

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

名古屋大学理学研究科
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

学籍番号: 261501096

大森雷太

2018/01/18

概要

Belle II 実験は電子・陽電子を衝突させて B 中間子対を生成し、その終状態の精密測定から新物理の観測・解析を行う。Belle II 実験では前身の Belle 実験の 50 倍となる 50 ab^{-1} のデータを収集する。B 中間子の精密測定にはその崩壊過程に含まれる K 中間子と π 中間子の識別が重要となる。我々は新型粒子識別装置 TOP (Time Of Propagation) カウンターを開発・導入し、運動量 $3 \text{ GeV}/c$ 以上の K/ π 中間子に対して 95 %以上の識別効率と、5 %以下の誤識別率を目指す。

TOP カウンターは粒子ごとのチェレンコフ光の放出角の違いによる、光子検出時間差を利用した粒子識別装置である。その構造は、TOP カウンターの大部分を占めるチェレンコフ光を伝搬する石英輻射体と、その片側の端面に取り付けられる角形光検出器 MCP (Micro Channel Plate) -PMT からなる。MCP-PMT は 4 個を 1 組の PMT モジュールとして組み上げて TOP カウンターに導入される。K/ π 中間子の光子検出時間差は $O(100 \text{ ps})$ であり、光子検出時間のわずかなズレが識別効率に大きな影響を与える。TOP カウンターの性能は石英輻射体での光子伝搬時間と、光検出器の光子検出数によって決まる。私はこの 2 点に対して機械的側面から研究を行い、TOP カウンターに要求される性能の実現にむけて成果を上げた。

光子伝搬時間に影響を与える機械的要因として、TOP カウンターの歪みがあげられる。TOP カウンターが歪むと内部の石英輻射体が歪んでしまい、チェレンコフ光の伝搬光路に変化が生じるため光子検出時間や検出するチャンネルに狂いが生じ、正確な粒子識別ができなくなる。これを防ぐために我々は TOP カウンターの製造時から Belle II 検出器へのインストール後まで、TOP カウンターが歪まないように細心の注意を払った。TOP カウンターの変形を防ぐために、支持構造体を TOP カウンターに取り付け、さらにベッセル点という物体の歪みが最小になる 2 点で支持しながらインストールできるように、専用の治具を設計、製作した。特に私は TOP カウンターの Belle II 検出器へのインストール開始から終了までの歪みの変化をストレインゲージとダイヤルゲージを用いてリアルタイムでの測定を行い、光子検出に影響を与えるような歪みがないことを確認した。インストール後の TOP カウンターは両端で Belle II 検出器に固定されるほか、両脇で両隣の TOP カウンターと連結され、自重での変形を防ぐ。

Belle II 検出器へのインストール後に磁場中での TOP カウンターの動作試験を行ったところ、TOP カウンター内部で MCP-PMT が磁場の影響を受けて回転してしまい、光子検出が数%低下している領域があることが確認された。これを防ぐために PMT モジュールの補修が予定されたが、MCP-PMT の個数や補修が可能な期間の短さから迅速かつ確実な手段が求められた。私はダミーの MCP-PMT を用いた PMT モジュールを作成し、MCP-PMT を PMT モジュールの中でより強固に固定する手段を模索した。それらの PMT モジュールに対して長期に負荷をかける試験や Belle II 実験の時と同様の磁場をかける試験を行い、MCP-PMT の磁場中での回転を防ぐ手法を確立した。

本研究により、TOP カウンターの粒子識別の識別効率を下げる機械的要因を実験開始前に取り除くことができた。この成果は TOP カウンターが目指す識別効率を実現することにつながる。

目次

| | | |
|----------|-------------------------------|-----------|
| 1 | Belle II 実験と TOP カウンター | 7 |
| 1.1 | SuperKEKB と Belle II 実験 | 7 |
| 1.2 | Belle II 検出器 | 8 |
| 1.3 | TOP カウンター | 10 |
| 1.3.1 | TOP カウンターの原理 | 10 |
| 1.3.2 | TOP カウンターの構造 | 12 |
| 1.3.3 | MCP-PMT | 14 |
| 1.4 | 本研究の目的 | 17 |
| 2 | TOP カウンターのインストール | 19 |
| 3 | TOP カウンターの歪み測定 | 23 |
| 3.1 | TOP カウンターの歪みと対処 | 23 |
| 3.2 | ストレインゲージ | 23 |
| 3.3 | ダイヤルゲージ | 26 |
| 3.4 | インストール時の歪み測定 | 27 |
| 3.5 | TOP カウンター連結時の歪み測定 | 32 |
| 3.6 | ストロングバック取り外し時の歪み測定 | 35 |
| 4 | 磁場中での MCP-PMT の回転と対処 | 39 |
| 4.1 | PMT モジュールの回転 | 39 |
| 4.2 | PMT モジュール内での MCP-PMT の回転 | 40 |
| 4.2.1 | PMT の真空破れへの機械的考察 | 41 |
| 4.2.2 | シム方式での PMT の固定 | 48 |
| 4.2.3 | Cure in place 方式での PMT の固定 | 53 |
| 4.3 | 長期試験 | 55 |
| 4.4 | 磁場試験 | 58 |
| 5 | 結論 | 60 |

表目次

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 3.1 | インストール時のアクションナンバー対応表 | 30 |
| 4.1 | PMT モジュールの高さの比較 | 51 |
| 4.2 | 長期試験を行った MCP-PMT | 57 |

目次

| | | |
|------|---------------------------------------|----|
| 1.1 | SuperKEKB/Belle II 検出器 | 8 |
| 1.2 | Belle/Belle II 検出器 | 10 |
| 1.3 | TOP カウンターの粒子識別原理 | 12 |
| 1.4 | TOP カウンターの構造 | 13 |
| 1.5 | TOP カウンターの石英輻射体の構造 | 14 |
| 1.6 | MCP-PMT の外観 | 15 |
| 1.7 | シリコンポッティング | 16 |
| 1.8 | MCP の構造 | 16 |
| 1.9 | MCP-PMT の内部構造の模式図 | 16 |
| 1.10 | PMT モジュールの模式図 | 17 |
| 1.11 | PMT モジュールの固定方法 | 17 |
| 2.1 | TOP カウンターのインストール治具 | 20 |
| 2.2 | ベッセル点支持と両端支持の歪みの差 | 20 |
| 2.3 | インストールの様子1 | 21 |
| 2.4 | インストールの様子2 | 21 |
| 2.5 | インストールの様子3 | 22 |
| 2.6 | インストールの様子4 | 22 |
| 3.1 | ストレインゲージ | 24 |
| 3.2 | 2ゲージ法 | 25 |
| 3.3 | ストレインゲージの回路模式図 | 25 |
| 3.4 | ストレインゲージの設置 | 25 |
| 3.5 | ストレインゲージのキャリブレーション | 26 |
| 3.6 | Portable Pipe Gauge(PPG) の概略図 | 27 |
| 3.7 | Fixed Pipe Gauge(FPG) の正面図 | 27 |
| 3.8 | モジュールのインストール先と歪みの方向 | 30 |
| 3.9 | ストレインゲージでの測定結果 | 31 |
| 3.10 | PPG とストレインゲージの結果比較 | 32 |
| 3.11 | z-beam の取り付け位置と PPG と FPG の取り付け位置 | 33 |
| 3.12 | z-beam 取り付け時の PPG による歪み測定結果 | 34 |
| 3.13 | z-beam 取り付け時の FPG による歪み測定結果 | 35 |
| 3.14 | ストロングバック取り外し時の PPG による歪み測定結果 | 36 |
| 3.15 | ストロングバック取り外し時の FPG とストレインゲージによる歪み測定結果 | 37 |
| 3.16 | ストロングバック取り外し後の FPG とストレインゲージによる歪み測定結果 | 38 |
| 4.1 | PMT モジュールの回転 | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.2 | 初回の磁場動作試験でのレーザーデータ | 40 |
| 4.3 | 磁場動作試験前後の CCD カメラの様子 | 40 |
| 4.4 | 動作試験中の CCD カメラの様子 | 41 |
| 4.5 | PMT の回転 | 41 |
| 4.6 | MCP-PMT ピン周りの真空の模式図 | 42 |
| 4.7 | MCP-PMT のピンだけに負荷をかける | 43 |
| 4.8 | MCP-PMT のピンだけに負荷をかけるテストに使用したソケット | 43 |
| 4.9 | 万能試験機での MCP-PMT のピンだけに負荷をかけるテスト | 44 |
| 4.10 | 負荷をかけたピンの位置と番号 | 44 |
| 4.11 | 万能試験機でピンだけに負荷をかけた結果 | 45 |
| 4.12 | MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかける | 46 |
| 4.13 | MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけるためのボルト | 46 |
| 4.14 | MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけるテスト | 47 |
| 4.15 | ピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけた結果 | 47 |
| 4.16 | 試験後のシリコンポッティングの様子 | 48 |
| 4.17 | シム EPDM | 50 |
| 4.18 | シムガラスエポキシ | 50 |
| 4.19 | 短期破壊試験用の金具 | 50 |
| 4.20 | 短期破壊試験 | 51 |
| 4.21 | シム圧縮試験 | 52 |
| 4.22 | シリコンポッティング圧縮試験 | 53 |
| 4.23 | ディスペンサーを使ってシリコンを流し込む | 54 |
| 4.24 | フロントボードと PMT の隙間にシリコンを流し込んだ PMT モジュール | 55 |
| 4.25 | 長期試験概略図 | 56 |
| 4.26 | 長期試験セットアップ 1 | 56 |
| 4.27 | 長期試験セットアップ 2 | 57 |
| 4.28 | 長期試験結果 | 57 |
| 4.29 | 磁場試験結果 | 59 |

1 Belle II 実験と TOP カウンター

1.1 SuperKEKB と Belle II 実験

現在の素粒子物理学において、標準理論はこれまでに観測された実験結果をニュートリノ振動を除いてすべて説明できる理論である。しかしながら、相互作用の統一化がされていない、重力の量子化ができていない、階層構造の問題、物質優勢の宇宙の説明等、標準理論では説明できない謎も残っている。これらの問題を解決するためには標準理論を超えた新しい理論が必要であり、例として超対称性粒子や余剰次元の存在等が考えられているが、どれも TeV のエネルギースケールに新しい物理法則があると考えられている。そのため今後の素粒子物理学では TeV 領域での物理の観測・解析が最重要課題となる。

TeV 領域の物理を実験的に見るには、TeV 領域まで粒子を加速させて衝突させること新粒子を作り直接測定するエネルギーフロンティア方面と、低いエネルギー領域での崩壊過程や終状態を精密に測定して新粒子の寄与を間接的に測定する高輝度フロンティア方面の 2 つのアプローチがある。間接測定では、標準理論の予測からのズレを新粒子の寄与として観測する。このため、直接測定では届かないエネルギー領域に対しても感度を持つことができる。

本小節で記述する Belle II 実験は間接測定の代表格であり、TeV 領域の新物理に感度が高い B 中間子の稀崩壊から精密測定を行う。大量の B 中間子のデータを集めるために、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子陽電子衝突型加速器 SuperKEKB (図 1.1 左) を用いる。

SuperKEKB 加速器は周長が約 3 km の円形加速器で、電子 7 GeV と陽電子 4 GeV を重心系エネルギー $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ で衝突させる。この $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ というエネルギーは、ボトムクォークと反ボトムクォークの束縛状態の一つである $\Upsilon(4S)$ の質量と一致しており、この $\Upsilon(4S)$ から B 中間子と反 B 中間子が生成される。SuperKEKB 加速器は、前身の KEKB 加速器の約 40 倍になるピークルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指して設計されており、 50 ab^{-1} のデータを収集する。衝突時の粒子の飛跡、運動量、エネルギーの測定は、電子と陽電子の衝突点におかれた Belle II 検出器で行う [1]。

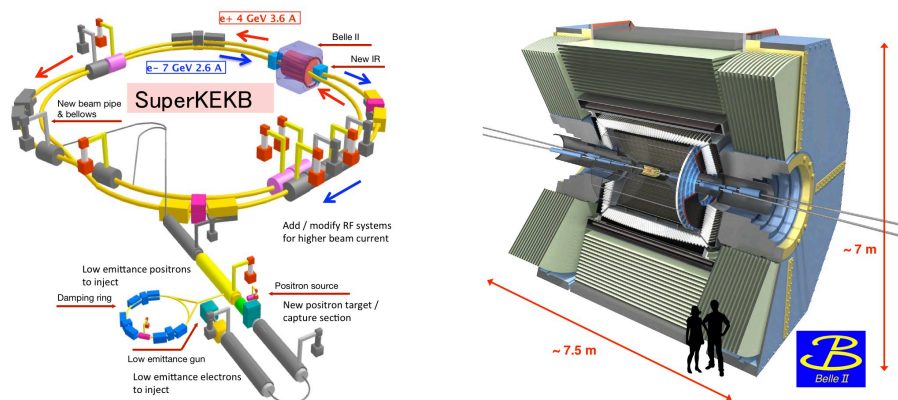


図 1.1: SuperKEKB/Belle II 検出器

1.2 Belle II 検出器

Belle II 検出器 [2] は円筒型検出器であり、外装である鉄ヨークは前身の Belle 検出器と同じものが使われるほか、基本的な構造も Belle 検出器と変わらない。

検出器には、円筒の側面に当たるバレル部分に内側から崩壊点検出器 (PXD、SVD)、中央ドリフトチェンバー (CDC)、TOP カウンター (TOP)、電磁カロリメータ (ECL)、KLM 検出器 (KLM) が設置され、円筒の蓋に当たるエンドキャップ部分にエアロジェル検出器 (A-RICH)、電磁カロリメータ (ECL)、KLM 検出器 (KLM) が設置されている (図 1.2)。

以下に各検出器について簡単に記述する。

- ピクセル検出器 (PXD)

バレル部分の最も内側に設置される、B 中間子の崩壊点を測定する 2 層からなる検出器。Belle 実験ではストリップシリコン検出器 (SVD) が崩壊点を検出していたが、Belle II 検出器では最内層の検出器の設置位置が Belle 検出器の衝突点から 30mm と比べて 14mm へと近づくことと、Belle II 実験になり生成されるビームバックグラウンドが増加することから、ストリップ型の検出器である SVD では粒子の誤識別が増え正確な飛跡検出ができなくなる。そこでストリップ型の検出器より位置分解能に優れるピクセル型の検出器である PXD が、Belle II 検出器へのアップグレードに伴い新しく導入されることとなった。

- ストリップシリコン検出器 (SVD)

PXDの外側に設置される4層からなる崩壊点検出器。センサーを長く配列したラダーと呼ばれる構造対から構成されている。後述する中央飛跡検出器(CDC)の内径が大きくなったことにより、Belle検出器のSVDよりも大型化がなされている。PXDでのバックグラウンドを排除する役目も持つ。PXDと合わせて運動量が数 $10MeV/c$ の粒子の飛跡検出も可能となる。 K_S 中間子のほとんどはPXDの外側で崩壊するため、SVDは K_S の崩壊点検出に用いることもできる。

- 中央飛跡検出器 (CDC)

