

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

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 261301527

古村大樹

2015.1.19 提出

概要

Belle II 実験では、 B 中間子稀崩壊の精密測定により、標準模型を超えた新物理の探索を行う。我々は Belle II 検出器で K/π 識別を担う TOP カウンターを開発し、識別効率 95 % 以上、誤識別率 5 % 以下の識別性能を目指している。TOP カウンターは、石英輻射体と光検出器 MCP-PMT からなる新型リングイメージ型チェレンコフ検出器であり、上記の識別性能を満たすには、発生したチェレンコフ光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達することが要求される。各光学素子の性能評価、石英輻射体の接着手法開発などの先行研究が進められてきた中で、MCP-PMT のアライメントと石英輻射体との光学接着を含めた PMT アセンブリ手法の確立が課題として残されていた。TOP カウンターでは、MCP-PMT の寿命の問題から実験期間中に PMT の交換が必要になるため、PMT を着脱可能な方法で光学接着する必要がある。且つ、接着面に気泡が入ると、全反射により到達光子数が減少するため、気泡を残さない光学接着が要求される。試作機で行った光学グリスによる接着では、接着面の気泡が問題となり、これを解決しなければ実機量産を開始できなかった。

そこで本研究では、シリコンゴムを使用し、PMT を石英に対して約 1.5 kgf/PMT 以下の構造上安全な力で押し付けることで光学接着することを目指した。シリコンゴムが Belle II 実験の環境下で使用可能かを調べるために、ガンマ線照射試験を行い、10 年の実験期間で予想される照射量 100 Gy に対して、十分な耐性を持つことを確かめた。このシリコンゴムに対して万能試験機による圧縮試験を行い、目標値である約 1.5 kgf/PMT 以下の力で接着面に気泡を残さずに接着するための硬度と形状を決定した。また、PMT のアライメントを保ったまま石英に押し付けるためのモジュールの製作手法も確立し、小型の模型及びほぼ実機仕様の試作機での接着試験で、いずれも気泡を残さずに接着できることを目視で確かめた。実機一号機の製作では、開発した手法で実際に PMT の取り付け及び取り外しが可能であることを実証した。実機では目視による確認ができないため、CCD カメラを用いて接着面に気泡が残らないことを確認した。

本研究により、実機量産において課題であった PMT アセンブリ手法を確立した。試作機製作時に大きな問題であった気泡の問題を解決し、実機量産を可能にした。この手法の確立により、PMT に到達する光子の割合が 80 % 以上という要求を十分に満たす光学接着が可能になった。

目次

第 1 章 Belle II TOP カウンター	6
1.1 Belle II 実験と TOP カウンター	6
1.1.1 Belle II 実験	6
1.1.2 Belle II 実験における K/π 識別	6
1.2 TOP カウンターの原理と識別性能	8
1.2.1 TOP カウンターの識別原理	8
1.2.2 TOP カウンターの識別性能	10
1.3 TOP カウンターの構造	11
1.3.1 石英輻射体	11
1.3.2 MCP-PMT	12
1.3.3 QBB	13
1.4 開発状況と研究課題	15
第 2 章 PMT アセンブリ手法の確立	18
2.1 シリコンゴムを使った光学接着	18
2.2 オプティカルクッキーの開発	19
2.2.1 オプティカルクッキーの製作	19
2.2.2 ガンマ線耐性試験	22
2.2.3 圧縮試験	28
2.2.4 モックアップによる接着試験	36
2.3 PMT モジュールの製作	38
2.3.1 PMT モジュールのデザイン	38
2.3.2 製作手法の確立	41
2.3.3 PMT モジュールの分解	43
2.3.4 PMT モジュールの磁場テスト	46
第 3 章 プロトタイプ及び実機 TOP カウンターにおける PMT アセンブリ	48
3.1 プロトタイプ TOP カウンターにおける PMT アセンブリ	48
3.1.1 プロトタイプの構造	48
3.1.2 オプティカルクッキーの取り付け	49
3.1.3 PMT モジュールの取り付けと接着面の確認	52
3.2 実機一号機における PMT アセンブリ	54
3.2.1 実機用 PMT モジュールの製作	54
3.2.2 実機での PMT モジュールの取り付け	57
3.2.3 CCD カメラによる接着面の確認	58
第 4 章 結論	63

目次

1.1	Belle 検出器における各 K/π 識別装置の担当する運動量領域	7
1.2	BelleII 検出器	8
1.3	TOP カウンターにおける光伝播の様子	9
1.4	荷電粒子が入射したときの断面図	9
1.5	TOP カウンターのリングイメージの一例	10
1.6	TOP カウンターの石英輻射体	11
1.7	MCP-PMT の外観	12
1.8	MCP-PMT の構造	13
1.9	マイクロチャンネルプレート	13
1.10	QBB の外観	14
1.11	プリズムエンクロージャ	14
1.12	コールドプレート	15
1.13	ビームテスト時の MCP-PMT のアライメント	16
1.14	ビームテスト時の接着面の気泡	17
2.1	オプティカルクッキーを使用した光学接着の概念図	19
2.2	TSE3032	20
2.3	オプティカルクッキーの製作手順	21
2.4	テフロン板の設計図の一例	22
2.5	ガンマ線照射の様子	24
2.6	照射サンプル	24
2.7	分光光度計 V-570 の外観	25
2.8	内部透過率の測定結果	27
2.9	照射前後の内部透過率の比	28
2.10	圧縮試験の試験サンプル	29
2.11	万能試験機の外観	30
2.12	圧縮試験の模式図	31
2.13	圧縮試験の様子	31
2.14	オプティカルクッキーの形状	32
2.15	全サンプルの圧縮試験の測定結果	34
2.16	TSE3032 の混合比による測定結果の変化	34
2.17	オプティカルクッキーの厚みによる測定結果の変化	35
2.18	オプティカルクッキーの山の幅による測定結果の変化	35
2.19	オプティカルクッキーの山の高さによる測定結果の変化	36
2.20	光学オイルの使用による測定結果の変化	36
2.21	接着試験用の PMT モジュールの模型	37
2.22	接着試験時の接着面の様子	37

2.23	11 カ月後の接着面の様子	38
2.24	PMT モジュールの外観	39
2.25	PMT モジュールに負荷をかける機構	39
2.26	読み出し回路と PMT モジュールの接続	40
2.27	PMT モジュールと読み出し回路の取り付けの様子	41
2.28	真空チャックの外観と設計図	41
2.29	納品された真空チャック	42
2.30	PMT モジュールの組み立て手順	43
2.31	PMT モジュールの分解手順	45
2.32	磁場テストに使用した双極電磁石の外観と磁場テストのセットアップ	46
2.33	磁場テストにおける接着面の確認	47
3.1	プロトタイプと実機のプリズムエンクロージャ	48
3.2	MCP-PMT の配置図	49
3.3	オプティカルクッキー取り付けの手順	51
3.4	オプティカルクッキーを取り付けた PMT モジュール	51
3.5	プロトタイプにおける PMT アセンブリ	53
3.6	プロトタイプにおける接着面の確認	54
3.7	プロトタイプの接着面	54
3.8	放電テスト用の読み出し基板	56
3.9	放電テストの模式図	56
3.10	放電テストのセットアップ	57
3.11	実機における PMT アセンブリの様子	57
3.12	PMT モジュール取り付け後の様子	58
3.13	CCD カメラ	58
3.14	CCD カメラの設置位置	59
3.15	接着面の気泡の識別	59
3.16	CCD カメラの視野確認	60
3.17	接着面の気泡が抜けていく様子	61
3.18	CCD カメラの映像	62

表目次

1.1	Belle 実験と BaBar 実験の K/π 識別性能の比較	7
1.2	TOP カウンターの識別性能	11
2.1	TSE3032 の仕様	20
2.2	TSE3032 の硬化温度と硬化時間	22
2.3	照射サンプルの番号と照射量	25
2.4	V-570 の仕様	26
2.5	万能試験機の仕様	30
2.6	圧縮試験の試験サンプル一覧	32
3.1	プロトタイプに使用した MCP-PMT の ID と PMT モジュール番号	49
3.2	OCF446 の仕様	50
3.3	実機一号機に使用した MCP-PMT の ID と PMT モジュール番号	55

第 1 章 Belle II TOP カウンター

1.1 Belle II 実験と TOP カウンター

1.1.1 Belle II 実験

現在の素粒子物理学における標準模型は、これまでに観測されたほとんどすべての実験結果を説明することに成功している。一方で標準模型は未だ不十分な側面も含んでおり、3つの相互作用の統一、重力の量子化、階層性問題、暗黒物質を説明できない、などの問題が残されている。これらの問題を解決するための新しい理論として提案されている超対称性、余剰次元などはいずれも TeV のエネルギー領域に新しい物理法則があることを示唆しており、この TeV 領域の物理の開拓が今後の素粒子物理学における大きな課題である。

Belle II 実験は TeV 領域の物理に感度の高い B 中間子の稀崩壊を精密に測定することで標準模型を超えた新物理の探索を行う。7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させ、 B 中間子を生成させる。TeV 領域に新物理があるとすれば、 B 中間子の崩壊にも影響がみられ、観測量に標準模型からのずれが生じる。Belle II 実験の前身の Belle 実験においてもいくつかの測定結果に新物理の手がかりが見られたが、ほとんどの測定結果は統計精度によって制限されていた。Belle II 実験では、加速器と測定器のアップグレードにより、ピークルミノシティを Belle 実験の 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増強させ、 B 中間子稀崩壊における CP 非対称度や崩壊分岐比などを数パーセントの精度で測定することを目指す。また、Belle II 実験では、 τ レプトンや c クォークを含む中間子も B 中間子とほぼ同数生成され、新物理に感度が高い様々な測定が可能である [1]。

1.1.2 Belle II 実験における K/π 識別

B 中間子の崩壊過程では、多くの終状態に荷電 K 中間子と荷電 π 中間子が含まれる。そのため、 K/π 識別は B 中間子の稀崩壊測定において非常に重要となる。Belle 実験においては、1 GeV/ c 以下の低い運動量領域では TOF(Time Of Flight) 検出器と CDC(Central Drift Chamber) の dE/dx 、それ以上の高運動量領域では閾値型チェレンコフ検出器 ACC(Aerogel Cherenkov Counter) を用いることで K/π 識別を行った。図 1.1 は Belle 検出器の各 K/π 識別装置がカバーする運動量領域を示している [2]。全体として 3.5 GeV/ c 以下の運動量領域に対して 3σ 以上の識別性能を持っていた。しかし、Belle 実験で広範囲の運動量領域をカバーした ACC は、総物質量が大きく、物質量が不均一であったため、Belle 検出器の外側に位置する電磁カロリメーターによる光子や電子のエネルギー測定に悪影響を及ぼすという問題があった。また、Belle 実験では閾値型チェレンコフ検出器を採用したが、Belle 実験のよき競争相手であり、 K/π 識別にリングイメージ型チェレンコフ検出器を採用した BaBar 実験と比較すると、長期運転後の総合的な K/π 識別性能では後れをとった。表 1.1 に Belle 検出器と BaBar 実験の K/π 識別性能を示す [3]。

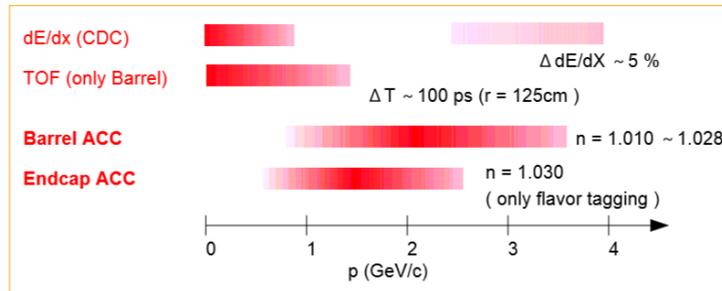


図 1.1 Belle 検出器における各 K/π 識別装置の担当する運動量領域

	運動量 [GeV/c]	K 中間子識別効率 [%]	π 中間子誤識別率
Belle	1.80–2.00	85.4 ± 0.3	10.2 ± 0.3
BaBar	1.75–2.00	約 99	約 2
Belle	3.00–3.50	83.8 ± 0.3	7.2 ± 0.2
BaBar	3.25–3.50	約 87	約 11

表 1.1 Belle 実験と BaBar 実験の K/π 識別性能の比較

Belle II 実験が目指す精密測定では、4 GeV/c 以下の運動量領域において 4σ 以上というより高い識別性能が求められる。また、ルミノシティ増強に伴うバックグラウンド増加により、高バックグラウンド環境下での運転が要求される。したがって、Belle II 実験においては K/π 識別装置の改良が必要であった。そこで、Belle II 実験においては閾値型ではなく、リングイメージ型チェレンコフ検出器である TOP (Time Of Propagation) カウンターと A-RICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) 検出器を導入し、 K/π 識別を行う。TOP カウンターはバレル部、A-RICH 検出器はエンドキャップ部の K/π 識別を担う。図 1.2 に Belle II 検出器の外観と TOP カウンター、A-RICH 検出器の位置を示す。これらの検出器の導入により、Belle 実験における ACC の物質量の課題を解決することができ、Belle II で要求される高い識別性能を実現することができる。A-RICH 検出器については参考文献 [4] を参照されたい。TOP カウンターの詳細は次節から述べる。

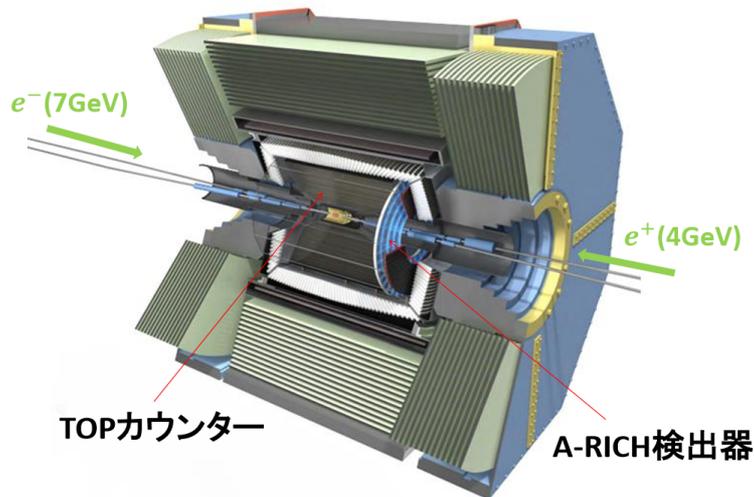


図 1.2 BelleII 検出器

1.2 TOP カウンターの原理と識別性能

1.2.1 TOP カウンターの識別原理

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る。図 1.3 に示すように、輻射体となる石英の端面に光検出器が取り付けられる。物質中の光速を超える速度を持った荷電粒子が石英輻射体に入射した際に放出されるチェレンコフ光を石英輻射体内部で全反射させ、端面の光検出器で検出する。図 1.4 のようにチェレンコフ光の放出角 θ_c とすると、 θ_c は粒子の速度 β 、物質の屈折率 n と、

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

という関係にある。また、粒子の速度 β と質量 m 、運動量 p は、

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad (1.2)$$

という関係式を満たす。したがって、リングイメージを再構成して θ_c がわかれば、式 1.1 から求めた粒子の速度 β と CDC で測定された運動量 p の情報から式 1.2 を用いて粒子の質量を求め、粒子を識別することができる。

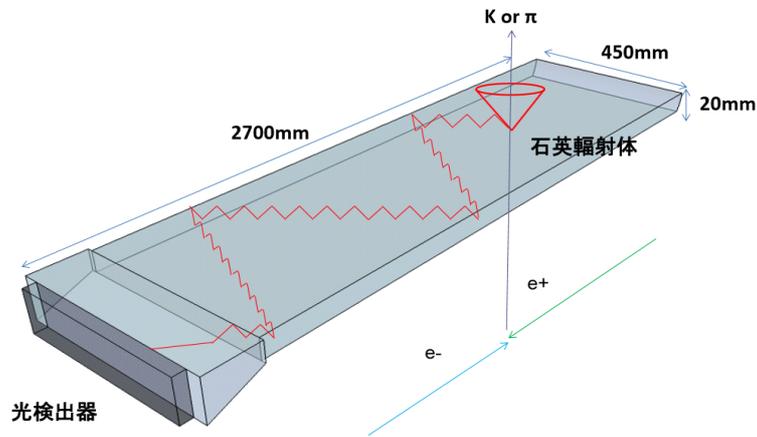


図 1.3 TOP カウンターにおける光伝播の様子

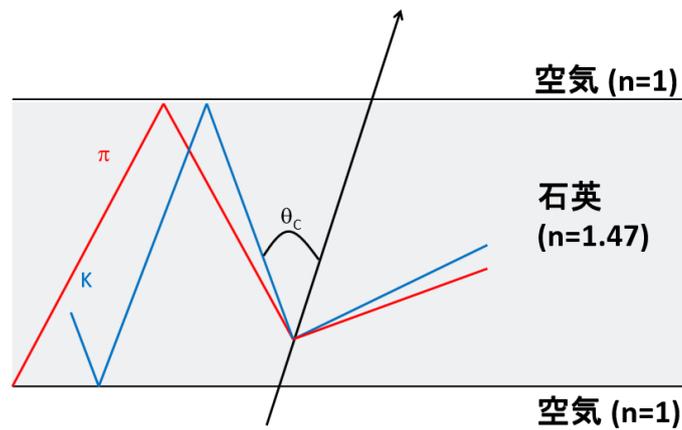


図 1.4 荷電粒子が入射したときの断面図

運動量が同じ荷電粒子の場合、放出されるチェレンコフ光は質量が大きい粒子ほど放出角が小さくなる。そのため、質量が大きい粒子のほうが石英輻射体内での伝播経路が長くなり、光の伝播時間が長くなる。TOP カウンターはこの伝播時間の違いに加えて、反射によって折り重ねられたリングイメージの 2 次元位置情報を測定し、3 次元的にリングイメージを再構成することで粒子識別を行う。伝播時間を測定するという点で、TOP カウンターは TOF の機能も兼ね備えており、またリング全体を投影する必要がないため非常にコンパクトな検出器を実現することができる。図 1.5 に TOP カウンターで検出されるリングイメージの例を示す。荷電粒子が垂直に TOP カウンターに入射した場合のリングイメージをシミュレーションにより求めたものである。

