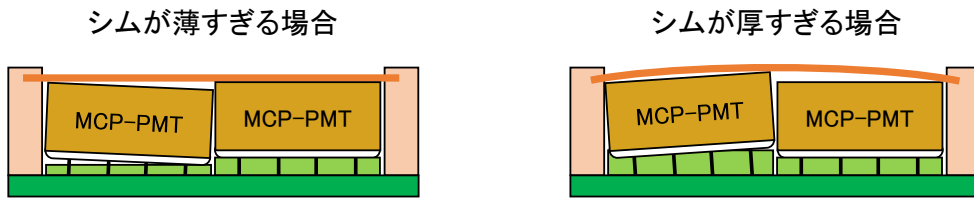


図 3.2: シムの厚さが適切でない場合のイメージ図

3.1.3 PMT モジュール改良の計画と本研究の研究内容

2022 年に予定されている PMT の交換では、224 本の PMT を 56 組のモジュールに組み上げてから TOP カウンターにインストールする。このとき組み上げるモジュールは、シム方式を導入した改良型モジュールとする計画である。計画では、2022 年春までに全てのモジュールが組み上げられる予定である。モジュールにシム方式を導入することを考えてあらかじめ硬さ 30° のシリコンシムを調達した。PMT ごとにシムの厚さを変えるため、数種類の厚さのシムを用意しそれらを組み合わせる手法を採用することが決まっていた。本研究では PMT ごとに適切な組み合わせを決定する手法を開発した。

まずサンプルの PMT を用いてシム方式で挿入するシムの厚さを決定した。この成果について 3.2 節で議論する。PMT の厚さを測定できる装置を作成し、PMT のポッティングがどの程度の厚さであるかを調べた。また、シムや PMT を押し潰したときの反発力を測定し、改良型モジュールを組み上げたときに PMT にかかる負荷の大きさを計算できるようにした。さらに、シム方式を取り入れたテストモジュールを作成し、磁場中での振る舞いを確認した。

次に、サンプル PMT での結果を用いて改良型モジュールに挿入するシムの厚さを決定した。この成果について 3.3 節で議論する。サンプル PMT での測定結果から、PMT の厚さを用いて挿入するシムの厚さを導出する手法を確立した。さらに、量産された PMT 全数で厚さ測定を実施し、全ての PMT に対して挿入するシムの厚さを決定した。また、シム方式の導入に伴いモジュールの製作手順を変更した。

3.2 最適なシリコンシムの厚さの決定

3.2.1 PMT の厚さ測定

モジュール内に存在する隙間の大きさを知るためには、PMT の厚さを精度良く測定する必要がある。PMT の厚さはシリコンポッティングの厚さに依存しているため、ポッティングの厚さや凹凸を精度良く測定することが重要である。ポッティングは柔らかい材質が使用されていることやポッティングの周囲に伸びているピンを曲げたり傷つけてはいけないことを考慮して、レーザー変位計を用いた測定する設計にした。またポッティングの面分布を測定するため、可動ステージを用いてレーザー変位計を動かしながら測定できる構造にした。

この設計の下で製作した測定ベンチが図 3.3 である。光学台に X 軸用可動ステージ（シグマ光機 SGSP26-100(X)）を設置し、その上に Y 軸用可動ステージ（シグマ光機 SGSP20-