SVDの外側に設置される内径160mm、外形1130mmの円筒型のドリフトチェンバーで、全56層からなりビーム軸方向に14336本のセンスワイヤーが張られている。また最内層では8層、それ以降は6層ごとに約 $50mrad$ の傾きがつけられており、ビーム軸方向にも分解能をもたせてある。主に荷電粒子の飛跡検出や、磁場中での粒子の曲がり具合から運動量測定を行う。またCDCで得られた信号はBelle II実験全体のトリガー信号としても用いられる。

- TOPカウンター (TOP)

CDCの外側に設置されるリングイメージ型チェレンコフ検出器。従来のチェレンコフ検出器と違い、入射した荷電粒子が放出するチェレンコフ光を内部で伝搬させてリングイメージを再構成して K/π 中間子の識別を行う検出器で、チェレンコフ光の伝搬時間の差も利用できる。詳細を1.3章で説明する。

- エアロジェル検出器 (A-RICH)

エンドキャップ部分に設置されるリングイメージ型チェレンコフ検出器。TOPカウンターを通過しない K/π 中間子の識別を行う。輻射体にエアロジェルを用いており、そこを通過した荷電粒子が出すチェレンコフ光をHAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) でリング全体で検出する。検出したチェレンコフリングの半径と、荷電粒子がエアロジェルを通過した位置からHAPDまでの距離から、チェレンコフ光の放出角を測定する。チェレンコフ光の放出角からは粒子の速度が求められるので、CDCでの運動量測定と合わせて粒子の質量がわかり、粒子識別が行える。

- 電磁カロリメータ (ECL)

バレル部分およびエンドキャップ部分に設置される、電子や光子のエネルギー測定を行う検出器。バレル部分にはBelle検出器のECLで使用したタリウム活性化ヨウ化セシウム ($CsI(Tl)$) シンチレータをそのまま使用する。ただしBelle II実験でのバックグラウンド増加により、 $CsI(Tl)$ のもつ減衰時間 $1\mu s$ の間に生じるエネルギー損失と1チャンネルあたりのノイズが同程度となり分離が困難となる。そのためBelle II実験では出力波形の読み出しとフィットを行い、信号パルスのタイミングを求める。

- KLM 検出器 (KLM)

1.5 T 超電導ソレノイドの外側に設置されている、 K_L 中間子と μ 中間子の識別を行う検出器。鉄板と検出器が交互に重ねられたサンドイッチ構造をしており、鉄板は超電導ソレノイドが作る磁場のリターンヨークの役目を果たす。Belle 検出器の KLM では RPC (Resistive Plate Chamber) が用いられ、通過した荷電粒子による RPC の電荷の放電から粒子の通過位置の測定が行われていた。しかし RPC は放電してから再び測定が可能となるまでに復帰時間が約 2 秒必要であるため、バックグラウンドの増加する Belle II 実験ではその一部がシンチレータに交換された。

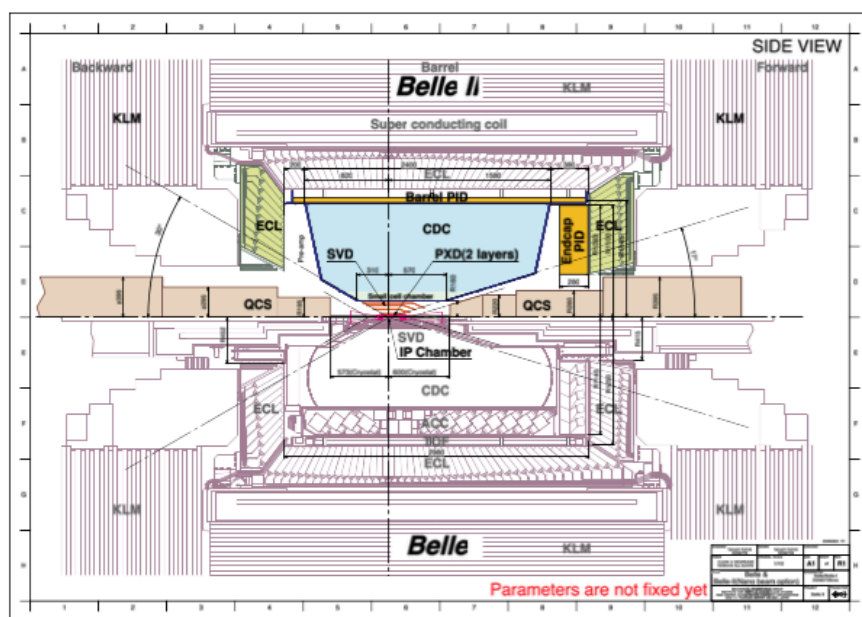


図 1.2: Belle/Belle II 検出器。上半分が Belle II 検出器の断面図、下半分が Belle 検出器の断面図となっている。

1.3 TOP カウンター

1.3.1 TOP カウンターの原理

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。物質中の光速を超える速度で検出器を通過した荷電粒子が放出するチェレンコフ光を輻射体内部を全反射さ

せて伝搬し、取り付けられた光検出器で検出して粒子の識別を行う。TOP カウンターを導入することで、運動量 3 GeV/c 以上の K/π 中間子に対して 95 %以上の識別効率と、5 %以下の誤識別率を目指す。

チェレンコフ光の放出角度 θ_c は、粒子の入射速度 β と輻射体の屈折率 n から

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

と表せる。

また、入射した粒子の運動量 p と速度 β との関係から、入射した粒子の質量 m を

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

と表すことができる。

TOP カウンターは検出器を通過した荷電粒子が放出したチェレンコフ光の放出角 θ_c を、チェレンコフ光のリングイメージを再構成することで求めることができる。また、入射した粒子の運動量 p は飛跡検出器 CDC を用いて求めることができる。これらから入射した粒子の質量 m を導くことができるので、粒子の識別が可能となる。

TOP カウンターの識別性能は、TOP カウンターの時間分解能 δ_{TOP} と、電子と陽電子の衝突から生成された粒子が TOP カウンターに入射するまでの時間 ΔTOF 、放出されたチェレンコフ光が光検出器に到達するまでの時間 ΔTOP と検出光子数 N を用いて近似的に次式のように表せる。

$$S = \frac{\Delta TOF + \Delta TOP}{\delta_{TOP}} \sqrt{N} \quad (3)$$

この式から TOP カウンターの粒子識別には、時間分解能と検出光子数が重要であることがわかる。

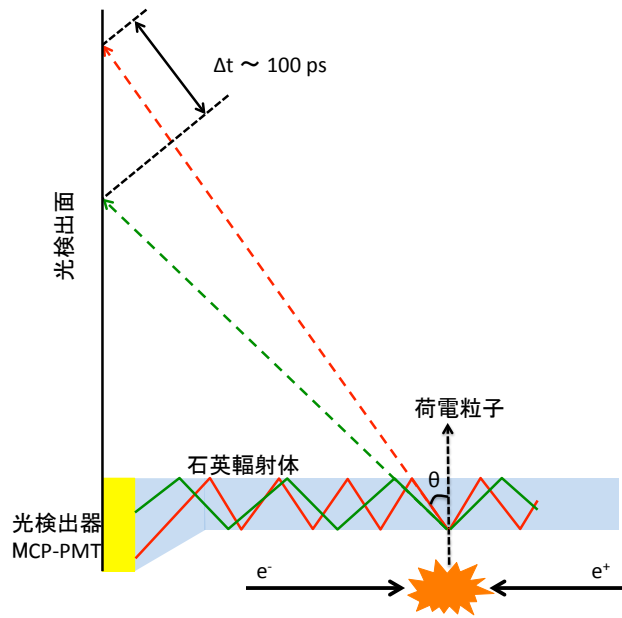


図 1.3: TOP カウンターの粒子識別原理

1.3.2 TOP カウンターの構造

TOP カウンターの構造は大まかに区分して、チェレンコフ光を伝搬する石英輻射体、光検出器 MCP-PMT とその読み出し機器、TOP カウンターの筐体となる Quart Bar Box (QBB) の 3 つの要素からなる (図 1.4)。

このうち TOP カウンターの構造の大部分を占める全長 2700 mm の石英輻射体は、1250 mm × 450 mm の石英板 2 枚と、その両端に取り付けられたプリズム、集光ミラーから構成されている (図 1.5)。これらは光学接着によって接着され、放出されたチェレンコフ光はこの輻射体内部で全反射を繰り返し、一方の端面に取り付けられた光検出器へと伝搬される。光検出器が取り付けられている側に取り付けられたプリズムは、伝搬されたチェレンコフ光を y 方向に拡大することで y 方向の分解能を向上させる役割を持っている。もう一方の端に取り付けられた集光ミラーは、伝搬距離の増加に伴う波長分散を抑える働きをする。

チェレンコフ光のリングイメージを正しく再構成するためには、できるだけ多くの光子を検出し、かつチェレンコフ光を伝搬する際にリングイメージが歪まないように注意する必要がある。そのために石英輻射体には以下の性能が要求される。

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

また、光学接着の際には以下の精度が求められる。

- 相対位置 ($\Delta x, \Delta y$) : $\leq 100 \mu\text{m}$
- 相対角度 ($\Delta\theta$) : $\leq 0.2 \text{ mrad}$

石英輻射体のプリズム側の端面にはチェレンコフ光を検出する光検出器 MCP-PMT が取り付けられている。MCP-PMT は 4 個を 1 組として PMT モジュールとして生まれ、1 台の TOP カウンターには 8 個の PMT モジュールが導入される。MCP-PMT については詳細を 1.3.3 節で述べる。

QBB は薄いアルミからなる構造体で、TOP カウンターの筐体を構成している。また TOP カウンターの自重による変形を軽減するために、ハニカム構造が採用されており、ハニカム構造を含めて厚さが 0.3 mm となっている。。

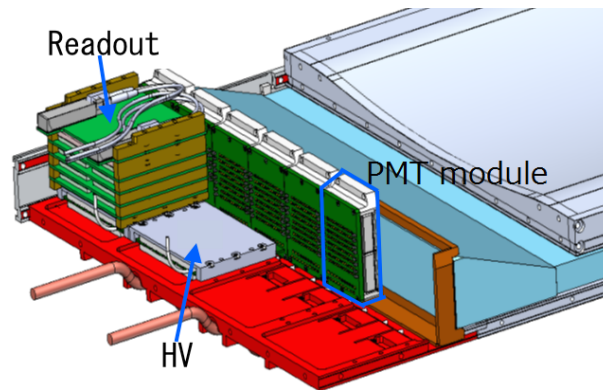


図 1.4: TOP カウンターの構造

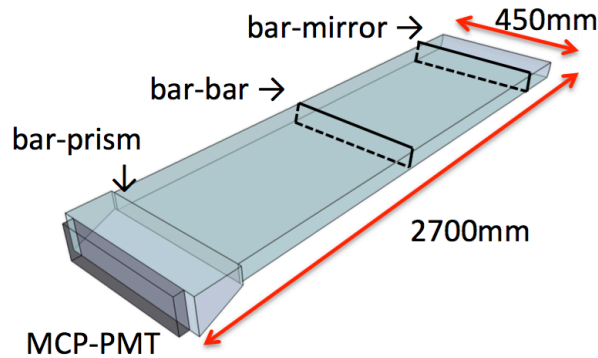


図 1.5: TOP カウンターの石英輻射体の構造

1.3.3 MCP-PMT

高い粒子識別効率の実現には、高い時間分解能と光子検出効率をもつ光検出器が重要になる。TOP カウンターに用いられる光検出器 MCP-PMT は、名古屋大学と浜松ホトニクスが共同開発した新型の光検出器である。 K/π 中間子の光子検出時間差 O (100 ps) の測定をするために、1 光子検出に対して 30 ps という高い時間分解能をもつ。

MCP-PMT は TOP カウンターに複数個を並べて導入されるが、その際の不感領域を減らすために $27.6 \text{ mm} \times 27.6 \text{ mm} \times 13.1 \text{ mm}$ の角形の形状が取られている (図 1.6)。表面の入射窓には不純物や格子欠陥が少なく、放射線耐性の高い合成石英ガラスが使用されている。光電面にはマルチアルカリである NaKSbCs を使用し、QE が最大となる波長 360 nm での全個体の平均が 29.3 % となっている。側面のチューブは合金であるコバルトから作られている。コバルトは常温付近での熱膨張率が金属の中では低く、入射窓に使われている石英ガラスに近い。そのため、熱膨張率の違いによって入射窓との接着が剥がれ、内部の真空が破れる心配が低いため採用された。底面には 4×4 の 16 チャンネルに分割されたアノードチャンネルが並んでいる。さらにチャンネルピンの放電防止や埃などからの保護のためにシリコンポッティングがなされている (図 1.7)。

MCP-PMT の内部には電子増幅部としての役割を持つ鉛ガラスでできた MCP が 2 枚並んでいる。MCP には直径 $10 \mu\text{m}$ のチャンネルと呼ばれる穴がいくつも開いており、光電面から放出された光電子が MCP に当たると、二次電子を放出する [3]。この時光電子が MCP に衝突せずにすり抜けることを防ぐために、チャンネルは MCP の表面に対して 13° の傾きがつけられている (図 1.8)。放出された二次電子は電位勾配によって加速し、再び MCP に衝突してさらに二次電子を放出する。これを繰り返す、最終的に 2 枚の MCP によって電子は 10^6 個程度にまで増幅される (図 1.9)。MCP-PMT の寿命を伸ばすために MCP は改善が

続けられ、MCP-PMT の寿命の短い順に Conventional、Atomic Layer Deposition (ALD)、寿命改善型 ALD と名付けられた MCP が導入されている。MCP の表面を ALD コーティングすることで MCP-PMT の寿命が延びる理由は、表面に残るガスが増幅過程の電子と衝突して中性ガスやイオンを発生させることを防ぎ、その結果光電面の劣化を抑えているからだと考えられる。

MCP-PMT は TOP カウンターに導入される際に、4 個の MCP-PMT を 1 組の PMT モジュールに組み上げてインストールされる (図 1.10)。PMT モジュールは 4 個の MCP-PMT、フロントボードと呼ばれる読み出し基盤、波長カットフィルター、PEEK パーツから構成される。フロントボードには MCP-PMT のピンを差し込むソケットが並んでおり、ここに 4 個の MCP-PMT が並べられる。MCP-PMT の入射窓には波長カットフィルターがシリコンゴム TSE3032 を用いて接着される。波長カットフィルターはチェレンコフ光の伝搬時間にみられる波長依存性による影響をなくすために用意され、依存性の強い短波長側、波長 340 nm 以下の光子をカットする。PEEK パーツは波長カットフィルターの固定に用いる部品で、フロントボードに PEEK 製のねじで取り付けられ、波長カットフィルターを上下から挟んで固定する。また、MCP-PMT にはピンの長さの違いによる全高や、シリコンポッティングの厚さの違いによる受光面から底面までの高さに存在する個体差を吸収するために、PMT モジュールは MCP-PMT の底面とフロントボードの間に隙間ができるように設計されている。

1 台の TOP カウンターには 8 組の PMT モジュールがインストールされる。フロントボードの裏面には電極パッドがつけられており、読み出し回路と PMT モジュールは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用いて接続されるようになっている (図 1.11)。