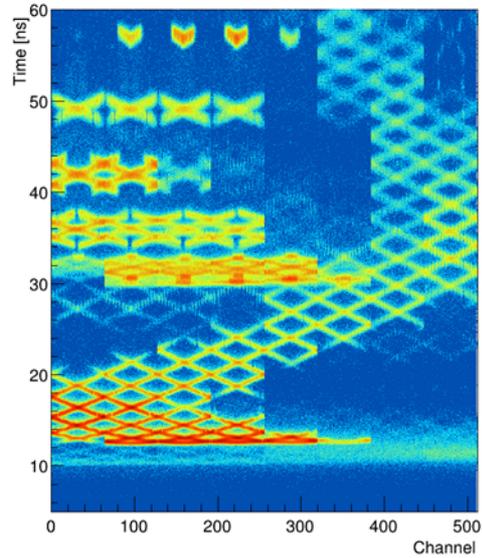


図 1.5 TOP カウンターのリングイメージの一例。荷電粒子が垂直に TOP カウンターに入射した場合のシミュレーション結果である。

1.2.2 TOP カウンターの識別性能

TOP カウンターの識別性能 S は、TOP カウンター全体の時間分解能 σ_{TOP} と粒子が生成されてから光検出器に到達するまでの時間 $\Delta TOF + \Delta TOP$ 、検出光子数 N を用いて、近似的に次式のように表すことができる。

$$S = \frac{\Delta TOF + \Delta TOP}{\sigma_{TOP}} \times \sqrt{N} \quad (1.3)$$

ΔTOF は TOP カウンターに入射するまでの軌跡と粒子の速度から決まり、 ΔTOP はチェレンコフ光の伝播経路と伝播速度によって決まる。式 1.3 から TOP カウンターの粒子識別性能に重要なのは、時間分解能と検出光子数であるということがわかる。

TOP カウンターの識別性能はこれまでにシミュレーションによって評価されている。表 1.2 に B 中間子の代表的な崩壊過程に対する TOP カウンターの識別性能と Belle 実験における識別性能を示す [5]。TOP カウンターの導入により、識別性能が大きく向上することがわかる。

崩壊過程		TOP カウンター	Belle 実験
$B \rightarrow \rho\gamma$	K 識別効率 [%]	98.7	87.5
	π 誤識別率 [%]	2.4	10.0
$B \rightarrow \pi\pi$	K 識別効率 [%]	95.8	88.5
	π 誤識別率 [%]	5.4	11.6

表 1.2 TOP カウンターの識別性能

1.3 TOP カウンターの構造

TOP カウンターは、石英輻射体と光検出器 MCP(Micro Channel Plate)-PMT、それらの筐体となる QBB(Quartz bar box) から構成される。以下ではそれぞれの構成部品について述べる。

1.3.1 石英輻射体

TOP カウンターの石英輻射体は、図 1.6 に示すように 1250 mm × 450 mm × 20 mm の 2 枚の石英板、100 mm × 450 mm × 20 mm で端面が球面に研磨された集光ミラー及びプリズムからなる。プリズムは長さ 100 mm、幅 456 mm で、厚みは石英板側が 20 mm、光検出器側が 51 mm である。プリズムは石英輻射体内を伝播してきたチェレンコフ光を厚み方向に広げることで、位置分解能を向上させるためのものである。集光ミラーは波長分散効果抑制のために使用される。これらは光学接着剤を用いて接着される。

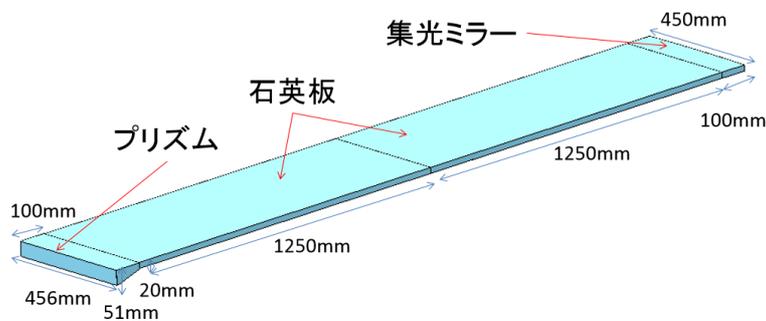


図 1.6 TOP カウンターの石英輻射体

TOP カウンターでは、石英輻射体内で放出されたチェレンコフ光は内部反射を繰り返して光検出器に到達する。その際の典型的な値は、反射回数が約 100 回、伝播距離が約 5 m、検出光子数が約 20 個である。できるだけ多くの光子を検出し、かつ伝播によってリングイメージを歪めないために石英輻射体には以下のような性能が要求される。

- 内部透過率 $\geq 98.5\%$
- 内部表面反射率 $\geq 99.90\%$
- 表面研磨精度 5 Å

また、石英輻射体と光学接着剤などを含めた全光学素子に対しては、以下が要求される。

- 発生した光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達する。
- 光路のずれが 0.5 mrad 以下

1.3.2 MCP-PMT

TOP カウンターの光検出器は、名古屋大学が浜松ホトニクス^{*1}と共同開発した MCP-PMT を使用する。MCP-PMT は図 1.7 に示すような外観で、27.6 mm × 27.6 mm × 13.1 mm の大きさである。TOP カウンターでは一機あたり 32 個の MCP-PMT を使用する。

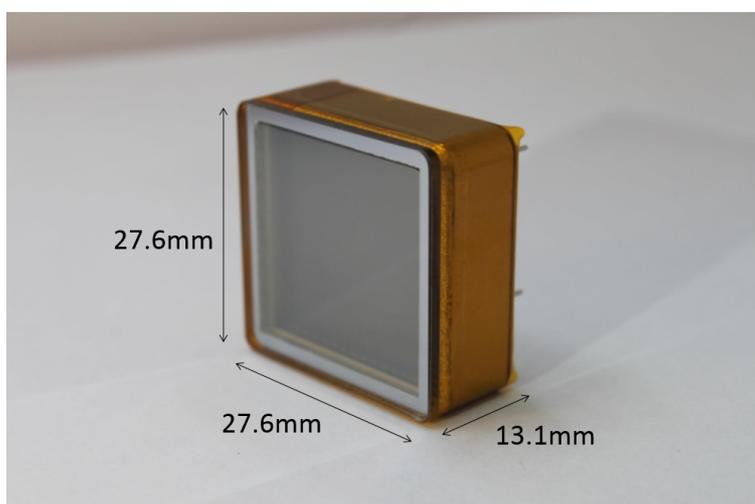


図 1.7 MCP-PMT の外観

MCP-PMT の内部構造は図 1.8 のようになっている [6]。光電面から放出された電子を図 1.9 に示すマイクロチャンネルプレート (MCP) と呼ばれる鉛ガラスの板により増幅し、16 チャンネルのアノードで読み出す。MCP は厚みが 400 μm であり、10 μm 径の無数の小さな穴が開けられている。この MCP に約 1 kV の高電圧を印加することで、2 枚で約 10^6 個程度まで電子を増幅することができる。MCP-PMT の典型的な信号は、1 光子に対して波高約 20 mV、パルス幅約 1 ns である。MCP-PMT の性能を以下に挙げる。

- 一光子検出可能
- 時間分解能 < 50 ps
- 位置分解能 < 5 mm
- 量子効率 (QE : Quantum Efficiency) > 24 %
- 1.5 T の磁場中で使用可能

MCP-PMT はすでに量産と性能評価が完了している。TOP カウンターで使用される MCP-PMT は従来の量産品である Conventional-MCP-PMT と量産途中から寿命対策がなされた Coating-MCP-PMT の 2 種類がある。全 16 機の TOP カウンターで使用される MCP-PMT は Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-

^{*1} <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>

PMT が約半数ずつである。

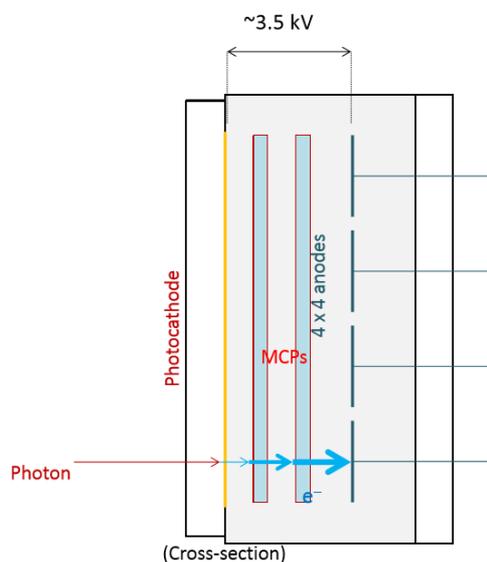


図 1.8 MCP-PMT の構造

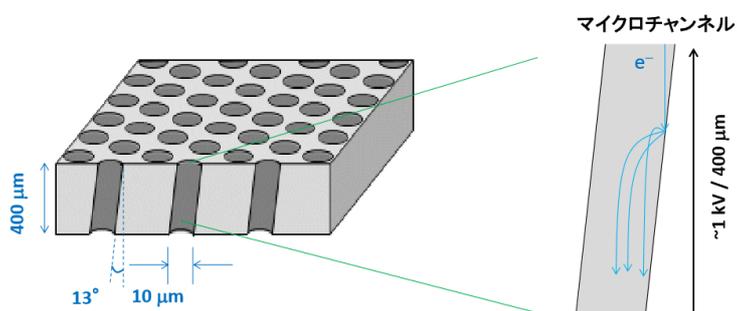


図 1.9 マイクロチャンネルプレート

MCP-PMT と石英輻射体の間には、波長分散効果抑制のために波長カットフィルターを挿入する。これまでの研究から 350 nm 以下の波長をカットするのが最適であることがわかっている [3]。

1.3.3 QBB

実機 TOP カウンターでは、石英輻射体、MCP-PMT、読み出し回路の筐体として QBB(Quartz Bar Box) が使用される。図 1.10 のように QBB は全体の側面を覆うサイドレール、石英板及び集光ミラーを覆うアウターハニカムパネルとインナーハニカムパネル、プリズム、MCP-PMT 及び読み出し回路を覆うプリズムエンクロージャとコールドプレートに大別される。プリズムエンクロージャとコールドプレートには後述する PMT モジュールを取り付けるための加工がなされている。図 1.11 はプリズムエンクロージャの内部構造を表している。PMT モジュールを取り付けるためのネジ穴が加工されているほか、接着面を撮影するための CCD カメラと LED ライトも取り付けられる。CCD カメラと LED ライトについては 3 章で述べる。図 1.12

はコールドプレートの構造を表している。コールドプレートには PMT モジュールに負荷をかけるためのバネが取り付けられるようになっている。また、読み出し回路を冷却するための冷却パイプも取り付けられる。

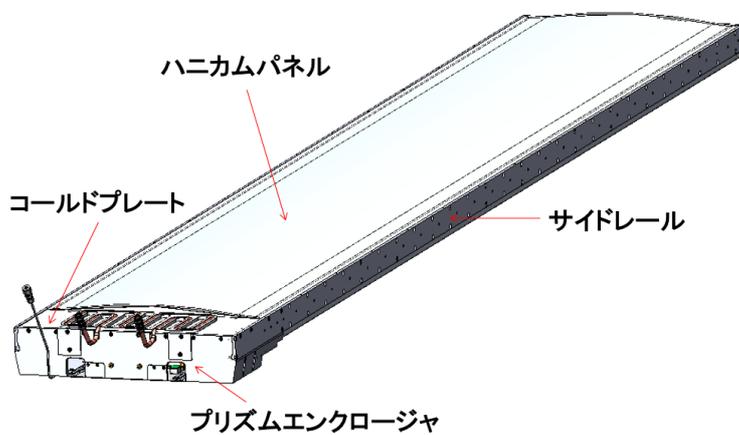


図 1.10 QBB の外観

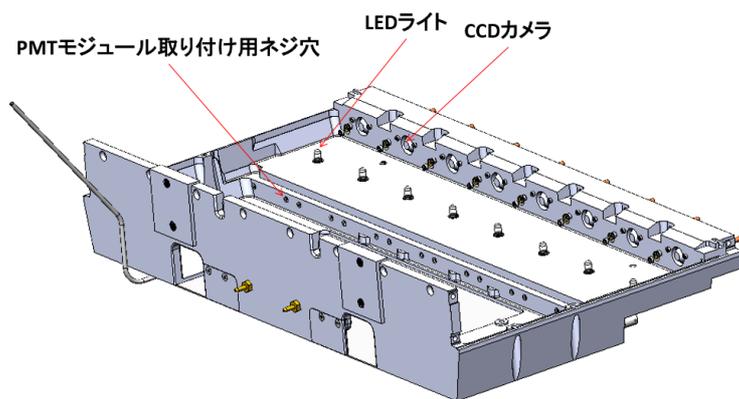


図 1.11 プリズムエンクロージャ

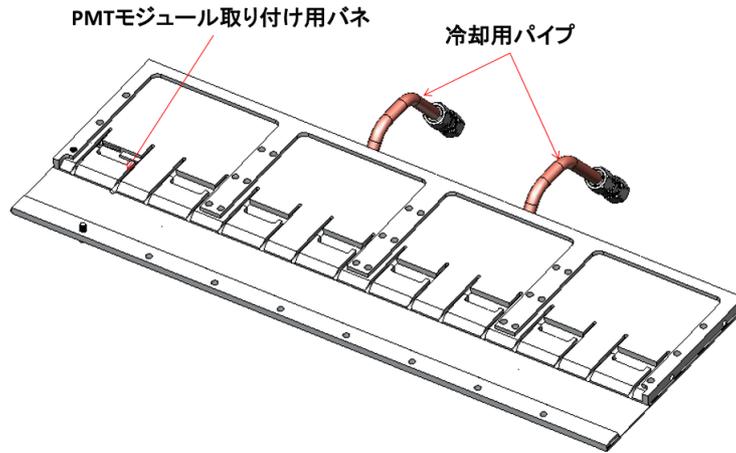


図 1.12 コールドプレート

1.4 開発状況と研究課題

Belle II 実験が目指す B 中間子稀崩壊の精密測定を実現するためには、TOP カウンターが表 1.2 に示した識別性能を満たすことが必要不可欠である。式 1.3 からわかるように TOP カウンターが十分な識別性能を発揮するためには、検出光子数を確保することが重要であり、石英輻射体内で発生したチェレンコフ光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達することが要求される。これを実現するために、先行研究において、各光学素子の性能評価や石英輻射体の接手法の確立といった様々な要素開発がなされてきた。その中で、MCP-PMT のアライメントと石英輻射体との接着を含めた PMT アセンブリ手法の確立が実機製作を開始するにあたっての大きな課題として残されていた。私は、本研究において TOP カウンター実機製作を可能にするために、この PMT アセンブリ手法の開発を行った。

TOP カウンターにおいて全体の約半数に使用される Conventional-MCP-PMT は寿命が約 1 C/cm^2 であり、Belle II 実験期間中に相対 QE が 80 % 以下に低下し、要求性能を満たさなくなる。また、寿命改善がなされた Coating-MCP-PMT についても寿命のばらつきがみられるため、TOP カウンターでは、Belle II 実験期間中に PMT の交換が必要になることが予想される。そのため、石英輻射体と MCP-PMT の光学接着は、PMT を着脱可能な手法で接着する必要がある。かつ、石英輻射体との接着面に気泡が入ると、入射条件によっては全反射により MCP-PMT への到達光子数の減少を引き起こすため、接着面に気泡を残さない光学接着が要求される。

したがって、TOP カウンターにおける PMT アセンブリでは、

- PMT と石英輻射体の接着面に気泡が残らない。
- PMT が着脱可能である。

という 2 点を満たす光学接着を行う必要がある。PMT を着脱可能にする必要があるため、光学セメントなどで石英に完全に接着することはできない。また、石英に大きな負荷をかけることは望ましくないため、小さな負荷で気泡を残さずに接着する方法を考える必要がある。加えて、TOP カウンターでは、一機あたり 32 個という数の MCP-PMT の入射窓を整列させる (アライメント) 必要があることから TOP カウンターにおける

PMT アセンブリ手法は開発が困難であった。

2013 年にプロトタイプ TOP カウンターを使用して行ったビームテスト時には、光学グリスを使用して MCP-PMT の接着を試みた。各 PMT に波長カットフィルターを取り付け、光学グリスを使用して石英に押し付けることで光学接着を行った。図 1.13 は光学グリスで各 PMT に波長カットフィルターを取り付けたときの写真である。各 PMT が直接読み出し回路に取り付けられているため、アライメントが困難であり、PMT の入射窓の位置にばらつきが見られた。また、PMT の入射窓と波長カットフィルターの間に気泡が入り、入射窓の面積の約 20 % に気泡が入っている PMT も見られた。図 1.14 は PMT をプリズムに対して光学接着した後、プリズム越しに接着面を写した写真である。接着面に気泡が生じていることがわかる。何度か接着を試みたが最終的に接着面の 10 % 以上に気泡が残った。例えば、接着面の面積の 10 % に気泡が入ったと仮定すると、TOP カウンターにおける光子分布はほぼ一様であることから最悪の場合発生したチェレンコフ光子全体の約 10 % を損失すると考えることができる。上で述べたように、TOP カウンターでは発生したチェレンコフ光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達することが要求されており、接着面に気泡が生じることで $\mathcal{O}(10)$ % の光子の損失が起きると識別性能に深刻な影響を及ぼす。

ビームテストでの経験から、光学グリスでは 32 本の PMT のアライメントを保つことが困難であり、接着面の気泡の問題を解決できないことが分かった。また、光学グリスは Belle II 実験期間中に蒸発することも懸念された。これらの経緯を踏まえ本研究では、MCP-PMT のアライメントを保ち、接着面に気泡を残さずかつ PMT が着脱可能な光学接着を行うための PMT アセンブリ手法の開発を行った。この手法の開発により、実機 TOP カウンターが目指す識別性能を発揮するために、チェレンコフ光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達するという要求を満たす手法で PMT アセンブリを行うことを目指す。

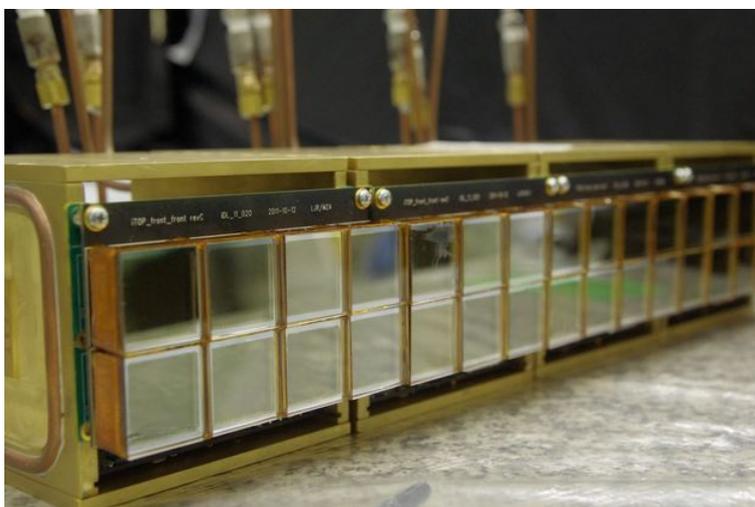


図 1.13 ビームテスト時の MCP-PMT のアライメント。各 PMT に個別に波長カットフィルターを取り付けており、入射窓のアライメントを保つのが困難であった。

