

修士論文

Belle II 実験 TOP カウンター
実機の光学性能評価

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 (N 研)
学籍番号:261001175

古賀 裕介

2012年1月23日

概要

2015 年開始予定の Belle II 実験は、世界最高のピークルミノシティ ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で B 中間子を大量に生成し、その稀崩壊現象を調べることで標準理論を超える新しい物理の探索を行う。これらの稀崩壊現象を調べる上で終状態に現れる K 中間子と π 中間子の識別が重要である。私は、Belle II 実験で K/π 識別を担う粒子識別装置 TOP (Time Of Propagation) カウンターの開発研究を行っており、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、石英輻射体やフォーカシングミラーなどの光学素子と光検出器 MCP-PMT (マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管) から構成される。荷電粒子が石英輻射体を通過する際に発するチェレンコフ光を光学素子内に伝搬させ、端面に接続された MCP-PMT で検出する。ある運動量の粒子に対しチェレンコフ光の放出角は質量に依存することを利用しており、検出光子の位置と時間情報からチェレンコフリングイメージを再構成することで粒子識別を行う。チェレンコフ光が伝搬する際の光子数の減少と光路のずれが識別性能に影響するため、各光学素子の光学性能が非常に重要である。

これまでの研究から、目指す識別性能を達成するために必要な各光学素子の光学性能が明らかになっている。具体的には、以下の 3 点である。

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。
- 10 年間の運転で予想される放射線照射による光子数の減少が 10% 以下。

さらに、実機生産には以下が求められる。

- 石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 $100 \mu\text{m}$ 以下の精度で接着。

本研究では、レーザー、フォトダイオード、CCD カメラを用いた高精度の光学性能測定システムを構築し、実機を構成する全ての光学素子について光学性能評価、放射線耐性試験を行った。その結果、各光学素子の光学性能が要求を満たしていることを明らかにした。また、石英輻射体とフォーカシングミラーの相対角度を $O(0.01)$ mrad、相対位置を $O(10) \mu\text{m}$ で制御可能な接着システムを構築し、実機プロトタイプの接着を行うことで、実機接着のシステム・手法を確立した。

本研究の成果は、各光学素子を用いて TOP カウンター実機を製作した際に期待通りの識別性能が得られることを、光学的観点から実証したことである。

目次

第 1 章 Belle/Belle II 実験と粒子識別	10
1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ	10
1.2 Belle 検出器	10
1.3 Belle 検出器の K/π 識別性能と課題	11
1.4 Belle II 検出器	12
1.5 Belle II 検出器における K/π 識別	13
第 2 章 TOP カウンタ	14
2.1 粒子識別の原理	14
2.2 TOP カウンターの構造	16
2.2.1 光検出器 MCP-PMT	17
2.3 TOP カウンターの K/π 識別性能	18
2.3.1 シミュレーションによる評価	19
2.4 各光学素子に求められる光学性能	20
2.4.1 本研究の内容	21
第 3 章 各光学素子の光学性能評価	22
3.1 石英輻射体の光学性能評価	22
3.1.1 石英ガラスの光学性質	22
3.1.2 石英輻射体の仕様	23
3.1.3 測定装置	24
レーザー	24
フォトダイオード	25
CCD カメラ	26
3.1.4 内部透過率測定	26
測定方法	26
結果	28
3.1.5 内部表面反射率測定	28
測定方法	29
結果	29
3.1.6 光路のずれ測定	31
測定方法	31
結果	32
3.2 その他の光学素子の光学性能評価	39

3.2.1	各光学素子の仕様	39
3.2.2	内部透過率測定	40
	測定方法	41
	結果	42
3.3	TOP カウンター全体での光学性能評価	43
3.4	まとめ	44
第4章	光学素子の放射線耐性試験	46
4.1	ガンマ線照射試験	46
4.1.1	Belle II 実験で予想されるガンマ線量	46
4.1.2	ガンマ線が光学素子に与える影響	46
4.1.3	照射サンプル	47
4.1.4	ガンマ線照射	47
4.1.5	測定・評価方法	48
4.1.6	結果	49
4.2	中性子線照射試験	53
4.2.1	Belle II 実験で予想される中性子線量	54
4.2.2	中性子線照射	54
4.2.3	照射サンプル	54
4.2.4	測定・評価方法	54
4.2.5	結果	55
4.3	まとめ	58
第5章	石英輻射体とフォーカシングミラーの接着	59
5.1	接着に求められる精度	59
5.2	接着システム	60
5.2.1	相対角度の調節・測定	62
5.2.2	相対位置の調節・測定	64
5.3	実機プロトタイプの接着	66
5.3.1	フォーカシングミラーの仕様	66
5.3.2	接着の配置と要求	67
	接着剤について	67
5.3.3	接着手順	68
5.3.4	接着後の測定結果	69
5.4	まとめ	69
第6章	結論	70
付録A	フレネルの式	75
A.1	フレネルの式	75

付録 B	石英輻射体の光路のずれ測定結果	77
B.1	Suprasil-P710	78
B.1.1	$x = 25$ mm	78
B.1.2	$x = 125$ mm	79
B.1.3	$x = 325$ mm	80
B.2	Corning7980 0D	81
B.2.1	$x = 25$ mm	81
B.2.2	$x = 125$ mm	82
B.2.3	$x = 325$ mm	83
付録 C	放射線耐性試験結果	84
C.1	ガンマ線照射試験	84
C.1.1	石英輻射体	84
C.1.2	光学フィルター	85
C.1.3	光学接着剤	86
C.1.4	光学グリス・シリコンラバー	87
C.2	中性子線照射試験	88
C.2.1	石英輻射体	88
C.2.2	光学フィルター	89
C.2.3	光学接着剤	90
C.2.4	光学グリス・シリコンラバー	91

目次

1.1	Belle 検出器の全体図	11
1.2	Belle 検出器における K/π 識別装置	12
1.3	Belle II 検出器の全体図	13
2.1	TOP カウンター概観	14
2.2	リングイメージ型チェレンコフ検出器の原理概観	15
2.3	TOP カウンターにおける光伝搬	15
2.4	TOP カウンターで検出されるリングイメージ	15
2.5	TOP カウンターを構成する各光学素子	16
2.6	Belle II 検出器における TOP カウンターの配置	16
2.7	MCP (Micro Channel Plate) と電子増幅原理	17
2.8	一光子検出時の電荷量と信号の時間分布	18
2.9	スーパーバイアルカリ光電面の QE 分布	18
2.10	K 中間子の識別効率と誤識別率	19
2.11	石英輻射体内でのチェレンコフ光伝搬の典型例	20
3.1	石英ガラスの光学性質	22
3.2	石英輻射体の面の定義	23
3.3	レーザーと光量モニター	24
3.4	フォトダイオード	25
3.5	フォトダイオードの感度の位置依存性	25
3.6	CCD カメラ	26
3.7	内部透過率測定のセットアップ	27
3.8	内部透過率の測定点	27
3.9	内部表面反射率測定のセットアップ	29
3.10	内部表面反射率の角度依存性	31
3.11	光路のずれ測定のセットアップ	32
3.12	CCD カメラで取得したデータと 2 次元フィットの典型例	33
3.13	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)	34
3.14	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)	35
3.15	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 入射角 30 度)	36
3.16	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 入射角 30 度)	37
3.17	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 0.1 mm ステップ)	38
3.18	V-570	41

3.19	基板 2 枚で挟んだサンプルの模式図	42
3.20	各光学素子の内部透過率測定結果	43
4.1	ガンマ線照射	48
4.2	U-4100	48
4.3	検出光子数の見積もり	49
4.4	石英輻射体のガンマ線照射結果	50
4.5	MCP-PMT 入射窓のガンマ線照射結果	51
4.6	各光学素子の検出光子数の比 (ガンマ線照射)	52
4.7	光学フィルターの検出光子数の比 (ガンマ線照射)	52
4.8	TOP カウンター全体でのガンマ線照射結果	53
4.9	東京大学原子炉「弥生」	54
4.10	石英輻射体の中性子線照射結果	55
4.11	MCP-PMT 入射窓の中性子線照射結果	56
4.12	各光学素子の検出光子数の比 (中性子線照射)	57
4.13	光学フィルターの検出光子数の比 (中性子線照射)	57
4.14	TOP カウンター全体での中性子線照射結果	58
5.1	接着の要求精度	59
5.2	接着用ジグ模式図	60
5.3	接着用ジグ写真	61
5.4	アルミ板 (上) と石英輻射体のたわみ	62
5.5	相対角度の調節	62
5.6	相対角度の測定	63
5.7	相対位置の調節	64
5.8	相対位置の測定	65
5.9	フォーカシングミラーの面の定義	66
5.10	石英輻射体とフォーカシングミラーの接着の配置図	67
A.1	光の反射の模式図	75
B.1	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 25$ mm)	78
B.2	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 125$ mm)	79
B.3	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 325$ mm)	80
B.4	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 25$ mm)	81
B.5	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 125$ mm)	82
B.6	Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 325$ mm)	83
C.1	石英輻射体のガンマ線照射結果	84
C.2	光学フィルターのガンマ線照射結果	85
C.3	光学接着剤のガンマ線照射結果	86
C.4	光学グリス・シリコンラバーのガンマ線照射結果	87

C.5	石英輻射体の中性子線照射結果	88
C.6	光学フィルターの中性子線照射結果	89
C.7	光学接着剤の中性子線照射結果	90
C.8	光学グリス・シリコンラバーの中性子線照射結果	91

表目次

1.1	Belle 検出器の K/π 識別性能	12
2.1	物理過程での識別性能の比較	19
3.1	石英輻射体の仕様	23
3.2	半導体レーザーの仕様	24
3.3	Suprasil-P710 の内部透過率測定結果	28
3.4	Corning7980 0D の内部透過率測定結果	28
3.5	岡本光学によって研磨された石英輻射体の内部反射率測定結果	30
3.6	Zygo 社によって研磨された石英輻射体の内部反射率測定結果	30
3.7	光学フィルターの仕様	39
3.8	光学接着剤の仕様	40
3.9	MCP-PMT 入射窓の仕様	40
3.10	光学グリス・シリコンラバーの仕様	40
3.11	V-570 の仕様	41
3.12	ガラス基板の仕様	42
4.1	石英輻射体サンプルの仕様	47
4.2	U-4100 の仕様	49
5.1	アルミ板(上、下)、塩化ビニル板のサイズ	61
5.2	マイクロメータヘッドの仕様	63
5.3	オートコリメータの仕様	64
5.4	レーザー変位計の仕様	65
5.5	フォーカシングミラーの仕様	66
5.6	NBA107 の仕様	68
6.1	石英輻射体の光学性能測定結果	70

序論

素粒子物理学における標準理論は、これまでに行われた実験結果をほぼ全て説明することに成功している。しかし、標準理論には、重力が含まれていないことや3つの相互作用が統一されていないことなど不十分な部分がある。また、標準理論で質量の起源となるヒッグス粒子は未だ発見されていない。これらの課題を解決するために、標準理論を超える超対称性理論や余剰次元理論などが提案されている。これらの理論で存在が示唆されている、TeV領域の物理法則の開拓が素粒子物理学の最重要課題である。

Belle II 実験は世界最高のピークルミノシティ ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で B 中間子を大量に生成し、 $B \rightarrow \rho\gamma$ 、 $B \rightarrow K^*\gamma$ などの稀崩壊現象を精密に調べることで標準を超える新しい物理の探索を行う。B 中間子の稀崩壊の多くは終状態に K 中間子や π 中間子を含むため、効率の良い K/π 識別は非常に重要な役割を担う。

私は、Belle II 実験で K/π 識別を行う粒子識別装置 TOP (Time Of Propagation) カウンターの開発研究に取り組んでおり、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、石英輻射体やフォーカシングミラーなどの光学素子と光検出器 MCP-PMT (マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管) から構成される。荷電粒子が石英輻射体を通過する際に発するチェレンコフ光を光学素子内に伝搬させ、端面に接続された MCP-PMT で検出する。ある運動量の粒子に対しチェレンコフ光の放出角は質量に依存することを利用しており、検出光子の位置と時間情報からチェレンコフリングイメージを再構成することで粒子識別を行う。チェレンコフ光が伝搬する際の光子数の減少と光路のずれが識別性能に影響するため、各光学素子の光学性能は非常に重要である。これまでの研究から、目指す識別性能を達成するために必要な光学素子の光学性能が明らかになっている。具体的には以下の3点である。

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。
- 10 年間の運転で予想される放射線照射による光子数の減少が 10% 以下。

また、それに関連して実機生産には以下が求められる。

- 石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 $100 \mu\text{m}$ 以下の精度で接着。