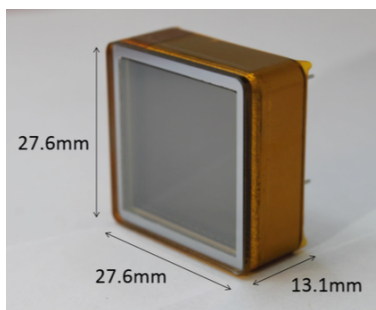


図 1.6: MCP-PMT の外観

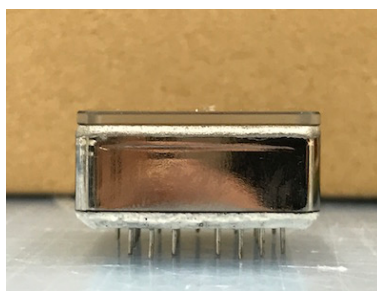


図 1.7: シリコンポッティング。底面にある白いシリコンがシリコンポッティングである。

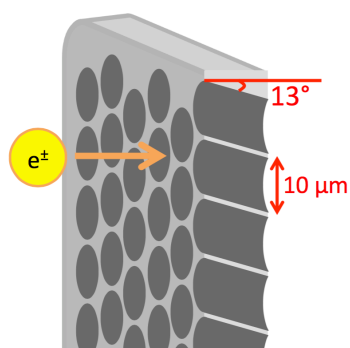


図 1.8: MCP の構造

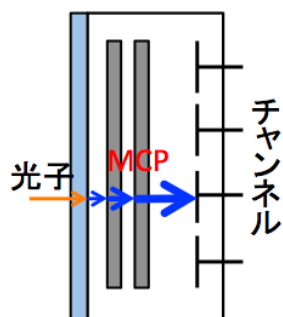


図 1.9: MCP-PMT の内部構造の模式図

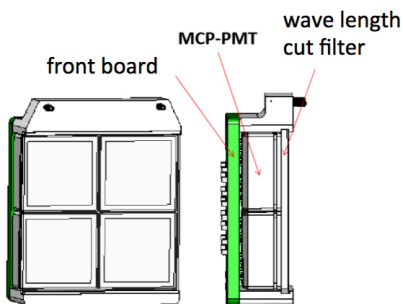


図 1.10: PMT モジュールの模式図

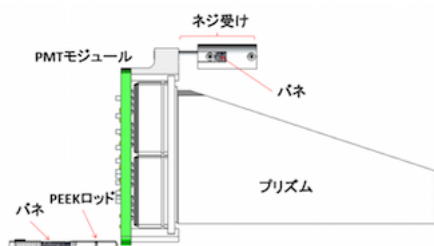


図 1.11: PMT モジュールの固定方法

1.4 本研究の目的

TOP カウンターはチェレンコフ光の放射角を用いて K/π 中間子の識別を行う新型の粒子識別検出器であり、現在全 16 台が Belle II 検出器へインストールされている。その検出原理は発生したチェレンコフ光を石英輻射体内部を伝搬させ、光検出器 MCP-PMT で光子検出時間差からチェレンコフ光の放出角を求めて、粒子識別を行うものであり、その粒子識別性能には時間分解能と検出光子数が重要となる。本研究において私は、TOP カウンターが要求される性能を実現できるように機械的な観点から粒子識別性能に影響を与えうる原因を探り、事前に対処を行った。

TOP カウンターの粒子識別性能に影響を与える機械的要因として、石英輻射体と MCP-PMT の不備が考えられる。特に石英輻射体が TOP カウンターの姿勢やその自重によって歪んでしまうと、チェレンコフ光の伝搬経路にずれが生じたり、石英輻射体同士の光学接着がはがれてしまったりする恐れがある。これらは TOP カウンターの粒子識別性能の低下に直

結するため、TOP カウンターが歪むことがないように注意を払う必要がある。そこで私は TOP カウンターが歪む可能性が最も高いインストール時に、問題となるような大きな歪みが生じないよう複数の手段で TOP カウンターの歪み測定を行った。

また TOP カウンターのインストール後に行った磁場動作試験で確認された MCP-PMT が回転してしまい、光子検出効率が数%落ちてしまう問題が発覚した。この問題は TOP カウンターの粒子識別性能に大きな影響を与えるものではなかったが、わずかであっても性能の低下につながるため、可能ならば MCP-PMT が回転しないように対策を施したい。そこで私は MCP-PMT を回転させないように PMT モジュールを補修する手段を模索した。

以降、TOP カウンターのインストールについて 2 章で、TOP カウンターのインストール中の歪みの測定について 3 章で、磁場中での PMT モジュールの回転および MCP-PMT の回転について 4 章で説明する。

2 TOP カウンターのインストール

製作が完了した TOP カウンターは Belle II 検出器にインストールされるが、インストールまでには数ヶ月の期間があり、それまでは汚れや傷がつかないように保管されたり宇宙線を用いての動作試験が行われる。その間に TOP カウンターが自重で歪んでしまわないように支持構造体が裏側（インストールされた時のビームパイプ側）に取り付けられる。この支持構造体のことを我々はストロングバックと呼んでおり、この論文中でも以下そう記述する。また、この間 TOP カウンターは表側を下向きにして置かれるが、表面が傷つかないようにスペーサーが取り付けられている。

TOP カウンターは Belle II 検出器のバレル部分に XY ステージ（図 2.1）と呼ばれる専用の治具を用いて 16 台インストールされた。

XY ステージは TOP カウンターのインストールのために設計された治具で、衝立のような形をしてる。TOP カウンターのインストールには XY ステージ 2 台と、ガイドパイプ 1 本を組み合わせて使用した。XY ステージは Belle II 検出器の両端に設置され、ガイドパイプはビームパイプが通る空間を通して XY ステージに取り付けられる。ガイドパイプの両端は XY ステージの平面上で自由に動かせるようになっており、さらに両端の動きは連動していないため、ビーム軸に対してガイドパイプに傾きをつけることもできる。またビーム軸を中心としてガイドパイプを Φ 方向に回転させることも可能となっている。ガイドパイプにはストロングバックをボルトで固定できるスライダーが取り付けられているため、TOP カウンターをガイドパイプ上で自由に動かすことができる。これらを用いて TOP カウンターをインストールされる所定のスロットまで運ぶ。スライダーは TOP カウンターをベッセル点で指示するようにストロングバックに取り付けられる。ベッセル点とは、均等荷重の梁を 2 点で支持した際に、両端間距離に与えるたわみの影響が最小になる支持位置のことで、TOP カウンターをベッセル点で支えることで両端支持よりも歪みを抑えることができる（図 2.2）。

次に TOP カウンターのインストールの手順について説明する。まずインストールする TOP カウンターモジュールをクレーンで Belle II 検出器付近まで運び、モジュールをボルトでスライダーに固定する。次に XY ステージを操作して、所定のスロットにインストールできるようにガイドパイプを動かす。ガイドパイプを大体の位置に調整したら、スライダーを動かしてモジュールをスロット付近まで移動させ、さらにガイドパイプの微調整を行う。この時モジュールが Belle II 検出器やインストール済みのモジュールに接触すると、モジュールに力が加わり変形してしまう恐れがあるほか、検出器を傷つけてしまう可能性があるため目視とストレインゲージでの測定を逐一確認して、接触が起こらないように細心の注意を払った。モジュールを所定のスロットまで運んだら、モジュールの両端をボルトで固定する。ボルトの締め付けによりモジュールに力が加わるため、この時もストレインゲージでの測定を確認しながら、モジュールが歪まないように注意する必要がある。モジュールの固定が完了したらカウンターウェイトを外したのち、スライダーからストロングバックを解放するとインス

トールが完了する。これらの作業もモジュールに瞬間的に力が加わるため、モジュールの歪みを確認しながら慎重に作業する。

全 16 台のインストールが終わると、TOP カウンター同士の連結が行われる。隣り合った TOP カウンターを z-beam と名付けたアルミの細長い板とボルトでつなぎ合わせ、16 台の TOP カウンターを 1 つの円にすることで、TOP カウンターの自重によるたわみを軽減する。全ての TOP カウンターを連結したら、次はストロングバックを外す。ストロングバックの取り外しが完了すると、TOP カウンターのインストールは完全に終了する。

インストールが終了した後に、Belle II 実験時と同じ 1.5 T の磁場をかけて TOP カウンターの磁場中での動作試験が行われた。

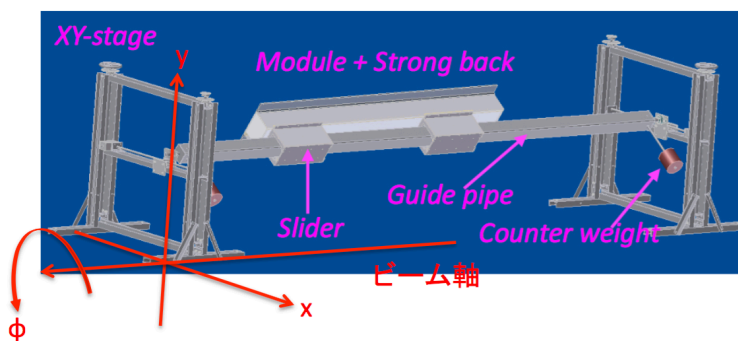


図 2.1: TOP カウンターのインストール治具

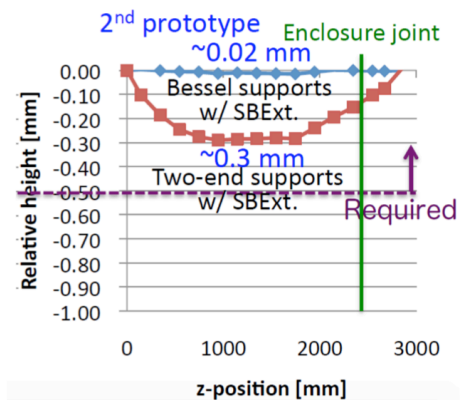


図 2.2: ベッセル点支持と両端支持の歪みの差



図 2.3: インストールの様子1。TOP カウンターをスロットに向けてスライドしている様子。



図 2.4: インストールの様子2。TOP カウンターをECL フランジにボルトで取り付けている様子。

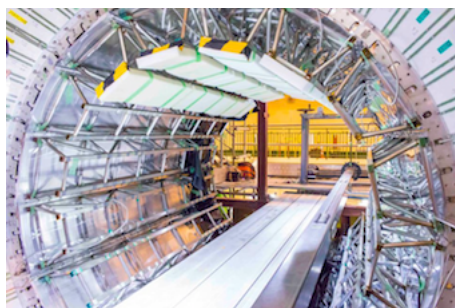


図 2.5: インストールの様子 3。全 16 台がスロットにインストールされた様子。この段階ではまだ z-beam での連結は行われていない。

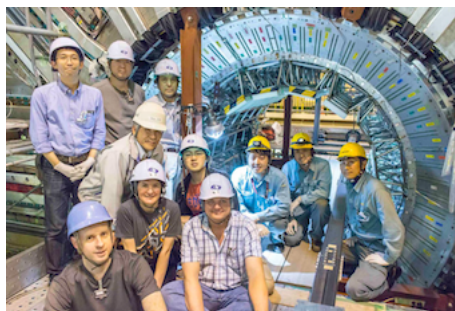


図 2.6: インストールの様子 4。図 2.5 後の記念撮影

3 TOP カウンターの歪み測定

3.1 TOP カウンターの歪みと対処

TOP カウンターはインストールの際に、姿勢や支持点の変更、ボルトの取り外しと締め付けが多くある。それらはTOP カウンターに通常とは違う負荷をかけ、TOP カウンターを歪ませてしまう恐れがある。歪みによっては、発生したチェレンコフ光の伝搬経路や光子が入射するチャンネルのずれを生んだり、石英輻射体同士の光学接着が剥離してしまう可能性が考えられる。これらはTOP カウンターの粒子識別性能を悪化させてしまい、TOP カウンターが要求される性能の実現を困難にするため、インストールの際にはTOP カウンターが大きく歪まないように注意を払う必要がある。

石英輻射体同士の光学接着は、石英輻射体が水平の状態から互いにたわむことなくV字のように傾いたとして、400 μm までにははがれないことが確認されている。実際にTOP カウンターが歪んだとすると、石英輻射体はU字のようにたわむため、石英輻射体同士が剥離するまでの歪みの許容範囲は400 μm よりも大きくなると思われる。そこで我々はTOP カウンターの歪みの許容範囲を500 μm とし、インストールの際の歪みがそれ以上にならないように、インストール中の歪みを測定した。

3.2 ストレインゲージ

インストールの際にTOP カウンターの歪みが許容範囲を超えていないかをリアルタイムで確認するためにストレインゲージ（図3.1）を用いた。ストレインゲージは測定したい対象に貼り付けて歪みを測定するセンサーで、長方形の薄い絶縁体上に線状の金属の抵抗体が取り付けられている[4]。対象に歪みが生じると、貼り付けられたストレインゲージも同率で歪む。するとストレインゲージ上の金属体も歪みに合わせて太さと長さが変形し、その結果抵抗値の増減が起こる。この電気抵抗の変化を測定することで、対象の歪みが逆算できる。またリアルタイムでの歪みの測定は、電位の推移をデータロガーなどで表示することで可能である。

ストレインゲージの電気抵抗の変化率と、対象の歪みの間には以下の関係が成り立つ。ここで R は電気抵抗、 K はストレインゲージの感度を表すゲージ率、 ϵ は対象の歪みである。

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (4)$$

ストレインゲージの電気抵抗の変化は非常に微小なものであるため、ストレインゲージをブリッジ回路に組み込んで、電圧の変化をアンプで増幅して測定する。ブリッジ回路の抵抗が変化した時の電圧の変化は以下の式で表せるので、対象の歪みと電圧の変化の間には以下の関係が成り立つ。

$$\Delta V = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot V \quad (5)$$

$$\epsilon = 4 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (6)$$

さらにストレインゲージを2枚使う2ゲージ法という結線方法を用いた。2ゲージ法は歪みを測定したい対象の表裏にストレインゲージを貼り付ける測定法で、歪みに対する感度を上げることができる（図3.2、図3.3）。また、ストレインゲージが持つ温度依存性を抑えることもできる。

ストレインゲージが対象に貼り付けて使用するセンサーであることはすでに記述したが、TOPカウンターにストレインゲージを貼り付けて歪みを測定しようとする、TOPカウンターの大きさに対して歪みが小さすぎるためストレインゲージの抵抗体がほとんど変化せずに測定が困難であることが予想された。また貼り付けたストレインゲージを放置することはできないが、インストール後に剥がすにはTOPカウンターに負荷がかかったり傷がつく可能性がある。こういった問題を解決するために、TOPカウンターにボルトで取り付けることができる長さ30 cmのアルミ棒を用意した。TOPカウンターが歪むと取り付けられたアルミ棒も追従して歪むので、このアルミ棒の歪みを測定することで間接的にTOPカウンターの歪みが測定できる（図3.4）。