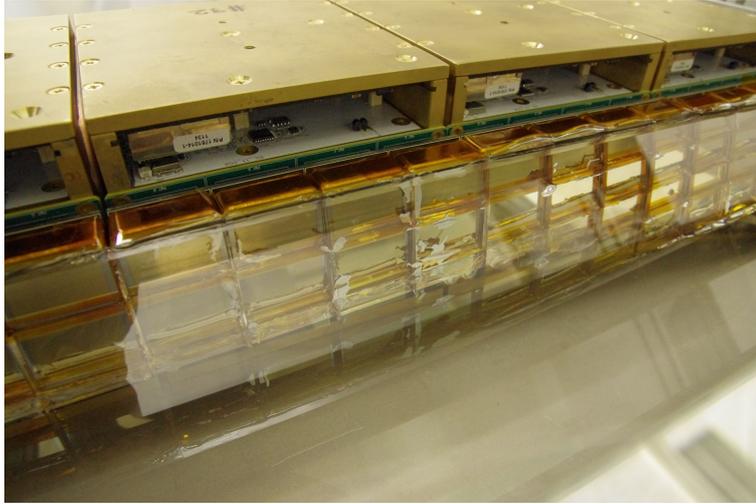


図 1.14 ビームテスト時の接着面の気泡。何度か接着を試みたが、最終的に接着面の 10 % 以上に気泡が残った。

第 2 章 PMT アセンブリ手法の確立

2.1 シリコンゴムを使った光学接着

1 章で述べたように、実機 TOP カウンターの製作を開始するために、

- PMT と石英輻射体の接着面に気泡が残らない。
- PMT が着脱可能である。

という要求を満たす PMT アセンブリ手法の確立が必要であった。

本研究では、シリコンゴムで作製したオプティカルクッキーを使用する手法を考案した。図 2.1 に示すように、波長カットフィルターとプリズムの間にシリコンゴムで作製したオプティカルクッキーを挟み、PMT を石英輻射体に対して押し付けることで光学接着する。オプティカルクッキーの表面を山なりな形状にし、押し付けた際に気泡が抜けやすくなることを期待している。また、PMT を 4 つごとに 1 モジュールとして扱う PMT モジュールを製作し、PMT のアライメントを保ったまま負荷を加える。

PMT を石英輻射体に押し付ける際には、石英輻射体に大きな力がかかるのを避ける必要がある。実機 TOP カウンターでは石英輻射体に加わる力を考慮して、MCP-PMT の光学接着を行う際に約 1.5 kgf/PMT の負荷が加わるように設計されている。

上記のような PMT アセンブリ手法の開発に伴い、以下に挙げる 3 点が必要であった。

1. ガンマ線耐性、光学特性の観点から使用するシリコンゴムを選定し、1.5 kgf/PMT の負荷で気泡を残さず接着するための仕様を決定する。
2. PMT の入射窓のアライメントを保ったまま負荷を加えるための構造体である PMT モジュールの製作手法を確立する。PMT の交換を考慮して、PMT モジュールはのちに分解できる必要がある。
3. プロトタイプと実機一号機で実際に PMT アセンブリを行い、実際に開発した手法で PMT アセンブリが可能であることを実証する。

2 章と 3 章でこれらの項目について述べる。

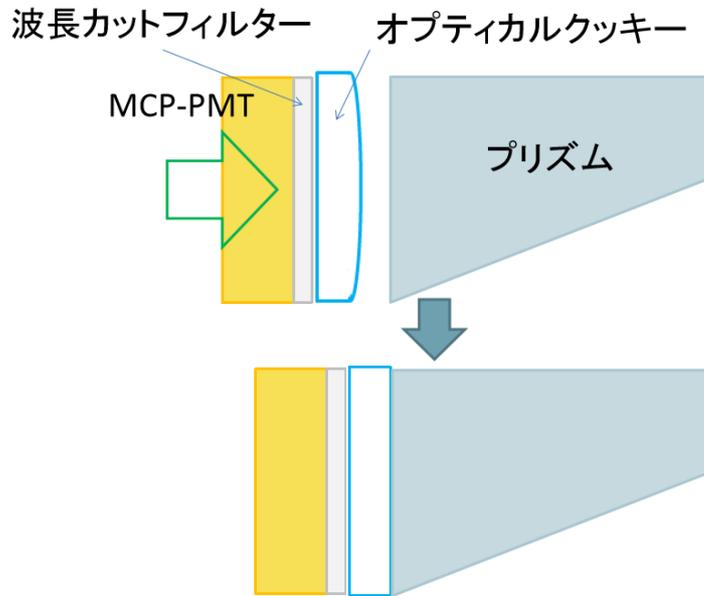


図 2.1 オプティカルクッキーを使用した光学接着の概念図。表面が山なりの形状をしたオプティカルクッキーをプリズムに対して押し付けることで接着面の空気が抜けることを期待している。

2.2 オプティカルクッキーの開発

ここでは、PMT アセンブリに使用するオプティカルクッキーの開発研究についてまとめる。オプティカルクッキーの製作手法、およびオプティカルクッキーのサンプルを製作して行ったガンマ線照射試験、圧縮試験、モックアップを使った接着試験について順に述べる。

2.2.1 オプティカルクッキーの製作

光学接着用のシリコンゴムとして、高い透過率と石英に近い屈折率を持つ 2 液混合型液状シリコンゴム TSE3032 (モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社^{*2}) を使用した。図 2.2 に示すように TSE3032 は、主剤の TSE3032(A) と硬化剤の TSE3032(B) の 2 成分からなり、室温または低温加熱することでゴム状に硬化する。硬化させる型を製作することで形状を自由に選択でき、また、主剤と硬化剤の混合比を変更することで硬度を変更することができる。TSE3032 の仕様を表 2.1 に示す。TSE3032 は、KOTO 実験においても CsI カロリメータの光学接着に使用された実績があり、製作手法などが研究されている [7]。KOTO 実験においても硬化剤の割合を減らして使用されており、本研究での製作手法も KOTO 実験での研究を参考にしている。

^{*2} <http://www.momentive.jp/>



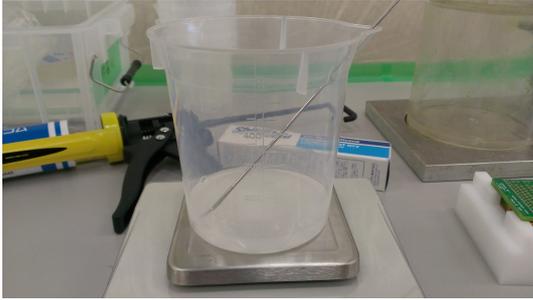
図 2.2 TSE3032。右が主剤の TSE3032(A)、左が硬化剤の TSE3032(B)

硬化前	
外観	TSE3032(A) : 淡黄色透明液状、TSE3032(B) : 透明液状
粘度 (23 °C) [Pa · s]	TSE3032(A) : 4.2、TSE3032(B) : 0.7
配合比	100:10
作業可能時間 (23 °C) [h]	4
硬化後	
外観	透明ゴム状
密度 [g/cm ³]	1.02
硬さ (タイプ A)	35
引張強さ [kgf/cm ²]	46
屈折率 (社内試験法による)	1.406

表 2.1 TSE3032 の仕様

TOP カウンターでは、後述する PMT モジュールのサイズに合わせて、厚み 2 mm、縦 56 mm、横 56 mm の大きさのオプティカルクッキーを製作する。オプティカルクッキーの製作には、専用の治具を使用する。製作手順を以下に示す。図 2.3 は各行程の様子を示している。

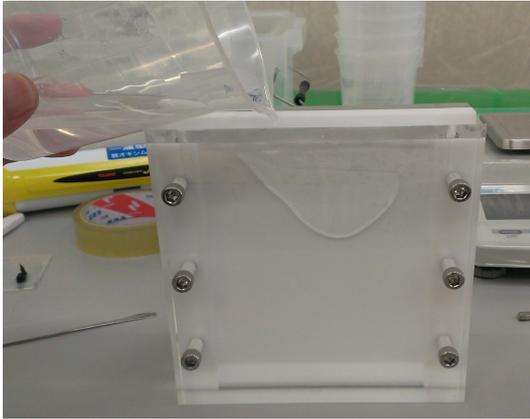
1. TSE3032 をプラスチック製のカップ内で混合し、真空脱泡する。(図 2.3(a)、(b))
2. アクリル板とテフロン製の板の間に 2 mm のスペーサーを挟み、ネジで固定する。
3. 上記の型に真空脱泡した TSE3032 を流し込み、室温または恒温槽で低温加熱して硬化させる。(図 2.3(c)、(d))
4. 硬化した TSE3032 を型から剥がし、56 mm × 56 mm の大きさに切り分ける。図 2.3(e) は型から剥がしたオプティカルクッキーである。



(a) 主剤と硬化剤を混合する。



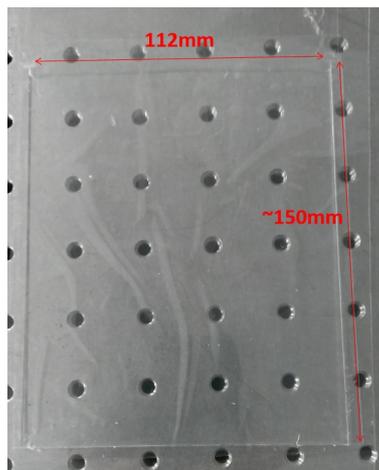
(b) 真空脱泡する。



(c) 型に TSE3032 を流し込む。



(d) 恒温槽で硬化させる。



(e) 完成した cookie

図 2.3 オプティカルクッキーの製作手順

前節で述べたようにオプティカルクッキーは表面の形状が山なりになるように製作する。そのため、図 2.4 のようなテフロン製の板を設計し、型として使用している。後述するが、テフロン製の型は数種類製作し、山の幅や形状を変更したサンプルに対して圧縮試験を行い、最適な形状を選択した。TSE3032(A) と TSE3032(B) の混合比は通常 100:10 であるが、本研究では、100:2-100:4 で使用している。混合比の決定についても後述する。混合比 100:4 の場合は、室温で 24 時間程度で硬化するが、100:2.5 以下の混合比では、恒温槽を使用し、40 °C で硬化させる。表 2.2 に混合比と製作時の硬化温度と硬化時間を示す。上記の型で 56 mm × 56 mm の大きさのオプティカルクッキーを一度に 4 枚製作することができる。

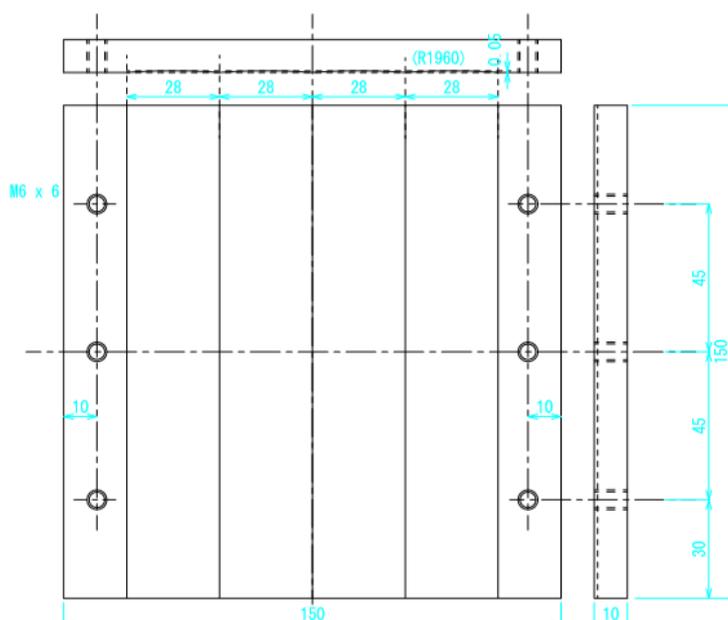


図 2.4 テフロン板の設計図の一例。オプティカルクッキーの表面が山なりになるようにカーブ状に設計した。

混合比	硬化温度 [°C]	硬化時間 [h]
100:4	室温	24
100:3	室温	24
100:2.5	室温/40	48/20
100:2	40	40

表 2.2 TSE3032 の硬化温度と硬化時間。室温は約 23 °C である。混合比 100:2.5 と 100:2 では恒温槽を使用した。

2.2.2 ガンマ線耐性試験

Belle II 実験ではルミノシティ増強に伴い、大量の放射線の生成が予想される。TOP カウンターの各光学素子は、実験期間中放射線にさらされながらも光学性能を維持する必要がある。中でも、ガンマ線は最も光学素子への影響が大きいと考えられており、これまでの研究で石英輻射体、光学接着剤、MCP-PMT の入射窓

などの各光学素子についてガンマ線耐性が確認されている。TSE3032 のガンマ線耐性はこれまで確認されていないため、本研究では、TSE3032 のサンプルを作製してガンマ線照射試験を行った。

TOP カウンターが十分な性能を維持するためには、10 年間の Belle II 実験期間に予想される放射線照射後、検出光子数の減少が 10 % 以下であることが要求される。Belle II 実験で予想されるガンマ線の照射量は、Belle 実験時のガンマ線量の測定結果をもとに見積もられており、10 年間で約 50–100 Gy である [8]。

先行研究において、

- ・石英輻射体
- ・光学接着剤
- ・光学フィルター
- ・MCP-PMT の入射窓

の各光学素子にガンマ線照射を行い、それぞれの透過率分布から TOP カウンター全体での検出光子数が評価されている。その結果、Belle II 実験で予想される約 100 Gy のガンマ線照射後で、TOP カウンター全体での光子数の減少は 2 ± 1 % であることがわかっている [2]。この結果から、検出光子数の減少を 10 % 以下に抑えるためには、ガンマ線照射前後で TSE3032 の透過率の低下が、TOP カウンターで重要となる 350–650 nm の波長領域において 8.2 % 以下であることが求められる。目標とする測定精度は識別性能にほぼ影響しないことを考慮して、 ± 3 % とした。

ガンマ線照射

ガンマ線の照射は名古屋大学のコバルト 60 ガンマ線照射室^{*3}で行った。線源は ^{60}Co である。

$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$ の反応により、1.17 MeV と 1.33 MeV のエネルギーのガンマ線が放出される。図 2.5 のように、線源から一定の距離に照射サンプルを設置してガンマ線照射を行う。照射サンプルは図 2.6 のように、硬化させた TSE3032 をガラス基板で挟んで固定したものである。線源からの距離と照射時間で照射線量を調整することができる。今回は、Belle II 実験での予想照射量に基づき、照射線量を 100 Gy とその 10 倍である 1000 Gy に設定した。線源から 46.1 cm の位置に 2 つ、145.7 cm の位置に 2 つのサンプルを設置し、20 時間の照射を行った。実際の照射線量はサンプルの隣に設置したアミノグレイ (日立金属株式会社^{*4}) により測定している。表 2.3 に照射サンプルの番号と照射量をまとめた。照射なし、照射量 100 Gy、照射量 1000 Gy のサンプルをそれぞれ 2 つずつ用意し、すべてのサンプルの照射前後の透過率を測定した。

^{*3} <http://co60.nucl.nagoya-u.ac.jp/index.html>

^{*4} <http://www.hitachi-metals.co.jp/>

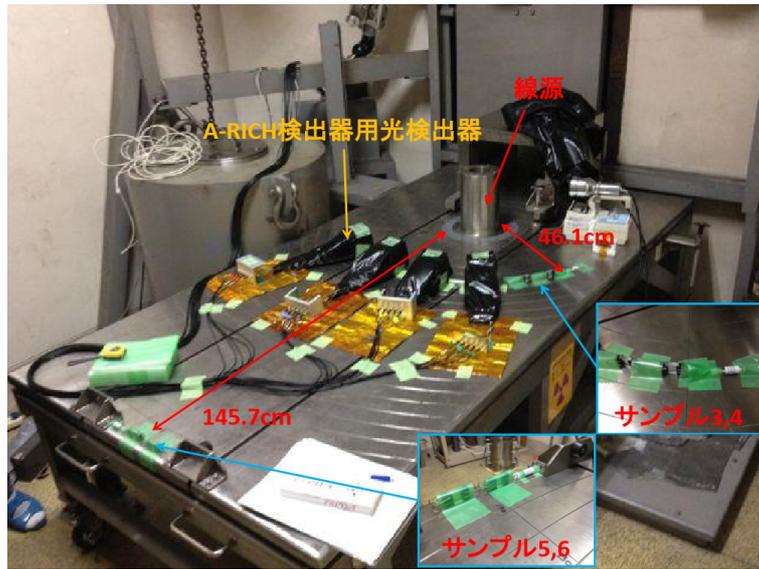


図 2.5 ガンマ線照射の様子。ガンマ線照射は A-RICH 検出器グループと共同で行った。写真中央に写っているのは A-RICH 検出器用光検出器である。TSE3032 の照射サンプルは図中に示したように線源から一定の距離に 2 つずつ設置している。

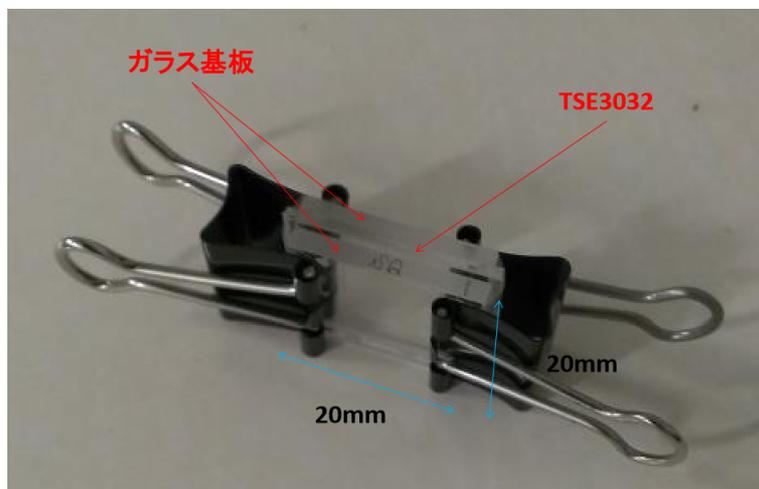


図 2.6 照射サンプル。TSE3032 を 20 mm × 20 mm の 2 枚のガラス基板で挟み、クリップで固定している。

サンプル番号	照射量 (Gy)	線源からの距離 (cm)	アミノグレイによる照射量の測定値 (Gy)
1	0(照射なし)	-	-
2	0(照射なし)	-	-
3	1000	46.1	996
4	1000	46.1	996
5	100	145.7	98
6	100	145.7	98

表 2.3 照射サンプルの番号と照射量

測定・評価方法

透過率の測定には名古屋大学物質科学国際研究センターの化学測定機器室^{*5}の分光光度計 V-570（日本分光株式会社^{*6}）を使用した（図 2.7）。V-570 の仕様を表 2.4 に示す。V-570 の測定精度は、透過率の各測定点に対し、絶対値で ±0.3 % である。今回は、TOP カウンターで検出される典型的な波長領域を含む 200–800 nm の波長領域で測定した。TSE3032 は単体では透過率の測定ができないため、図 2.6 のように照射サンプルは二枚の石英ガラス基板で挟んで固定している。そのため、分光光度計では表面での反射を含んだ外部透過率を測定している。TSE3032 の内部透過率を評価するために、ガラス基板のみの透過率を測定し、(照射サンプルの透過率) ÷ (ガラス基板の透過率) を求めた。