本研究では、レーザー、フォトダイオード、CCD カメラを用いた高精度の光学性能測定システムを構築し、実機を構成する全ての光学素子について光学性能評価、放射線耐

性試験を行った。また、石英輻射体とフォーカシングミラーの相対角度と相対位置を高精度で制御可能な接着システムを構築し、実機プロトタイプの接着を行った。本論文の構成を以下に示す。

- 第1章：Belle/Belle II 実験とその粒子識別についてまとめる。Belle 実験から Belle II 実験へ至った経緯や、Belle 実験の粒子識別の課題を明らかにし、Belle II 実験における TOP カウンターの有用性を論じる。
- 第2章：TOP カウンターについてまとめる。粒子識別の原理や構造について述べ、TOP カウンターを構成する各光学素子に求められる光学性能を示す。
- 第3章：TOP カウンターを構成する各光学素子の光学性能評価についてまとめる。石英輻射体については、内部透過率、内部表面反射率、光路のずれの各測定について述べる。その他の光学素子については内部透過率測定について述べる。また、TOP カウンター全体での光学性能評価についても述べる。
- 第4章：各光学素子の放射線耐性試験についてまとめる。放射線照射の方法、放射線による影響の評価方法、結果を述べる。
- 第5章：実機生産に必要な石英輻射体とフォーカシングミラーの接着についてまとめる。接着システムの構築や接手法について述べ、それを用いて行った実機プロトタイプの接着について述べる。
- 第7章：本論文の結論を述べる。

第1章 Belle/Belle II実験と粒子識別

本章では Belle 実験から Belle II 実験へ至った経緯を述べる。また、Belle 実験の粒子識別の課題を明らかにし、Belle II 実験における TOP カウンターの有用性を論じる。

1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ

Belle 実験は CP 対称性の破れを検証することを目的として、1999 年に高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市) で開始された。Belle 実験では KEKB 加速器を用いて 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を加速させ、衝突させる。電子・陽電子の衝突における重心系でのエネルギーを $\Upsilon(4S)$ の質量 ($10.58 \text{ GeV}/c^2$) に合わせており、 $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ により、年間 10^8 個もの B 中間子対を生成する。その崩壊過程を衝突点に配置した Belle 検出器を用いて精密に測定することで CP 対称性の破れを観測することができる。2001 年に $B \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊における CP 対称性の破れを発見した。この発見は小林・益川理論の正しさを証明し、小林誠、益川敏英両氏のノーベル物理学賞受賞 (2008 年) につながった。

Belle 実験のデータ取得は 2010 年 6 月に終了したが、世界最高のピークルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、積分ルミノシティで 1 ab^{-1} 以上のデータを取得した。

今後、Belle 実験で得られたピークルミノシティを 40 倍に増強させた Belle II 実験を 2015 年に開始する予定である。目的は、 $B \rightarrow \rho\gamma$ 、 $B \rightarrow K^*\gamma$ などの稀崩壊事象を精密に調べることで、標準理論を超える新しい物理の探索を行うことである。高統計のデータを用いることで、LHC などのエネルギーフロンティア実験では見えない信号を観測できる可能性がある。

現在 Belle 検出器の解体がほぼ終了し、Belle II 実験に向けて新しい Belle II 検出器や Super-KEKB 加速器の建設が進んでいる。

1.2 Belle 検出器

B 中間子崩壊における CP 対称性の破れを観測するためには、生成した B 中間子の 4 元運動量と生成から崩壊までの移動距離を高い精度で測定する必要がある。B 中間子の 4 元運動量を精度良く測定するためには、B 中間子の崩壊で生成された粒子の運動量やエネルギーの測定と、粒子識別が必要となる。これらの要求を満たすように Belle 検出器は設計された [1]。図 1.1 が Belle 検出器の全体図であり、大きさは約 $7 \times 7 \times 7 \text{ m}^3$ 、重量は約 2000 t である。非対称エネルギーの加速器に対応して、測定器も衝突点に対して前後方非対称に設計され、電子ビームの方向からの角度が 17–150 度の領域をカバーしている。内側からシリコンストリップ検出器 (SVD : Silicon Vertex Detector)、中央飛跡検出器

(CDC : Central Drift Chamber)、ACC (Aerogel Cherenkov Counter)、TOF (Time Of Flight counter)、電磁カロリメータ (ECL : CsI Electronic Calorimeter)、超伝導ソレノイド、 K_L ・ミューオン検出器 (KLM : K_L and Muon detector) が配置されている。それぞれの機能を以下に述べる。

SVD : 粒子の崩壊位置を $70 \mu\text{m}$ の精度で測定

CDC : 荷電粒子の運動量を 0.3% 、単位長さあたりのエネルギー損失 (dE/dx) を 6% の精度で測定

ACC : チェレンコフ光検出による K/π 中間子の識別

TOF : 粒子の飛行時間を 100 ps の精度で測定

ECL : 電子・光子のエネルギーを 2% 、入射位置を 5 mm の精度で測定

KLM : μ 粒子・ K_L 中間子の検出

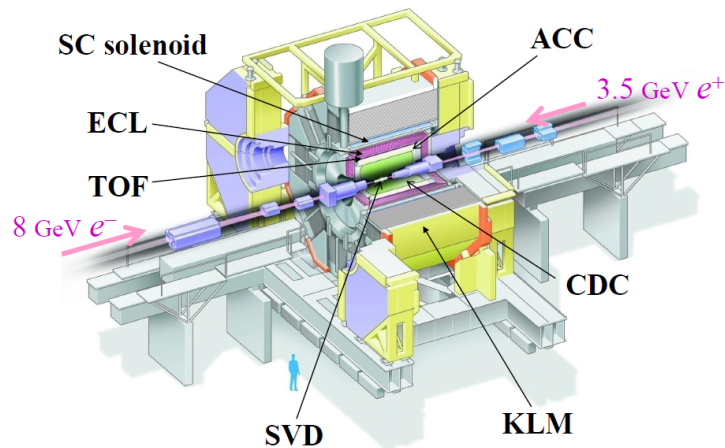


図. 1.1: Belle 検出器の全体図。内側から SVD、CDC、ACC、TOF、ECL、超伝導ソレノイド、KLM が配置されている。

1.3 Belle 検出器の K/π 識別性能と課題

多くの B 中間子崩壊の終状態に荷電 K 中間子、荷電 π 中間子が含まれ、それらの特性が似通っていることから、 K/π 識別は B 中間子崩壊の研究において重要な役割を担う。Belle 検出器においては、ACC、TOF の情報と CDC で測定した dE/dx を用いて K/π 識別を行う。1 GeV/c までの運動量領域では、CDC の dE/dx と TOF が粒子識別を担い、それ以上の運動量領域を ACC が補う。図 1.2 に 3 つの検出器が担当する運動量領域を示す¹。

¹この図は Belle Collaboration の PID (Particle IDentification : 粒子識別) グループによって作成されたものである。

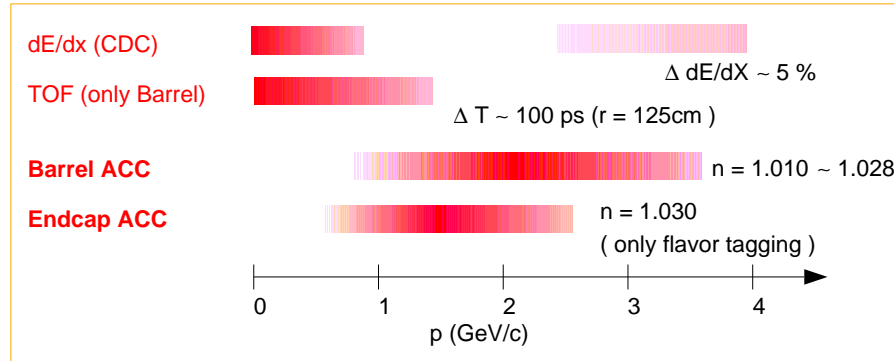


図. 1.2: Belle 検出器における K/π 識別装置。ACC、TOF、CDC の dE/dx がそれぞれ担当する運動量領域を示す。

Belle 検出器の K/π 識別性能を表 1.1 に示す [2]。 e_K は K 中間子の識別効率 (Efficiency) を、 f_π は π 中間子を K 中間子と誤認する誤識別率 (Fake rate) を表している。

p (GeV/c)	e_K (%)	f_π (%)
1.80–2.00	85.4 ± 0.3	10.2 ± 0.3
3.00–3.50	83.8 ± 0.3	7.2 ± 0.2

表. 1.1: Belle 検出器の K/π 識別性能

粒子識別の課題

表 1.1 に示したように Belle 検出器は高い識別性能を持つが、Belle II 実験の目的である稀崩壊現象の探索にはより高い精度での K/π 識別が求められる。

また、広範囲の運動量領域において粒子識別を担っているバレル ACC は 960 個のカウンターモジュールから構成されており、それぞれのカウンターモジュールには 1 個または 2 個のファインメッシュ PMT が組み込まれているために、総物質量が大きく、物質量が不均一である。このことが Belle 検出器の外縁に配置される ECL による光子や電子の測定に悪影響を与える。これらが Belle 検出器の粒子識別の課題である。

1.4 Belle II 検出器

Belle II 実験では、ルミノシティを Belle 実験の 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増強させるとともに、検出器も Belle 検出器から Belle II 検出器にアップグレードする [3]。Belle II 検出器は高いルミノシティに付随する高いバックグラウンド環境に耐える設計になっている。また、それに加えて様々な性能向上を目指している。図 1.3 に Belle II 検出器の全体図を示す。内側からピクセル型シリコン検出器 (PXD : Pixel Detector)、シリコンストリップ検出器 (SVD)、中央飛跡検出器 (CDC)、TOP カウンター (Time Of Propagation counter)・A-RICH 検出器 (Aerogel-Ring Image Cherenkov detector)、電磁カロリメータ (ECL)、超

伝導ソレノイド、 K_L ・ミュオン検出器 (KLM) を配置する。主な変更点は、SVD の内側に 2 層のピクセル型シリコン検出器 (PXD) を導入することや、 K/π 識別装置を ACC と TOF から、TOP カウンター (パレル領域) と A-RICH 検出器 (エンドキャップ領域) に変更することなどである。PXD を導入することで、粒子の崩壊位置の測定精度が $\sim 20 \mu\text{m}$ に向上する。新しい K/π 識別装置については、次節で説明する。

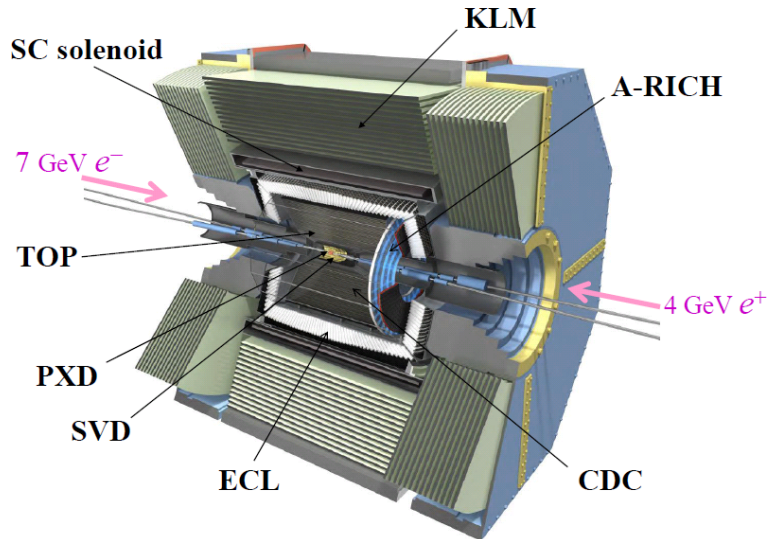


図. 1.3: Belle II 検出器の全体図。内側から PXD、SVD、CDC、TOP (パレル領域)・A-RICH (エンドキャップ領域)、ECL、超電導ソレノイド、KLM を配置する。

1.5 Belle II 検出器における K/π 識別

Belle 実験における K/π 識別は、異なる運動量領域を TOF、ACC、CDC の dE/dx がカバーすることで行った。Belle II 実験では、TOF、ACC を TOP カウンター、A-RICH 検出器に取り替え、CDC の dE/dx は引き続き利用する。閾値型のチェレンコフ検出器である ACC においては、チェレンコフ光が出るか出ないかで K/π 識別を行うが、リングイメージ型チェレンコフ検出器である TOP カウンターと A-RICH 検出器では、チェレンコフ光子の位置や時間の情報をフルに活用してチェレンコフリングを再構成するため、より高い識別性能を実現できる。また、TOP カウンターは TOF カウンターの役割も兼ね備えている。TOP カウンター、A-RICH 検出器の導入により、特に ACC が抱えていた物質質量の問題を克服できることも、大きな改善点の一つである。TOP カウンターに関する詳細は、期待される識別性能も含めて、次章で示す。A-RICH 検出器の詳細については、参考文献 [3] を参照されたい。