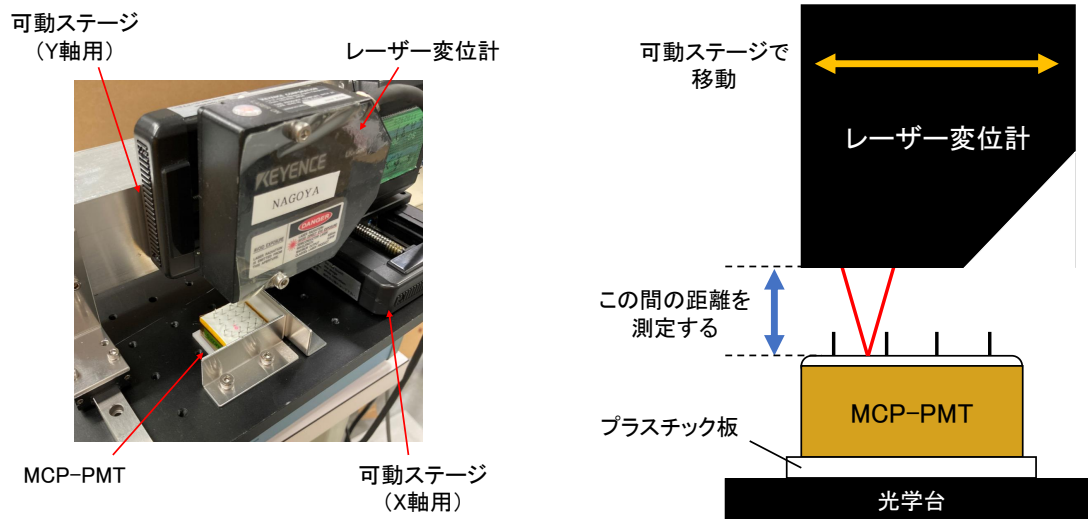


図 3.3: PMT の厚さの測定ベンチ、写真（左）と測定手法のイメージ図（右）

35(X)) を光学台に垂直な向きに取り付け、レーザー変位計（キーエンス LK-G30）を固定した。測定中に Y 軸用可動ステージが揺れることを防ぐため、Y 軸用可動ステージの一端をガイドレールで支えた。MCP-PMT を毎回同じ場所に設置できるよう、壁の役割を果たす L 字金具を光学台に固定した。MCP-PMT の入射窓が傷つかないように、MCP-PMT と光学台の間にプラスチック製の板を挟んで設置した。測定器のキャリブレーションには高さ 15 mm のゲージブロックを使用した。15 mm の高さを基準にして本測定の結果を高さに変換した。

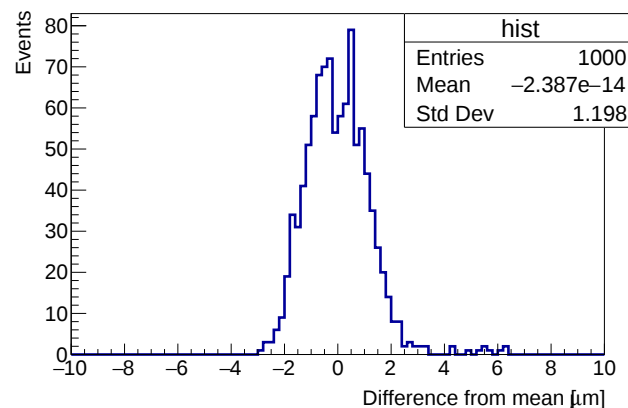


図 3.4: 測定データの平均からのずれの大きさ

測定ベンチの設置が完了して最初に測定精度の検証を行った。10 × 10 点で高さ 15 mm のゲージブロックを 10 回測定し、各点ごとに測定値の平均からのずれを計算した。検証の結果を図 3.4 に示す。測定値の標準偏差は 1.2 μm であり、この値を測定精度と解釈した。

この測定ベンチを用いて PMT の厚さを測定した例が図 3.5 である。色が白い部分はレーザー変位計による測定がうまくいかなかった部分である。レーザーが PMT のピンに当たってしまいポッティングの厚さを測れなかったと推測される。複数の PMT の厚さを測定した結果、図 3.6 のようにポッティングの一部が厚くなっている PMT があった。以降の議論ではこのような部分をポッティングの「山」と表現する。これは PMT の製造時に切り落としたピンからの放電を防ぐためにポッティングを厚く塗布した部分であり、山の位置はどの PMT でもおおむね共通である。