図 2.7 分光光度計 V-570 の外観。図中の開口部に測定サンプルを入れ、透過率の測定を行う。

^{*5} <http://www.cic.nagoya-u.ac.jp/>

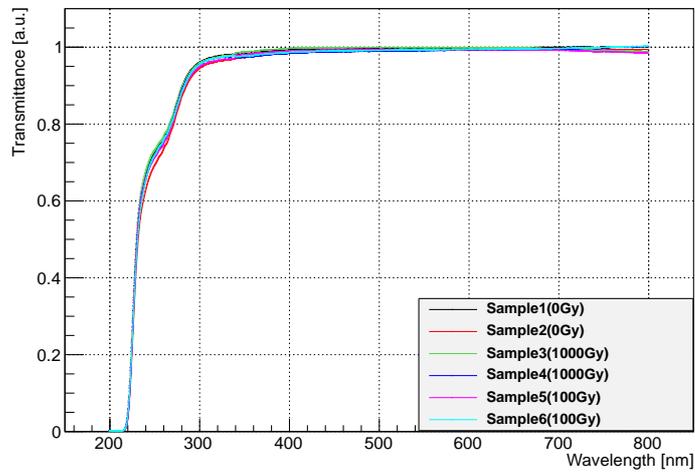
^{*6} <http://www.jasco.co.jp/jpn/home/>

光学系	シングルモノクロダブルビーム方式
光源	重水素放電管/タングステンヨウ素ランプ
波長範囲	190–2500 nm
波長移動速度	8000 nm/min
検出器	光電子増倍管、PbS 検出器
波長正確さ	±0.3 nm
測定精度	±0.3 % (透過率)

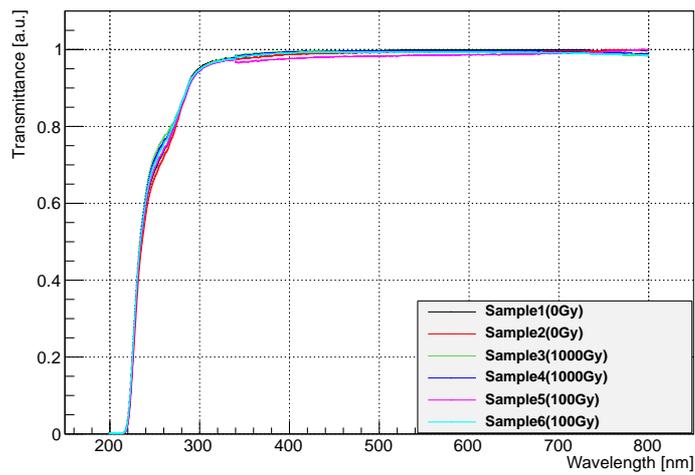
表 2.4 V-570 の仕様

測定結果

TSE3032 の内部透過率の測定結果を図 2.8 に示す。図 2.8(a)、2.8(b) は各サンプルの照射前と照射後の内部透過率である。内部透過率の測定誤差は、±1.1 % であった。これらの結果から、各サンプルに対して内部透過率の相対変化を評価するために、(照射後の内部透過率)/(照射前の内部透過率) を求めた結果を示したものが図 2.9 である。100 Gy 照射したサンプル 5 について、350–650 nm の波長領域で約 1 % の低下が見られたが、その他のサンプルについては有意な低下は見られなかった。1000 Gy 照射したサンプル 3 とサンプル 4 について透過率の低下が見られていないことから、サンプル 5 の内部透過率が低下した理由はガンマ線ではないと考えられるが、原因については明らかになっていない。しかし、全てのサンプルで内部透過率の低下が 8.2 % 以下という要求は十分に満たしており、TSE3032 は Belle II 実験期間中に照射されるガンマ線に対して十分な耐性を持ち、放射線耐性の面では 10 年間の Belle II 実験を通して使用可能であることが実証された。



(a) 照射前の内部透過率



(b) 照射後の内部透過率

図 2.8 内部透過率の測定結果

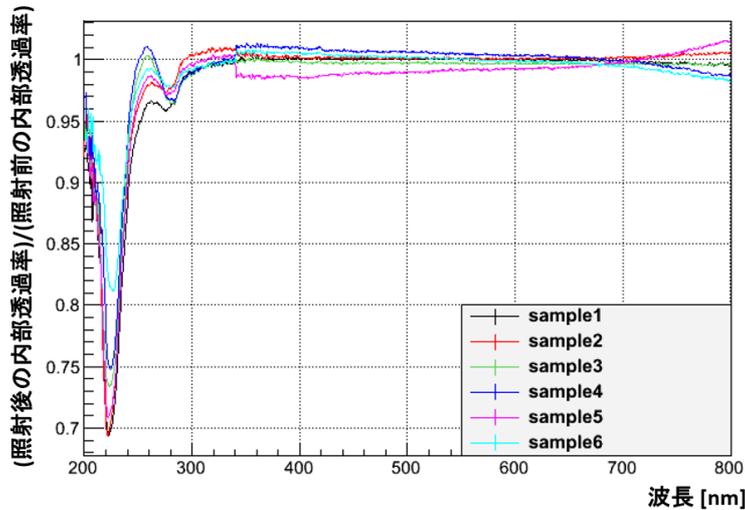


図 2.9 照射前後の内部透過率の比

2.2.3 圧縮試験

TSE3032 を実際に光学接着に使用するためには、2.1 節で述べたように 1.5 kgf/PMT 以下の負荷で石英輻射体に対して押し付けた際に、接着面に気泡が残らずに接着することが求められる。通常の混合比で作製した TSE3032 は硬度が高く、目標とする負荷で気泡を残さず接着することはできないため、TSE3032 は硬化剤の割合を減らして使用する。TSE3032 のサンプルを作製し、圧縮試験を行うことで 1.5 kgf/PMT 以下の負荷で接着するための TSE3032 の混合比と形状の決定、及び接着手法の開発を行った。

試験サンプル

図 2.10 に示すように、縦 100 mm、横 100 mm、厚み 20 mm の 2 枚の透明アクリル板に 56 mm×56 mm の大きさのオプティカルクッキーのサンプルを挟んだものを試験サンプルとした。下側のアクリル板の四隅にネジを取り付け、横すべりを防止している。今回の圧縮試験では最大 1000 N の負荷を加える。上記のアクリル板で両端支持、集中荷重を仮定した場合、1000 N の負荷でアクリル板のたわみは約 0.1 mm である。支持方法を考慮すると、今回の圧縮試験におけるアクリル板のたわみはこれよりも十分に小さいため、オプティカルクッキーに対してはほぼ一様に負荷がかかることができる。この試験サンプルを使用することで、実機と同じようにオプティカルクッキーに対して一様な負荷を加えた状態で、目視によって接着面の気泡を観察することができる。

試験方法

圧縮試験には、図 2.11 に示す精密万能試験機オートグラフ AG-50kNXD plus (島津製作所^{*7})を使用した。万能試験機の仕様を表 2.5 に示す。今回の圧縮試験では、60–1000 N の負荷を試験体に加えた。図 2.12 は圧縮試験の模式図を表している。試験体をクロスヘッドと呼ばれる金属製のアームで圧縮し、試験体に加えている力(試験力)とクロスヘッドの移動距離(ストローク)を測定した。同時に、オプティカルクッキーとアク

^{*7} <http://www.shimadzu.co.jp/>

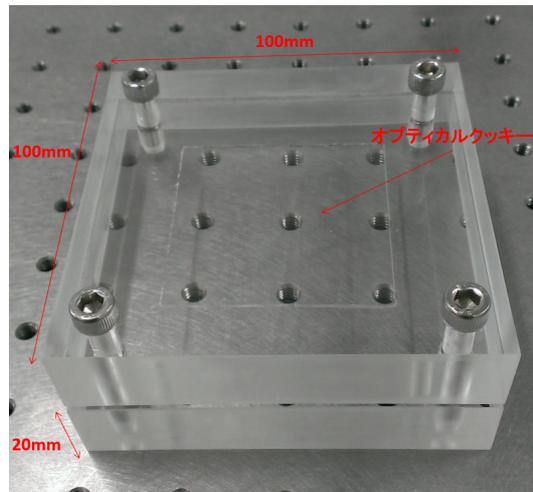


図 2.10 圧縮試験の試験サンプル。2 枚の透明アクリル板でオプティカルクッキーを挟んでいる。

アクリル板の境界を目視で確認し、接着面に気泡が残っているかどうかを観察した。図 2.13 は、接着面に気泡が入った場合の一例である。接着面の気泡は目視で容易に判別できる。

試験条件として、以下に挙げる項目をそれぞれ変更したサンプルを作製し、圧縮試験を行った。

- TSE3032 の混合比
- オプティカルクッキーの厚み
- オプティカルクッキーの山の幅
- オプティカルクッキーの山の高さ
- 光学オイルの使用の有無

TSE3032 の混合比は、オプティカルクッキーの硬度を下げ、負荷を加えたときに変形しやすくするために通常よりも低い 100:4-100:2 で製作した。100:2 以下の混合比では、製作治具から取り外すことが困難であったため、オプティカルクッキーを製作できなかった。厚みについては、1 mm と 2 mm の 2 種類について試験した。QBB の設計上、2 mm 以上のクリアランスがないため、2 mm が上限値である。オプティカルクッキーの山の幅と山の高さは図 2.14 に示すように、オプティカルクッキーの山なりになっている部分の幅と最も高いところの高さを指す。山の幅は、56 mm、28 mm、14 mm の 3 種類、山の高さは 0.1 mm と 0.05 mm の 2 種類について試験を行った。

当初は、TSE3032 の混合比、形状を工夫することで 1.5 kgf/PMT 以下の負荷での接着を目指していたが、混合比と形状の変更だけでは接着面の気泡がなくなるのに約 7.5 kgf/PMT の負荷が必要であった。そこで、光学オイルをオプティカルクッキーの表面に塗布する接着手法を考案した。これは、圧縮する際に、アクリル板がオプティカルクッキーと接着してオプティカルクッキーの幅方向への変形を拘束すると考えられるため、アクリル板とオプティカルクッキーの接着面にオイルを塗布することにより、オプティカルクッキーを変形しやすくするためである。圧縮試験では光学オイルに TSE3032 の主剤 TSE3032(A) を使用した。

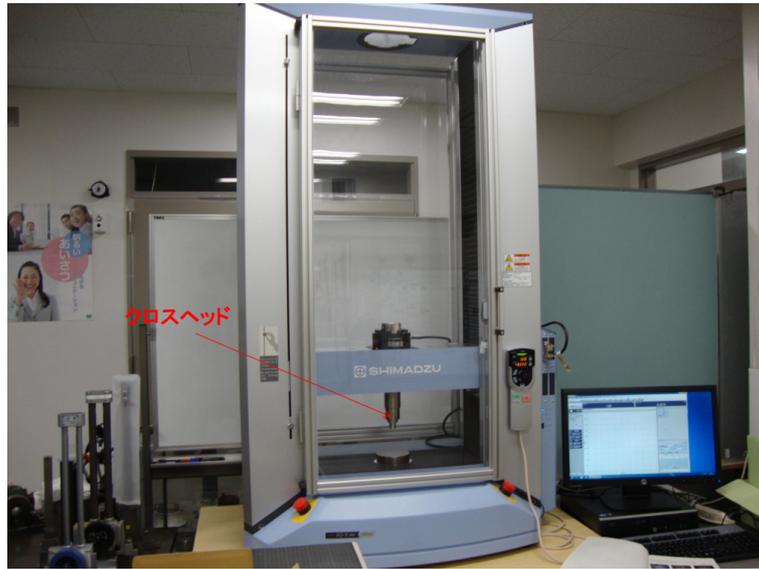


図 2.11 万能試験機の外観。図に示すクロスヘッドで試験サンプルに負荷を加えて圧縮する。

負荷容量	50 kN
試験力測定精度	±1 % 以内
クロスヘッド位置計測方式	光学式エンコーダ測定
クロスヘッド位置検出精度	±0.1 % 以内 ただし、10 mm 以下では ±0.01 mm

表 2.5 万能試験機の仕様

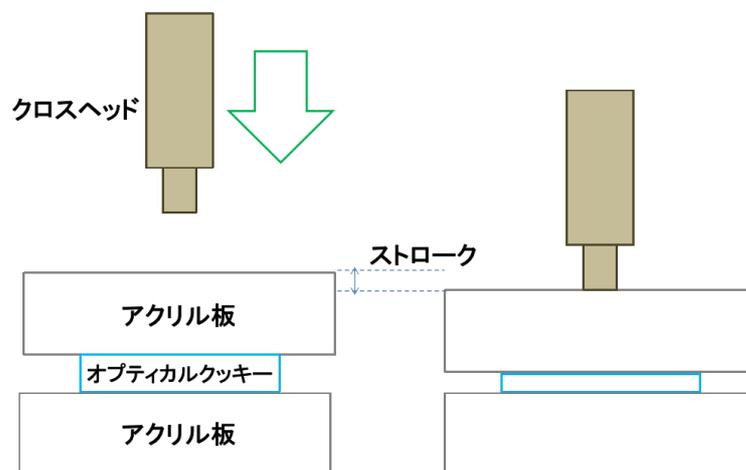


図 2.12 圧縮試験の模式図。クロスヘッドで試験サンプルを圧縮し、かけている負荷 (試験力) とクロスヘッドの移動距離 (ストローク) を測定する。

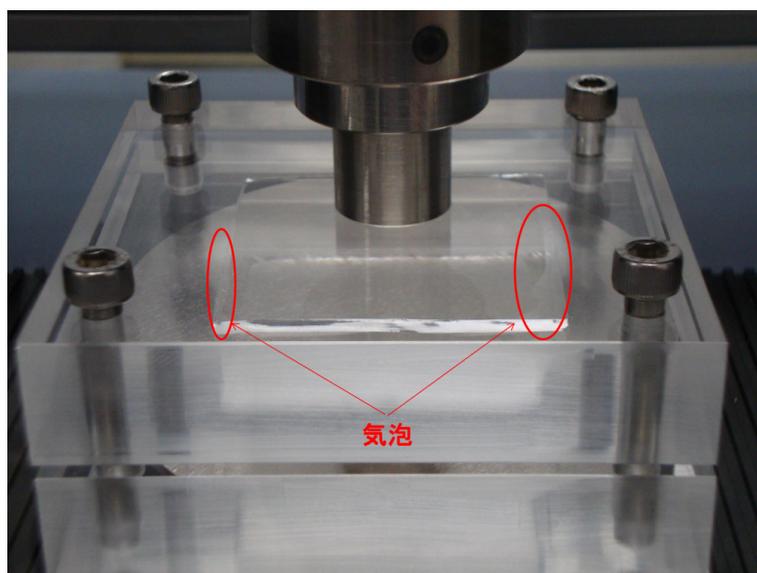


図 2.13 圧縮試験の様子。赤丸で囲った部分に気泡が残っている様子がわかる。

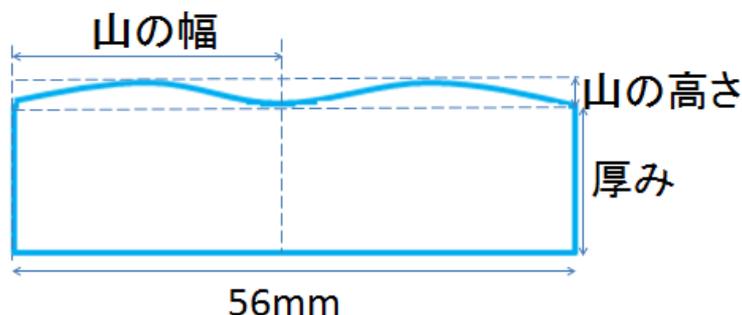


図 2.14 オプティカルクッキーの形状

試験結果

表 2.6 に圧縮試験を行ったサンプルの番号と試験条件を示す。各サンプルで接着面の気泡が完全になくなったときの試験力を接着に必要な負荷としている。

サンプル番号	混合比	厚み [mm]	山の幅 [mm]	山の高さ [mm]	光学オイル	接着に必要な負荷 (N)
1	100:4	1	56	0.1	なし	>1000(気泡が残った)
2	100:4	1	28	0.1	なし	>1000(気泡が残った)
3	100:4	2	28	0.1	なし	>1000(気泡が残った)
4	100:3	2	28	0.1	なし	600
5	100:3	2	14	0.1	なし	600
6	100:3	2	14	0.05	なし	600
7	100:2.5	2	28	0.05	なし	300
8	100:2.5	2	14	0.05	なし	300
9	100:2.5	2	28	0.05	あり	100
10	100:2.5	2	14	0.05	あり	100
11	100:2	2	28	0.05	あり	60

表 2.6 圧縮試験の試験サンプル一覧。接着面の気泡が完全になくなったときの試験力を接着に必要な負荷としている。

各サンプルの試験力とクロスヘッドのストロークの測定結果をまとめたものが図 2.15 である。例えば、サンプル 1 とサンプル 11 を比較すると、サンプル 1 ではストロークが約 0.13 mm に達するのに必要な試験力が 1000 N であるのに対し、サンプル 11 では 50 N で同じストロークに達している。このことからサンプル 11 はサンプル 1 に対して、より小さな負荷で変形しやすく、接着面の気泡が抜けやすいと考えられる。実際、目視による接着面の確認においても、サンプル 1 は 1000 N でも接着面に気泡が残ったが、サンプル 11 は 60 N で接着面の空気が完全になくなった。

以下に、各測定条件についての測定結果をまとめる。

- TSE3032 の混合比

図 2.16 に TSE3032 の各混合比での、試験力とストロークの関係を示す。図 2.16(a)、図 2.16(b)、図 2.16(c) はそれぞれ、混合比 100:4 と 100:3、100:3 と 100:2.5、100:2.5 と 100:2 の比較である。各プロットで混合比以外の試験条件は同じである。100:4 と 100:3 では、試験力とストロークの関係に大きな変化は見られなかったが、100:2.5 以下の混合比では、混合比が低いほうがより小さな負荷でオプティカルクッキーが変形することがわかる。接着に必要な力は、硬化剤の割合を減らすにしたがって、3 分の 1 以下に下げることができた。この結果から TSE3032 の混合比は 100:2 を採用した。

- オプティカルクッキーの厚み

図 2.17 はオプティカルクッキーの厚みが 2 mm のときと 3 mm のときの測定結果の比較である。厚み以外の試験条件は同じである。この結果から、厚みが厚いほうがオプティカルクッキーはより小さな負荷で変形することがわかる。QBB の設計上、オプティカルクッキーの厚みを 2 mm 以上にすることは難しいため、オプティカルクッキーの厚みは 2 mm を採用した。

- オプティカルクッキーの山の幅

図 2.18 はオプティカルクッキーの山の幅を変更したときの試験結果の比較である。図 2.18(a) は 56 mm と 28 mm、図 2.18(b)、図 2.18(c)、図 2.18(d) は 28 mm と 14 mm の比較であり、各プロットの 2 つのサンプルは山の幅以外の測定条件は同じである。図 2.18(c) では、山の幅が狭いほうがよい傾向が見られたが、その他では顕著な違いは見られなかった。また、サンプル 7 とサンプル 8 では接着面に気泡がなくなったときの試験力はどちらも約 300 N でほとんど変わらなかった。したがって、オプティカルクッキーの山の幅はあまり影響しないと考えられる。