第2章 TOP カウンタ

この章では粒子識別装置 TOP カウンターについて、その構造と粒子識別の原理、識別性能を述べる [3]。また、TOP カウンターを構成する各光学素子に要求される光学性能を示す。

2.1 粒子識別の原理

TOP (Time Of Propagation) カウンターはリングイメージ型チェレンコフ検出器の一種であり、荷電粒子が物質中の光速を超える速度で石英輻射体を通じた際に円錐状に放出するチェレンコフ光を検出する。検出した光子からリングイメージを再構成し、粒子の速度を算出することで粒子識別を行う。

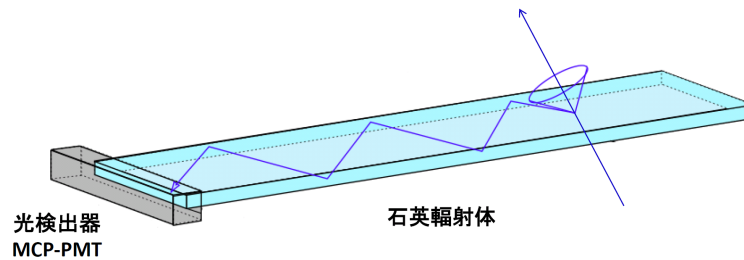


図. 2.1: TOP カウンター概観。石英輻射体で荷電粒子が発するチェレンコフ光を検出することで、粒子識別の情報を得る。

チェレンコフ光の放出角 θ_c と粒子の速度 β には、 $\cos\theta_c = 1/n\beta$ の関係があるため、リングイメージから θ_c が測定されると β が分かる。また、粒子の質量 m と速度 β 、運動量 p の間には、以下の関係式がある。

$$m = \frac{p \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \quad (2.1)$$

Belle II 検出器では、荷電粒子の運動量を CDC で測定できるため、リングイメージから得られた速度を用いることで、式 (2.1) から粒子の質量が求められ、粒子を識別することができる。

通常のリングイメージ型チェレンコフ検出器では、光子の位置情報を用いてリングイメージを再構成する [4]。図 2.2 に、その一例を概念図として示す。TOP カウンターの場合、石英輻射体の端面における位置情報に精密な時間情報を組み合わせることで粒子識別を行う。リング全体を投影する必要がないため、コンパクトな検出器を実現できる。 K/π

粒子通過時のチェレンコフ輻射とその光路の模式図を図 2.3 に、TOP カウンターで検出されるリングイメージを図 2.4 にそれぞれ示す。

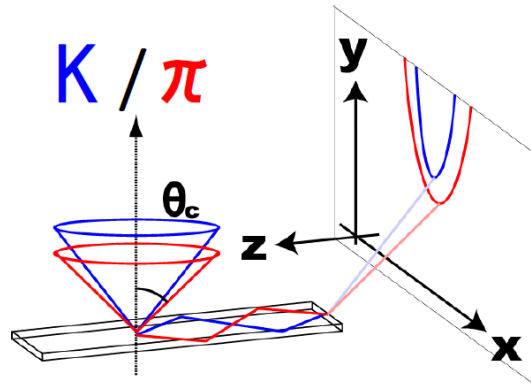


図. 2.2: リングイメージ型チェレンコフ検出器の原理概観。K 中間子 (青) と π 中間子 (赤) が異なるリングイメージを描く。

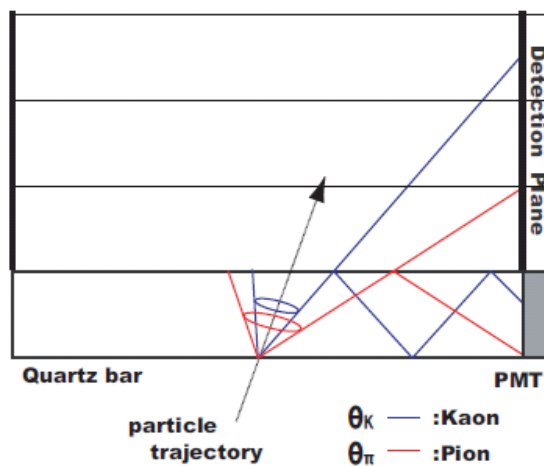


図. 2.3: TOP カウンターにおける光伝搬。輻射体内を伝搬する光子を検出し、リングイメージを取得する。位置情報は折り畳みによる不定性を持つが、時間情報によって補われる。

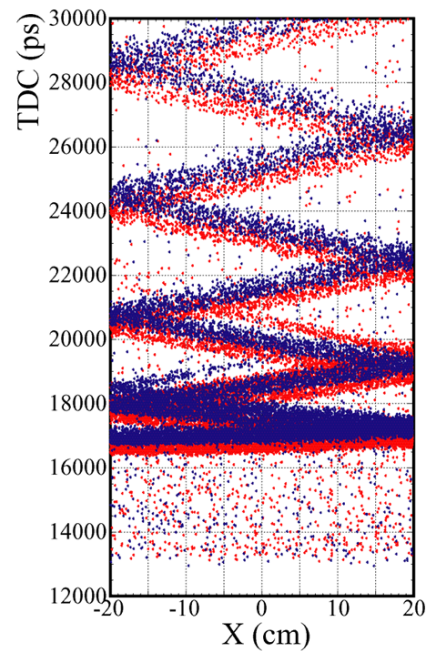


図. 2.4: TOP カウンターで検出されるリングイメージ。K 中間子 (青) と π 中間子 (赤) のリングイメージを示す。

2.2 TOPカウンターの構造

TOP カウンターは図 2.5 に示すように、2 つの石英輻射体とフォーカシングミラー、光検出器 MCP-PMT (マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管) で構成されている。フォーカシングミラーの端面は球面に研磨されておりアルミミラーが蒸着されている。また、MCP-PMT と石英輻射体の間には短波長の光をカットする光学フィルターを挿入する。これらは、波長分散効果による時間分解能の悪化を防ぐためであり、シミュレーションによる評価によって、フォーカシングミラーの球面半径は 5000 mm、光学フィルターは 300–350 nm 以下の波長領域をカットするのが最適だとわかっている。その他に、石英輻射体やフォーカシングミラーの接着に用いる光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、MCP-PMT - 光学フィルター間と光学フィルター - 石英輻射体間の光学的接続に用いる光学グリス、シリコンラバーも TOP カウンターを構成する光学素子である。

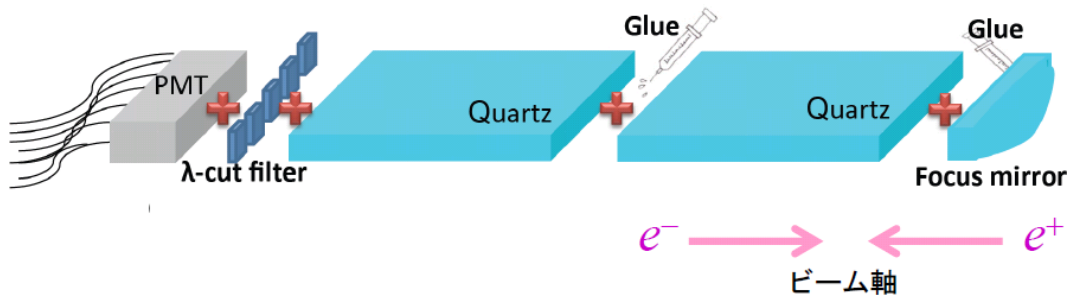


図. 2.5: TOP カウンターを構成する各光学素子。2 つの石英輻射体とフォーカシングミラー、光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学フィルター、光学グリス、シリコンラバーがある。

TOP カウンターの 1 機の大きさは約 $2610 \times 450 \times 20 \text{ mm}^3$ であり、これを図 2.6 のように Belle II 検出器のパレル領域を覆うように 16 機設置する。

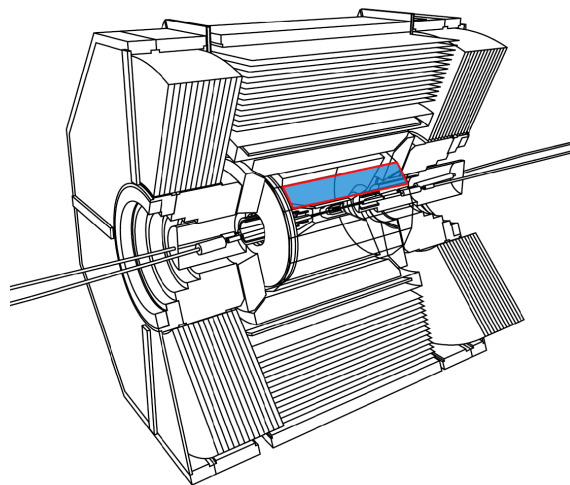


図. 2.6: Belle II 検出器における TOP カウンターの配置。色付きの部分が 1 機分に対応する。パレル領域を覆うように 16 機設置する。

2.2.1 光検出器 MCP-PMT

MCP-PMT は、約 $10\ \mu\text{m}$ 径の小さな穴を開けた板である MCP (マイクロチャンネルプレート) を二次電子増幅部に用いた光電子増倍管である。光電面から放出された光電子は光電面-MCP 間で加速され MCP に入射し、MCP 内で衝突を繰り返して増幅される。

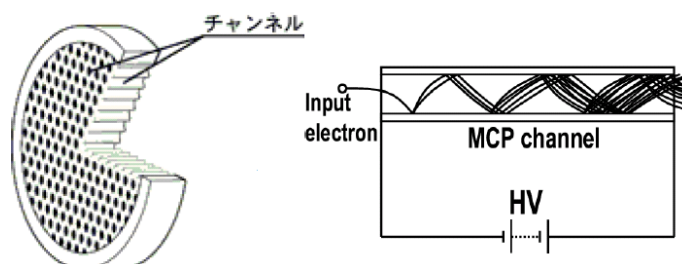


図. 2.7: MCP (Micro Channel Plate) と電子増幅原理。MCP (マイクロチャンネルプレート) は約 $10\ \mu\text{m}$ 径の小さな穴を開けた板である。光電面から放出された光電子は光電面-MCP 間で加速され MCP に入射し、MCP 内で衝突を繰り返して増幅される。

信号の典型的な電荷量と時間分布を図 2.8 に示す [2]。電荷量の分布から電子増幅率の評価を行い、一光子を検出可能な 2×10^6 を達成している。また、時間分布に対してガウス分布をフィットして、その標準偏差 (σ) の値を時間分解能としており、 $50\ \text{ps}$ 以下を達成している。また、光電面には高い量子効率 (QE: Quantum Efficiency) が見込まれるスーパーバイアルカリ光電面を採用している。スーパーバイアルカリ光電面の典型的な量子効率分布を図 2.9 に示す。その他の性能を含めて、MCP-PMT の性能を以下にまとめる。

- 一光子検出可能
- 時間分解能 $< 50\ \text{ps}$ (一光子検出時)
- 位置分解能 $< 5\ \text{mm}$
- 量子効率 $> 24\%$ @ピーク波長
- $1.5\ \text{T}$ の磁場中で使用可能
- Belle II 環境下で寿命 > 10 年

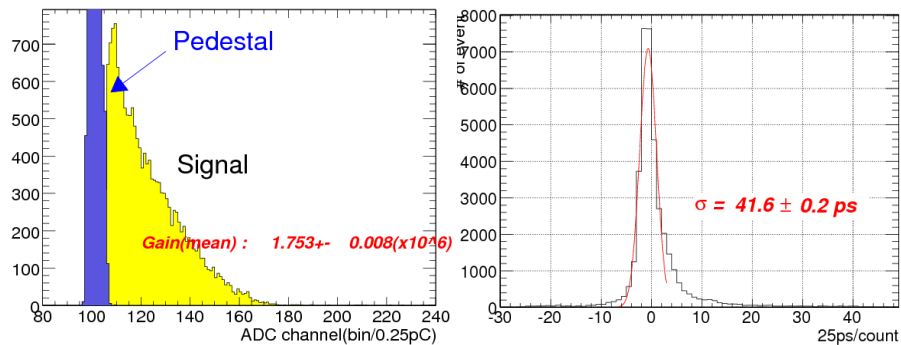


図. 2.8: 一光子検出時の電荷量 (左) と信号の時間分布 (右)。左図：横軸は電荷、縦軸はイベント数である。青：ペDESTAL、黄：一光子検出時の信号で、信号の平均値から電子増幅率を求める。右図：横軸は時間、縦軸はイベント数である。赤線は信号時間分布に対してフィットしたガウス分布を表す。この標準偏差 (σ) を時間分解能とする。