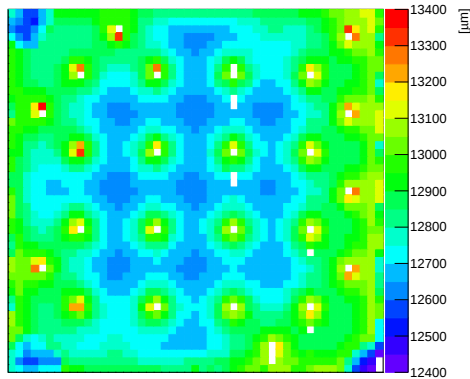


図 3.5: PMT の厚さ面分布の例

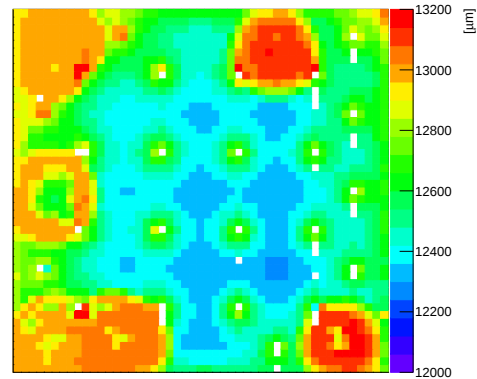


図 3.6: 山を持つ PMT の例

3.2.2 シムの厚さ測定

改良型モジュールを製作するために大きさの異なるシムが用意されている。シム（大）は縦横 55 ± 1.2 mm の大きさで、モジュール全体の間隙を埋めることができる。シム（小）は縦横 27 ± 0.8 mm の大きさで、PMT ごとに微調整するためのものである。寸法や製造誤差を製造元に問い合わせたところ、厚さの製造誤差については回答を得られなかった。そのためシムの厚さを精密に測定し、正確な寸法や製造誤差を検証する必要がある。

前章で製作した厚さ測定装置を用いてシムの厚さを測定した。シムの上にプラ板とアルミブロックを重ねて光学台に設置し、高さを測定した。シムが無い状態でも高さを測定し、両者の差分をシムの厚さとして記録した。まず試験用のサンプルとして使用するシム（大）の厚さを測定した。厚さ 1.4 mm のシムを 2 枚測定し、結果はそれぞれ 1.34 mm と 1.33 mm だった。続いて、実際のモジュールに使用するシムの厚さを測定した。同じサイズのシムを一部抽出し、平均的な厚さとばらつきの大きさを調べた。表 3.1 にそれぞれのシムの厚さを記載する。

	測定枚数	設計値	平均厚さ	標準偏差
シム (大)	10	1.8	1.72	0.01
	10	1.4	1.37	0.01
シム (小)	20	0.2	0.20	0.01
	10	0.15	0.14	0.005
	10	0.1	0.10	0.015

表 3.1: シムの厚さ、長さの単位は全て mm

3.2.3 シムの厚さと PMT にかかる負荷の大きさの関係

シムとポッティングが圧縮されたときに発生する反発力の大きさを調べるため、PMT とシムの圧縮試験を実施した。図 3.7 のようなセットアップを組み、テスト用の読み出し基盤にシムと PMT を取り付け万能試験機で圧縮した。この時の圧縮による変位量と反発力の大きさを記録した。圧縮試験により PMT が壊れてしまうリスクを考慮して、TOP カウンターに使用されない PMT を使用した。ダミー PMT を 4 本、寿命測定に使用された PMT を 10 本選び、この試験に使用した。

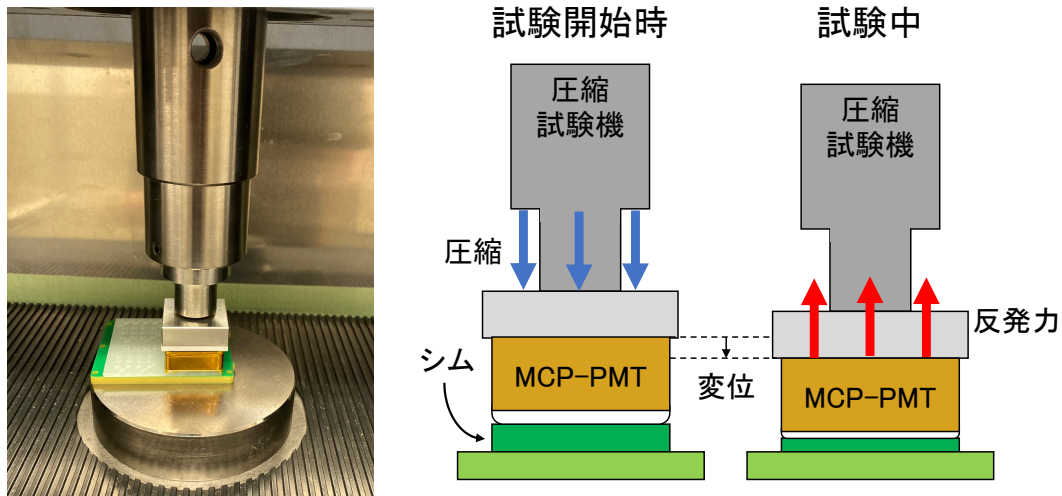


図 3.7: 圧縮試験の実際の様子 (左) と測定手法のイメージ図 (右)