- オプティカルクッキーの山の高さ

オプティカルクッキーの山の高さについても 0.1 mm と 0.05 mm の 2 種類を作製し、測定を行った。測定結果を比較したものが図 2.19 である。この結果から、山の高さは高いほうがオプティカルクッキーはより小さな負荷で変形することがわかる。しかし、サンプル 5 とサンプル 6 の接着に必要な力はいずれも約 600 N がであったため、山の高さの影響は小さいと考えられる。

- 光学オイルの使用の有無

光学オイルの使用の有無による測定結果の比較を図 2.20 に示す。図 2.20(a)、図 2.20(b) は混合比 100:2.5 のサンプルを使用しており、光学オイルの有無以外の試験条件は同じである。光学オイルを使用した場合は、どちらも小さな負荷でオプティカルクッキーが変形する傾向が見られた。接着に必要な力も約 3 分の 1 まで下げることができた。

以上の結果から、接着時に必要な力を減らすには、硬化剤の割合を減らすことと、光学オイルを使用することが特に有効であることがわかった。この結果に基づき、混合比 100:2 のサンプルで光学オイルを使用した圧縮試験を行い、目標とする 1.5 kgf/PMT の力で接着面に気泡を残さず接着することができた。

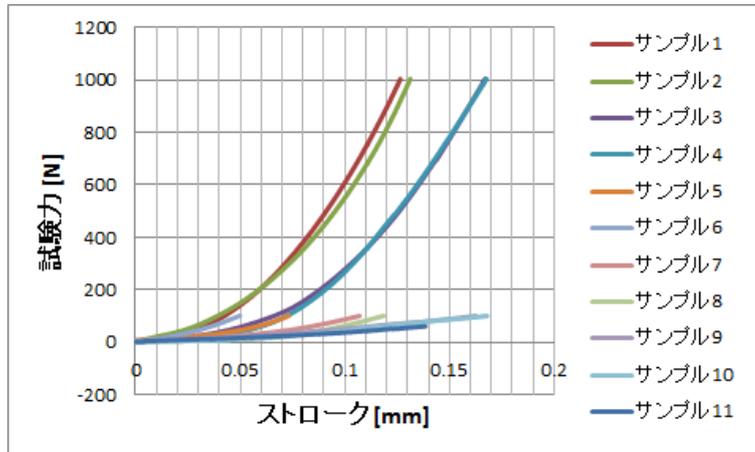
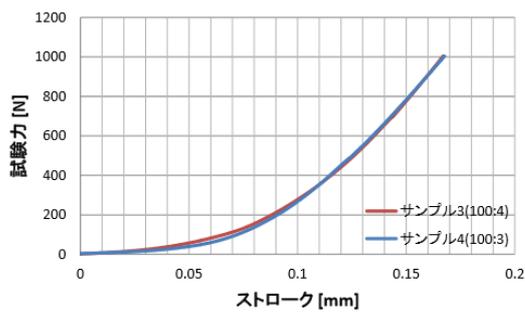
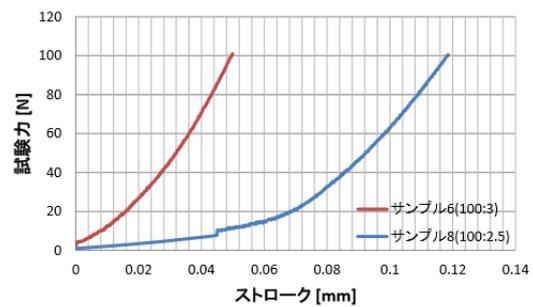


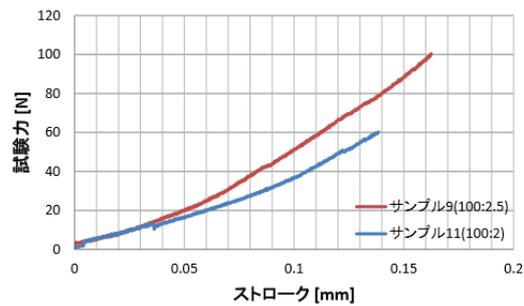
図 2.15 全サンプルの圧縮試験の測定結果



(a) 100:4 と 100:3 の比較



(b) 100:3 と 100:2.5 の比較



(c) 100:2.5 と 100:2 の比較

図 2.16 TSE3032 の混合比による測定結果の変化

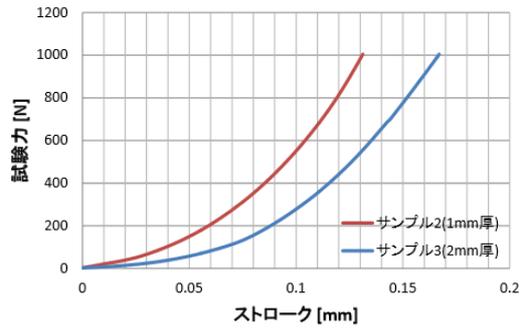
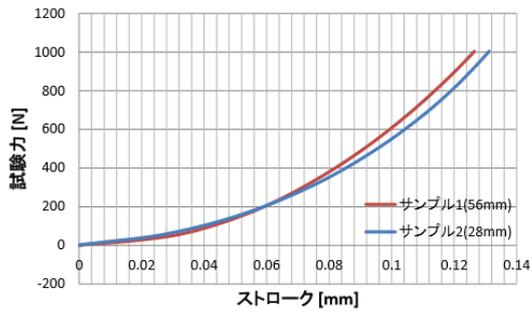
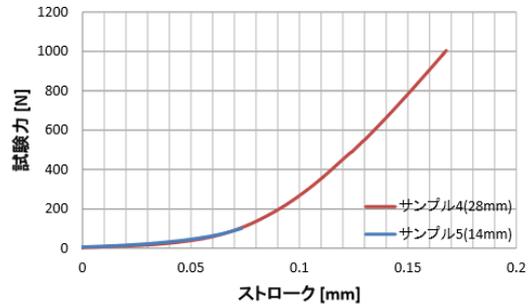


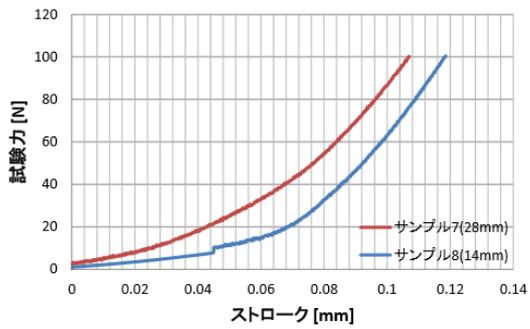
図 2.17 オプティカルクッキーの厚みによる測定結果の変化



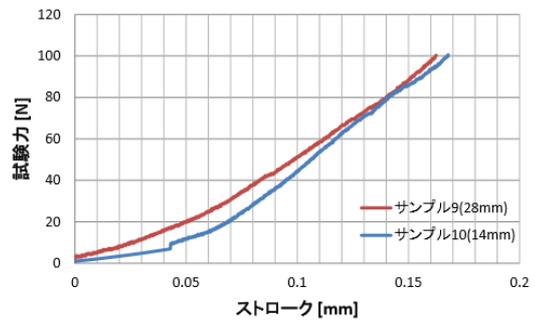
(a) 56 mm と 28 mm の比較



(b) 28 mm と 14 mm の比較 (1)



(c) 28 mm と 14 mm の比較 (2)



(d) 28 mm と 14 mm の比較 (3)

図 2.18 オプティカルクッキーの山の幅による測定結果の変化

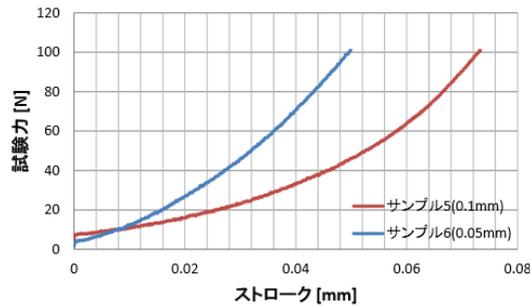
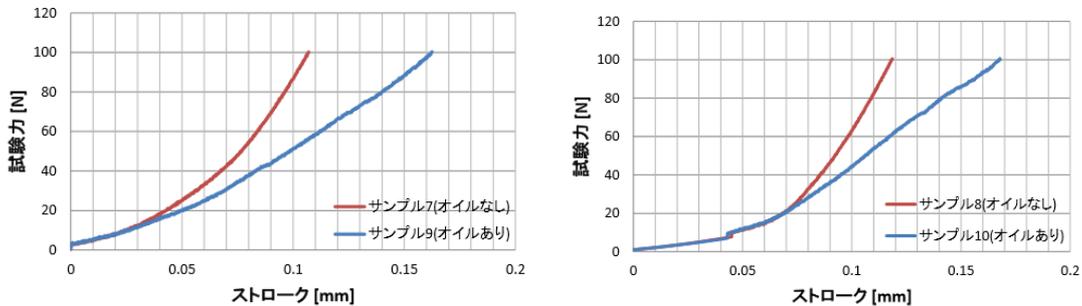


図 2.19 オプティカルクッキーの山の高さによる測定結果の変化



(a) 混合比 100:2.5 のサンプル

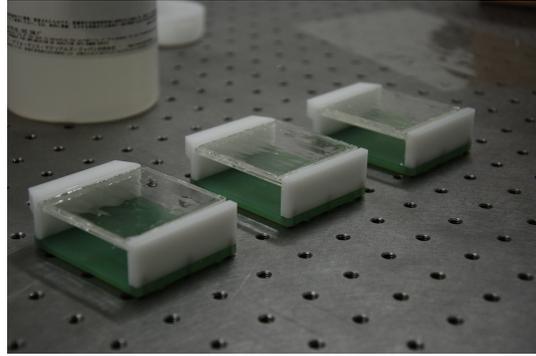
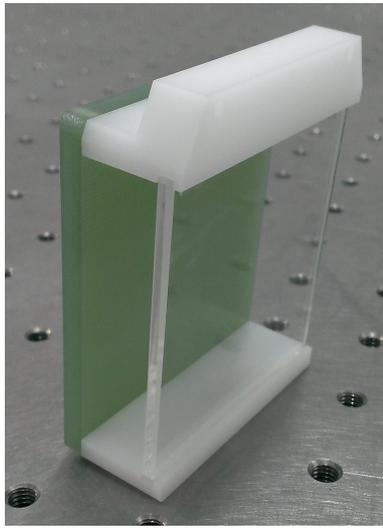
(b) 混合比 100:2 のサンプル

図 2.20 光学オイルの使用による測定結果の変化

2.2.4 モックアップによる接着試験

圧縮試験により 1.5 kgf/PMT の負荷で接着可能なオプティカルクッキーの製作方法、接着手法を開発した。このオプティカルクッキーを用いて実際に接着可能であることを確かめるために、実機に近い構造のモックアップを製作して接着試験を行った。プリズムのかわりに 1 cm 厚のガラス板を使用し、接着面を目視で確認できるように設計されている。図 2.21(a) が後述する PMT モジュールの模型である。MCP-PMT は取り付けられていないが、実機と同じ大きさであり、波長カットフィルターはガラス板を代用している。パネを使ってこの模型の上下に負荷を加える。負荷を加える箇所も実機の場合とほぼ同じであり、実機の場合に PMT モジュールにかかる力とほぼ同じ力を加えることができる。図 2.21(b) のようにオプティカルクッキーをつけた 3 つの PMT モジュールの模型をモックアップに取り付け、接着面に気泡が残るかどうかを確認した。図 2.22 は接着面の写真である。前節で開発した接着手法で実際に接着面に気泡が残らないことを実証した。

また、このモックアップを用いて、接着後の長期安定性についても試験を行った。PMT モジュールの模型を取り付けた状態で、2014 年 2 月から 2015 年 1 月までの 11 カ月間置いておき、接着面の経過を確認した。図 2.23 は 2015 年 1 月の段階での接着面の写真である。接着面が剥離したり、接着面に気泡が生じたりしないことを実証した。



(a) PMT モジュールの模型

(b) オプティカルクッキーを取り付けた模型

図 2.21 接着試験用の PMT モジュールの模型。(a) が PMT モジュールと同じサイズの模型、(b) は表面に TSE3032(A) を塗布したオプティカルクッキーを取り付けたもの。

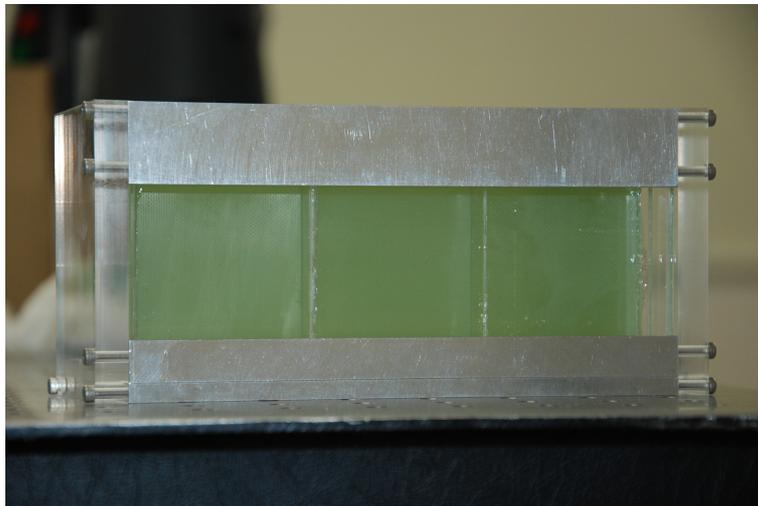


図 2.22 接着試験時の接着面の様子。気泡を残さずに接着できている。

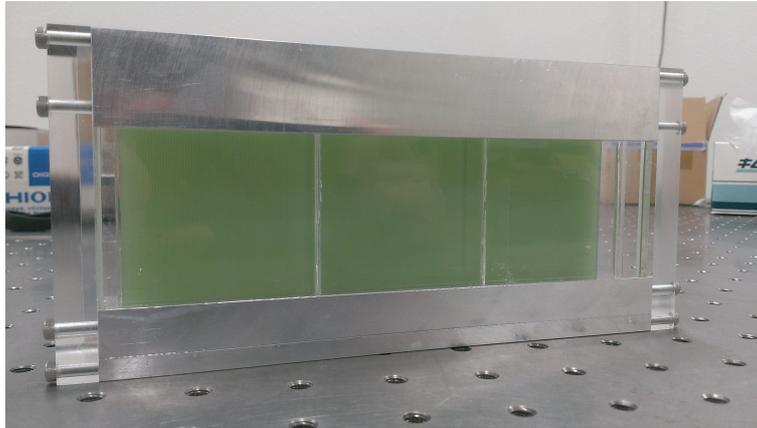


図 2.23 11 カ月後の接着面の様子。剥離やオプティカルクッキーの劣化は見られていない。

2.3 PMT モジュールの製作

2.3.1 PMT モジュールのデザイン

2013 年のビームテスト時には光学グリスを使用して各 PMT にそれぞれ波長カットフィルターを取り付けていた。その手法では各 PMT のアライメントを保つことが困難であり、PMT の入射窓が揃わない結果、接着面に気泡が入る原因にもなった。そこで、実機では、図 2.24 に示す PMT モジュールにより MCP-PMT4 つを 1 モジュールとして扱い、PMT のアライメントを行う。

PMT モジュールは以下の部品で構成される。

- MCP-PMT ×4
- 読み出し基板
- 波長カットフィルター
- PEEK パーツ (2 種類)
- PEEK 製ねじ ×6

PEEK パーツは波長カットフィルターを固定するためのものであり、読み出し基板にネジで取り付ける。また、片側の PEEK パーツには QBB に取り付けるためのネジ穴が加工されている。

図 2.25 は PMT モジュールに負荷をかける機構を図示している。周りの QBB の構造は省略している。上部は、PMT モジュールのネジ受けの内部にバネが取り付けられており、ネジを締めることでプリズム側に PMT モジュールを引き付ける構造になっている。下部は、バネの先に PEEK 製のロッドが取り付けられており、このロッドを図 2.24 の読み出し基板の半円の形状をした部分に押し付けて負荷を加える。

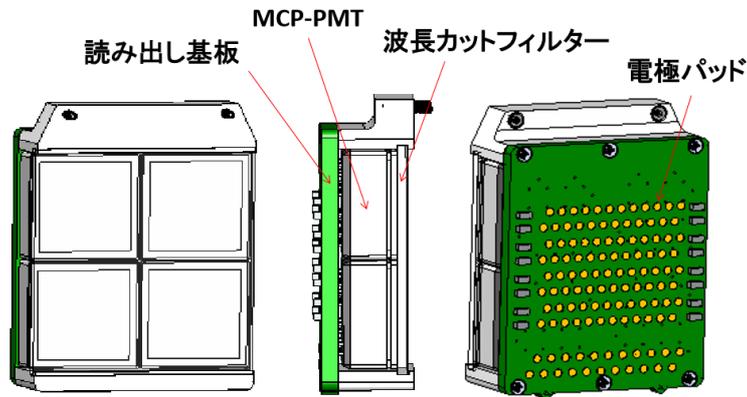


図 2.24 PMT モジュールの外観。MCP-PMT4 つの信号を 1 つの読み出し基板で読み出す。PMT の入射窓側には波長カットフィルターが取り付けられる。

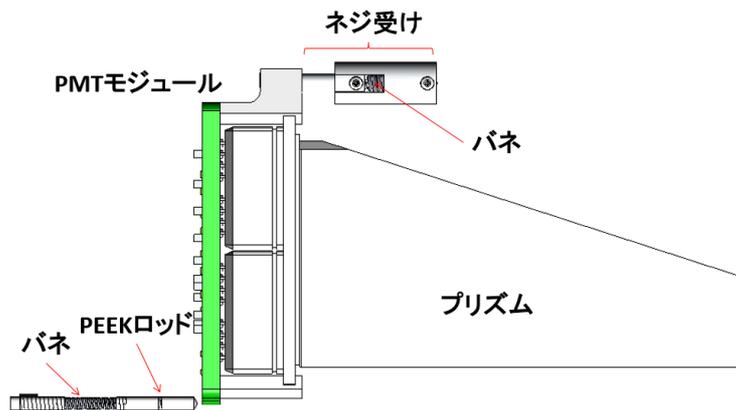


図 2.25 PMT モジュールに負荷をかける機構。上部はネジ受けの内部にバネが入っており、ネジを締めることでプリズム側に負荷がかかる。下部はバネの先端に取り付けられた PEEK 製のロッドで読み出し基板に負荷を加える。

PMT モジュールと読み出し回路のアセンブリ

PMT モジュールの読み出し基板には図 2.24 に示すように電極パッドがつけられている。読み出し回路と PMT モジュールは図 2.26 に示すようにポゴピンと呼ばれる先端がバネで伸縮する可動型プローブピンを使用して電氣的に接続するように設計されている。

図 2.27 は、PMT モジュールと読み出し回路のアセンブリ手順を表している。プリズムエンクロージャは簡略化している。手前がプリズムに何も取り付けられていないときの状態で、奥側が PMT モジュール及び読み出し回路を取り付けた後の状態である。図中に示した番号は以下のアセンブリ手順に対応している。

1. PMT モジュールを取り付ける。前述したようにこのときに約 1.5 kgf/PMT の負荷がかかる。PMT モジュールは垂直定規を使ってコールドプレートに垂直になるようにアライメントを行う。これにより PMT モジュールとプリズムを約数百 μm の精度でアライメントすることができる。数百 μm のずれは