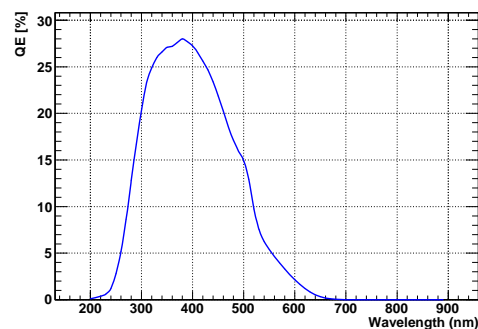


図. 2.9: スーパーバイアルカリ光電面の QE 分布。400 nm 付近のピーク波長で 28% の QE が見込まれる。

2.3 TOPカウンターの K/π 識別性能

TOPカウンターの K/π 識別性能は、近似的に

$$S \propto \frac{\sqrt{N_{det}}}{\sigma_{TOP}} \quad (2.2)$$

S : 識別能力 [σ]

N_{det} : 検出光子数 [個]

σ_{TOP} : 一光子に対する TOP 全体の時間分解能 [ps]

と表せる。検出光子数を増やすことと時間分解能を良くすることが重要である。上式の比例係数は、 K/π が生成されてからチェレンコフ光が検出されるまでの時間や、石英放射体の均質性などにより決まる。よって、光子検出までの時間を長くすることや、均質な

石英輻射体を用いることも重要な要素である。TOP カウンターにおける粒子識別は、複数の検出光子に対する尤度法によって行うため、厳密な性能はシミュレーションによって評価される。

2.3.1 シミュレーションによる評価

TOPカウンターの K/π 識別性能について、シミュレーションによる評価が行われている。K 中間子の識別効率と、K 中間子を π 中間子と誤認する誤識別率のシミュレーション結果を図 2.10 に示す¹。

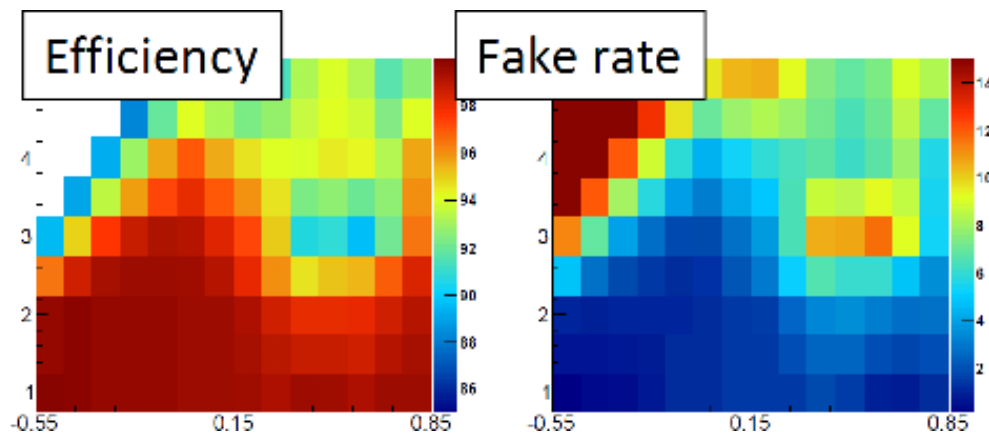


図. 2.10: K 中間子の識別効率と誤識別率。横軸は $\cos \theta$ で、 θ は衝突点で生成した粒子の e^- ビーム軸に対する極角である。縦軸は粒子の運動量で単位は GeV/c である。

また、B 中間子崩壊の代表的な物理過程に対する TOP カウンターと Belle 検出器の識別性能を表 2.1 にまとめる¹。TOP カウンターを用いることで、識別性能が大幅に向上することが分かる。

物理過程	$B \rightarrow \rho\gamma$		$B \rightarrow \pi\pi$	
	識別効率 (%)	誤識別率 (%)	識別効率 (%)	誤識別率 (%)
TOP	98.7	2.4	95.8	5.4
Belle	87.5	10.0	88.5	11.6

表. 2.1: 物理過程での識別性能の比較。 $B \rightarrow \rho\gamma$ 、 $B \rightarrow \pi\pi$ 共に、TOP カウンターを用いることで識別性能が大幅に向上することが分かる。

¹K. Inami, "B-PID performance," Belle II PID upgrade meeting, 9th November 2011

2.4 各光学素子に求められる光学性能

TOP カウンターが前節で示した識別性能を実現するために、各光学素子に求められる光学性能は以下の 2 つである。

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。

図 2.11 に石英輻射体内でのチェレンコフ光伝搬の典型的な例を示した。TOP カウンターで検出される光子の典型値は、光子数が約 20 個、伝搬距離が約 5 m、反射回数が約 100 回である。

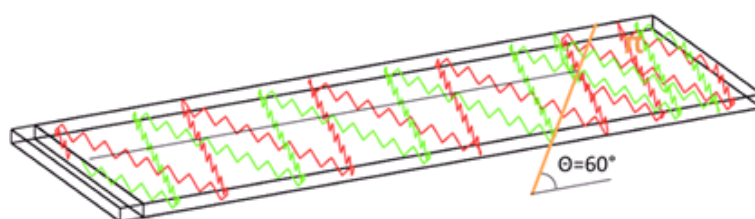


図. 2.11: 石英輻射体内でのチェレンコフ光伝搬の典型例。 $\beta = 1$ の π 中間子が $\theta = 60^\circ$ で入射した場合を示す。 θ は e^- ビーム軸に対する極角である。例として 2 つの光路を赤と緑で表している。

これを踏まえ、上記の要求を満たすために各光学素子に求められる光学性能を以下に具体的に示す。

- 石英輻射体
 - 内部透過率： $\geq 98.5\%/m$
 - 内部表面反射率： $\geq 99.90\%$
 - 光路のずれ： ≤ 0.5 mrad
- 光学フィルター、光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学グリッド、シリコンラバー
 - 内部透過率： $\geq 99.0\%$

いずれも TOP カウンターで検出する光子の典型的な波長である 400 nm に対する光学性能である。

また、Belle II 実験では世界最高のピークルミノシティを目指しているために放射線量が増加することが予想されている。よって、各光学素子の光学性能について、以下の放射線耐性が求められる。

- 10 年間の運転で予想される放射線照射による光子数の減少が 10% 以下。

さらに、実機生産には以下が求められる。

- 石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 $100 \mu m$ 以下の精度で接着。

2.4.1 本研究の内容

本研究では、TOP カウンター実機を構成する各光学素子について、光学性能評価、放射線耐性試験を行った。また、石英輻射体とフォーカシングミラーの接着システムの構築に取り組み、それを用いて実機プロトタイプの接着を行った。

光学性能評価では、上記した光子の MCP-PMT への到達率を $\pm 5\%$ 以内、光路のずれを ± 0.1 mrad 以内の精度で測定することを目標とした。これを実現するために、各測定でそれぞれ以下の精度を目指した。

- 石英輻射体
 - 内部透過率： $\leq \pm 0.3\%/m$
 - 内部表面反射率： $\leq \pm 0.05\%$
 - 光路のずれ： $\leq \pm 0.1$ mrad
- 光学フィルター、光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学グリス、シリコンラバー
 - 内部透過率： $\leq \pm 0.5\%$

また放射線耐性試験では、光子数の減少を $\pm 3\%$ の精度で測定することを目標とした。

石英輻射体とフォーカシングミラーの接着システムの構築では、相対角度を $O(0.01)$ mrad、相対位置を $O(10)$ μm で制御することを目標とした。それを用いて、実機プロトタイプの 2 つの石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 100 μm 以下の精度で接着した。

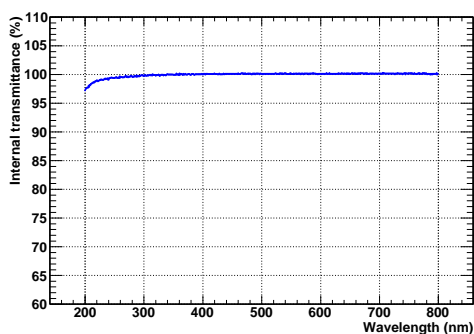
第3章 各光学素子の光学性能評価

第2章で述べたように、TOPカウンターを構成する各光学素子に求められる光学性能が明らかになっている。本章では各光学素子の光学性能評価について述べる。まず、石英輻射体の光学性能評価について述べる。その後、その他の光学素子の光学性能評価について述べる。

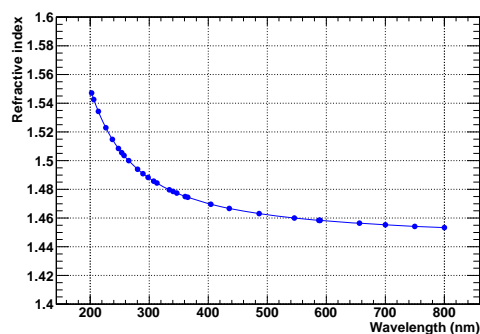
3.1 石英輻射体の光学性能評価

3.1.1 石英ガラスの光学性質

石英ガラスは二酸化珪素 (SiO_2) から作られるガラスで、通常のガラスに比べて SiO_2 純度が高いものをいう。石英ガラスの一般的な特長としては、透過率が高い、不純物が少ないことなどがある。図3.1に一般的な石英ガラスの内部透過率と屈折率の波長依存性を示す。図3.1(a)の内部透過率は厚さ6 cmのものだが、TOPカウンターで検出する350–800 nmの領域で重大な変化がないことが分かる。



(a) 内部透過率の波長依存性 (厚さ 6 cm)



(b) 屈折率の波長依存性

図. 3.1: 石英ガラスの光学性質

3.1.2 石英輻射体の仕様

今回、実機仕様の2つの石英輻射体について光学性能評価を行う。1つはSuprasil-P710 (信越石英¹)を岡本光学加工所²が研磨したもの、もう1つはCorning7980 0D (Corning 社³)をZygo 社⁴が研磨したものである。2つの石英輻射体の仕様を表3.1に示す。石英ガラスには天然の水晶を粉砕して溶融して作る溶融石英ガラスと、珪素と酸素を化学的に合成して作る合成石英ガラスがある。溶融石英ガラスには不純物が10–100 ppm程度含まれるが、合成石英はさらに純度が高く不純物含有量は1 ppm以下である。また、均質性も高く脈理もほとんどない。今回光学性能評価を行うSuprasil-P710とCorning7980 0Dは、いずれも合成石英で、脈理グレード、均質性、純度が非常に高い。しかし、これらの石英輻射体が求める光学性能を満たしているか評価を行う必要がある。

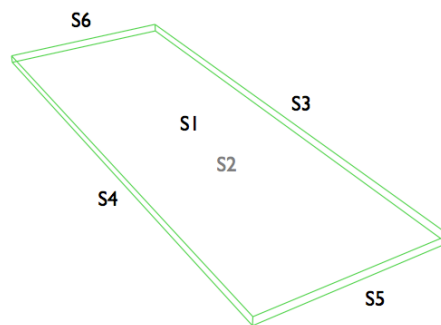


図. 3.2: 石英輻射体の面の定義。S1は上面、S2は下面、S3–S6は側面に対応する。

硝材	Suprasil-P710	Corning7980 0D
脈理グレード	A (MIL-G-174 規格)	5 (ISO 10110-4 規格)
屈折率均質性 (Δn)	< 5 ppm (x-y 面), < 10 ppm (y-z 面)	3 ppm
複屈折	10 nm/cm	< 6 nm/cm
泡等級	0 (DIN58927 規格)	0 (DIN58927 規格)
長さ (mm)	1309.84	1199.5
幅 (mm)	449.92	450.15
厚さ (mm)	20.085–20.098	20.001
直角度 (分角)	0.08–3.75	0.17
面精度 S1, S2 ($\mu\text{m PV}$)	2.6, 3.0	4.9, 5.1
面精度 S3, S4 ($\mu\text{m PV}$)	1.1, 0.9	0.9, 0.8
面精度 S5, S6 ($\mu\text{m PV}$)	0.9, 0.8	2.0, 2.0
面粗さ (nm rms)	0.4	0.44 (S1–S4), 2.0 (S5, S6)

表. 3.1: 石英輻射体の仕様

¹<http://www.sqp.co.jp/>

²<http://www.okamoto-optics.co.jp/>

³<http://www.corning.com/>

⁴<http://www.zygo.com/>

3.1.3 測定装置

前節で示した2つの石英輻射体について、内部透過率、内部表面反射率、光路のずれの測定を行う。ここでは、光学性能測定に用いたレーザー、フォトダイオード、CCDカメラなどの測定装置について述べる。