測定に用いたストレインゲージのキャリブレーションは、ストレインゲージを貼り付けたアルミ棒をTOPカウンターのダミーモジュールに取り付けて行った。ダミーモジュールに負荷をかけて歪みを意図的に作り、その時のブリッジ回路の電圧変化を測定した。ダミーモジュールの歪みはダイヤルゲージを用いて測定した。図から

$$16.9mV/100\mu m \quad (7)$$

として測定をする。

ストレインゲージでの測定はインストール中とストロングバックの取り外しの時、ストロングバック取り外し後に行われた。



図 3.1: ストレインゲージ



図 3.2: 2 ゲージ法。測定したい対象の表裏にストレインゲージを接着している。

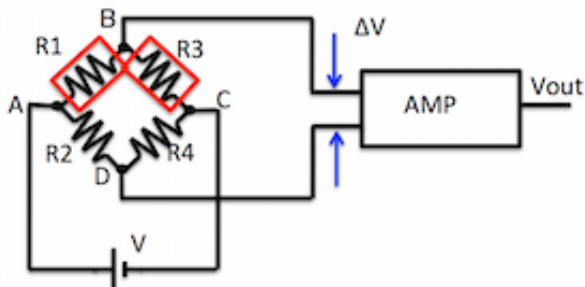


図 3.3: ストレインゲージの回路模式図

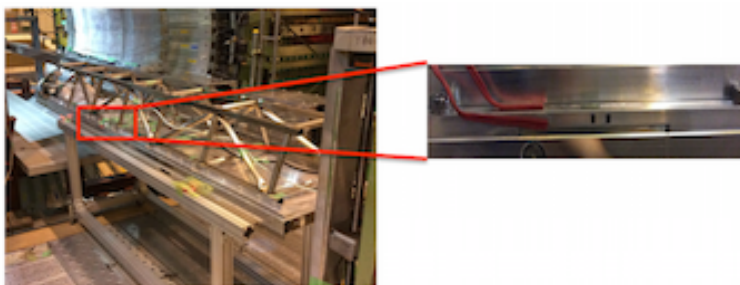


図 3.4: ストレインゲージの設置

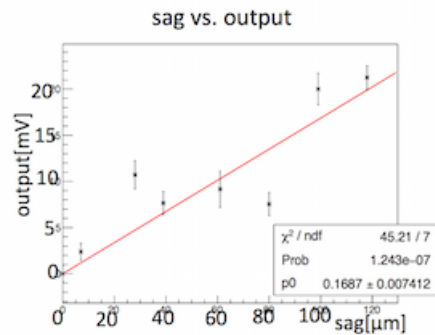


図 3.5: ストレインゲージのキャリブレーション

3.3 ダイアルゲージ

インストール時の TOP カウンターの歪みを測定するのに、ストレインゲージだけでなくダイアルゲージも用いた。ダイアルゲージを用いた歪み測定用の治具は 2 つあり、どちらもパイプとダイアルゲージを組み合わせて製作されたものである。それぞれ Portable Pipe Gauge(PPG) (図 3.6) と Fixed Pipe Gauge(FPG) (図 3.7) と名付けられた。

まず PPG について説明する。PPG は 4 つのダイアルゲージと TOP カウンターと同じ長さのパイプを組み合わせて作られている。ダイアルゲージは TOP カウンターの両端と、石英輻射体の接着面に当たる位置に設置されており、前方から見てそれぞれ Forward(Fwd)、Middle(Mid)、Joint、Backward(Bwd) と名付けられた。PPG での歪み測定はインストール中、z-beam での連結中、ストロングバックの取り外し中に行われた。

FPG はダイアルゲージのほかにリニアゲージも使って歪みを測定している。PPG とは異なり、ゲージがパイプなどで連結しておらず、ECL フランジに取り付けられたダイアルゲージで TOP カウンターの両端の変化を、TOP カウンターに取り付けられたリニアゲージで TOP カウンターの中央の変化を独立に測定している。それらの結果をまとめて全体の歪みを算出している。またリニアゲージの測定はデータロガーを用いているため、モニターを観察することで中央の変化に関してはリアルタイムでの測定が可能である。FPG での測定は z-beam での連結中とストロングバックの取り外しの時、ストロングバック取り外し後に行われた。

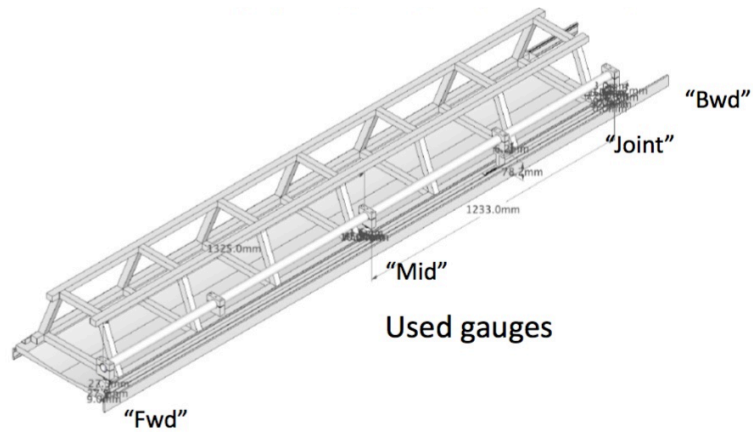


図 3.6: Portable Pipe Gauge(PPG) の概略図

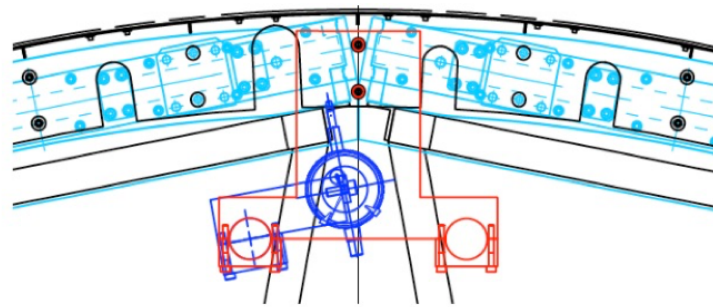


図 3.7: Fixed Pipe Gauge(FPG) の正面図

3.4 インストール時の歪み測定

インストール中の歪み測定はストレインゲージと PPG によって行われた。ただし PPG での測定は 7 台に対してのみ行われた。ストレインゲージでのデータロガーを用いてリアルタイムで行われたが、PPG は常にダイヤルゲージを見続けることができなかつたため、TOP カウンターに負荷がかかり歪みが生じるタイミングで測定を行った。TOP カウンターに歪みが生じると考えられるのは、主に TOP カウンターにボルトを取り付ける時と取り外す時、それから TOP カウンターの姿勢が変わった時である。そこでインストール開始からそ

これらの作業順に番号を振り、便宜上アクションナンバーと名付けて、その都度歪みを測定し結果にまとめた。またストレインゲージの結果もアクションナンバーでまとめた。

以下にアクションナンバーでの行為について軽く説明する。

1. スライダー取り付け前
Belle II 検出器付近に運ばれてきた状態。この時 TOP カウンターはアルミフレームで組まれた台の上に置かれている。
2. スライダー取り付け後
ストロングバックをスライダーにボルトで取り付け直後。ボルトによる締め付けによる歪みが生じていないか、ガイドパイプのたわみを受けていないか確認する。
3. 持ち上げ
ガイドパイプを Y 方向に動かし、TOP カウンターを台の上から持ち上げた直後。この時、TOP カウンターはベッセル点支持に移行するので歪みを確認する。
4. カウンターウェイトの取り付け
ガイドパイプにカウンターウェイトを取り付ける。ウェイトによってガイドパイプがたわみ、TOP カウンターに伝わっていないかどうか確認する。
5. TOP カウンターの上下反転
スペーサーを取り外すために TOP カウンターの上下を入れ替える。
6. スペーサー取り外し後
スペーサーを取り外した直後。スペーサーはボルトで固定されているので、取り外しの際の負荷で歪みが生じていないか確認する。
7. スロットに合わせて角度調節後
インストールするスロットに合わせて角度を調整した後。
8. 高さを調整後
インストールするスロットの高さにガイドパイプを調整した後。
9. スロットへ向けてスライド後
TOP カウンターをスライドさせて、Belle II 検出器内へとスライドさせていく。このタイミングではまだスロット近くでスライドを止めて測定を行う。この作業の後に、スロットにはまるように微調整を繰り返す。
10. ショルダーボルト締め付け後
TOP カウンターの ECL フランジに取り付けるために、まずはショルダーボルトで固定する。

11. フランジボルト締め付け後
ショルダーボルトでの固定の後にフランジボルトで TOP カウンターを完全に固定する。
12. カウンターウェイト取り外し後
カウンターウェイトを外すことでガイドパイプのたわみに変化が生じるため、TOP カウンターに歪みが伝わっていないか確認する。
13. スライダー取り外し後
スライダーを取り外した直後。この時 TOP カウンターは両端支持に移行する。このタイミングが最も TOP カウンターの歪みが大きくなると考えられる。
14. 上側の L 字金具の取り外し
ストロングバックを TOP カウンターにより強固に取り付けている L 字型の金具を取り外した直後。この時、地面から見て上側の L 字金具から取り外す。その理由は、支えの一つがなくなったことによりおこる TOP カウンターのわずかな下降を、少しでも抑えるためである。
15. 下側の L 字金具の取り外し
下側の L 字金具を取り外した直後。このタイミングをもって TOP カウンターのインストールは一旦終了となる。

ストレインゲージでの歪み測定の結果が図 3.9 になる。全 16 台の TOP カウンターが、インストール中に 0.5 mm 以上歪むことなくスロットにインストールできていることがわかる。なお歪みの正負は、外側に膨らむ歪みをプラス方向、中央に凹む歪みをマイナス方向とした(図 3.8)。

もう少し詳しく

PPG での歪み測定の結果は図 3.10 の上側のグラフに表されている。こちらもストレインゲージでの測定と同じく、インストール中に 0.5 mm 以上歪むことなくスロットにインストールできていることがわかる。図 3.10 を見ると、PPG の測定結果とストレインゲージの測定結果で歪みの変化が一致していないが、これは PPG が TOP カウンター全体をダイヤルゲージで測定しているのに対して、ストレインゲージは歪みが最も大きくなるであろう中心付近を測定して TOP カウンターの歪みとしているからといった理由が考えられる。また、PPG は目視による誤差、ストレインゲージは回路による電位測定 of 誤差なども影響していると思われる。

しかし、測定結果の一致は見られなかったが、異なった測定手段のどちらでも問題となる歪みが観測されなかったことから、TOP カウンターは歪むことなくインストールできたと結論できる。

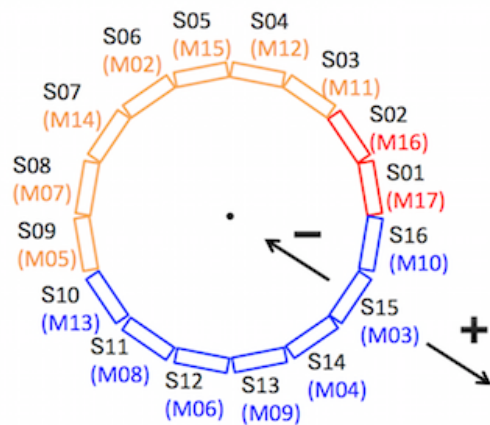


図 3.8: モジュールのインストール先と歪みの方向。Fwd 側から見ている。S はスロットの番号、M は TOP カウンターモジュールの番号を示している。色の違いはインストールされている MCP-PMT の寿命の違いを示している。

| アクションナンバー | 内容 |
|-----------|------------------|
| 1 | スライダー取り付け前 |
| 2 | スライダー取り付け後 |
| 3 | 持ち上げ（ベッセル点支持に移行） |
| 4 | カウンターウェイトの取り付け |
| 5 | TOP カウンターの上下反転 |
| 6 | スペーサー取り外し後 |
| 7 | スロットに合わせて角度調節後 |
| 8 | 高さを調整後 |
| 9 | スロットへ向けてスライド後 |
| 10 | ショルダーボルト締め付け後 |
| 11 | フランジボルト締め付け後 |
| 12 | カウンターウェイト取り外し後 |
| 13 | スライダー取り外し後 |
| 14 | 上側の L 字金具の取り外し |
| 15 | 下側の L 字金具の取り外し |

表 3.1: インストール時のアクションナンバー対応表

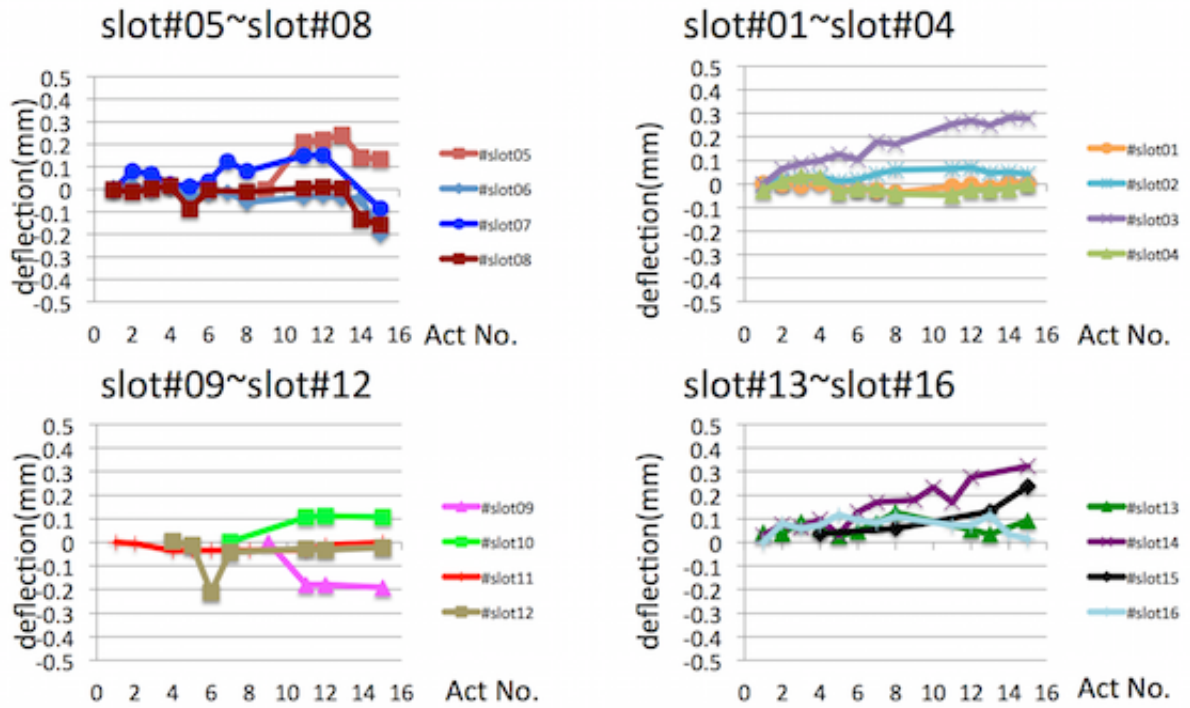


図 3.9: ストレインゲージでの測定結果。横軸がアクションナンバー、縦軸が TOP カウンターの歪みとなっている。スライダー取り付け前の歪みを 0 とした時の、アクションナンバーごとの歪みの推移がグラフで表されている。インストール中に 0.5 mm を超える歪みは確認されなかった。