オプティカルクッキーで吸収することができる。

2. HV ボードを取り付ける。HV ボードの先にもポゴピンが取り付けられており、PMT モジュールに対して押し付けることで電氣的に接続する。HV ボードは QBB にネジ止めする。
3. 読み出し回路を取り付ける。PMT モジュールに対して押し付けた状態で HV ボードにネジ止めする。HV ボードと読み出し回路が PMT モジュールにかかる負荷は約 1.5 kgf/PMT である。したがって、PMT モジュールと読み出し回路を取り付けた際、石英輻射体に対して約 3 kgf/PMT の負荷がかかることになる。

ポゴピンによる接続により、PMT モジュールを剥がすような負荷を加えずに読み出し回路の付け外しが可能である。したがって、PMT モジュールを取り付けた際に 1.5 kgf/PMT の負荷で接着面に気泡のない接着ができていれば、その後の読み出し回路の取り付けによって接着面に気泡が生じるようなことはないと考えられる。

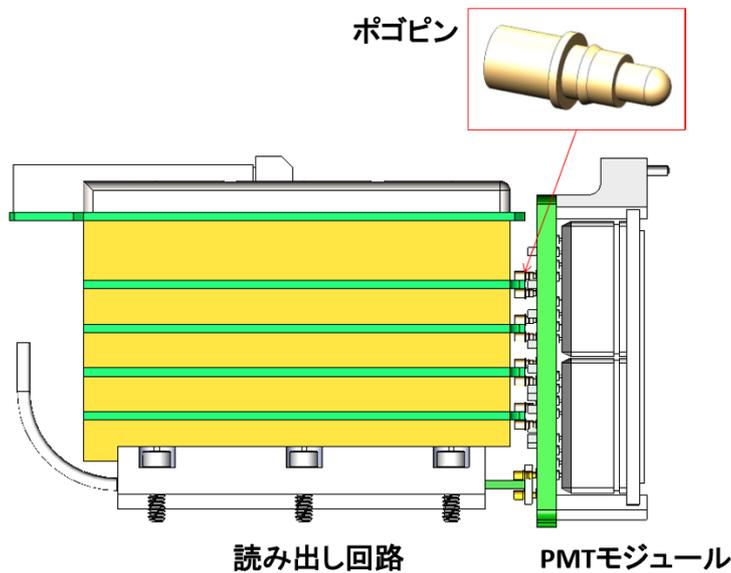


図 2.26 読み出し回路と PMT モジュールの接続。先端が伸縮するポゴピンを使って読み出し回路に PMT モジュールを押し付けることで電氣的に接続する。

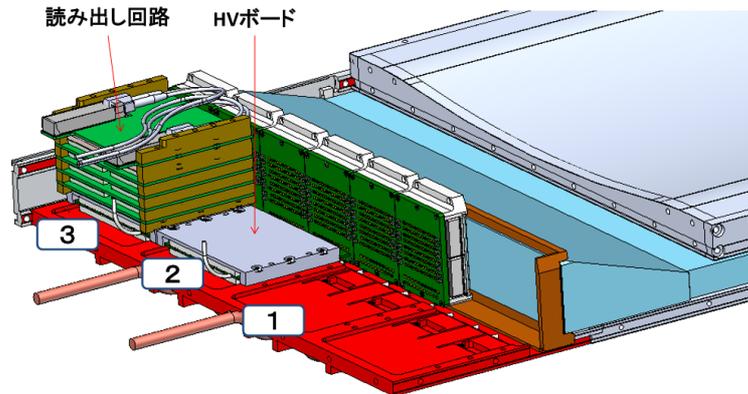
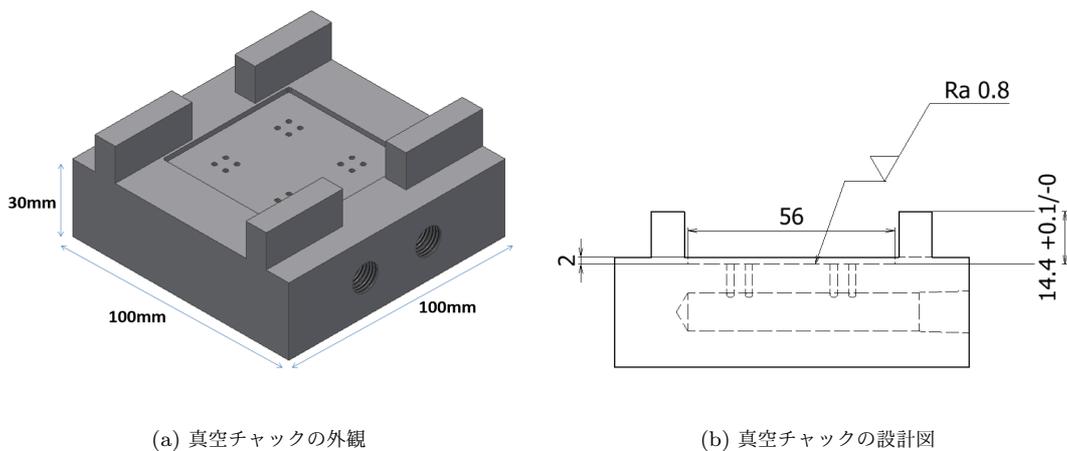


図 2.27 PMT モジュールと読み出し回路の取り付けの様子。手前から順に取り付け手順を表している。PMT モジュールを取り付けた後、HV ボード、読み出し回路の順に取り付ける。

2.3.2 製作手法の確立

PMT モジュールの製作手法はこれまでに開発されていなかったため、PMT のアライメントを保ちつつ PMT モジュールを組み立てる手法を確立する必要があった。PMT の入射窓のアライメントのために、専用の真空チャックを設計した。図 2.28(a) が真空チャックの外観である。中央に 4 つの PMT を入射窓を下向きにして設置し、真空ポンプを使って PMT を真空チャックに引き付けることで入射窓のアライメントを行う。真空を引いた状態で、PMT に読み出し基板を取り付ける。真空チャックの上部の突出した部分が読み出し基板を支えるようになっており、読み出し基板と波長カットフィルターの距離に合わせて、入射窓が当たる面から突出部の先端までの距離を $14.4 + 0.1 / - 0$ に設計している。また、PMT の入射窓が当たる面は中心線平均粗さ $0.8 \mu\text{m}$ に設計している。したがって PMT の入射窓をおよそ $100 \mu\text{m}$ の精度でアライメントできる。実際に製作された真空チャックが図 2.29 である。



(a) 真空チャックの外観

(b) 真空チャックの設計図

図 2.28 真空チャックの外観と設計図。材質はポリアセタールである。

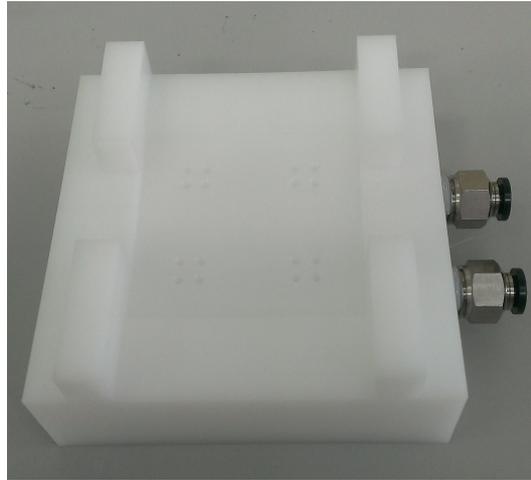


図 2.29 納品された真空チャック。図のようにチューブフィッティングを取り付けて使用する。

1 章で述べたように、TOP カウンターでは Belle II 実験期間中に MCP-PMT を交換することが予想される。この PMT の交換の際は全ての PMT を交換するわけではなく、相対 QE が 80 % 以下に低下したものや故障したもののみを交換する予定である。そのため、PMT モジュールは、分解して安全にそれぞれの PMT を取り出せるようにする必要がある。これを踏まえ、以下に示す PMT モジュールの製作手順を確立した。図 2.30 に各行程の写真を示す。写真は、ダミーの PMT と部品を用いた際のものである。

1. MCP-PMT を真空チャックに設置する。

MCP-PMT を並べた後、一度読み出し基板を取り付け、PMT のピン位置を調整する。読み出し基板を取り付けた状態で、真空を引いて PMT を吸引してから読み出し基板を外す。図 2.30(a) のように各 PMT の四隅のうち三か所に読み出し基板を固定するためのシリコン接着剤を塗布する。シリコンゴムは一液型 RTV ゴム (信越シリコーン^{*8}) を使用する。

2. 読み出し基板を取り付ける。

接着剤を塗布した後、再び読み出し基板を取り付ける。接着剤が硬化するまで真空を引いた状態で約四時間放置する。(図 2.30(b))

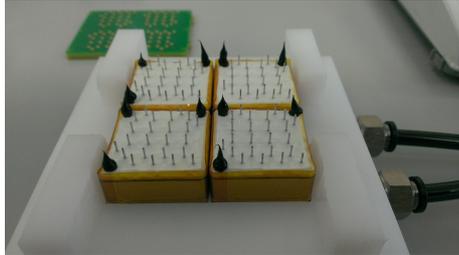
3. PMT に TSE3032 を塗布する。

接着剤の硬化後、読み出し基板に固定された PMT を真空チャックから外す。PMT と波長カットフィルターの接着にはオプティカルクッキーと同じシリコンゴム TSE3032 を使用する。混合比 100:10 で混合した TSE3032 を PMT の入射窓に塗布する。(図 2.30(c))

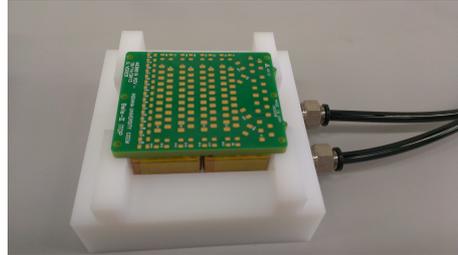
4. 波長カットフィルターを接着する。

図 2.30(d) のように、TSE3032 を塗布した PMT に波長カットフィルターと PEEK パーツを取り付ける。PEEK パーツと読み出し基板をネジで固定し、TSE3032 を硬化させるため、約 20 時間放置する。図 2.30(e) が完成した PMT モジュールである。

^{*8} <http://www.silicone.jp/index.shtml>



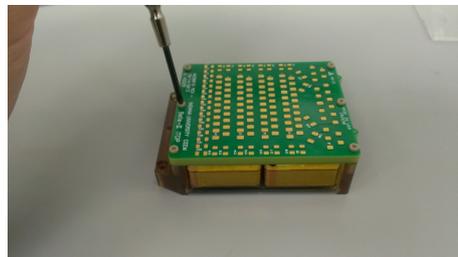
(a) 真空チャックに MCP-PMT をセットする。



(b) フロントボードを取り付ける。



(c) PMT の入射窓に TSE3032 を塗る。



(d) 波長カットフィルターを取り付け、TSE3032 を硬化させる。



(e) 完成した PMT モジュール

図 2.30 PMT モジュールの組み立て手順

2.3.3 PMT モジュールの分解

実際に製作した PMT モジュールの分解を試み、分解が可能であることを確認した。以下に分解の手順を示す。

1. PEEK パーツを取り外す。

図 2.31(a) のように、読み出し基板と PEEK パーツを固定しているネジを外す。PEEK パーツは手で容易に外れる。

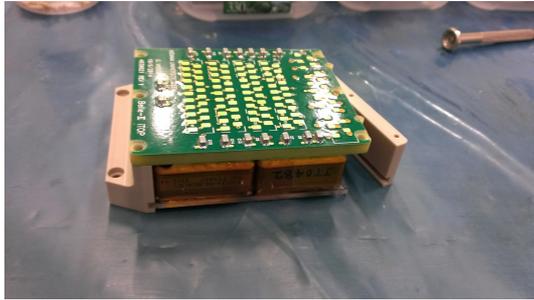
2. 読み出し基板を取り外す。

まず、PMT と読み出し基板の固定のための RTV ゴムを金属の刃で切断する。(図 2.31(b)) 中央の部分には刃が入らないため、外側のみ切断する。その後、図 2.31(c) のように波長カットフィルターに接着された PMT から、PMT のピンを曲げないように注意して読み出し基板を取り外す。

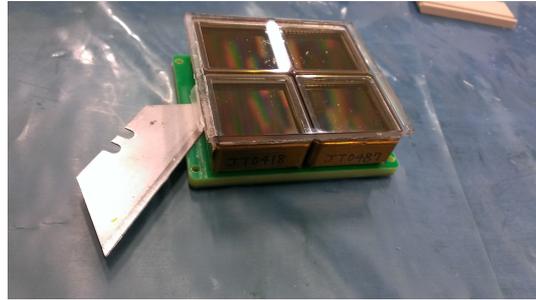
3. 波長カットフィルターと PMT と分離する。

図 2.31(d) に示すように PMT と PMT の隙間に金属の刃を入れ、PMT を波長カットフィルターから剥がす。図 2.31(e) が分解後の PMT モジュールである。

上記の手順で、複数個の PMT モジュールを分解し、安全にそれぞれの PMT を取り外せることを確かめた。PMT を交換する際は、交換が必要な PMT のみを取り換え、前節で述べた手順でもう一度 PMT モジュールを組み立てる。これにより、TOP カウンターでは Belle II 実験期間中に性能の落ちた PMT のみ交換することが可能であることを実証した。



(a) PEEK パーツを取り外す。



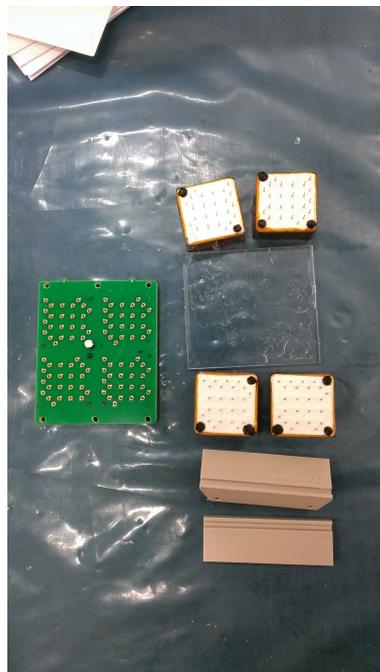
(b) RTV ゴムを切断する。



(c) フロントボードを取り外す。



(d) PMT を波長カットフィルターから取り外す。



(e) 分解後の PMT モジュール

図 2.31 PMT モジュールの分解手順

2.3.4 PMT モジュールの磁場テスト

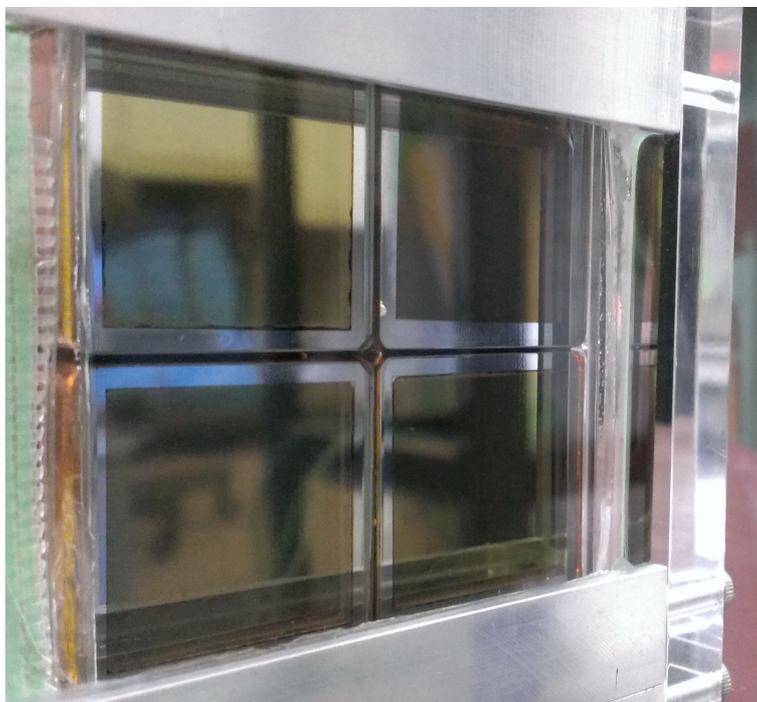
TOP カウンターは Belle II 実験において 1.5 T の磁場中で使用される。MCP-PMT は磁場によるローレンツ力を受けるため、磁場によって PMT モジュールに負荷がかかり、接着面が剥離することが懸念された。そこで、2.2.4 節で述べた接着試験に使用したのと同じモックアップを製作し、PMT モジュールの磁場テストを行った。磁場テストには、KEK 北カウンターホールの双極電磁石を使用した。図 2.32 は双極電磁石の外観と磁場テストのセットアップを示している。オプティカルクッキーと PMT モジュールを取り付けたモックアップを双極電磁石中に固定し、1.5 T の磁場をかけた。モックアップの固定には鉛ブロックを使用した。数分間磁場をかけた状態で放置し、接着面が剥離しないかどうかを確かめた。図 2.33 は磁場をかける前後での接着面の写真である。図 2.33 からわかるように磁場をかける前後で接着面の剥離は見られなかった。これにより実際に 1.5 T の磁場中においても PMT モジュールとオプティカルクッキーを用いた光学接着が可能であることを実証した。



図 2.32 磁場テストに使用した双極電磁石の外観と磁場テストのセットアップ。手前に写っているのは MCP-PMT の磁場テスト用の暗箱である。PMT モジュールの磁場テストはモックアップを双極電磁石中に固定して行った。



(a) 磁場をかける前の接着面



(b) 磁場をかけた後の接着面

図 2.33 磁場テストにおける接着面の確認。磁場をかける前後で接着面の剥離は見られなかった。

第3章 プロトタイプ及び実機 TOP カウンターにおける PMT アセンブリ

2章では、PMT アセンブリ手法開発のための、オプティカルクッキーの製作手法と接手法、及び PMT モジュールの製作手法について述べた。本章では、2014 年に行われたプロトタイプ TOP カウンターと実機一号機における PMT アセンブリについて述べる。これまでに開発してきた手法で、実際に接着面に気泡を残さない PMT アセンブリが可能であることを確かめた。

3.1 プロトタイプ TOP カウンターにおける PMT アセンブリ

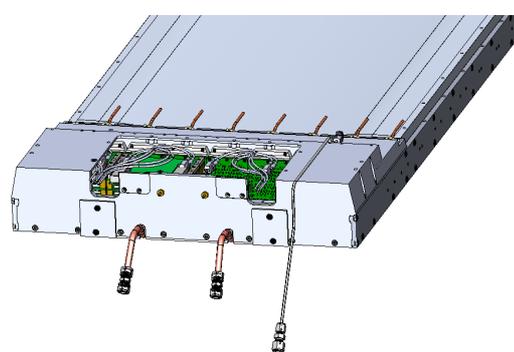
2014 年 7 月、前章で述べたオプティカルクッキーと PMT モジュールを使用して、プロトタイプ TOP カウンター (以下プロトタイプ) で PMT アセンブリを行った。このプロトタイプは 2013 年のビームテストで使用されたものであり、今回これまで使用していた読み出し回路をほぼ最終仕様の読み出し回路に変更して宇宙線テストを行った。ほぼ最終仕様の読み出し回路は、実機と同じ構造をしており、2章で述べたポゴピンによって PMT モジュールと電気的に接続する。