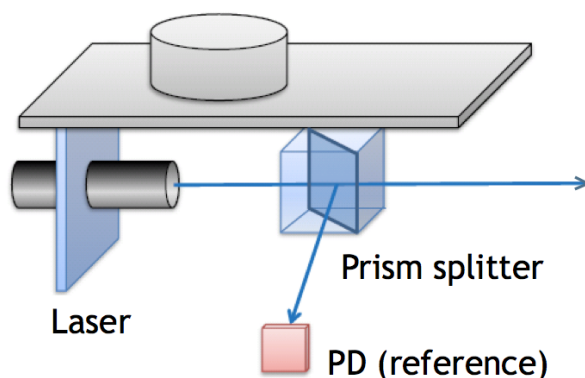
レーザー

光学性能測定の光源として、半導体レーザー (LDU33-405-3.5 シグマ光機⁵) を用いた。波長は405 nmで、TOPカウンターで検出する光の典型的な波長である。半導体レーザーの仕様を以下に示す。

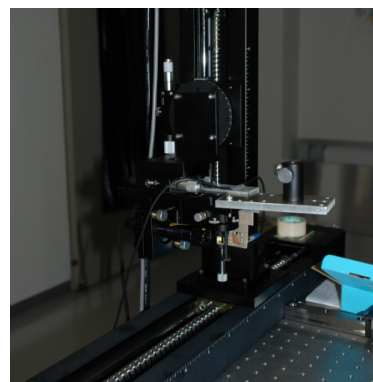
品名	LDU33-405-3.5
波長	405 nm
出力	3.5 mW
ビーム径	~2 × 1 mm ²
ビーム広がり全角	< 1 mrad
出力安定性	< ±3%

表. 3.2: 半導体レーザーの仕様

レーザーの光量は±3%でふらつくため、高精度の測定を行うためには光量補正が必要である。図3.3に示すように、偏光ビームスプリッター (PBS-10-4050 シグマ光機) でレーザー光を2つに分け、光量モニターとしてリファレンス用フォトダイオードを使用した。レーザーと光量モニターは水平-垂直方向に稼動できるように可動ステージ (SGSP46-500、SGSP33-200 シグマ光機) に取り付けた。可動ステージの位置精度は25 μm、繰り返し位置精度は6 μmである。



(a) レーザーと光量モニターの模式図。ビームスプリッターでレーザー光を2つに分け、1つの強度をリファレンス用フォトダイオードでモニターする。



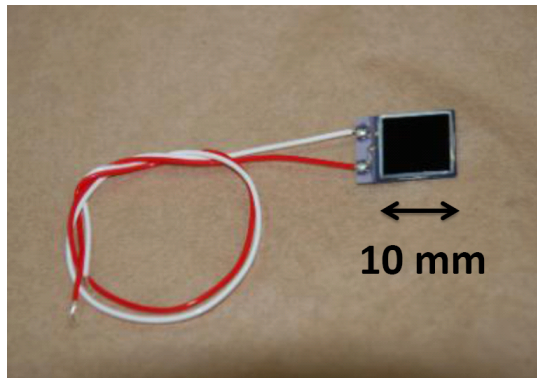
(b) レーザーと光量モニターは可動ステージに取り付けた。

図. 3.3: レーザーと光量モニター

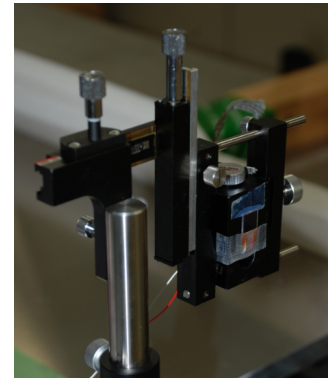
⁵<http://www.sigma-koki.com/>

フォトダイオード

レーザー光の強度測定にはフォトダイオード (S3994-01 浜松ホトニクス⁶) を用いた。受光面の大きさは $10 \times 10 \text{ mm}^2$ で、400 nm の光に対する感度は $\sim 0.25 \text{ A/W}$ (25) である。図 3.4 にフォトダイオードの写真を載せる。



(a) フォトダイオード (S3994-01)



(b) フォトダイオードは手動ステージに取り付けた。

図. 3.4: フォトダイオード

フォトダイオードの有感度領域と感度の位置依存性を測定した。x, y 方向にそれぞれ 2 mm ステップの 8 点 (計 64 点) で測定した。各点の測定では、リファレンス用フォトダイオードとの比を 50 回測定し、その平均値を取った。図 3.5 にその結果を示す。中心の $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の領域では感度は $\pm 1\%$ 以内で安定である。これは、測定に用いたレーザーのスポット径 ($\leq 0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$) よりも十分小さい。

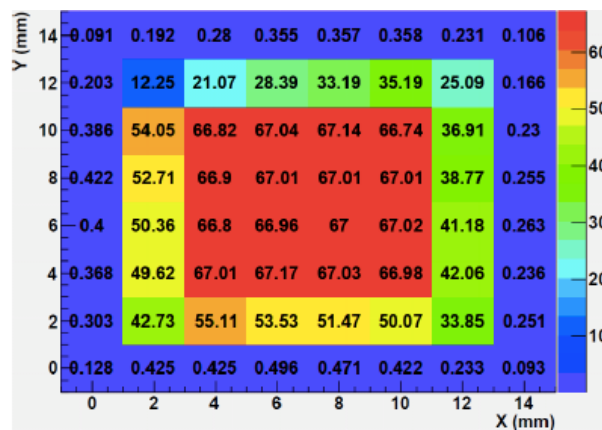


図. 3.5: フォトダイオードの感度の位置依存性。各点での値はリファレンス用フォトダイオードとフォトダイオードの強度測定値の比である。中心の $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の領域では感度は $\pm 1\%$ 以内で安定だった。

⁶<http://jp.hamamatsu.com/>

CCD カメラ

レーザー光の強度の位置依存性を測定するために、CCD カメラ (STC-TC202USB-AT センサーテクノロジー⁷⁾) を用いた。ピクセルサイズは $4.40 \times 4.40 \mu\text{m}^2$ 、ピクセル数は 1600×1200 である。CCD カメラは水平-垂直方向に稼働できるように可動ステージ (SGSP46-300、SGSP26-100 シグマ光機) に取り付けた。可動ステージの位置精度は $25 \mu\text{m}$ 、繰り返し位置精度は $6 \mu\text{m}$ である。図 3.6 に CCD カメラの写真を載せる。



(a) CCD カメラ
(STC-TC202USB-AT)



(b) CCD カメラは可動ステージに取り付けた。

図. 3.6: CCD カメラ

3.1.4 内部透過率測定

第 2 章で述べたように、石英輻射体に求められる内部透過率は $98.5\%/m$ 以上である。TOP カウンターでの検出光子数の典型的な伝搬距離は約 5 m であることから、内部透過率 $98.5\%/m$ は石英輻射体内の内部透過で 90% 以上の光子が MCP-PMT に到達することを意味する。また、測定精度の目標は $\pm 0.3\%/m$ 以内である。レーザーとフォトダイオードを用いて内部透過率を測定した。

測定方法

図 3.7 に内部透過率測定のセットアップ模式図を載せる。内部透過率 τ は以下の式 (3.1) から求めることができる。

$$I_0(1 - R_0)\tau(1 - R_1) = I_1 \quad (3.1)$$

ここで I_0 は入射レーザー光の強度、 I_1 は透過後のレーザー光の強度である。また、 R_0 と R_1 はそれぞれ空気 - 石英輻射体間および石英輻射体 - 空気間での反射率である。

⁷<http://www.sentech.co.jp/>

I_0 と I_1 はフォトダイオードを用いて測定した。その際、レーザー光量のふらつきを補正するためにリファレンス用フォトダイオードとの比を測定し、50 回の測定の平均値を用いた。また、 R_0 と R_1 はフレネルの式による計算値を用いた⁸。フレネルの式については巻末の付録 A にまとめる。

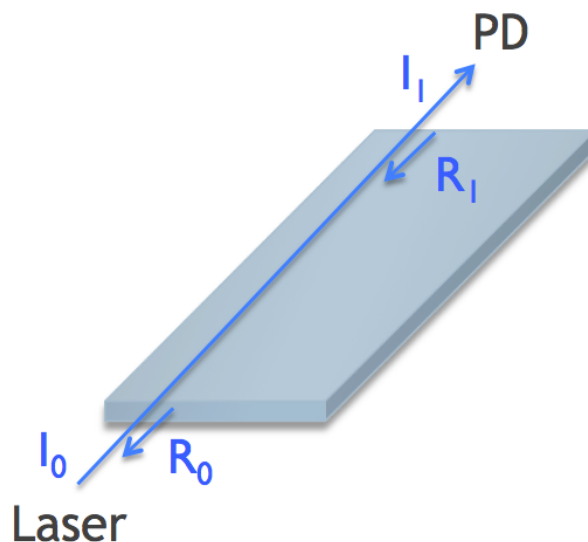


図. 3.7: 内部透過率測定のセットアップ。石英輻射体の端面からレーザーを照射し、入射レーザー光の強度 I_0 と石英輻射体透過後のレーザー光の強度 I_1 をフォトダイオードを用いて測定する。 R_0 と R_1 はフレネルの式による計算値を用いた。

また、内部透過率の位置依存性を見るために、異なる入射位置での測定を行った。図 3.8 のように x が幅方向、 y が厚さ方向を表すように入射方向から見た x - y 軸を定義して、 $x = (25, 125, 225, 325, 425)$ mm と $y = (4, 6, 8, 10, 12, 14, 16)$ mm の全ての組み合わせに対し測定を行った。

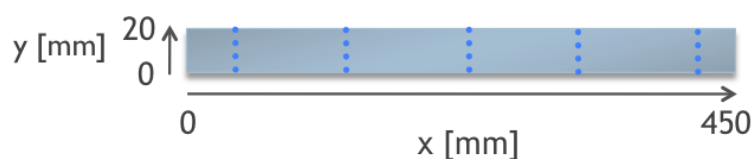


図. 3.8: 内部透過率の測定点。石英輻射体への入射方向からの図を示す。 $x = (25, 125, 225, 325, 425)$ mm と $y = (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17)$ mm の全ての組み合わせの計 35 点で測定を行った。

⁸フレネルの式の計算値を用いる妥当性は 3、5、10 度の入射角度での反射率を測定して確かめた。その際、レーザーの偏光も考慮した。

結果

表 3.3 と表 3.4 に Suprasil-P710 と Corning7980 0D の石英輻射体の内部透過率測定結果を示す。平均値は、Suprasil-P710 が 99.44%/m、Corning7980 0D が 99.35%/m であった。

I_0 と I_1 の測定誤差は 100 回の繰り返し測定から求めており、 $^{+0.04}_{-0.17}\%$ である。この誤差を用いて、内部透過率の誤差を求めると各点で $\pm 0.17\%$ となり、目標とした測定精度 $\pm 0.3\%/m$ 以内を達成した。内部透過率の有意な位置依存性は見られず、両方の石英輻射体の全ての測定点で要求性能である 98.5%/m を満たした。

$x \backslash y$	25 mm	125 mm	225 mm	325 mm	425 mm
16 mm	99.47	99.49	99.39	99.47	99.53
14 mm	99.53	99.49	99.40	99.49	99.57
12 mm	99.28	99.38	99.39	99.43	99.55
10 mm	99.49	99.30	99.37	99.40	99.54
8 mm	99.31	99.44	99.52	99.38	99.53
6 mm	99.31	99.27	99.49	99.47	99.48
4 mm	99.41	99.45	99.40	99.42	99.51

表. 3.3: Suprasil-P710 の内部透過率測定結果。単位は%/m。

$x \backslash y$	25 mm	125 mm	225 mm	325 mm	425 mm
16 mm	99.34	99.32	99.28	99.38	99.45
14 mm	99.39	99.32	99.27	99.35	99.36
12 mm	99.39	99.36	99.41	99.39	99.43
10 mm	99.36	99.31	99.41	99.38	99.29
8 mm	99.43	99.37	99.35	99.46	99.41
6 mm	99.39	99.40	99.44	99.50	99.38
4 mm	99.29	99.44	99.43	99.49	99.25

表. 3.4: Corning7980 0D の内部透過率測定結果。単位は%/m。

3.1.5 内部表面反射率測定

石英輻射体の内部表面反射率に対する要求は 99.90% 以上である。TOP カウンターでの検出光子数の典型的な反射回数は約 100 回であることから、99.90% の内部表面反射率は石英輻射体内の反射によって 90% 以上の光子が MCP-PMT に到達することを意味する。また、測定精度の目標は $\pm 0.05\%$ 以内である。レーザーとフォートダイオードを用いて内部表面反射率を測定した。

測定方法

図 3.9 に内部表面反射率のセットアップ模式図を載せる。内部表面反射率 α は以下の式 (3.2) から求めることができる。

$$I_0(1 - R_0)\alpha^N e^{-\frac{L}{\Lambda}} \sqrt{1 + \left(\frac{bN}{L}\right)^2} (1 - R_1) = I_1 \quad (3.2)$$