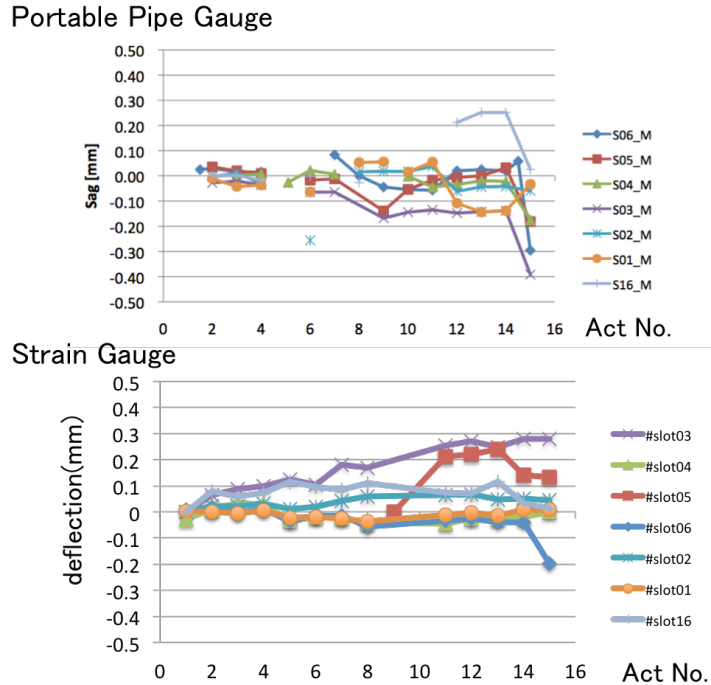


図 3.10: PPG とストレインゲージの結果比較。PPG とストレインゲージの両方で測定した TOP カウンターの歪みの比較。上のグラフが PPG によるもので、下のグラフがストレインゲージによるものである。

3.5 TOP カウンター連結時の歪み測定

TOP カウンター全 16 台のインストールが終わると、次に z-beam での TOP カウンター同士の連結になるが、z-beam もボルトで取り付けるために負荷がかかって歪みが生じる可能性がある。そこで z-beam の取り付け中にも PPG と FPG を用いて歪みを測定した。ストレインゲージは z-beam を取り付けるためのボルト穴を利用して TOP カウンターに取り付けていたので、今回の測定では使用できなかった。

今回の測定では PPG は TOP カウンター 1 台 1 台を測定するのではなく、特定の 1 台の全 z-beam 取り付け中の歪みを測定した。これは作業時間や作業性を考慮してのものである。PPG はスロット 06 に取り付けられ、FPG はスロット 05 とスロット 12 に取り付けられて歪みを測定した (図 3.11)。このスロットの TOP カウンターを選択したのは TOP カウンターの剛性によるものである。TOP カウンターはその形状から縦向きになっている場合が最も歪みにくいと考えられる。その逆に横向きになっている場合が最も歪みやすいと思われるの

で、最も水平に近い角度でインストールされているスロットの測定を行った。

図 3.12 と図 3.13 にその結果を載せる。

図 3.12 は PPG での測定結果であり、この図の左のグラフから歪みは z-beam を #1、#2、#4 をつけた時に生じていることがわかる。Bwd 部分が #2 を取り付けた時に大きく変化しているが、これは #2 の取り付けの際に PPG に触れてしまったことが原因と考えられる。#8 を取り付ける際にも PPG に触れてしまったが、この時は PPG に大きな変化は見られなかった。図 3.12 からは z-beam 取り付けの際の歪みは、ほぼ全ての取り付けで 0.05 mm 以下に抑えられており、最大でも #1 を取り付けた時の 0.07 mm、#2 の時の懐疑的な測定を含めても 0.12 mm の歪みとなっている。しかしこの歪みは TOP カウンターにとっては影響のある大きさの歪みではない。

図 3.13 は FPG での測定結果であり、スロット 05 では #4、すなわちスロット 05 の TOP カウンターに取り付けた時に、スロット 12 では #14、すなわちスロット 12 の TOP カウンターに取り付けた時に歪みが見えている。歪みの大きさは最大でスロット 05 では 0.17 mm、スロット 12 では 0.18 mm となっている。この歪みの大きさはやはり TOP カウンターにとっては影響のある大きさの歪みではない。

以上の結果より、z-beam の取り付けによる TOP カウンター同士の連結作業においても、問題となる歪みは見られなかった。

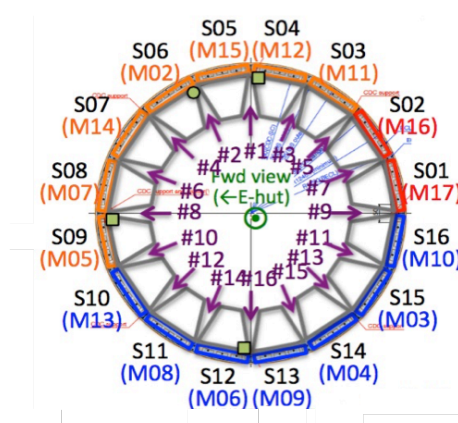


図 3.11: z-beam の取り付け位置と PPG と FPG の取り付け位置。#No. が z-beam の取り付け位置とその識別番号で、丸が PPG の取り付け位置、四角が FPG の取り付け位置を示している。

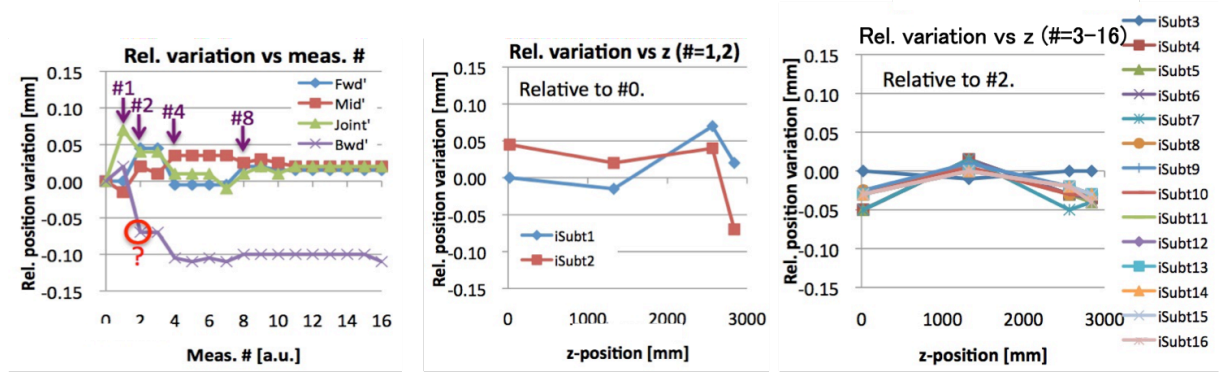


図 3.12: z-beam 取り付け時の PPG による歪み測定結果。左の図は z-beam を取り付けた時の各測定点の推移で、横軸が取り付け位置、縦軸が歪みを表している。真ん中と右の図は、左の図の横軸を測定点の位置に変えて、TOP カウンター全体の変化を比較したもの。ただし真ん中の図は z-beam を取り付ける前と比較しており、右の図は #2 を取り付けの時と比較している。

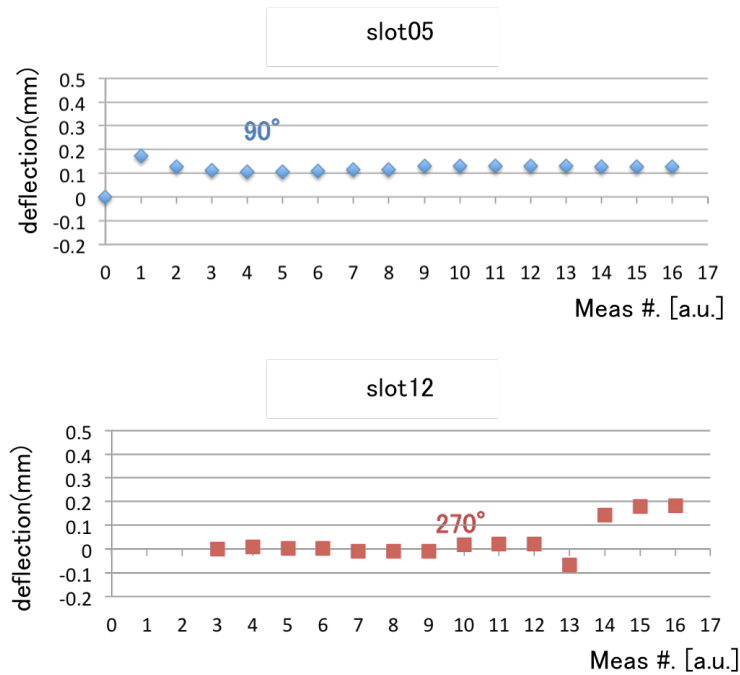


図 3.13: z-beam 取り付け時の FPG による歪み測定結果

3.6 ストロングバック取り外し時の歪み測定

z-beam での TOP カウンターの連結が終了したら、次はストロングバックの取り外しを行う。ストロングバックはボルトで取り付けられているため、これを外す時には TOP カウンターに負荷がかかる。さらに TOP カウンターの姿勢を支えていた支持構造体が外されることになるので、TOP カウンターに歪みが生じる可能性がある。そのため PPG と FPG、ストレインゲージを用いて歪み測定を行った。PPG と FPG の取り付け位置は z-beam での連結時の歪み測定と変わらず、ストレインゲージは FPG の片方と同じくスロット 05 の歪みを測定した。

図 3.14 はストロングバックを取り外している最中の PPG による歪み測定の結果である。Fwd と Bwd で最大 0.15 mm の歪みが確認されているが、これは問題のある大きさの歪みではない。

図 3.15 はストロングバックを取り外している最中の FPG とストレインゲージによる歪み測定の結果である。z-beam での TOP カウンター連結時から設置位置が変わっていないため、取り外す前の歪みは z-beam 連結時の最後の歪みの大きさに合わせてある。またストレインゲージの設置は途中からだったため、設置した際の歪みの大きさを FPG と合わせてある。図

3.15を見るとFPGが設置してある付近のスロットのストロングバックを外す時に0.10 mm程度の歪みが見えるが、どれも問題のある歪みではない。スロット04を外す時に他と比べると大きい0.20 mm程度の歪みが見えているが、スロット08のストロングバックを外してから次の作業に移るまでに数日があいており、その間の温度依存や誰かのFPGへの接触などが考えられるものの、原因の特定はできていない。しかしこの歪みの推移が純粋にTOPカウンターの歪みであったとしてもやはり問題のある大きさの歪みではない。

以上より、ストロングバックの取り外しによってTOPカウンターの識別性能に影響を与えるような歪みは確認されなかったと言える。また、これまでの結果からインストール全体を通して問題のある歪みは確認されなかった。この結果をもって、TOPカウンターのインストールは無事に、かつ完全に終了した。

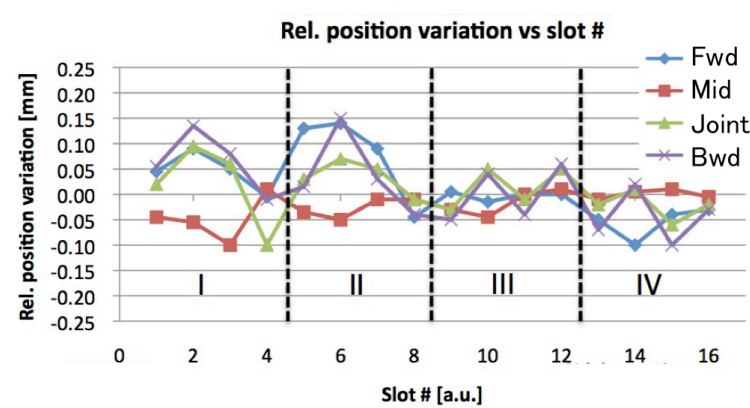


図 3.14: ストロングバック取り外し時のPPGによる歪み測定結果。横軸がストロングバックを取り外したスロット番号、縦軸が歪みを表している。I～IVはスロット番号を4つに区分した時の番号である。

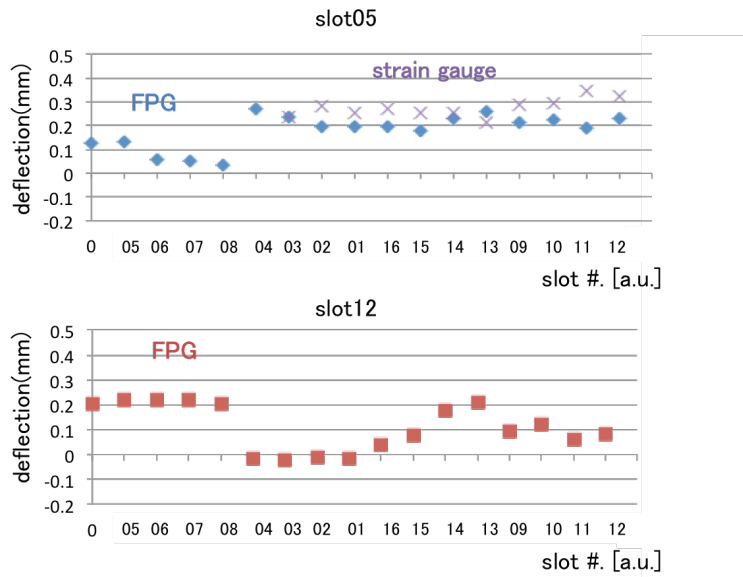


図 3.15: ストロングバック取り外し時の FPG とストレインゲージによる歪み測定結果。横軸がストロングバックを取り外したスロット番号、縦軸が歪みを表している。取り外す前の歪みは、z-beam 連結時の歪みを同じ値にしてある。

TOP カウンターのインストール後も FPG とストレインゲージによる測定は数日の間続けられた。その結果が図 3.16 である。23 日正午から 24 日零時にかけて温度依存と思われる推移が見られたが、全体を通して大きな歪みは確認できなかった。

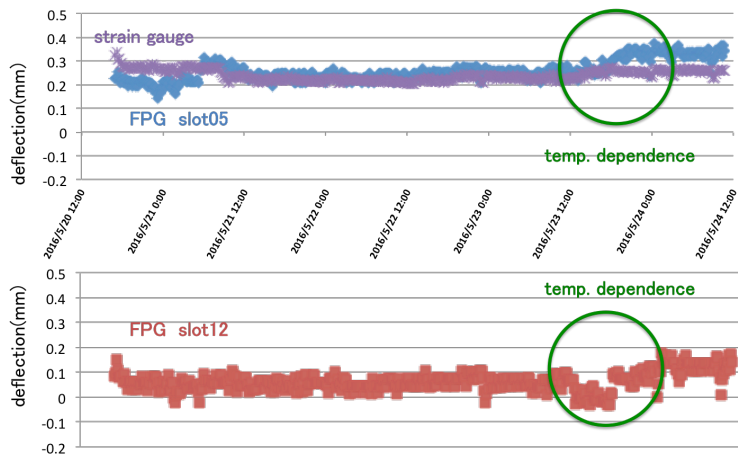


図 3.16: ストロンバック取り外し後の FPG とストレインゲージによる歪み測定結果。横軸が測定日時、縦軸が歪みを表している。23 日正午から 24 日零時にかけての推移は温度依存であると思われる。