3.1.1 プロトタイプの構造

新しい読み出し回路を取り付けるために、プロトタイプのプリズム周辺部の QBB(プリズムエンクロージャ) を改造した。実機のデザインと外観は異なるが、PMT モジュールに負荷をかける機構は同じである。図 3.1 にプロトタイプ及び実機のプリズムエンクロージャを示す。実機のデザインでは、作業のために手を入れる部分 (アクセスウィンドウ) は、上部の中央部分のみである。これに対し、プロトタイプではプリズムの上部と後方部が大きく開いており、実機よりも作業は容易になる。また、プロトタイプではプリズムと QBB をガスシールするためのピークフレームが取り付けられていない。しかし、2章で述べた PMT モジュールに負荷をかけるためのバネや PEEK ロッド、ネジ受けは実機と同じものを使用するため、PMT モジュールの取り付け手順、及び石英に対してかかる負荷は実機の場合と同様である。



(a) プロトタイプのプリズムエンクロージャ



(b) 実機のプリズムエンクロージャ

図 3.1 プロトタイプと実機のプリズムエンクロージャ

3.1.2 オプティカルクッキーの取り付け

試作機用 PMT モジュールの製作

2章で述べた手順で試作機用の全8個のPMTモジュールを製作した。32個のPMTの配置は、QEが一様になるように決められている。各配置場所の番号付けは図3.2のように定義されている[9]。取り付けの際にPMTの配置を間違えるのを防ぐために、PMTモジュールにも1-8の番号をつける。図3.1に各配置番号に対応するMCP-PMTのIDとPMTモジュールの番号を示す。

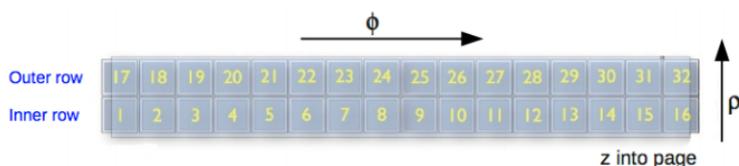


図 3.2 MCP-PMT の配置図。読み出し回路側から見た図になっている。

図 3.2 中の番号	MCP-PMT の ID	PMT モジュールの番号	図 3.2 中の番号	MCP-PMT の ID	PMT モジュールの番号
1	JT0823	1	17	JT0987	1
2	JT0975	1	18	JT0770	1
3	JT1003	2	19	JT0982	2
4	JT1035	2	20	JT0793	2
5	JT1038	3	21	JT0766	3
6	JT1034	3	22	JT1052	3
7	JT0826	4	23	JT0758	4
8	JT0810	4	24	JT0757	4
9	JT0983	5	25	JT0833	5
10	JT0768	5	26	JT0825	5
11	JT1073	6	27	JT0804	6
12	JT1076	6	28	JT0807	6
13	JT1077	7	29	JT0809	7
14	JT1081	7	30	JT0767	7
15	JT1082	8	31	JT0818	8
16	JT0822	8	32	JT0819	8

表 3.1 プロトタイプに使用した MCP-PMT の ID と PMT モジュール番号

オプティカルクッキーの取り付け

2章で述べたように光学接着の際にはオプティカルクッキーの表面に光学オイルを塗布する。前述した圧縮試験及び接着試験では、手袋をして手で直接オプティカルクッキーに光学オイルを塗布していたが、実機用のPMTモジュールを扱う上では作業性があまりよくなかった。そのため、実機量産に向けてオプティカルクッキーをPMTモジュールに取り付ける手順を確立した。実機用の光学オイルは石英と屈折率が近い

OCF446(Nye Lubricants, Inc.^{*9})を使用した。OCF446の光学的性質を表3.2に示す。

外観	無色透明
屈折率	1.4615(波長 589.3 nm)
光学吸収	$< 2 \times 10^{-4} \%$ /μm (400–750 nm)

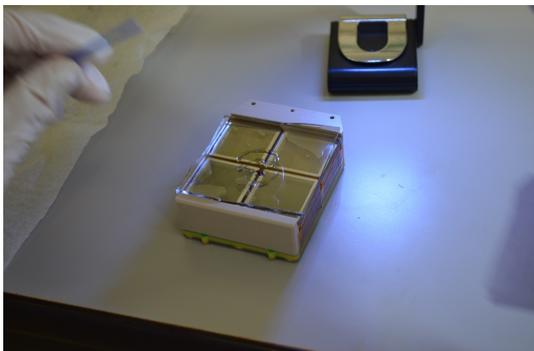
表 3.2 OCF446 の仕様

オプティカルクッキーの取り付け手順は以下の通りである。

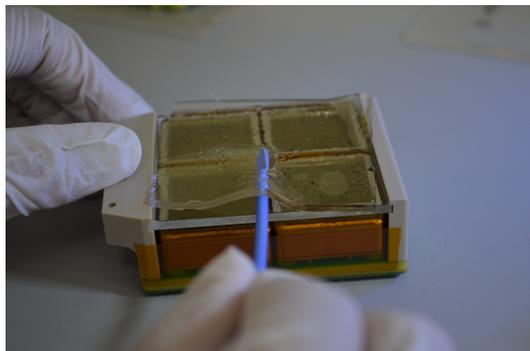
1. 波長カットフィルターに光学オイルを数滴垂らし、その上にオプティカルクッキーを設置する。図 3.3(a) がオプティカルクッキーを置いた PMT モジュールである。
2. オプティカルクッキーの表面にも光学オイルを塗り、オプティカルクッキーの位置を調整する。図 3.3(b) のようにプラスチック製のスティックを使用し、オプティカルクッキーの表面にオイルを伸ばしながら位置を調整する。
3. 図 3.3(c) のようにオプティカルクッキーと波長カットフィルターの間に入った気泡を取り除く。スティックで気泡を外側に移動させ、すべての気泡を取り除く。(図 3.3(d))

図 3.4(a) はオプティカルクッキーの取り付けが完了した PMT モジュールである。上記の手順を繰り返し、8 個のモジュールにオプティカルクッキーを取り付けた。オプティカルクッキーを取り付けた PMT モジュールは図 3.4(b) のように容器に入れ、埃などが入らないようにふたを閉めて一時的に保管する。

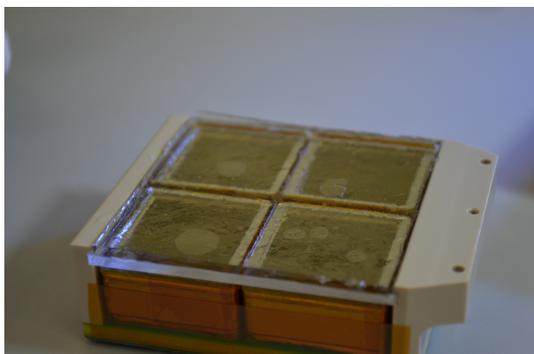
^{*9} <http://www.nyelubricants.com/>



(a) オプティカルクッキーを設置する。



(b) オプティカルクッキーの位置を調整する。

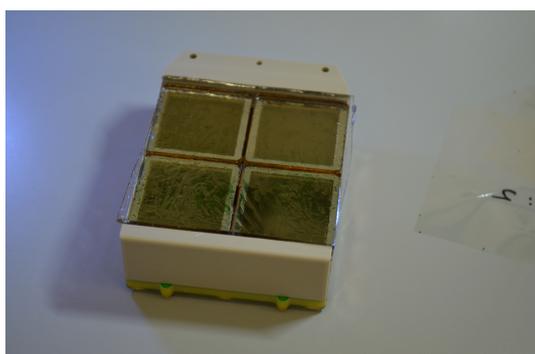


(c) オプティカルクッキーと波長カットフィルターの間に
に入った気泡。

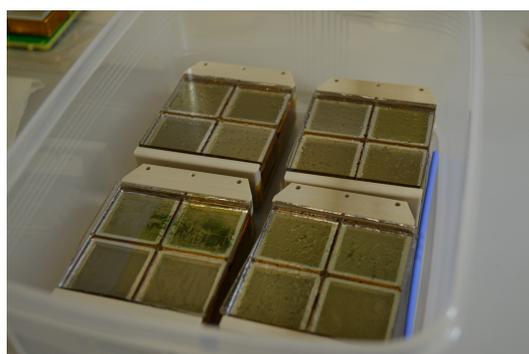


(d) スティックを使って気泡を取り除く。

図 3.3 オプティカルクッキー取り付けの手順



(a) オプティカルクッキーを取り付けた PMT モジ
ュール



(b) PMT モジュールは容器内で一時的に保管する。

図 3.4 オプティカルクッキーを取り付けた PMT モジュール

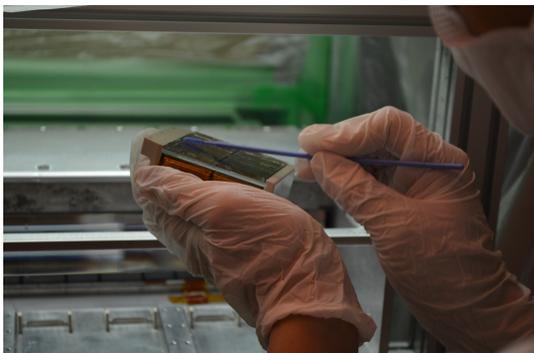
3.1.3 PMT モジュールの取り付けと接着面の確認

オプティカルクッキーを取り付けた PMT モジュールを順にプロトタイプの QBB に取り付けた。取り付け手順を以下に示す。

1. オプティカルクッキーの表面の光学オイルを伸ばし、PMT モジュールをセットする。
2. コールドプレート側のバネを押し込む。
3. 上部のネジを締める。
4. 垂直定規を使ってコールドプレートに対して垂直になるように PMT モジュールのアライメントを行う。

図 3.5 は各行程の様子である。

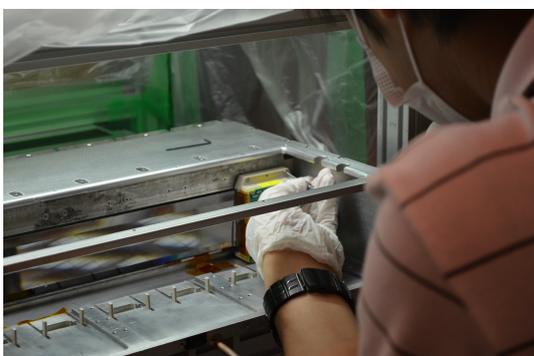
8 モジュールの取り付け後、プリズムエンクロージャの一部の部品を取り外し、プリズム越しに接着面を目視で確認した。図 3.6(a) は接着面の確認の際の模式図を表している。図の点線で囲まれた部分の部品を取り外し、矢印の位置から接着面を見ている。実際に部品を取り外したときのエンクロージャが図 3.6(b) である。また、図 3.7 が接着面の写真である。接着面の全範囲で気泡は見られず、負荷をかけた際にオプティカルクッキーが移動するといったこともないことを確認した。これにより開発してきた手法で実際に PMT アセンブリが可能であることを実証した。



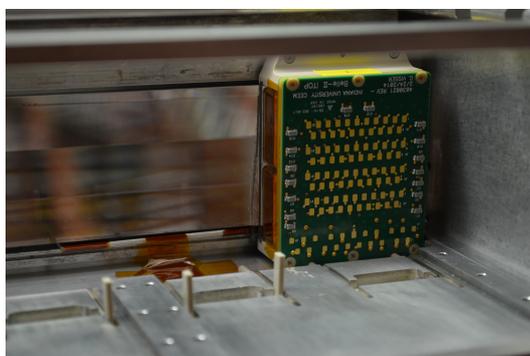
(a) オプティカルクッキー表面の光学オイルを伸ばす。



(b) 下側のバネで PMT モジュールを押し。



(c) 上部のネジと締める。



(d) 取り付けした PMT モジュール

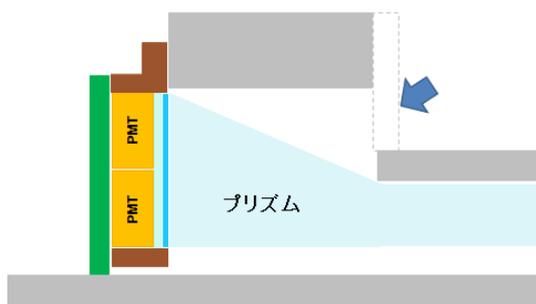


(e) PMT モジュールのアライメントの様子。



(f) 全モジュールを取り付けた後の様子。

図 3.5 プロトタイプにおける PMT アセンブリ



(a) 図中の点線部の部品を取り外し、プリズム越しに接着面の確認を行った。



(b) 実際に部品を取り外した際の様子。

図 3.6 プロトタイプにおける接着面の確認

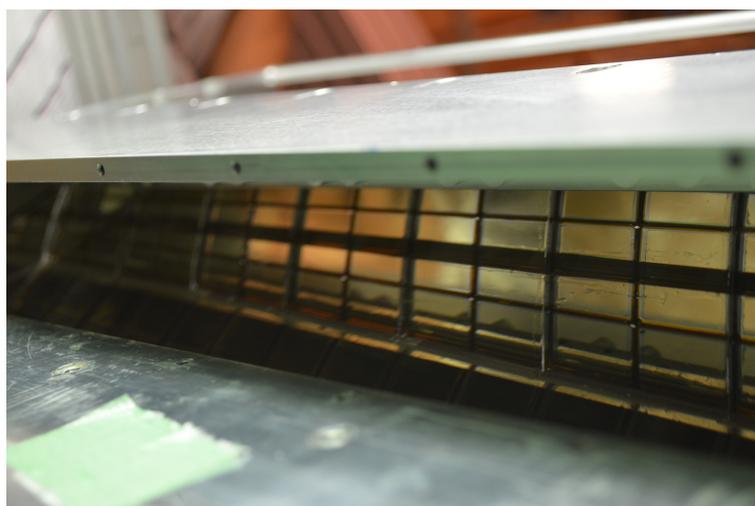


図 3.7 プロトタイプの接着面。全面にわたって気泡は見られなかった。

3.2 実機一号機における PMT アセンブリ

2014 年 10 月より実機一号機の製作を開始した。ここでは、実機一号機における PMT アセンブリについて述べる。PMT アセンブリの手法と手順はプロトタイプの場合とほぼ同じであるが、実機では目視による確認ができなため、プリズムエンクロージャに取り付けた CCD カメラを使用して接着面の確認を行う。

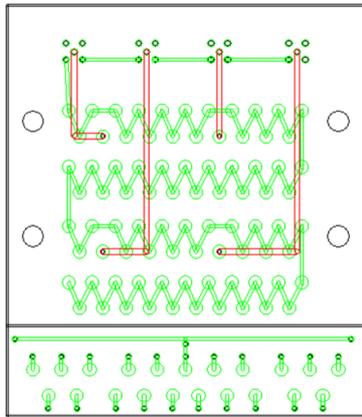
3.2.1 実機用 PMT モジュールの製作

実機一号機に使用される MCP-PMT とその配置を図 3.2 及び表 3.3 に示す。一号機の MCP-PMT は全て Conventional-MCP-PMT から選択されており、配置は QE ができるだけ一様になるように決定されている。PMT モジュールの製作手法は 2 章で述べた手法と同様である。

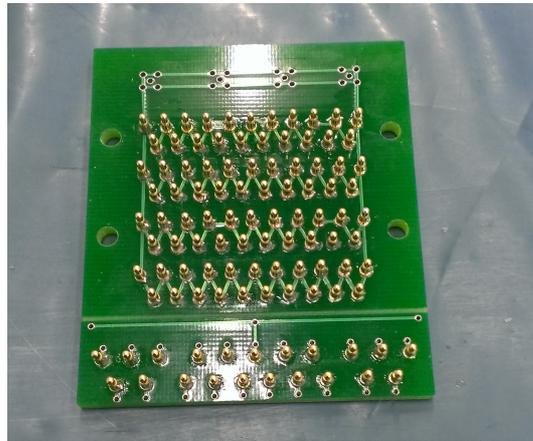
図 3.2 中の番号	MCP-PMT の ID	PMT モジュールの番号	図 3.2 中の番号	MCP-PMT の ID	PMT モジュールの番号
1	JT0775	1	17	JT0954	1
2	JT1006	1	18	JT1018	1
3	JT0671	2	19	JT1016	2
4	JT1013	2	20	JT0452	2
5	JT0485	3	21	JT0669	3
6	JT0402	3	22	JT0477	3
7	JT0482	4	23	JT0407	4
8	JT0487	4	24	JT0418	4
9	JT0343	5	25	JT0284	5
10	JT0296	5	26	JT0286	5
11	JT1020	6	27	JT0382	6
12	JT1033	6	28	JT0967	6
13	JT1012	7	29	JT1019	7
14	JT1048	7	30	JT0530	7
15	JT0702	8	31	JT0682	8
16	JT1017	8	32	JT1086	8

表 3.3 実機一号機に使用した MCP-PMT の ID と PMT モジュール番号

実機製作は KEK の富士実験棟にあるクリーンルーム内で行われる。石英輻射体の接着、QBB の組み立て、PMT モジュールのインストールはクリーンルーム内で行い、その後 PMT モジュールを取り付けた状態の TOP カウンターをクリーンルームの外に移動させて、読み出し回路のインストールを行う。クリーンルームの外に出した TOP カウンターをもう一度クリーンルームに戻すのは困難なため、実機に使用する PMT モジュールはインストール前に放電テストを行い、全モジュールが放電しないことを確認しておく必要がある。そのため、実機量産に向けて PMT モジュールの放電テストのシステムを構築した。読み出し回路のかわりに、図 3.8(a) に示すような放電テスト用の読み出し基板を設計した。PMT モジュールの各 PMT に HV を供給し、各 PMT から 1 ch 分のアナログ信号を読み出す。この基板も読み出し回路と同様に図 3.8(b) のようにポゴピンを取り付け、PMT モジュールに押し付ける構造をしている。図 3.9 に放電テストの模式図を示す。プランジャーを使って PMT モジュールに読み出し基板を押し付ける。読み出し基板には HV ディバイダーを通して、高圧電源から HV を供給する。各 PMT に標準電圧を印加し、オシロスコープで PMT のアナログ信号を確認して放電しないことを確かめる。図 3.10 が実際に組み上がった放電テストのセットアップである。このセットアップで 8 モジュールの放電テストを行い、全てのモジュールで放電が起こらないことを確認した。