ここで内部透過率測定と同様に、 I_0 と I_1 はそれぞれ入射・透過後のレーザー光の強度、 R_0 と R_1 はそれぞれ空気 - 石英輻射体間および石英輻射体 - 空気間での反射率である。また、 N は反射回数、 Λ は石英輻射体の吸収係数、 L と b はそれぞれ石英輻射体の長さおよび厚さである。

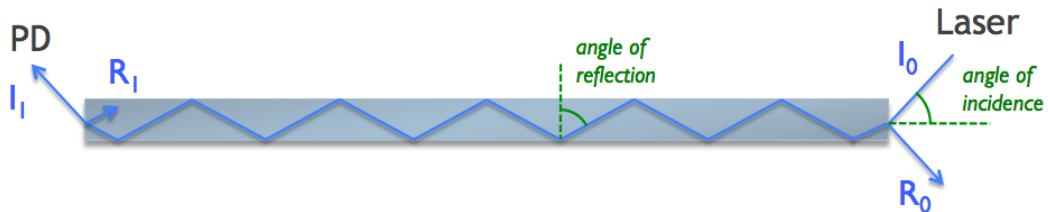


図. 3.9: 内部表面反射率測定の設定アップ。石英輻射体の端面から角度を付けてレーザーを入射し、入射レーザー光の強度 I_0 と内部表面反射後のレーザー光の強度 I_1 をフォトダイオードを用いて測定する。 R_0 と R_1 はフレネルの式による計算値を用いた。

内部透過率測定と同様に、 I_0 と I_1 はフォトダイオードを用いて測定した。その際、フォトダイオードの受光面を光軸に対して垂直になるようにして測定した。 R_0 と R_1 はフレネルの式による計算値を用いた。 N は肉眼で微小な散乱光を捕えることで確認することができる。また、 Λ は前節で測定した内部透過率から求めることができる。内部表面反射率の角度依存性を見るために 56, 50, 45, 39, 35, 30 度の 6 つの入射角で測定した。この角度はそれぞれ石英輻射体内での反射角 56, 59, 61, 65, 67, 70 度に対応する。

結果

表 3.5 と表 3.6 に岡本光学によって研磨された石英輻射体 (Suprasil-P710) と Zygo 社によって研磨された石英輻射体 (Corning7980 0D) の測定結果を示す。

I_0 と I_1 の測定誤差は、内部透過率測定と同様に $+0.04\%$ である。また、吸収係数 Λ は内部透過率の測定値から求めているため誤差があり、Suprasil-P710 が (179^{+119}_{-42}) m、Corning7980 0D が (154^{+55}_{-31}) m である。これを用いて計算した内部表面反射率の測定誤差は $\pm 0.01 - 0.02\%$ であり、目標とした測定精度 $\pm 0.05\%$ 以内を達成した。

両方の石英輻射体について、測定した全ての反射角で内部表面反射率は要求性能である 99.90% 以上であることが明らかになった。

入射角 (°)	反射角 (°)	反射回数	内部表面反射率 (%)
56	56	45	99.95 ± 0.01
50	59	39	99.96 ^{+0.02} _{-0.01}
45	61	35	99.97 ^{+0.02} _{-0.01}
39	65	31	99.92 ^{+0.02} _{-0.01}
35	67	27	99.96 ^{+0.02} _{-0.01}
30	70	23	99.98 ^{+0.02} _{-0.01}

表. 3.5: 岡本光学によって研磨された石英輻射体の内部反射率測定結果

入射角 (°)	反射角 (°)	反射回数	内部表面反射率 (%)
56	56	41	99.92 ± 0.01
50	59	37	99.93 ± 0.01
45	61	33	99.93 ± 0.01
40	64	29	99.93 ± 0.01
35	67	25	99.93 ± 0.01
30	70	21	99.97 ^{+0.02} _{-0.01}

表. 3.6: Zygo 社によって研磨された石英輻射体の内部反射率測定結果

また、図 3.10 に内部表面反射率の角度依存性の図を載せる。データに対してスカラー光散乱理論の式 (3.3) を用いてフィットした。

$$f(x) = 1 - (4\pi\delta \cos \theta / \lambda)^2 \quad (3.3)$$

式 (3.3) において δ が面粗さの rms、 θ が反射角、 λ がレーザーの波長を表している。フィットの結果、岡本光学が研磨した石英輻射体の面粗さが $(12 \pm 4) \text{ \AA}$ 、Zygo 社が研磨した石英輻射体の面粗さが $(17 \pm 4) \text{ \AA}$ となった。これは光干渉計を用いて研磨会社で測定した結果 ($\sim 5 \text{ \AA}$) と異なる。この不一致は表面のほこりなどによって起こりうると考えられるが、結論は得られていない。

今回の性能評価で $\sim 5 \text{ \AA}$ の要求で石英輻射体を研磨した際に、内部表面反射率は要求性能を満たすことが確かめられた。

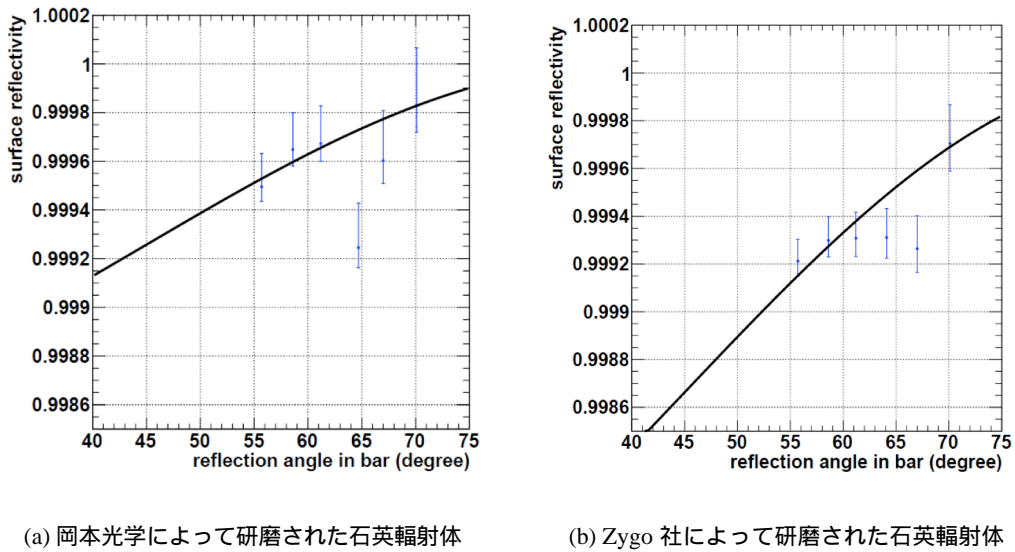


図. 3.10: 内部表面反射率の角度依存性。スカラー光散乱理論の関数を用いてフィットを行った。

3.1.6 光路のずれ測定

石英輻射体中に屈折率の変化があると、チェレンコフ光の光路が曲がることになる。特に、硝材を作る際の積層によってできるとされる脈理が光路に影響を与えられられる。光路のずれはMCP-PMTに到達する位置と時間に影響する。光路のずれに対する要求は、0.5 mrad以内である。また、測定精度の目標は ± 0.1 mrad以内である。レーザーとCCDカメラを用いて、光路のずれを測定した。

測定方法

図 3.11 に光路のずれ測定のセットアップ模式図を示す。石英輻射体の端面からレーザーを入射して、反対側の端面から出てくるレーザー光をCCDカメラで測定する。レーザーとCCDカメラはそれぞれ可動ステージに取り付けられており、同時に動かして位置スキャンをすることで光路のずれを測定することができる。



図 3.11: 光路のずれ測定のセットアップ。石英輻射体の端面からレーザーを入射し、反対側の端面から出てくるレーザー光を CCD カメラで測定する。可動ステージに取り付けたレーザーと CCD カメラを同時に動かしてスキャンする。

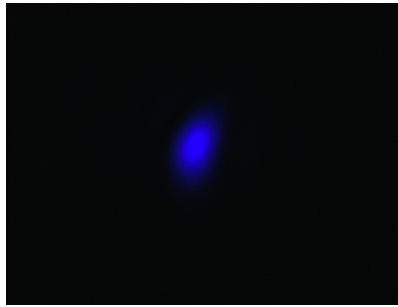
測定は次の 3 段階で行った。

- (1) $x = (25, 125, 225, 325, 425)$ mm と $y = (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17)$ mm の全ての組み合わせで CCD カメラを用いてデータを取得する。
- (2) CCD カメラで得られたビットマップイメージを 2 次元ヒストグラムに変換する。
- (3) 得られた 2 次元ヒストグラムを、信号のガウス分布とバックグラウンドの一次関数の 2 成分からなる確率密度関数でフィットを行う。

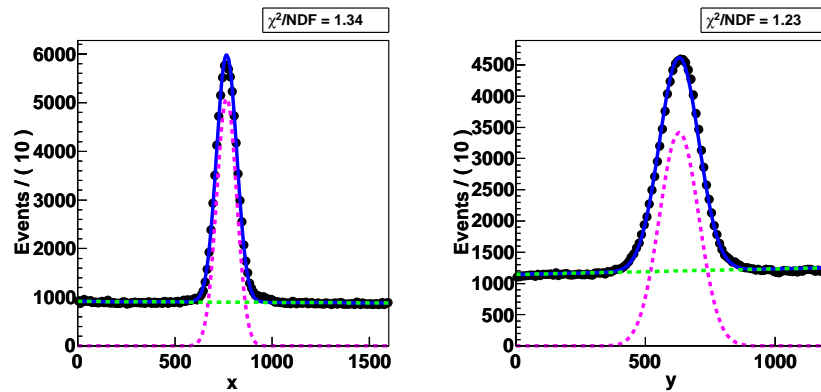
フィットしたガウス分布の中心値と幅を見ることで、脈理と表面の歪みによる光路のずれを見ることができる。比較のために、石英輻射体ではなく空中透過についても測定した。また、レーザーの入射角 30 度での測定も行った。さらに Corning7980 0D については、入射角 0 度で 0.1 mm ステップでの細かいスキャン測定も行った。

結果

図 3.12(a) に CCD カメラで取得したデータの典型例を示す。また、図 3.12(b) に 2 次元フィットの結果を示す。2 次元フィットは x 方向、 y 方向のガウス関数の積を用いて行った。



(a) CCD カメラで測定したビットマップイメージの典型例。ピクセルサイズは $4.40 \times 4.40 \mu\text{m}^2$ 、ピクセル数は 1600×1200 である。



(b) 典型的な 2 次元フィットの結果。左図、右図はそれぞれ y 方向に積分した投影、 x 方向に積分した投影を表す。

図 3.12: CCD カメラで取得したデータと 2 次元フィットの典型例

図 3.13 と図 3.14 に、Suprasil-P710 と Corning7980 0D についての $x = 225 \text{ mm}$ での測定結果を示す。 $y < 20 \text{ mm}$ が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20 \text{ mm}$ は空中を透過したレーザーに対する結果である。 $y > 20 \text{ mm}$ でのデータが $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内で安定していることから、光路ずれの測定精度は $\pm 0.05 \text{ mrad}$ 以下であると言える。いずれの石英輻射体も、 y 方向の中心値で比較的大きな変化が見られた。この変化は Suprasil-P710 で $\pm 0.1 \text{ mrad}$ 、Corning7980 D で $\pm 0.3 \text{ mrad}$ に相当するが、石英輻射体表面の歪みによって説明することができる。よって脈理などによる光路のずれは、表面の歪みによる影響よりも小さいと考えられる。