4 磁場中での MCP-PMT の回転と対処

4.1 PMT モジュールの回転

TOP カウンターのインストールが完了した後、Belle II 検出器に 1.5 T の磁場をかけて TOP カウンターの動作試験を行ったが、複数の MCP-PMT から信号が送られてきていないことがわかった。そこで MCP-PMT の受光面を目視で確認するために TOP カウンター内に設置されている CCD カメラを確認したところ、PMT モジュールとプリズムとの光学接着のはがれが確認でき、幾つかのモジュールが TOP カウンター内部で回転してしまっていることがわかった。原因は MCP-PMT の側管に使用されているコバルトにあり、MCP-PMT1 個当たりおよそ 1.0 kgf の力を磁場から受けて MCP-PMT がモジュールごと回転してしまっていた。PMT モジュールと HV ボードの間が設計値に比べて 0.05 ~ 0.25 mm 離れていたことも、バネの弾力を弱めモジュールの回転を許す一因となっていた。その結果 PMT モジュールとポゴピンの接触がはがれてしまい、はがれた箇所に対応する MCP-PMT からの信号が送られてこなかったのである。

この PMT モジュールが磁場中で回転してしまう問題に対処するために、PMT モジュールの上部の PEEK パーツと QBB の隙間にシムを挿入することにした。次の磁場試験までの 3 日の間に応急処置として PMT モジュールと HV ボードの間を設計値通りに直し、厚さ 1.5 mm のポリエチレンテレフタレート (PET) 製のシムを挟んだところ、磁場がかかっていない状態で幾つかのモジュールとプリズムの光学接着がはがれてしまっていることが確認できた。そこで本格的な補修として、各 PMT モジュールと QBB の隙間に合わせて厚さを調整したアセタール樹脂 (POM) 製のシムを挟んで、磁場をかけて動作試験を行ったところ、ほぼ全ての PMT モジュールの回転を止めることができた。

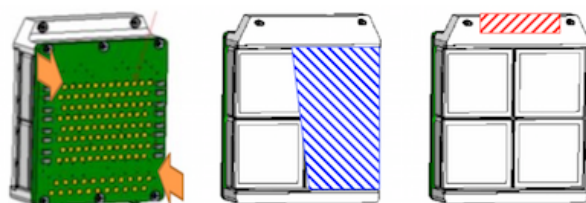


図 4.1: PMT モジュールの回転

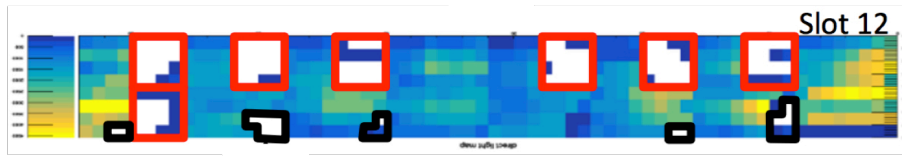


図 4.2: 初回の磁場動作試験でのレーザーデータ。信号が死んでいる領域が散見される。赤線で囲われた領域は HV ポゴピンの接触がはがれており PMT からの全ての信号が死んでいる。黒線で囲われた領域は信号ポゴピンの接触がはがれている。



図 4.3: 磁場動作試験前後の CCD カメラの様子

4.2 PMT モジュール内での MCP-PMT の回転

POM 製のシムを挟んだ上で、磁場をかけて動作試験を行っている中でも、CCD カメラを使った目視での確認は行われた。すると PMT モジュールとプリズムの光学接着のはがれは確認されなくなったが、新たに MCP-PMT の受光面と波長カットフィルターの光学接着のはがれが確認された。該当する PMT モジュールを取り出して確認したところ、PMT モジュール内で MCP-PMT が回転してしまっていることが原因であることがわかった。PMT モジュールは固定され回転しなくなったが、MCP-PMT が磁場から力を受けていることは変わらないために起こった問題であった。MCP-PMT とフロントボードの間にギャップがあることも MCP-PMT が回転する余地を作ってしまう、一因となっていた。

この問題による影響は、該当する MCP-PMT の光子検出数が数%低下することにとどまるため、早急な対処が必要な問題ではなかったが、可能ならば MCP-PMT が回転しないように PMT モジュールを補修したい。この小節ではその対処法について詳しく述べる。

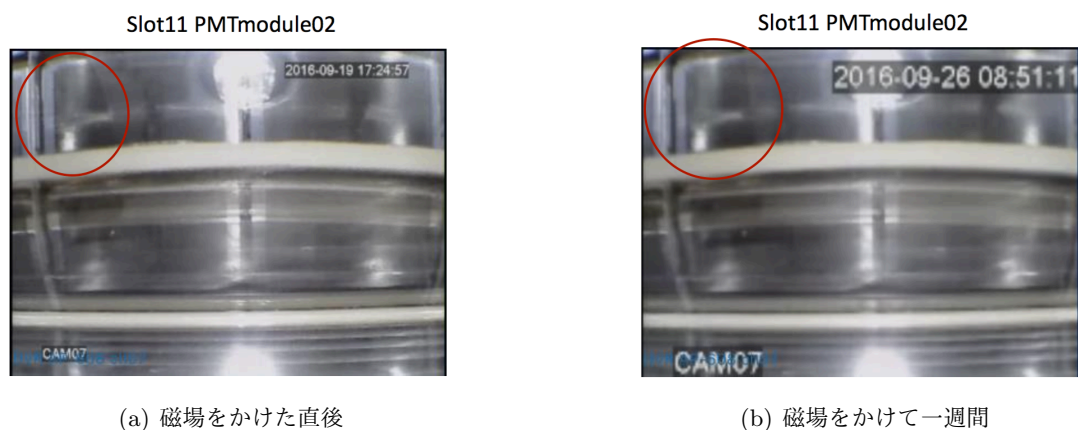


図 4.4: 動作試験中の CCD カメラの様子。左上と左下の MCP-PMT の受光面と波長カットフィルターの接着がはがれた上、時間経過で乖離が進んでいる様子が確認できる。一週間後のカメラの解像度が悪いのは、なんらかの理由で設定が変更されてしまったため。

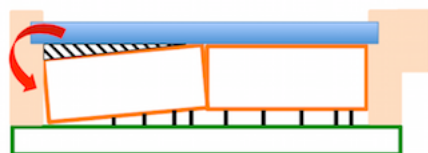


図 4.5: PMT の回転

4.2.1 PMT の真空破れへの機械的考察

MCP-PMT の受光面と波長カットフィルターの光学接着がはがれた場合に光子検出数に数%の低下が見られることはすでに述べたが、この小節では MCP-PMT の回転が起す影響について、新たに機械的な側面から考察する。

MCP-PMT は 1.5 T の磁場をうけて PMT モジュール内で回転するが、波長カットフィルターやフロントボードにぶつかるためすぐに回転自体は止まる。だが回転が止まった後も磁場からの力はいくつうけ続けるため、MCP-PMT には負荷がかかり続ける。この負荷によって MCP-PMT が破損し、MCP-PMT の真空が破れていた場合、光子検出ができなくなるため

に MCP-PMT を交換しなくてはならなくなる。その場合 PMT モジュールの補修に関わらず、破損した MCP-PMT の代わりに手配をしなければならないので早急な確認が必要となった。そこで磁場中で MCP-PMT が受ける負荷と同じ負荷をダミーの MCP-PMT にかけて、MCP-PMT が破損するかどうかを確認した。

PMT モジュール内で回転した MCP-PMT において最も破損しやすい箇所は、フロントボードのソケットにはめられているピン周りである。MCP-PMT のピン周りの真空は図 4.6 のようになっており、MCP-PMT がフロントボードに押し付けられたことでピンが単体で、あるいはソケットごと動いてしまい、真空が破れてしまうことが考えられる。そこで万能試験機を用いてピン周りに直接負荷をかけて、MCP-PMT の破損を確認した。

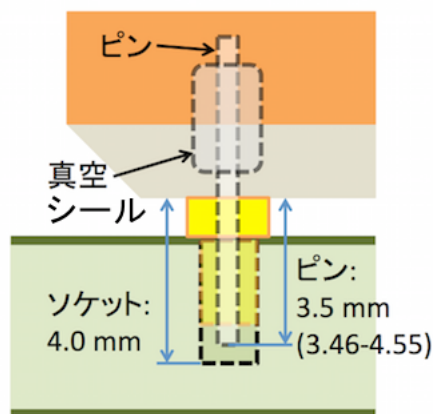


図 4.6: MCP-PMT ピン周りの真空の模式図

まず MCP-PMT が回転してピンがフロントボードに押し付けられて負荷がかかった時に、MCP-PMT の真空が破れてしまうかどうかを試験した (図 4.7)。シリコンポッティングに接触せずにピンだけを押し込めるように深さを調節したソケット (図 4.8) を用意し、ダミー MCP-PMT のピンに挿して万能試験機で 5.0 kgf まで徐々に負荷をかけた (図 4.9)。負荷をかけたピンは全部で 9 つで、MCP-PMT が PMT モジュール内で回転した時に最も負荷がかかりやすい、MCP-PMT の外周に近いピンを選択した (図 4.10)。MCP-PMT の真空が破れた場合、ピンの周囲が破損したということなので、ピンの固定も緩くなり抵抗が弱まるため、万能試験機の示す負荷が減少するはずである。図 4.11 を見ると、どのピンも一定の傾きで負荷が増加しているため、負荷の増減からは MCP-PMT の破損はないと言える。しかし同時に図 4.11 からは、負荷に応じてピンが動いてしまっているようにも見える。ピンが動くということは、MCP-PMT の内部でピンが動く余地があるということになるので、すなわち MCP-PMT 内部で真空が保たれていない可能性がある。それを確認するために、試験に使用

したソケットを単体で同じ条件のもと万能試験機にかけて、ピンの結果と比較してみた。図 4.11 の jig のデータがソケット単体の時の試験結果である。このことから試験に使用したソケットは 1.0 kgf の負荷がかかるごとにおよそ 0.01 mm 変形することがわかる。このソケットの負荷に対する変形の関係は、ピンに負荷をかけた時の万能試験機のストロークとの関係におおむね一致することが、グラフの傾きから言える。よって図 4.11 の負荷に対するストロークは、ソケットの変形が見えているのであって、ピンは動いておらず MCP-PMT の破損もないことがわかった。

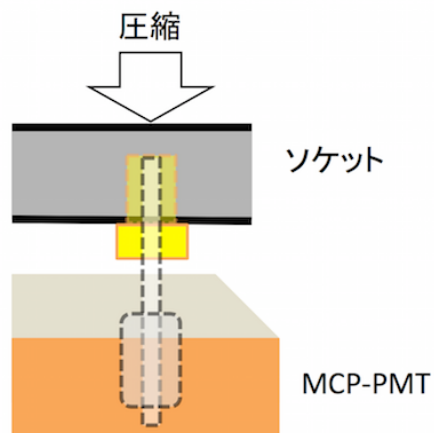


図 4.7: MCP-PMT のピンだけに負荷をかける



図 4.8: MCP-PMT のピンだけに負荷をかけるテストに使用したソケット

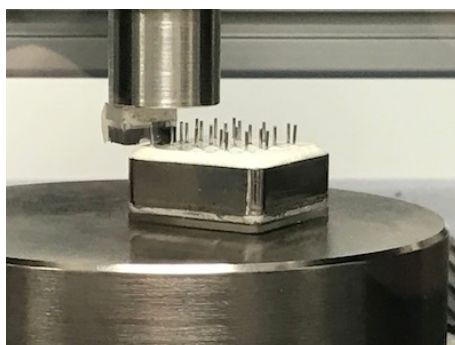


図 4.9: 万能試験機での MCP-PMT のピンだけに負荷をかけるテスト

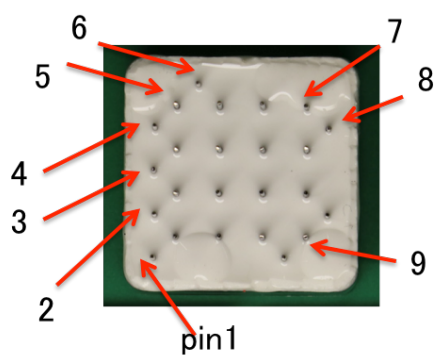


図 4.10: 負荷をかけたピンの位置と番号

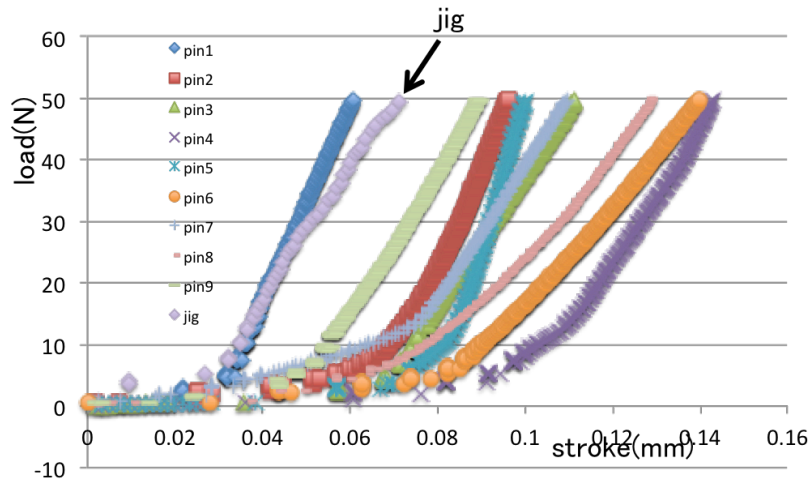


図 4.11: 万能試験機でピンだけに負荷をかけた結果。横軸は万能試験機のストロークで、縦軸は万能試験機がピンにかけた負荷を表している。ピンごとに高さに差があるため、万能試験機が負荷をかけ始める位置が違う。使用したソケットだけに負荷をかけた結果も合わせて示してある。

次に MCP-PMT が回転してシリコンポッティングごとフロントボードに押し付けられて、フロントボードのソケットから負荷を受けてピン周辺が陥没してしまい、MCP-PMT の真空が破れてしまうかを試験した (図 4.12)。図 4.12 のようにピンに触れることなく、ピン周辺のシリコンポッティングだけを押し出すことのできるもの、今回は図 4.13 のボルト、を用意して、ダミーの MCP-PMT にセットして万能試験機で負荷をかけた (図 4.14)。試験は図 4.10 の 1 番と 2 番のピン周辺に対して行われた。その結果を図 4.15 にのせる。図 4.15 から、どちらも負荷を 3.0 kgf ほどかけたところで負荷の一時的な減少が見られる。この減少は、負荷をかけていた箇所の抵抗が弱くなったために起こったと考えられる。すなわち、試験箇所に破損が起きたということなので、MCP-PMT を取り出して該当箇所を確認したところ、シリコンポッティングがボルトの内径状に破れていることが確認できた (図 4.16)。しかしピンとその周辺の陥没や変形は確認できなかったため、破損はシリコンポッティングにとどまり、MCP-PMT の真空は破れていないと言える。