(a) 放電テスト用の読み出し基板の設計図



(b) 実際の読み出し基板の写真

図 3.8 放電テスト用の読み出し基板

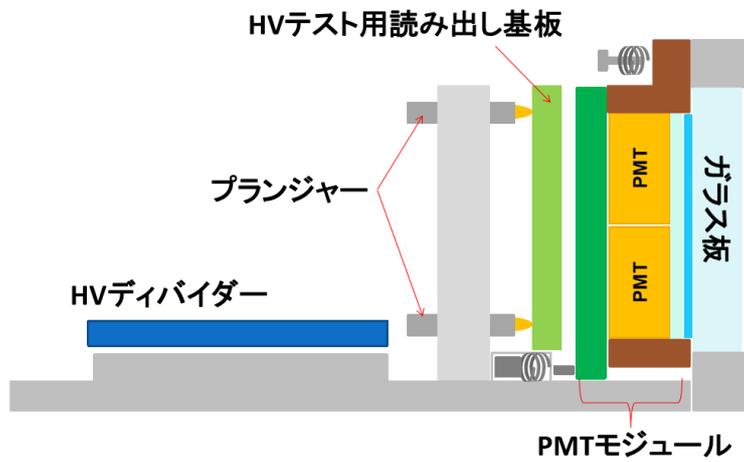


図 3.9 放電チェックの模式図。プランジャーを使って読み出し基板を PMT モジュールに押し付ける。

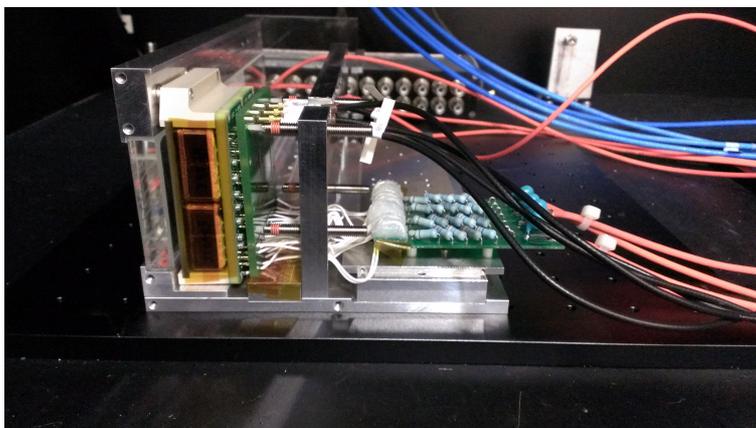


図 3.10 放電テストのセットアップ。放電テストは暗箱内で行う。

3.2.2 実機での PMT モジュールの取り付け

PMT モジュールの取り付け手順はプロトタイプの場合と同様である。前述したように、実機はプロトタイプよりもアクセスウィンドウが狭いデザインになっているが、図 3.11 のように取り付けは問題なく完了した。全モジュールを取り付けたときの写真が図 3.12 である。プロトタイプと同様に垂直定規を使って PMT モジュールのアライメントをしている。



図 3.11 実機における PMT アセンブリの様子。プロトタイプよりもアクセスウィンドウが狭いが、取り付け作業は問題なく完了した。

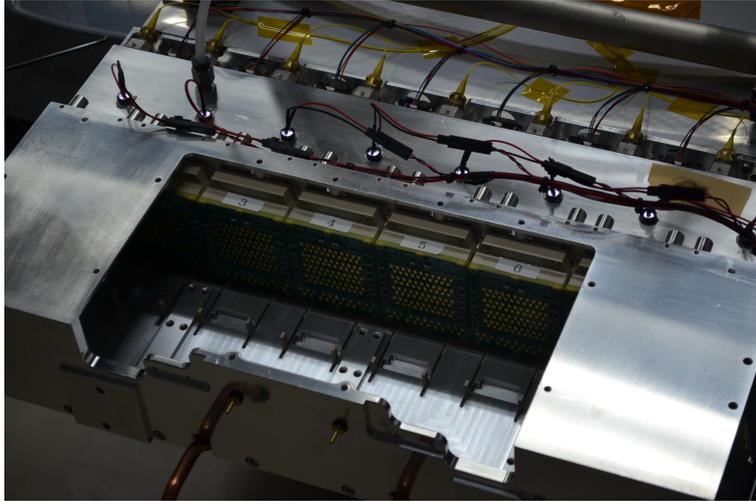


図 3.12 PMT モジュール取り付け後の様子

3.2.3 CCD カメラによる接着面の確認

実機では QBB のデザイン上目視で接着面を確認することができないため、プリズムエンクロージャに CCD カメラを取り付けて接着面の確認を行う。CCD カメラは、図 3.13 に示す Mini CMOS Color Camera Series 20B45M(Videology Imaging Solutions, Inc.^{*10}) を使用する。プリズムエンクロージャには図 3.14 に示すように、全部で 8 個の CCD カメラと光源となる LED ライトを取り付け、プリズム越しに接着面の映像を撮影する。CCD カメラの映像は AP-608 8 Channel H.264 Triplex DVR(ApexCCTV^{*11}) で読み出す。これにより 8 チャンネルの映像をリアルタイムで確認でき、また 8 チャンネル同時に録画することもできる。図 3.15 は接着面を撮影した CCD カメラの映像の一例である。PMT モジュールに負荷をかけておらず、気泡が入っているとき (a) と、負荷をかけ、気泡がなくなったとき (b) の比較である。このように撮影した映像から気泡を判別することができる。



図 3.13 CCD カメラ

^{*10} <http://www.videologyinc.com/>

^{*11} <http://www.apexcctv.com/>

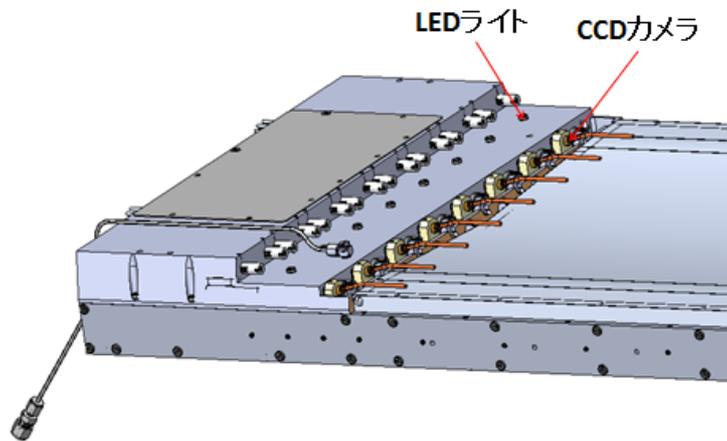
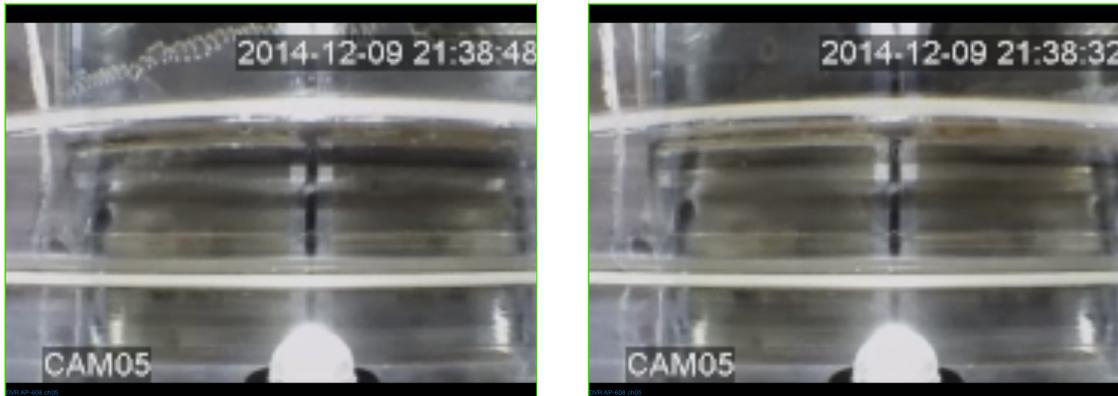


図 3.14 CCD カメラの設置位置



(a) 気泡がある場合

(b) 気泡がない場合

図 3.15 接着面の気泡の識別

CCD カメラの視野確認

CCD カメラは各 PMT モジュールの接着面が確認できる位置に取り付けられている。図 3.15 に示したような映像が接着面をどのように写しているのかを示したのが図 3.16 である。図 3.16(a) のように、PMT の位置に番号を書いた紙を透明のフィルターに挟み、波長カットフィルターとオプティカルクッキーの間に挿入した PMT モジュールを用意し、接着面の映像を撮影した。図 3.16(b) がその映像であり、接着面のほぼ全体を見ることができている。3.16(b) の各色で囲まれた領域は、図 3.16(c) 中の同色の矢印で示された光路で CCD カメラの視野に入った映像である。赤色の実線で囲まれた範囲はプリズム表面で屈折した映像である。青色の実線で囲まれた範囲はプリズムの底面で一回反射した後プリズムで屈折した映像、緑色の実線で囲まれた範囲

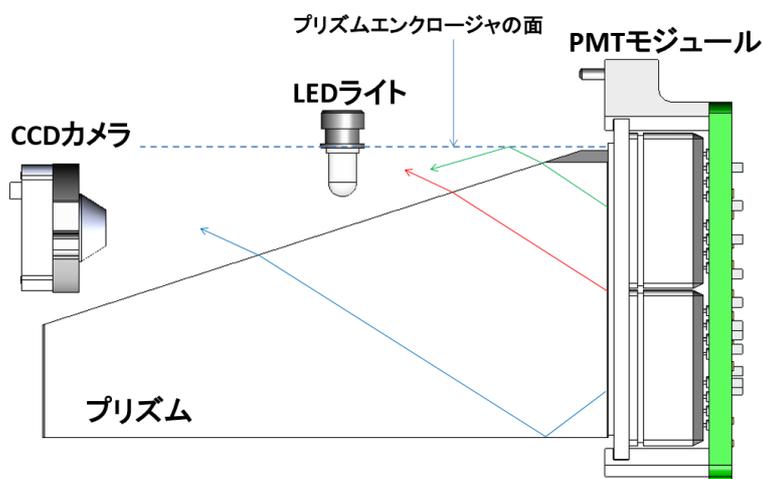
はプリズムで屈折した後プリズムエンクロージャの表面で反射した映像である。プリズムによる屈折を考慮すると、カメラの角度調整などによりこれ以上広い視野を確保することは難しい。



(a) 視野範囲確認のための PMT モジュール。



(b) CCD カメラの映像



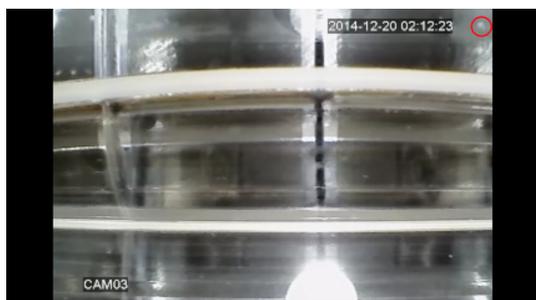
(c) プリズムでの屈折

図 3.16 CCD カメラの視野確認

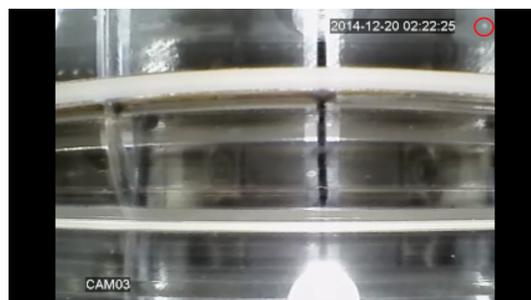
全モジュール取り付け後の接着面の確認

図 3.17(a)–図 3.17(d) は PMT モジュールを取り付けた後の接着面の経過の一例である。図 3.17(a) で赤い丸で囲ってある部分の気泡が次第に小さくなっていき、約 30 分で目視で確認できない大きさになっていることがわかる。図 3.18 は、気泡が完全になくなったときの全 CCD カメラの映像である。数か所気泡と紛らわ

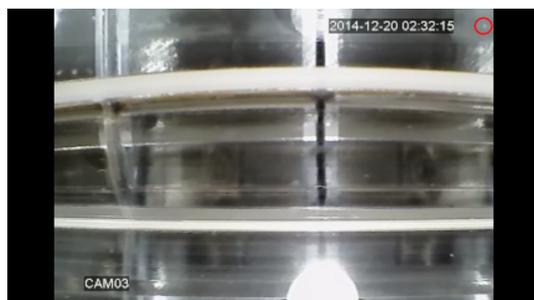
しい白い点が見られるが、これらは光の反射であることを確認している。これにより実機でも接着面に気泡を残さない接着に成功した。実機においても、設計値である 1.5 kgf/PMT の負荷で接着面に気泡を残さずに接着できることを確かめ、これから続けられていく TOP カウンターの実機量産が可能であることを実証した。



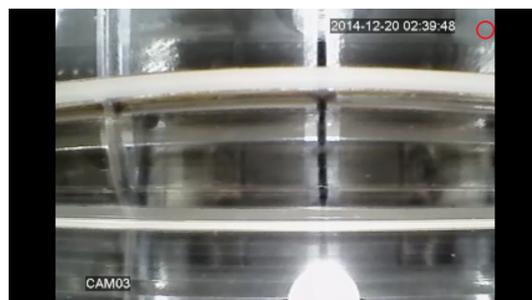
(a) 接着直後



(b) 約 10 分後



(c) 約 20 分後



(d) 約 30 分後

図 3.17 接着面の気泡が抜けていく様子



(a) CCD カメラ 1



(b) CCD カメラ 2



(c) CCD カメラ 3



(d) CCD カメラ 4



(e) CCD カメラ 5



(f) CCD カメラ 6



(g) CCD カメラ 7



(h) CCD カメラ 8

第4章 結論

本研究では Belle II TOP カウンターの実機量産に向けての課題であった PMT アセンブリ手法の開発を行った。TOP カウンターでは、目指す識別性能を達成するために、石英輻射体内で発生したチェレンコフ光子の 80 % 以上が MCP-PMT に到達することが要求される。また、MCP-PMT の寿命の問題から実験期間中に PMT の交換が必要になる。これらの要求から、TOP カウンターにおける PMT アセンブリでは以下の 2 点が重要となる。

- PMT と石英輻射体の接着面に気泡が残らない。
- PMT が着脱可能である。

この 2 つの要求を満たす PMT アセンブリ手法を確立するために、シリコンゴムを使ったアセンブリ手法を考案した。シリコンゴムで作製したオプティカルクッキーを PMT と石英輻射体の間に挿入し、PMT を石英に対して約 1.5 kgf/PMT 以下の構造上安全な負荷で押し付けることで光学接着する。

手法の開発に伴い、以下に挙げる 3 点が必要であった。

1. ガンマ線耐性、光学特性の観点から使用するシリコンゴムを選定し、1.5 kgf/PMT の負荷で気泡を残さず接着するための仕様を決定する。
2. PMT の入射窓のアライメントを保ったまま負荷を加えるための構造体である PMT モジュールの製作手法を確立する。PMT の交換を考慮して、PMT モジュールはのちに分解できる必要がある。
3. プロトタイプと実機一号機で実際に PMT アセンブリを行い、実際に開発した手法で PMT アセンブリが可能であることを実証する。

以下にそれぞれの項目の結果をまとめる。

(1) オプティカルクッキーの開発

候補となるシリコンゴムが Belle II 実験の環境下で使用可能かを調べるために、ガンマ線照射試験を行い、10 年の実験期間で予想される照射量 100 Gy 及びその 10 倍の 1000 Gy を照射した。波長領域 350–650 nm における透過率の低下は最大で約 $1 \pm 1.1\%$ であり、透過率の低下が 8.2 % 以下という要求を十分に満たすことを確かめた。

このシリコンゴムを使って作製したオプティカルクッキーに対して、万能試験機による圧縮試験を行い、目標値である約 1.5 kgf/PMT 以下の負荷で接着面に気泡を残さずに接着するための硬度、形状、接着手法を調べた。接着に必要な負荷を減らすためにはシリコンゴムの硬度を減らすことと、接着時に光学オイルを使用することが有効であることを明らかにし、1.5 kgf/PMT の負荷で接着するためのオプティカルクッキーの仕様と接着手法を決定した。

(2) PMT モジュールの製作

PMT のアライメントを保つための PMT モジュールの製作手法を開発した。PMT のアライメントのために真空チャックを設計し、約 100 μm の精度で PMT の入射窓のアライメントを可能にした。製作手法と同時に分解手法も確立し、Belle II 実験期間中に交換が必要な PMT のみを取り換えることができることを実証

した。また、PMT モジュールを使って磁場内での接着テストを行い、1.5 T の磁場中でもオプティカルクッキーと PMT モジュールによる光学接着が可能であることを実証した。

(3) プロトタイプ及び実機一号機での PMT アセンブリ

オプティカルクッキーと PMT モジュールを使用して実際に実機とほぼ同じ構造のプロトタイプで PMT アセンブリを行った。接着面を目視で確認し、接着面に気泡がないことを確認した。1.5 kgf/PMT の負荷で気泡を残さずに接着できることを実証した。

プロトタイプと同様の手法で実機一号機においても PMT アセンブリを行った。接着面の確認にはプリズムエンクロージャに取り付けられた CCD カメラを使用し、実機でも接着面に気泡がないことを確認した。実機においても 1.5 kgf/PMT の負荷で接着面に気泡をのこさずに接着可能であることを実証し、これから続けられていく実機量産を可能にした。

本研究により、1.5 kgf/PMT 以下の負荷で接着面に気泡を残さずに接着でき、かつ PMT が着脱可能な PMT アセンブリ手法を確立した。この手法の確立により、PMT に到達する光子の割合が 80 % 以上という要求を十分に満たす PMT アセンブリを可能にした。かつ、Belle II 実験期間中に PMT の交換が可能であることも実証し、10 年間の Belle II 実験を通して TOP カウンターが要求される識別性能を発揮することを可能にした。

謝辞

本研究を行うにあたり、飯嶋徹教授、居波賢二准教授をはじめとする研究室の皆様大変お世話になりました。特に、指導教官である居波准教授には、研究を行う上で終始丁寧且つ適切なご指導をいただきました。心より感謝致します。早川知克研究員には KEK で研究を行うにあたり様々な面で大変お世話になりました。また、研究室以外にも、KEK の高力孝氏、PNNL の B.D.Grassgow 氏には技術者としての立場から多大なご協力をいただきました。

多くの方々のご協力をいただいて、本研究を行うことができました。皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 飯嶋徹, 中山浩幸, 後田裕, 「Belle II 実験」, 高エネルギーニュース Vol.29 No.4
- [2] 古賀裕介, 「Belle II 実験 TOP カウンター実機の光学性能評価」, 修士論文, 2012
- [3] 有田義宣, 「Belle II 実験 TOP カウンターの実機仕様決定に向けた光検出器の改良と K/π 識別性能評価」, 修士論文, 2011
- [4] T.Abe *et al.*, "Belle II Technical Design Report", KEK Report 2010-1, arXiv:1011.0352(2010).
- [5] K.Inami, "B-PID performance", Belle II PID upgrade meeting, 11th November 2011.
- [6] K.Matsuoka, "Development of the TOP counter for the Belle II experiment", KMI Topics(2014).
- [7] 柳田陽子, 「J-PARC KOTO 実験 CsI カロリメータのための光学接続シリコンの製作と長期安定性の評価」, 修士論文, 2012
- [8] Tara Nanut, "TOP beam background", 19th B2GM
- [9] M.Barrett, "The TOP Numbering Scheme version 1.0", Belle II Internal Note, 0026.