$x = 25, 125, 325 \text{ mm}$ での測定でも同様の結果が得られた。これらの結果は巻末の付録 B に載せる。

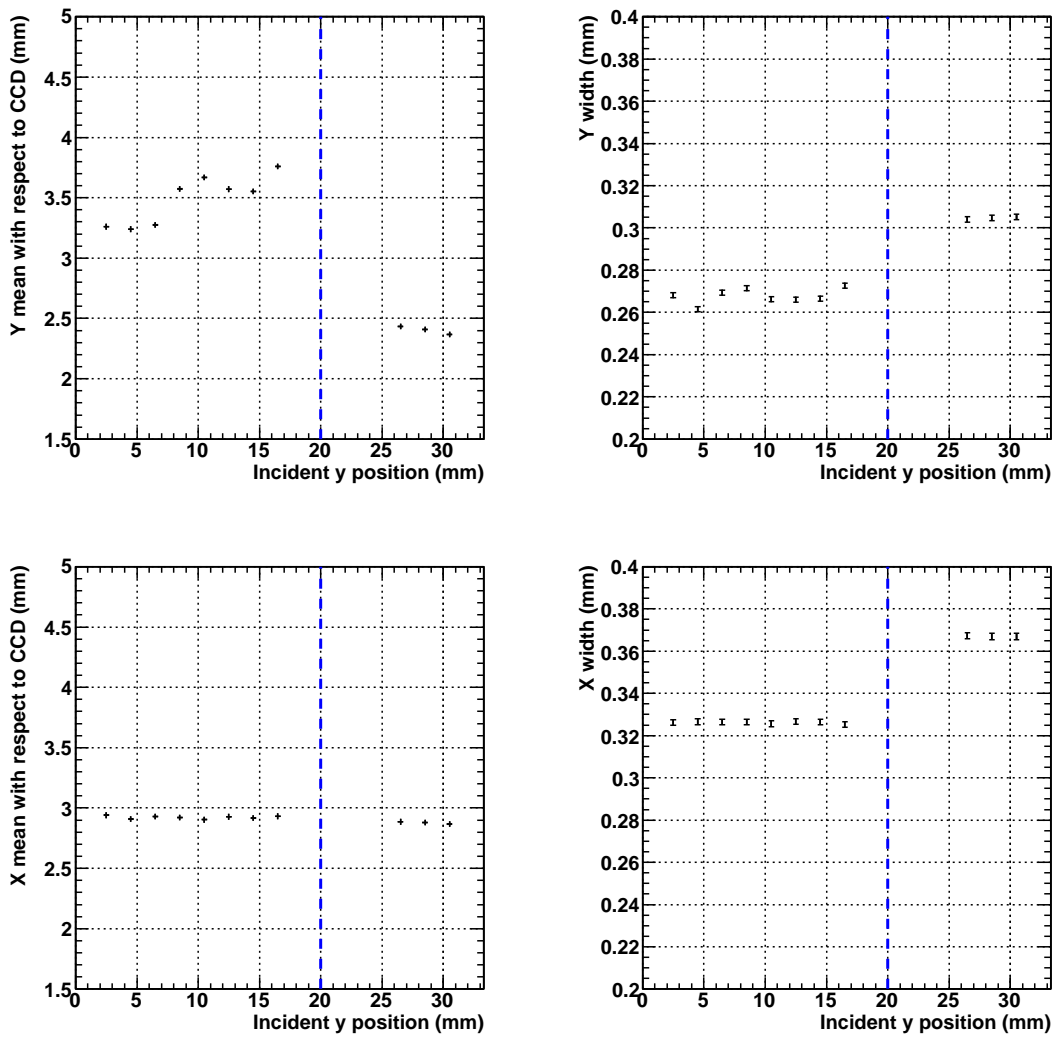


図. 3.13: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

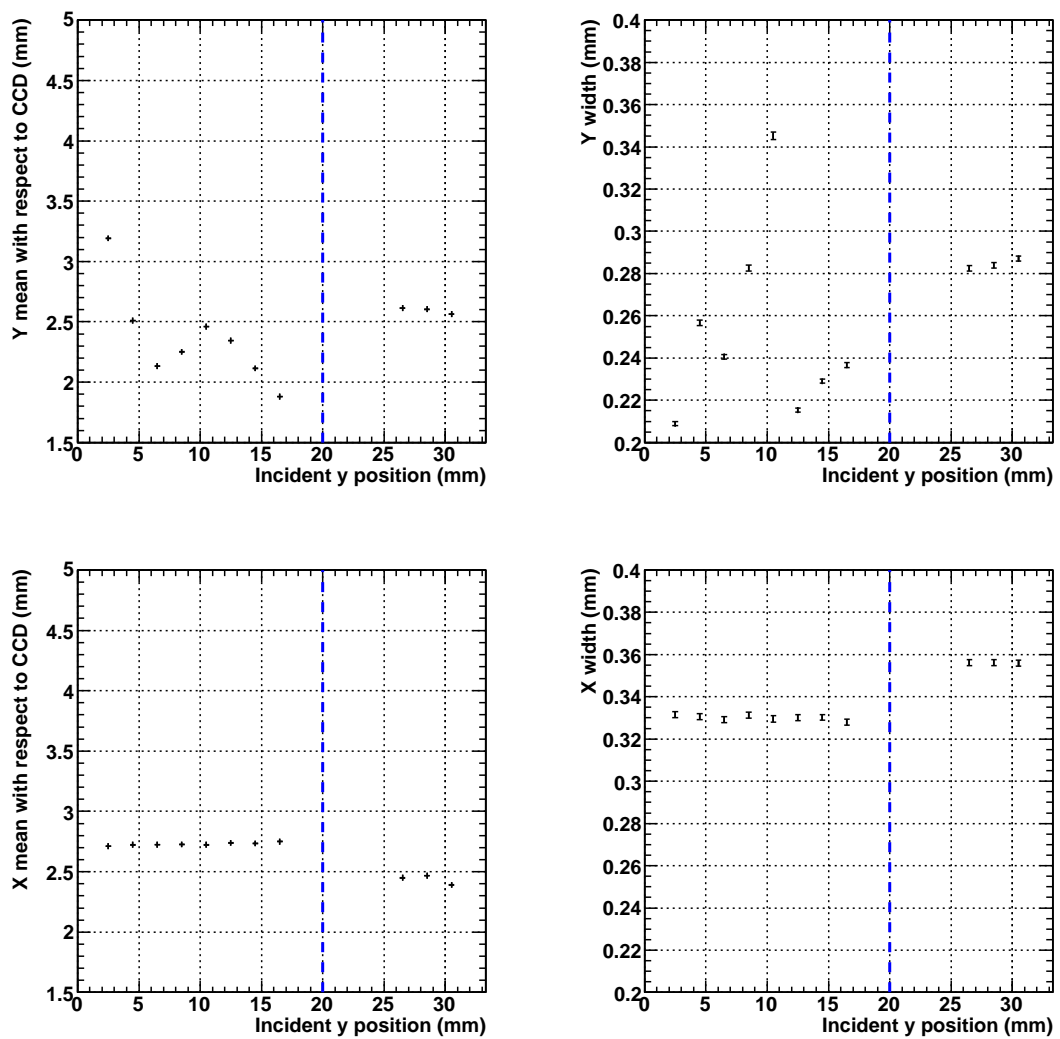


図. 3.14: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

図 3.15 と図 3.16 に、Suprasil-P710 と Corning7980 0D についての入射角 30 度での測定結果 ($x = 225$ mm) を示す。スキャンした範囲は狭いが、 x, y 方向の中心値と幅はあまり変化が見られなかった。Corning7980 0D の y 方向の中心値のみ $\sim \pm 0.1$ mrad の変化が見られたが、これは表面の歪みで説明できる。

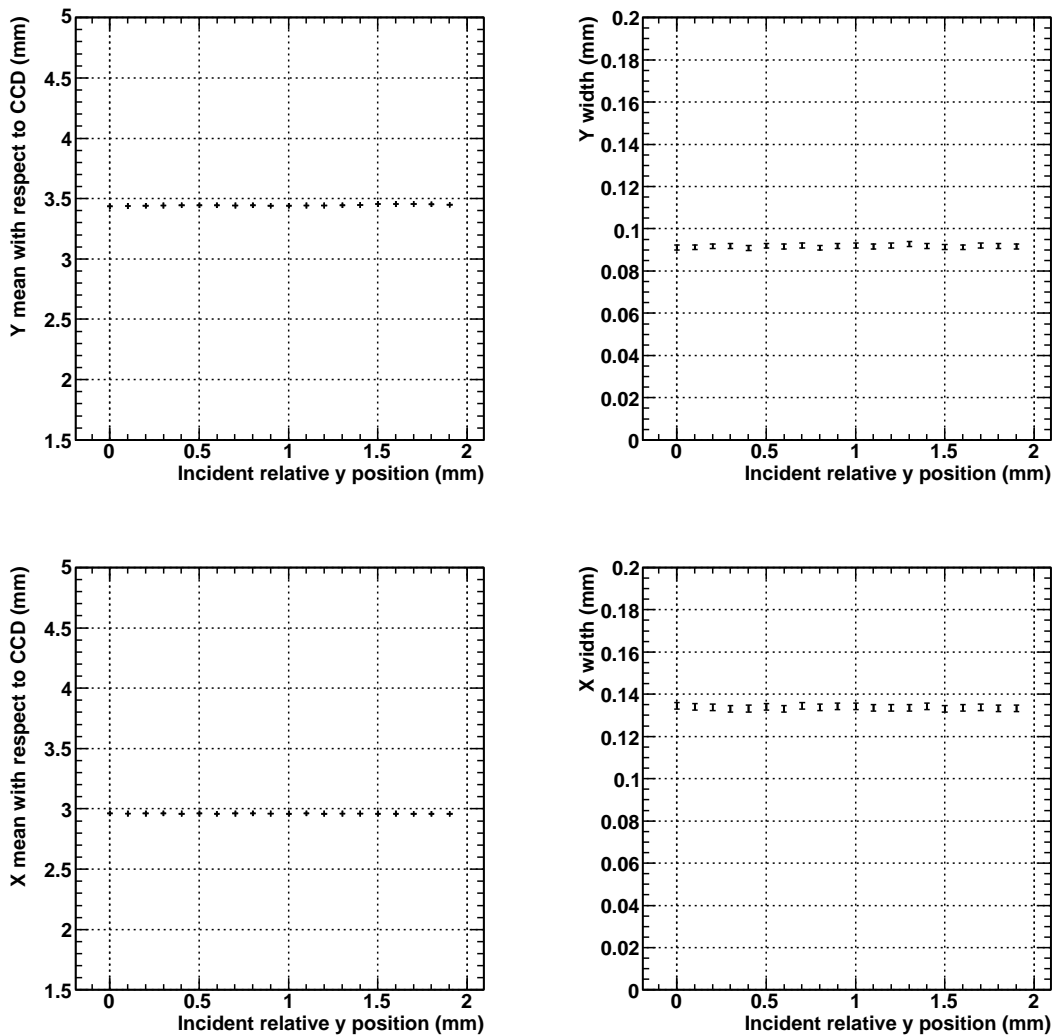


図. 3.15: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 入射角 30 度)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。

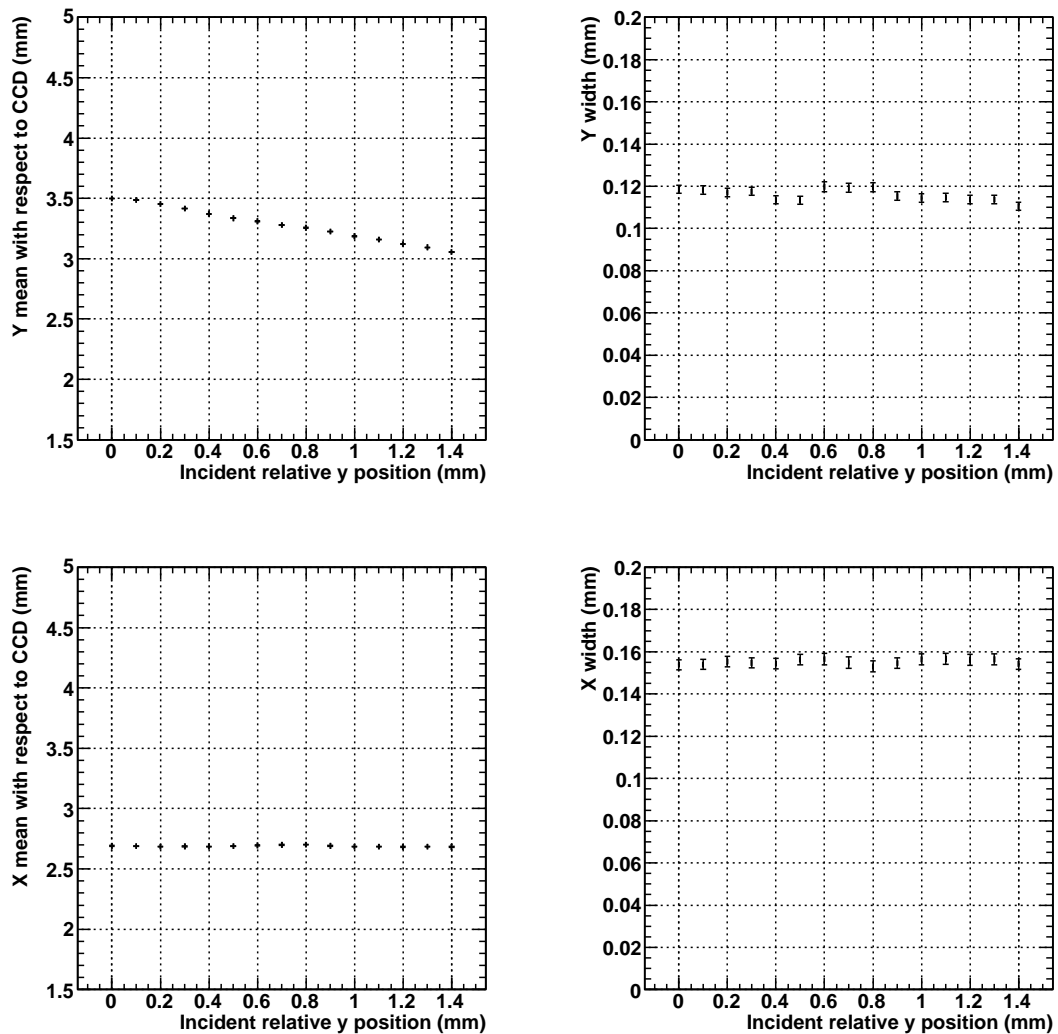


図. 3.16: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 入射角 30 度)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。