PMT を用いた測定の後で、PMT とシムを設置しない状態での測定を行った。試験機の降下開始地点を 14.0 mm 下げた状態で試験を行い、試験機が試料に接触する変位量を調べた。図 3.8 のように直線でフィッティングを行い、負荷の大きさが 0 になる切片を接触した瞬間の変位量としてみなした。この値を h_0 として、本測定で試験機と PMT が接触した瞬間の変位量 d_0 と PMT とシムが押しつぶされた量 d を計算した。 d は測定された変位量を x 、PMT とシムの厚さをそれぞれ T_{PMT} 、 T_{shim} として、

$$d_0 = h_0 + 14.0 \text{ mm} - T_{\text{PMT}} - T_{\text{shim}} \quad (3.1)$$

$$d = x - d_0 \quad (3.2)$$

と表せる。厚さの異なるシムを用いて同じ PMT で圧縮試験を行った結果を図 3.9 に示す。この PMT はポッティングの山がある PMT で、厚さ測定で得た平均値よりも高い位置で試験器が接触する。そのため変位量が負の値である地点から負荷がかかり始めている。また、2 つのグラフは横軸方向に若干のずれが見られるがおおよそ一致している。横軸方向にグラフがずれている原因は、シムの厚さに製造誤差があるためと推測される。

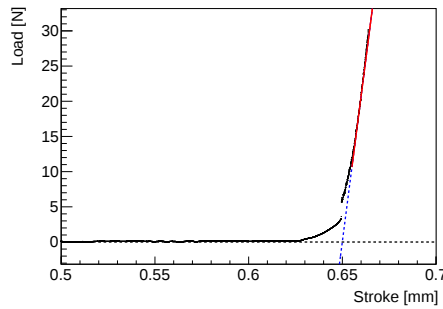


図 3.8: 試験機と試料が接触した高さの測定結果

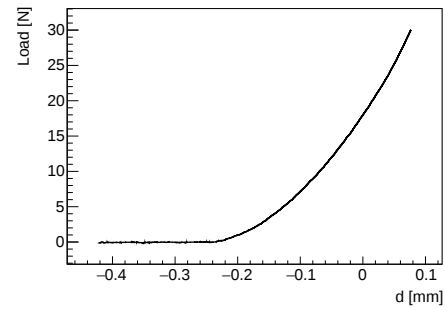


図 3.9: PMT とシムが押しつぶされた量の測定結果

次に、圧縮試験でかけた負荷を PMT モジュール内で再現する。PMT モジュールは波長カットフィルターから読み出し基盤までの距離は 14.3 mm に設計されている。PMT とシムの合計の厚さがこの値を超過している場合、モジュールを組み立てた際にシムが押しつぶされ負荷がかかる。圧縮試験の結果から押しつぶされた量と負荷の大きさの関係はシムの厚さによらないことが分かったので、挿入するシムの厚さを調節することで任意の大きさの負荷を実現することができる。モジュール内で PMT とシムが押しつぶされる量 d_m とその時の負荷の大きさ F は、圧縮試験で得た変位量と負荷の大きさの関係を関数 $G(d)$ とおいて、

$$d_m = T_{\text{PMT}} + T_{\text{shim}} - 14.3 \quad (3.3)$$

$$F = G(d_m) \quad (3.4)$$

と表せる。この式と図 3.9 を利用してシムの厚さとモジュール内での負荷の大きさの関係を計算した結果を図??に示す。このとき、図 3.9 の 1.4 mm のシムを使用した測定結果を用いて計算した。また、実際に用意できるシムの厚さでの結果を赤色の点で表示した。

3.2.4 テストモジュールを用いたシムの厚さの決定と実用性の検証

シム方式をモジュールに適用するためには、モジュールを構成するパーツがシム方式で生じる負荷に耐えられることを確認する必要がある。PMT には最大で 30 N の負荷をかけることを想定しているが、PMT が長期間の負荷に耐え続けられるか確認しなければならない。一方、PEEK パーツや波長カットフィルターなどモジュール全体を支えるパーツにかかる負荷の大きさは、PMT4 本の負荷を合計した大きさになる。4 本の PMT にそれぞ