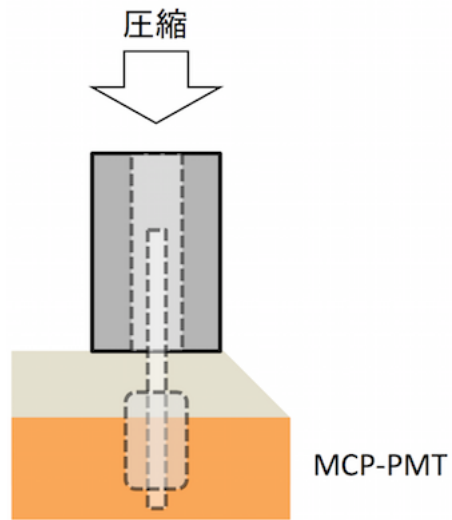


図 4.12: MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかける



図 4.13: MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけるためのボルト

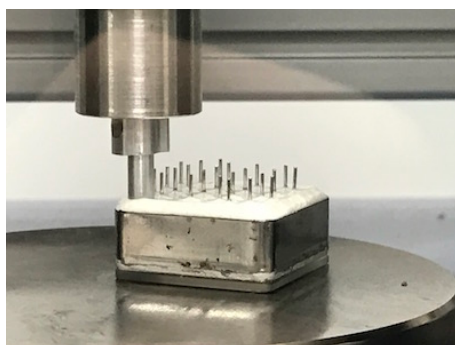


図 4.14: MCP-PMT のピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけるテスト

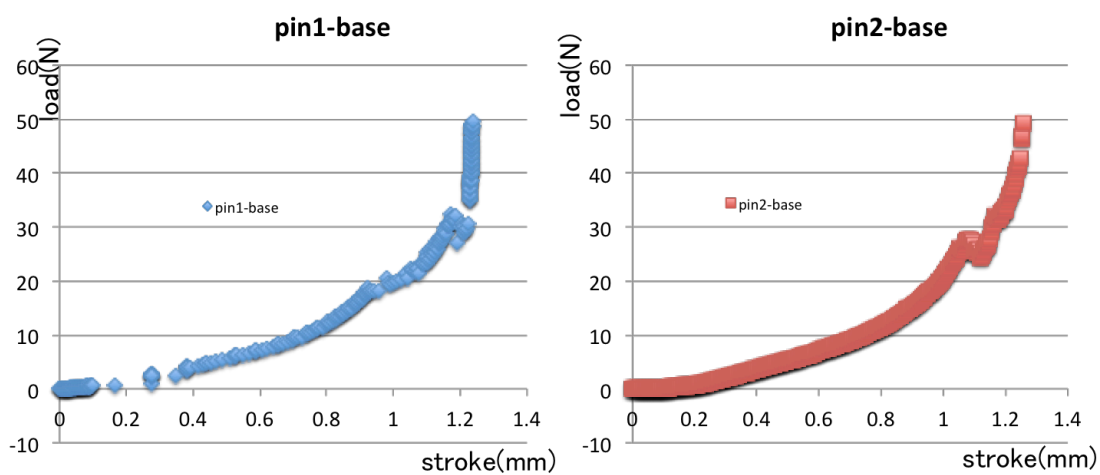


図 4.15: ピン周辺のシリコンポッティングだけに負荷をかけた結果。負荷 3.0 kgf 付近で、負荷の一時的な減少が見られる。



図 4.16: 試験後のシリコンポッティングの様子

以上の試験結果より、1.5 T の磁場の影響で起こる MCP-PMT の回転によって MCP-PMT の真空が破れてしまっている心配はせずとも良くなった。

4.2.2 シム方式での PMT の固定

MCP-PMT とフロントボードの間に存在するギャップが、MCP-PMT が回転する余地を生んでしまっていることはすでに述べた。そこで MCP-PMT の回転を止める方法として、そのギャップを埋めて MCP-PMT をより強固に固定する案が補修方法として考案され、ギャップにシムを挟むこととした。この方法をシム方式と名付け、以下そう記述する。

シム方式のメリットとしては作業時間の短さがあげられる。PMT モジュールの補修は夏のシャットダウンの間に行うため補修できる期間は決して長くないため、できる限り作業時間を短くでき、かつ簡単・確実に補修できる手法を開発する必要がある。その点シム方式はギャップにシムを挟むだけなので、PMT モジュール 1 個あたりの作業時間が 10 ～ 20 分ですむほか、作業自体も単純なので人を選ばず作業ができることも全体の作業時間の短縮につながる。

シム方式の補修案としての実用性の確認のために、まず短期的な破壊試験を行った。エチレンプロピレンジエンゴム (EPDM) 製とガラスエポキシ製の 2 種類のシムを用意し、それぞれで補修した PMT モジュールを製作した。補修していない PMT モジュールも用意し、同様の試験を行い比較とした。試験方法について説明する。PMT モジュール内の MCP-PMT をボルトを組み合わせた金具 (図 4.19) で固定し、バネばかりで PMT モジュールを吊り上げる (図 4.20) ことで MCP-PMT だけに負荷をかけることができる。波長カットフィルターの剥離が起こるかどうかを肉眼で確認し、剥離が起こらなければ MCP-PMT がしっかりと固定できていると言える。1.5 T の磁場中で MCP-PMT にかかる負荷はおよそ 1.0 kgf であるが、長期にわたって負荷がかかるため、この短期試験で 1.0 kgf の負荷で剥離が起こらな

かったからといって磁場中でも MCP-PMT を固定できるとは言えない。そのため短期試験ではもっと大きい負荷をかける必要がある。バネばかりの仕様によりかけられる負荷は 4.0 kgf までなので、その限界まで負荷をかけたところ、補修をしていない PMT モジュールは 2.0 ～ 3.0 kgf で波長カットフィルターの剥離が確認されたが、シム方式で補修した PMT モジュールは 4.0 kgf の負荷をかけても剥離が見られなかった。以上よりシム方式は MCP-PMT を固定する方法として有効であると言える。

次にシム方式のデメリットについて説明する。MCP-PMT の高さには個体差が存在するため、MCP-PMT とフロントボードのギャップにも個体差が生まれる。しかし 1 枚のシムの厚さは均一なため、その個体差に対応しにくいという問題がある。シムがギャップより薄いと MCP-PMT を固定する役割を果たさないが、厚すぎると PMT モジュールが組めなくなってしまう。では柔らかい素材のシムを用意し、シムを潰しながら PMT モジュールを組めば個体差が吸収できると考えたが、それでもシムの厚さによっては PMT モジュールが組み上げられはするものの変形してしまい、TOP カウンターにインストールできなくなってしまった(表 4.1 参照)。そこで 0.5 mm のシリコンのシムを用意し、薄いシムを重ねて個体差に合わせた調整をすることにした。

シムを潰しながら PMT を組むことには MCP-PMT の個体差を吸収できる以外にも利点がある。シムが柔らかい素材の場合、ギャップにピッタリ合うシムを挟んでも、MCP-PMT が回転するときにシムを潰しながら回転してしまう可能性があるため、MCP-PMT を固定しきることができない。そこであらかじめシムをある程度潰しながら PMT モジュールを組めば、シムが潰れることで MCP-PMT の回転する余地を生んでしまうことがなくなる。図 4.21 はシリコンシムの圧縮試験の結果である。負荷をかけていない状態から 1 kgf の負荷をかけた時よりも、負荷をかけてシムを潰した状態から負荷をかけた方がシムの圧縮率が低いことがわかる。シリコンポッティングについてはシリコンシムよりもさらに顕著で、図 4.22 からあらかじめ潰しておかなかった場合、MCP-PMT の回転によって負荷がかかった時に大きく潰れて MCP-PMT が動く余地を作ってしまう。これはシリコンポッティングが、MCP-PMT の縁によるほど盛り上がっていることが大きな原因である。

以上より、シム方式に挟むシムの厚さは、個体に合わせた調整が必要不可欠であることがわかる。

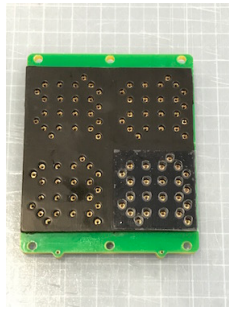


図 4.17: シム EPDM

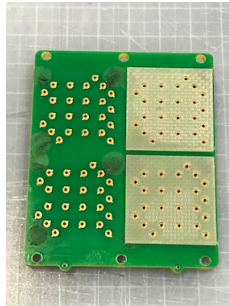


図 4.18: シムガラスエポキシ

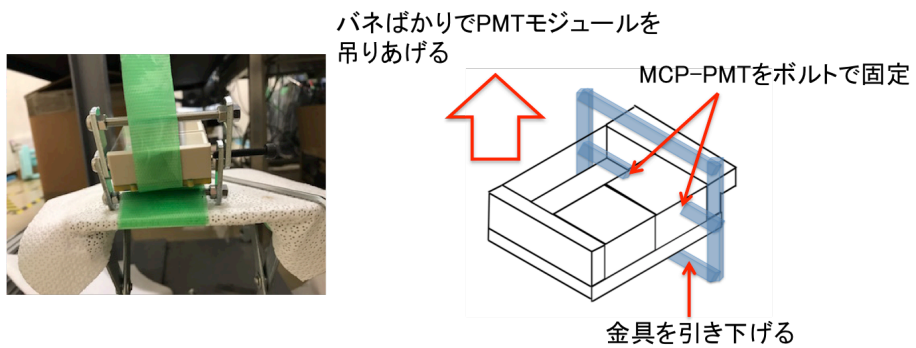


図 4.19: 短期破壊試験用の金具。左は実物の写真で、右は概要図になる。

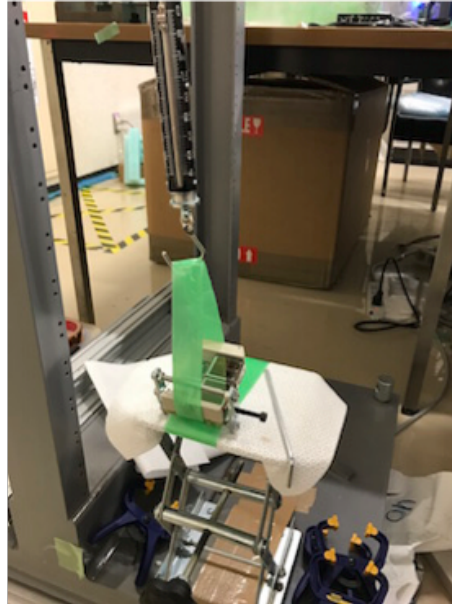


図 4.20: 短期破壊試験

| | 下辺の高さ | 中央の高さ | 上辺の高さ |
|------|----------|----------|----------|
| シムなし | 20.83 mm | 20.82 mm | 20.81 mm |
| シムあり | 21.23 mm | 21.28 mm | 21.15 mm |

表 4.1: PMT モジュールの高さの比較。厚さ 2 mm のシムをフロントボードと PMT の隙間に挟んだ。挟まれたシムは 0.4 mm ほど潰れてはいるが、それでも PMT モジュールは本来より膨らんでしまっている。これでは TOP カウンターにインストールする際に問題が生じる。

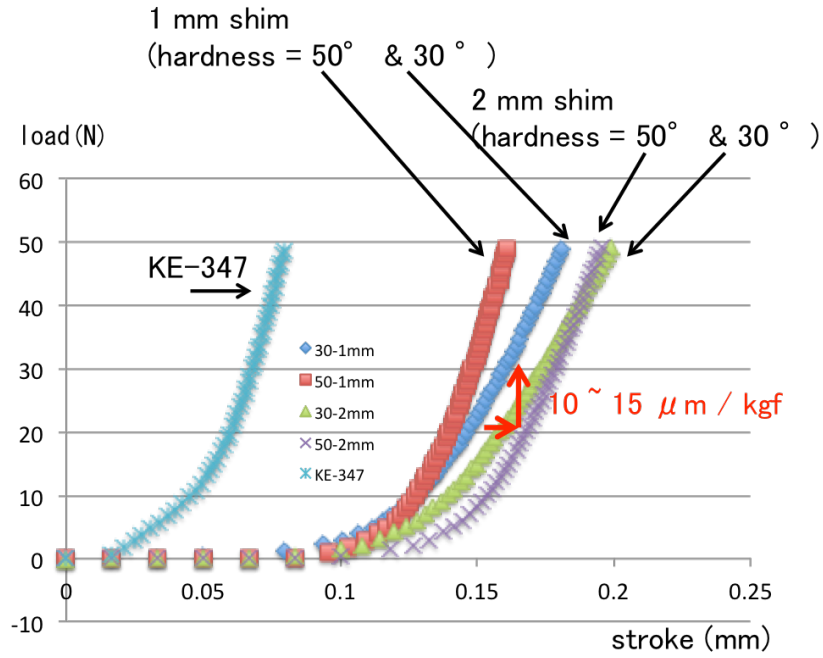


図 4.21: シム圧縮試験。縦軸がかけた負荷、横軸がシムが潰れた距離を示している。硬度 50° と 30° のシリコンシムをそれぞれ厚さ 1.0 mm と 2.0 mm 用意し行った。どのシムも負荷をかけると、負荷に対するストロークの傾きが一定に近づいている。

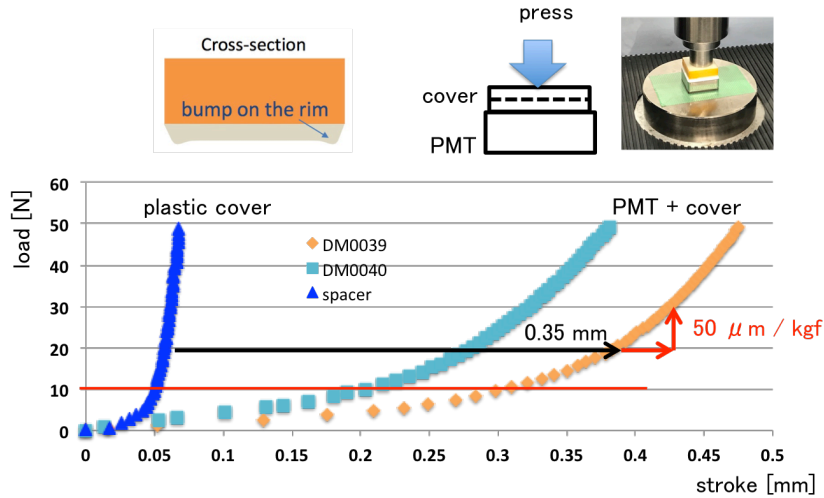


図 4.22: シリコンポッティング圧縮試験。縦軸がかけた負荷、横軸がシリコンポッティングが潰れた距離を示している。青いプロットは試験に使ったカバー単体の圧縮試験の結果である。図 4.21 と比べると負荷をかけなかった場合の圧縮率が大きいことがわかる。

4.2.3 Cure in place 方式での PMT の固定

MCP-PMT を PMT モジュール内部でより強固に固定する方法として、もう一つの方法が考案された。MCP-PMT とフロントボードのギャップにシリコンを流し込んで MCP-PMT を固定するというもので、我々はこの方法を Cure in place 方式と名付けた。