3.3. PMT 全数に対してシリコンシムの厚さを決定する手法の確立

れ 30 N の反発力を与えるとパーツには合計で 120 N の負荷がかかるが、パーツがこの負荷に耐えられるのか確認しなければならない。

そこで本研究ではテストモジュールを用いた検証を行った。実機用と同じ部品を用いてテストモジュールを作成した。PMT は圧縮試験に使用したものを使用して、PMT に 10 N あるいは 30 N の負荷を掛けるようにシムの厚さを選択した。モジュールの組み立ては問題なく成功し、パーツの破損や歪みはなかった。また、PMT に故障がないことを確かめるために、検証の前後に QE 測定を行った。10 N の負荷をかけたモジュールを約 18 日間、30 N の負荷をかけたモジュールを約 13 日間放置したが、QE 測定の結果に異常は見られなかったため、PMT は 30 N の負荷に十分耐えられると判断した。

次に、テストモジュールに磁場を印加してシム方式の有効性を確認した。KEK ファンタスク電磁石の中央にテストモジュール 2 台を図 3.10 のように設置し、1.5 T の磁場を印加した。およそ 20 分から 30 分の周期で電磁石の電源を切り替えることで、磁場の変化に伴う力を再現した。4 日間試験を行い、試験時間は合計で 16 時間だった。テストモジュールではシムによる負荷の大きさをそれぞれ 20 N と 30 N に設定した。これらのモジュールを試験した結果が図 3.11 であり、PMT の接着は剥がれなかった。この結果をもって、シム方式で PMT に 20 N 以上の負荷を与えることで磁場による回転を防ぐことができると結論づけた。

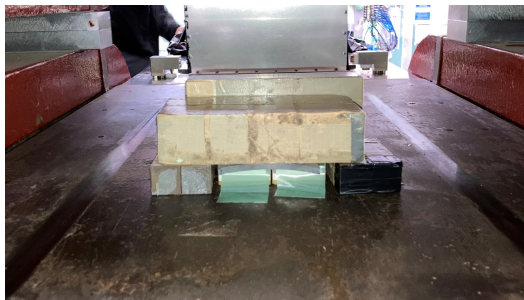


図 3.10: テストモジュールが画像中央の養生テープで固定されている様子。

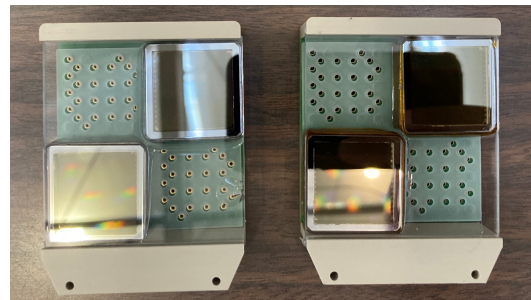


図 3.11: 試験終了時点でのテストモジュールの様子

3.3 PMT 全数に対してシリコンシムの厚さを決定する手法の確立

シム方式をモジュールに採用するためには PMT 全数に対して適切な厚さを把握する必要がある。前節では個々の PMT に対して圧縮試験を行い最適なシムの厚さを調べたが、この手順を PMT 全数に適用することは困難である。なぜなら、圧縮試験による PMT の損傷のリスクがあるからである。また圧縮試験機は大学共用の機材であり、数百本の PMT を圧縮試験にかける時間を確保することが難しいという問題点もある。そこで、圧縮試験を行わずに最適なシムの厚さを求める手法を開発する必要がある。

3.3.1 PMT の厚さとシムの厚さの相関関係

前節の結果から、PMT に 20 N 以上の負荷を与えることで磁場中での回転を防げることが分かった。サンプル PMT の圧縮試験結果から各 PMT に 20 N 以上 30 N 以下の負荷を与えときのシムの厚さを導出し、PMT 自身の厚さとの相関関係を調べた。PMT が山を持っているとポッティングの設置面積が少なくなり、山を持たない PMT とは負荷のかかり方が異なると考えられるため、相関関係を別々の直線で表現した。結果を図 3.12 に示す。

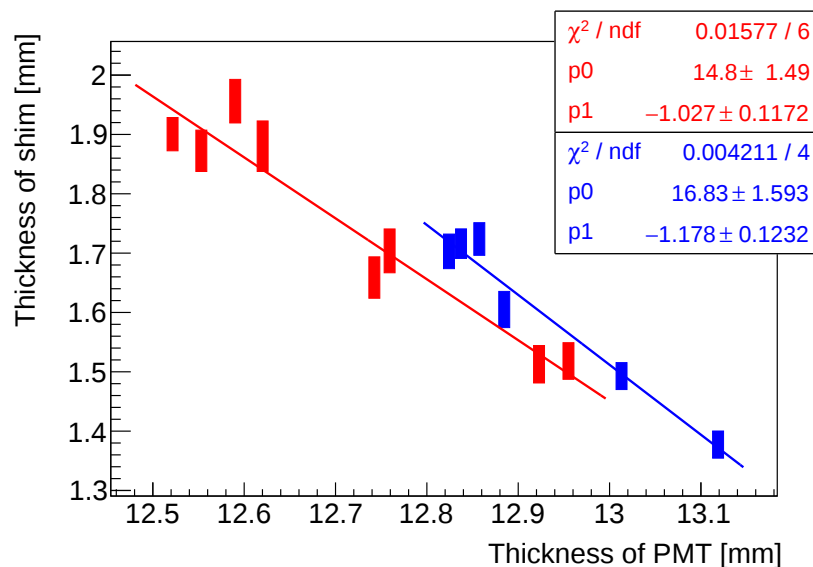


図 3.12: PMT の厚さとシムの厚さの関係。赤色が山を持つ PMT についての結果で、青色が山を持たない PMT についての結果である。

3.3.2 量産された PMT 全数に対する厚さの自動測定

前節の結果を利用してシムの厚さを決定するために、量産品全数で厚さを測定する必要がある。そこで、3.2.1 節で製作した厚さ測定ベンチを改良し、大量の PMT を短期間に測定できるようにした。まず、一度に 2 本の PMT を測定できるように PMT の設置場所を増設し、1 本の PMT に対する測定点を 32×32 点に設定した。さらに測定手順をマニュアル化し、シフト制での測定を可能にした。TOP カウンターへ使用する候補であった量産品 230 本の全数測定を行い、21 日間で完了した。また、測定結果を解析して PMT ごとの厚さを計算した。山がある PMT に対しては図 3.13 斜線部での平均厚さ、山がない PMT に対しては面全体の平均厚さを計算した。図 3.14 に全数測定結果を示す。

さらに、測定結果を用いてモジュールに挿入するシムの組み合わせを決定した。まず使用するシム（大）を選出した。同じモジュールに搭載される 4 本の PMT に対して最適なシムの厚さを図 3.12 から導出し、全ての計算結果が 1.72 mm 以上である場合は 1.8t のシ

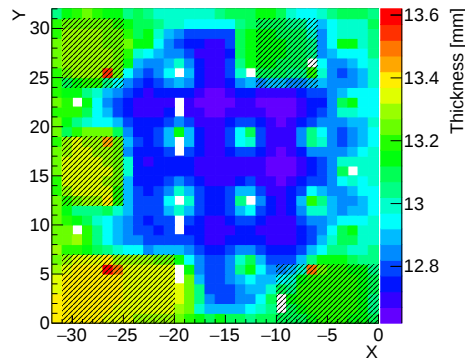


図 3.13: 測定結果の例

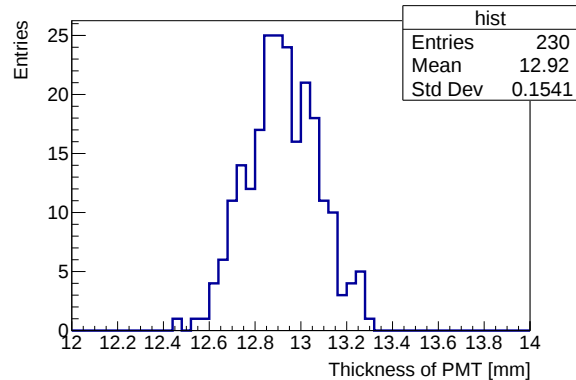


図 3.14: 厚さの全数測定結果

ムを、そうでない場合は 1.4t のシムを選択した。その後、各 PMT に対してシム（小）の最適な組み合わせを決定した。

3.4 改良型モジュール組み立て手順の確立

改良型モジュールにシム方式を導入するためには、組み立て手順を従来の手順 [8] から変更する必要がある。まず、PMT を読み出し基盤に取り付ける直前に、シムを挿入する手順を追加した。また、以前の手順では PMT の四隅と読み出し基盤をシリコン接着剤で接着していたが、改良型モジュールでは接着が不要であるためこの手順を削除した。この変更に伴い、読み出し基盤を一度取り外す手順やシリコン接着剤の硬化を待つ手順が不要になった。以上の点を踏まえて、改良型モジュールの組み立て手順を以下のように定めた。