この方式のメリットは、MCP-PMT の個体差に対応できる点にある。前述した通り MCP-PMT の高さには個体差があり、さらに底面のシリコンポッティングも完全な平面ではなく、凹凸が存在している。そのためシム方式を採用すると、MCP-PMT が回転した際にフロントボードに押し付けられてかかる負荷が均等ではなく、底面の膨らんでいる箇所から負荷がかかり始めてしまう。また埋めきれないギャップは MCP-PMT が回転する余地となってしまう。しかし Cure in place 方式の場合はシリコンを流し込んで固めるため、MCP-PMT とフロントボードのギャップを隙間なく埋めることができ、MCP-PMT にかかる負荷を均一にできるほか、MCP-PMT が回転する余地をなくしてしまえる。使用するシリコンには信越シリコンの KE-45 と KE-347 を選択し、それぞれ試験した。KE45 は KE-347 に比べると固まる前の粘性が高いが、固まった後の硬度はどちらも 30° である [5]。

シム方式と同様に短期的な負荷をかけて、MCP-PMT の固定が出来ているかを試験したところ、4 kgf の負荷をかけても MCP-PMT と波長カットフィルターの剥離は見られなかった。

デメリットとしては、シム方式に比べると作業時間がかかることと、シリコンで固めてしまうため PMT モジュールを分解しても MCP-PMT やフロントボードを再利用できないことが挙げられる。特に作業時間の問題は大きく、KE-45 を用いた作業では、当初シリコンを流し込むのに MCP-PMT1 個あたり 2 時間を必要とした。この時間はあくまでシリコンを流し込むのにかかった時間なので、作業が完了するまでにはさらにシリコンが固まるまでの時間が必要となる。これほどに時間がかかるのはギャップの狭さによるところが大きい。シリコンは、ディスペンサーにつないだシリンジをフロントボードとのギャップに差し込んで流し込むのだが、狭さから細いシリンジを選択せざるを得ず、しかしその中を粘性のあるシリコンが流れるには時間がかかってしまうからである。さらにシリコンには粘性があるため、無造作に流し込んでも隙間なく詰めることはできず、目視での確認が必要となるが、やはりその狭さのために確認が非常に難しいことも作業時間の増加に拍車をかけている。ただしシリコンをより粘性の低い KE-347 に変えることで、作業時間を MCP-PMT1 個あたり 30 分まで縮めることができた。

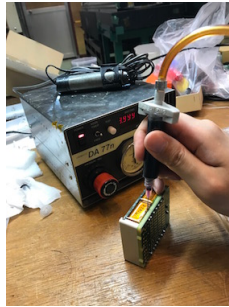


図 4.23: ディスペンサーを使ってシリコンを流し込む

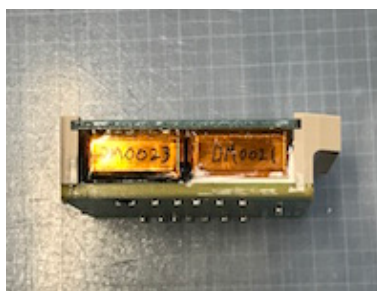


図 4.24: フロントボードと PMT の隙間にシリコンを流し込んだ PMT モジュール。黒いシリコンは信越シリコンの KE-45、白いシリコンは信越シリコンの XE11-B5320。XE11-B5320 は最初期のテストで使ったのみで、粘度の高さから以降は使用されていない。

4.3 長期試験

短期間での負荷試験での結果からシム方式と Cure in place 方式は、PMT モジュールの補修案として有効であると思われるが、長期に磁場中にあった場合に実用に足るとはまだわからない。そこで補修した PMT モジュールに長期間負荷をかけた試験と磁場をかけた試験を行い、2案の実用性を検証した。この小節では長期に負荷をかけた場合について記述する。

補修した PMT モジュールを用意し、図 4.25 のように固定した MCP-PMT の一端に負荷をかけて長期間放置し、MCP-PMT が回転し波長カットフィルターから剥離するかどうかを目視で確認した。試験した MCP-PMT は 5 個で、内訳はシム方式は厚さが 1.0 mm のシムと 2.0 mm のシムを挟んだ 2 個で、硬度はどちらも 50°、Cure in place 方式は KE-45 が 1 個で KE-347 が 2 個の計 3 個となっている（表 4.2 参照）。かける負荷は 1.5 T の磁場中で MCP-PMT が受ける負荷を考慮して、それより少し大きい 2 kgf とした。

試験は 74 日間にわたり続き、KE-347 を使用した Cure in place 方式で固定された MCP-PMT を除く 3 個の MCP-PMT の全てに、試験期間中での波長カットフィルターの剥離は確認されなかった（図 4.28）。KE-347 で固定した 2 個は 1 日持たずに剥離してしまったが、PMT モジュールを分解してみたところ、シリコンが十分に流し込めておらず隙間があることがわかった。KE-347 の硬度は KE-45 と同じ 30° なので、シリコンを十分に流し込めていれば試験期間中に剥離することはなかったと思われる。

以上より長期試験からはシム方式と Cure in place 方式の両補修案ともに実用に耐えうることが確認された。

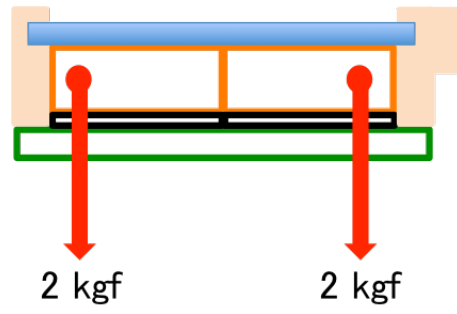


図 4.25: 長期試験概略図



図 4.26: 長期試験セットアップ1



図 4.27: 長期試験セットアップ 2

| | DM0023 | DM0024 | DM0025 | DM0028 | DM0031 |
|--------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|
| 補修方法 | Cure in place 方式 | Cure in place 方式 | Cure in place 方式 | シム方式 | シム方式 |
| 使用したもの | KE-45 | KE-347 | KE-347 | 硬度 50° | 硬度 50° |
| 厚さ | | | | 1.0 mm | 2.0 mm |

表 4.2: 長期試験を行った MCP-PMT。

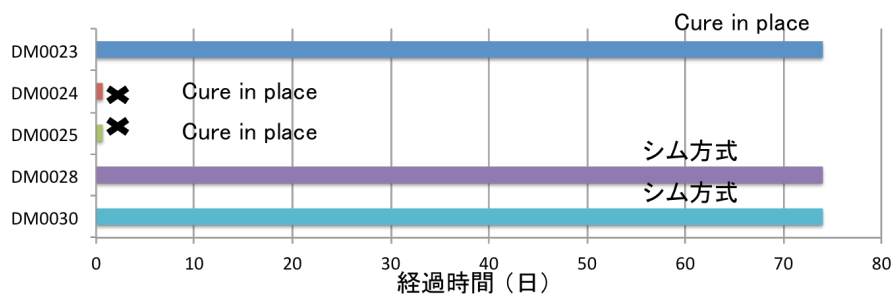


図 4.28: 長期試験結果。シリコンの流し込みに隙間があった DM0024 と DM0025 以外は 2ヶ月以上の間、剥離が見られない。

4.4 磁場試験

前小節では長期的に負荷をかけての試験について記述した。この小節では補修した PMT モジュールに、Belle II 実験時と同様に 1.5 T の磁場をかけて、シム方式と Cure in place 方式の実用性を検証する。

磁場試験には KEK の北カウンターホールにある双極電磁石を使用した。補修した PMT モジュールを双極電磁石中にタッパーと鉛ブロックで固定し、1.5 T の磁場を 1 日に数時間、複数日に渡ってかけた。磁場をかけた PMT モジュールは合計で 7 個で、内訳はシム方式で補修したものが 4 個、Cure in place 方式で補修したものが 1 個、補修をしていないものが 2 個である。シム方式で補修したものは使用しているシムに違いがあり、シリコンシムで厚さ 2.0 mm、硬度 30° のものが 2 個、シリコンシムで厚さ 2.0 mm、硬度 50° のものが 1 個、EPDM シムで厚さ 1.5 mm、硬度 70° のものが 1 個となっている。1 日の磁場試験終了ごとに肉眼で波長カットフィルターが剥離しているかどうかを確認した。

図 4.29 が結果をまとめたものである。PMT モジュール内の MCP-PMT1 個ずつの経過を見ており、補修しなかった PMT モジュールと EPDM シムで補修した PMT モジュールには早い段階で波長カットフィルターの剥離が見られた。EPDM シムで補修した PMT モジュールに剥離が見られたのは、MCP-PMT とフロントボードのギャップに対してシムの厚さが薄かったからだと考えられる。十分な厚さを持ったシムまたは Cure in place 方式で補修した PMT モジュールには試験期間中に剥離が確認されなかった。

以上より磁場試験からもシム方式と Cure in place 方式の両補修案ともに実用に耐えうることが確認された。

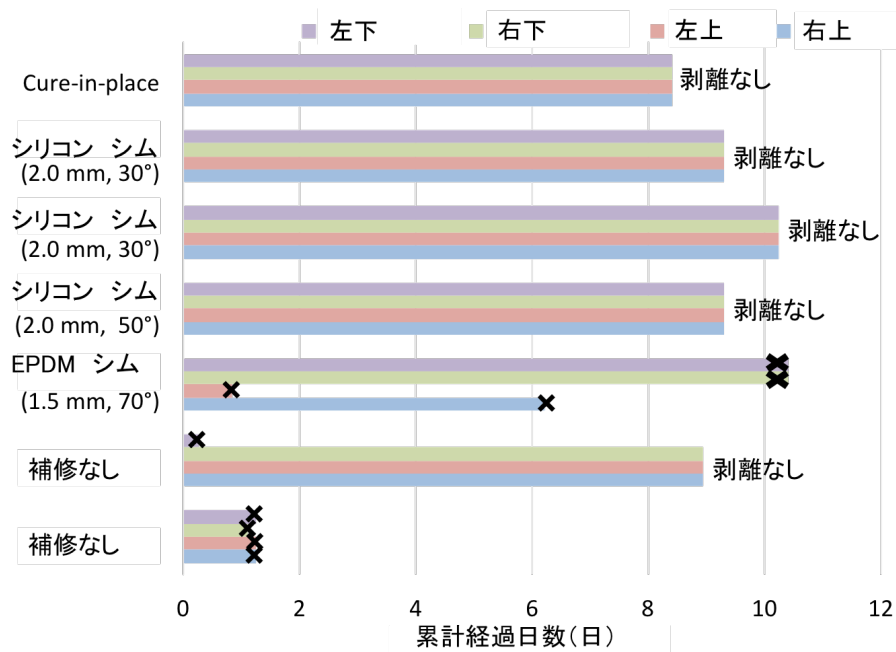


図 4.29: 磁場試験結果。シリコンシムと Cure in place 方式で補修した PMT モジュールは 8 日以上剥離が確認されなかった。EPDM シムで補修したものと補修のないものには早い段階での剥離が確認された。

5 結論

TOP カウンターは Belle II 実験に向けて K/π 中間子の識別率向上と誤識別率減少のために導入された新型のリングイメージ型チェレンコフ検出器である。その性能は TOP カウンターの時間分解能と検出光子数に左右される。本研究では、機械的観点から、TOP カウンターの粒子識別性能に影響を与える要因に対処した。

TOP カウンターの性能に影響を与える機械的要因としては石英輻射体の歪みがあげられる。そこで私は、TOP カウンターが最も歪みやすいインストール時に、TOP カウンターの歪みをストレインゲージとダイヤルゲージを用いて測定した。

またインストール後に行った磁場中での TOP カウンターの動作試験において、磁場中で PMT モジュールと MCP-PMT の回転が起こっていることが確認されたため、対処法を模索した。

以下にそれぞれの結果について述べる。

TOP カウンターの歪み測定

TOP カウンターの歪み測定では、TOP カウンターの歪みの許容範囲を $500 \mu\text{m}$ とし、インストール時の TOP カウンターの歪みと z-beam での連結時の歪み、ストロングバック取り外し時の歪み、そしてストロングバック取り外し後の歪みの測定を行った。特にインストール時の歪みはリアルタイムでの測定を行った。測定器具はストレインゲージとダイヤルゲージを用いたものをそれぞれ用意し、常に複数の器具で歪みを測定することで歪み測定の信頼度を高めた。歪みの測定は問題なく行われ、TOP カウンターはインストールの開始時からストロングバックを取り外した数日後まで許容範囲である $500 \mu\text{m}$ を超えて歪むことはなかった。以上より TOP カウンターのインストールは問題なく終了した。

磁場中での MCP-PMT の回転

磁場中での TOP カウンターの動作試験の際に複数の PMT モジュールから信号が送られていないことが確認された。CCD カメラで内部を確認したところ、PMT モジュールが磁場の影響を受けて回転しており、チャンネルと読み出し機器の接触が外れてしまっていたことが原因であった。そこで PMT モジュールと QBB の隙間にシムを挟み PMT モジュールを固定した。その結果 PMT モジュールの回転は止まったが、今度は PMT モジュール内部で MCP-PMT が回転していることが CCD カメラからわかった。MCP-PMT の回転は TOP カウンターの性能低下に大きな影響を与えるものではなかったが、止められるのならばこの回転も止めた方が良いため、その対処法を考えることとなった。すでに TOP カウンターにインストールされている PMT モジュールを取り出して補修する上に補修できる期間が短いため、手早い補修方法が求められた。そこで補修案として 2 つの方法を考案し、その実用性を確かめた。

1. シム方式

MCP-PMT とフロントボードの間にシムを挟んで MCP-PMT を固定する方法。短期破壊試験、長期試験、磁場試験のどれにおいても MCP-PMT が回転することはない、補修方法としての実用性がある。PMT モジュール 1 個あたり 10 ～ 20 分で補修できるため、短時間での補修が可能。

2. Cure in place 方式

MCP-PMT とフロントボードの間にシリコンを流し込んで MCP-PMT を固定する方法。シリコンを隙間なく流し込めた場合、短期破壊試験、長期試験、磁場試験のどれにおいても MCP-PMT が回転することはない。しかし PMT モジュール 1 個あたりの補修時間が数時間かかる上にシリコンを隙間なく流すことが難しいため補修方法としての実用性は、現状ではシム方式に劣る。

以上より MCP-PMT の回転を止めるための補修方法としてを模索し、シム方式をメインとして、Cure in place 方式はバックアッププランとして補修方法を確立した。

本研究により、TOP カウンターの性能低下につながる機械的要因を Belle II 実験開始前に取り除くことができた。

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(2011)
- [2] T. Abe et al., "Belle II Technical Design Report" , KEK Report 2010-1, arXiv:1011.0352(2010)
- [3] 浜松ホトニクス株式会社, "光電子増倍管 その基礎と応用 第3a版"(2007)
- [4] 株式会社 共和電業, "ひずみゲージ"
- [5] 信越化学工業株式会社, "電子・電気・一般工業用 RTV シリコーンゴム"

謝辞

本研究に際して、様々にご指導をいただきました飯嶋徹教授、居波賢二准教授、鈴木一仁特任講師、松岡広大特任准教授をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝いたします。指導教官である居波准教授には、多くの場面でご助言をいただき、研究を進展させることができました。また戸本誠准教授、堀井泰之助教をはじめとする ATLAS グループの方々には、研究グループは別ながら鋭い指摘やご意見をいただき、研究を遂行する上で非常に参考になりました。研究室以外にも、KEK の高力孝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。

多くの方のご協力のもと、本研究を遂行することができました。この場を借りて深く御礼申し上げます。