1. MCP-PMT を真空チャックに設置する。
2. 各 MCP-PMT に使用するシムの組み合わせを確認し、PMT にシム（小）、シム（大）の順で重ねる。
3. 真空を引いて PMT を吸引しながら、読み出し基盤を取り付ける。
4. 固定された PMT を真空チャックから取り外し、PMT の入射窓の中央にシリコンゴムを滴下する。材質は TSE3032 を 100:10 の比で混合したものを使用する。
5. PMT に波長カットフィルターを接着し、PEEK パーツをねじで取り付ける。シリコンゴムの硬化のため約 20 時間放置して完成である。

この手順が従来の手順よりも優れている点を考える。まず、シリコン接着剤が硬化するまで放置する手順がなくなったことで、モジュール組み立てに必要な時間が短くなった。また、波長カットフィルターを接着する際に PEEK パーツを取り付けるが、シム方式の導入によって PMT が波長カットフィルターに押し付けられるようになった。そのため、少量のシリコンゴムでも薄く延ばされて PMT 全体を覆うことができるようになった。以

前の手順ではシリコンゴムを綿棒などで延ばしていたが新しい手順ではその必要がなくなり、気泡が残らないように接着することが容易になった。

一方で、新しい手順の問題点として、シムを正しく挿入する事が面倒な作業であることが挙げられる。PMT ごとに挿入すべきシムの厚さが異なる上に 3 種類のシム（小）は見間違いやすいため、正しいシムが挿入されているか注意深く確認することが求められる。また、シリコンシムは静電気の影響を受けやすく滑りにくい材質であるため、2 枚以上のシム（小）をきれいに重ねる作業は高い集中力を必要とする。

第4章 結論

Belle II 実験 TOP カウンターはチェレンコフ光を利用した粒子識別装置である。光検出器に MCP-PMT が採用され、512 本が搭載された。MCP-PMT は高い時間分解能を持つ一方、積算出力電荷によって QE が低下するという特徴を持つ。224 本の初期量産型 PMT は光電面寿命が短く 2022 年に QE が低下すると予測されているため、2022 年のシャットダウン期間中に寿命改善 ALD 型への交換が予定されている。この計画の準備として、本研究では量産品の性能評価と PMT モジュールの改良を行った。

量産品の性能評価

224 本の PMT を交換するため、前量産時の予備 75 本に加え新たに 176 本を量産した。新たに量産された PMT がは求性された性能を満たしている必要がある。また、QE や時間分解能は TOP カウンターの粒子識別性能を大きく左右するため、各 PMT の個体差を精密測定することが重要である。本研究では量産品の全数で性能評価を実施した。

QE 測定では新しく量産された PMT の全てが要求を満たしていた。しかし、光電面の性能劣化の有無を調べるため期間を空けて再測定したところ、一部の PMT で時間経過による QE 低下が発生していた。QE 低下のない PMT との比較を行い測定データの正しさが確認され、また QE 低下は PMT の製造バッチに依存しないことが分かった。製造元と協議した結果これらの PMT は不良品ではないとの見解を得たが、TOP カウンターへの使用を避けることを決めた。また、予備として保管されていた PMT の QE を再測定したところ、2 本の PMT が要求性能を満たさず製造元に返品した。

基本特性の測定ではアンプの出力特性の変化などにより性能評価が正しく行えていないことが分かった。そこで、キャリブレーションデータの解析手法を改善することで精密な性能評価を実現した。増幅率の測定では ADC 出力値を信号電荷量に換算する。測定時期ごとに個別の変換関数を導出することで全ての測定データに対して正しい増幅率を導出できるようにした。また、時間分解能の測定では読み出し回路の時間不確かさの計算が正しく行われない問題が発覚した。そこで正常なデータを用いた時間不確かさの計算手法を開発し、全てのデータで正しい時間分解能を導出できた。

全ての性能評価結果をまとめて要求通りの性能を満たしているか確認したところ、合計 6 本の PMT が何らかの要求を満たさず返品の対象となった。また、シリーズごとに PMT の性能を比較した結果、QE や増幅率がシリーズごとに異なることが分かった。また、時間分解能は製造手法にかかわらず一定であることも確認できた。

量産した PMT は 7 台の TOP カウンターで使用される。TOP カウンターの性能を可能な限り高めるため、性能の全数測定で得たデータをもとに使用する PMT を選定した。また個々の TOP カウンターの性能を均一にするように PMT の割り振りをを行い、全ての TOP カウンターに対して PMT の配置を決定した。

PMT モジュールの改良

一部の MCP-PMT は運転中に磁場による力によって PMT モジュール内では PMT が回転し、検出光子数の低下を招いている。この問題への対策として先行研究ではモジュール内の PMT と読み出し基盤の間にシリコンシムを挿入する「シム方式」が提案され、その有効性が示された。しかしシム方式を全ての PMT に適用するためには、個体差がある PMT の厚さに合わせて適切な厚さのシムを選択しなければならない。本研究では PMT ごとに最適なシムを選択する手法を確立し、改良型モジュールの作成を可能にした。

まずサンプル PMT を用いて、シム方式に適したシムの厚さを検証した。PMT の厚さを測定するためにレーザー変位計を用いた測定ベンチを製作した。性能評価の結果、測定精度は $1.2\ \mu\text{m}$ であった。サンプル PMT でポッティングの厚さを精密測定することに成功し、ポッティングに「山」の構造を持つ PMT があることが分かった。また、製造されたシムの中から数枚のサンプルを抽出して厚さを測定し、平均的な厚さを測定することができた。さらに、サンプル PMT を用いて圧縮試験を行い、PMT やシムが押しつぶされた変位量に対する反発力の大きさを測定した。これらの結果から、モジュール内にシムを挿入した際の負荷の大きさを導出した。シム方式を導入したテストモジュールを作成し、モジュールが 30 N の負荷に耐えられることや 20 N の負荷があれば磁場中での PMT の回転を防ぐことができることを確認した。

次に、サンプル PMT での検証結果を用いて改良型モジュールに挿入するシムの厚さを決定した。サンプル PMT で得た PMT の厚さとシムの厚さの関係を直線で近似した。さらに、量産された PMT に対して厚さの全数測定を実施し、個々の PMT に対して最適なシムの厚さを導出する手法を確立した。最後に従来のモジュール作成手順を変更し、改良型モジュールを組み上げる手順を確立した。

以上の研究成果により、交換に用いられる MCP-PMT が高性能であることを保証し、TOP カウンターの性能を最大限に高めるように配置を最適化することができた。また、PMT モジュールが抱えていた問題を解決した改良型モジュールの製作手法を開発し、TOP カウンターが安定して高性能を発揮することに貢献した。

参考文献

- [1] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), The Review of Particle Physics (2021)
- [2] T. Abe et al. Belle II Technical Design Report. 11 2010.
- [3] https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii/
- [4] 大森雷太 修士論文, “Belle II 実験 TOP カウンター実機のインストールと磁場中試験での機械的特性の研究” (2018)
- [5] 米倉拓弥 修士論文, “Belle II 実験 TOP カウンター実機用 MCP-PMT の性能評価” (2015)
- [6] 武市秀樹 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” (2012)
- [7] 大久保亮吾 修士論文, “素粒子実験の大規模化・高度化を推進する高時間分解能光検出器の開発” (2021)
- [8] 古村大樹 修士論文, “Belle II TOP カウンター量産のための PMT アセンブリ手法の確立” (2015)

謝辞

本研究を進めるにあたり、大勢の方々に支えられてきました。指導教員の居波賢二准教授をはじめN研の飯嶋徹教授やスタッフの方々からは、アドバイスをいただいたり研究を円滑に進められるよう手助けをしていただけました。また、N研 Belle II グループの学生からもアドバイスをいただくことができただけでなく、PMTの全数測定のスフトワークなど測定の手伝いをしてくれました。心から感謝申し上げます。

そのほか、N研外の方々からもご助力いただきました。松岡広大准教授はN研スタッフとしてご助力いただいただけでなく、KEKに異動されてからも多くのアドバイスをいただきました。また、KEKでの電磁石を用いた試験では、Belle II TOP グループに所属している他大学のスタッフにもご協力いただきました。心から感謝申し上げます。