図 3.17 に、Corning7980 0D について 0.1 mm ステップでの測定結果 ($x = 225$ mm) を示す。2 mm ステップで行った測定図 3.14 と無矛盾の結果が得られた。この測定結果からも脈理になどによる光路のずれは表面の歪みの影響よりも小さいと考えられる。

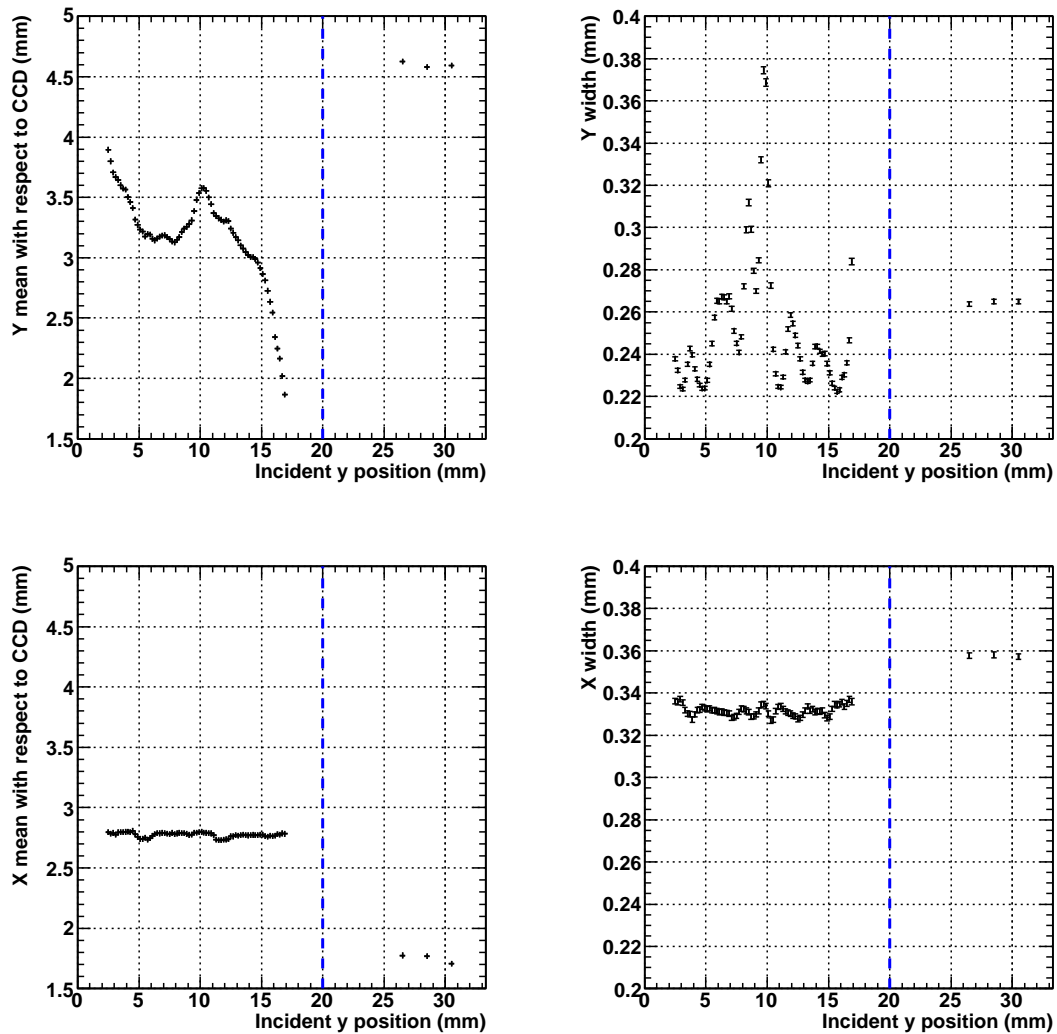


図 3.17: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm, 0.1 mm ステップ)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

3.2 その他の光学素子の光学性能評価

前節では、石英輻射体の光学性能評価について述べた。しかし、TOP カウンターを構成している光学素子にはそれ以外に光学フィルター、光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学グリッド、シリコンラバーがある。本節ではそれらの光学素子についての光学性能評価について述べる。

3.2.1 各光学素子の仕様

光学性能評価を行う各光学素子についてまとめる。

光学フィルター

光学フィルターは、波長分散効果による時間分解能の悪化を防ぐために石英輻射体と MCP-PMT の間に挿入する (図 2.5 参照)。光学フィルターの候補を選ぶ際に考慮したのは、透過限界波長が 300–350 nm であること、限界波長幅が短いこと、高透過域での透過率が高いことである。光学フィルターの候補は、IHU340・IHU350 (五鈴精工硝子⁹)、L-37 (HOYA¹⁰)、ZJB340 (Nantong Xiangyang Optical Element 社¹¹) である。この 4 種類の光学フィルターについて性能評価を行う。各光学フィルターの仕様を以下に示す。

品名	サイズ	透過限界波長 ¹²	波長傾斜幅 ¹³	高透過域の透過率 ¹⁴	屈折率 (n_d)
IHU340	50 × 50 × 2.5 mm ³	340 ± 7 nm	< 40 nm	≥ 85 %	1.516
IHU350	50 × 50 × 2.5 mm ³	350 ± 7 nm	< 40 nm	≥ 85 %	1.517
L37	50 × 50 × 2.5 mm ³	370 ± 5 nm	< 35 nm	≥ 85 %	1.582
ZJB340	50 × 50 × 2.0 mm ³	340 ± 10 nm	< 50 nm	≥ 88 %	1.620

表. 3.7: 光学フィルターの仕様

光学接着剤

TOP カウンターの実機では、2 つの石英輻射体とフォーカシングミラーを接着するために光学接着剤を用いる。光学接着剤の候補は、NOA61・NOA63 (Norland Products 社¹⁵)、EPO-TEK 301-2 (Epoxy Technology 社¹⁶) の 3 種類である。各光学接着剤の仕様を以下に示す。

⁹<http://www.isuzuglass.co.jp/>

¹⁰<http://www.hoya.co.jp/japanese/>

¹¹<http://nxoecl.en.china.cn/>

¹²波長傾斜幅の中心に該当する波長

¹³透過率が 5% の波長と、72% の波長の間隔

¹⁴高透過限界波長 (透過率が 72% の波長) から 800 nm までの透過率の平均値

¹⁵<http://www.norlandprod.com/>

¹⁶<http://www.epotek.com/>

品名	硬化条件	屈折率 (n_d)	粘度	引張強度	せん断強度
NOA61	紫外線	1.56	300 cps ¹⁷	3000 psi ¹⁸	-
NOA63	紫外線	1.56	2000 cps	5000 psi	-
EPO-TEK 301-2	常温	1.53	225-425 cps	-	> 2000 psi

表. 3.8: 光学接着剤の仕様

MCP-PMT 入射窓

MCP-PMT 入射窓は 3 種類の候補がある。合成石英である Suprasil-P20 (信越石英)、T4040 と、ホウケイ酸ガラスの Corning7056 (Corning 社) である。

品名	サイズ	種類	屈折率 (n_d)
Suprasil-P20	27.5 × 27.5 × 1.5 mm ³	合成石英	1.47
T4040	27.5 × 27.5 × 1.5 mm ³	合成石英	1.47
Corning7056	27.5 × 27.5 × 1.5 mm ³	ホウケイ酸ガラス	1.49

表. 3.9: MCP-PMT 入射窓の仕様

光学グリス・シリコンラバー

光学グリスとシリコンラバーは、MCP-PMT - 光学フィルター間と光学フィルター - 石英輻射体間の光学的接続に用いられる。屈折率が石英に近いこと、透過率が高いこと、接続のしやすさが求められる。光学グリスは液体であるのに対して、シリコンラバーは固体 (シリコンゴム) であることが大きな違いである。光学グリスの候補はカーギル標準屈折液 06350 (Cargille Labs 社¹⁹)、シリコンラバーの候補は EJ-560 (Eljen Technology 社²⁰) である。

品名	屈折率 (n_d)	密度	厚さ
Cargille 06350	1.4587	0.824 g/cc	-
EJ-560	1.43	1.03 g/cc	2 mm

表. 3.10: 光学グリス・シリコンラバーの仕様

3.2.2 内部透過率測定

第 2 章で述べたように、石英輻射体以外の各光学素子に求められる光学性能は、400–800 nm の波長領域で内部透過率が 99.0 % 以上である。また、測定精度の目標は ±0.5% 以内

¹⁷センチポアズ。1 ポアズは、流体に 1 cm につき 1 cm/s の速度勾配があるとき、その速度勾配の方向に垂直な面において、速度の方向に 1 dyn (ダイン) の抵抗力が生ずる粘度。

¹⁸重力ポンド毎平方インチ (Pound-force per Square Inch)。1 psi = 0.07 kg/cm²

¹⁹<http://www.cargille.com/>

²⁰<http://www.eljentechnology.com/>

である。内部透過率測定について測定方法、結果を述べる。

測定方法

各光学素子の透過率の測定には分光光度計 V-570 (日本分光²¹) を用いた。V-570 は 190–2500 nm の範囲で透過率を測定することができる。光源には、重水素放電管 (紫外域) とタングステンヨウ素ランプ (可視–近赤外域) を用いており、検出器は PbS 光導電セルである。以下に V-570 の仕様を示す。



図. 3.18: V-570

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
波長正確さ	±0.3 nm
測定精度	±0.3% (透過率)

表. 3.11: V-570 の仕様

測定精度は、透過率の各測定点に対して ±0.3% (絶対値) である。これは NIST 標準物質 (NIST SRM 930D) を用いて検査されている。今回の測定では、TOP カウンターで検出する 200–800 nm の波長領域で透過率を測定した。ただし、光学接着剤、光学グリス、シリコンラバーについては、そのままでは透過率を測定できないため、図 3.19 のように 2 枚のガラス基板に挟んで測定を行った。接着剤の厚さは約 25 μm 、光学グリスの厚さは約 10 μm である。ガラス基板の仕様を以下に示す。

²¹<http://www.jasco.co.jp/jpn/home/>

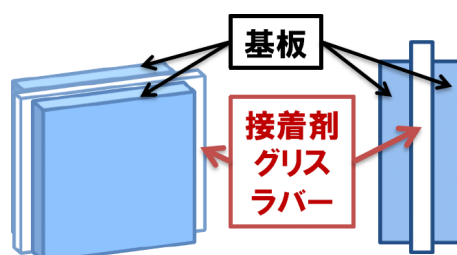


図. 3.19: 基板 2 枚で挟んだサンプルの模式図。光学接着剤、光学グリス、シリコンラバーは 2 枚のガラス基板に挟んだサンプルを作成し、透過率を測定した。

品名	OPSQ-20S2.3-1-10 (シグマ光機)
サイズ	20 × 20 × 2.3 mm ³
材質	合成石英
屈折率 (n _d)	1.47

表. 3.12: ガラス基板の仕様

分光光度計で測定できるのは表面での反射を含んだ外部透過率である。また、光学接着剤、光学グリス、シリコンラバーについては、基板に挟んで測定を行っているため、基板込みでの透過率を測定することになる。そのため、各光学素子の内部透過率を求めるためには工夫が必要である。以下にそれぞれの光学素子の内部透過率の求め方を述べる。

光学フィルター・MCP-PMT 入射窓

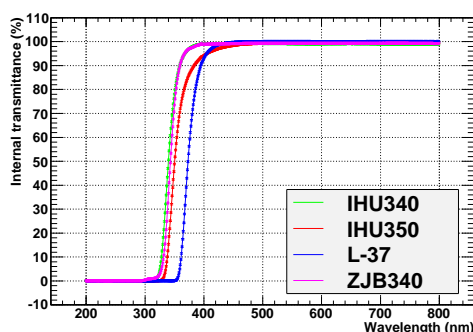
各光学素子の屈折率からフレネルの式を用いて反射率を計算し、補正を行うことで内部透過率を求めた。

光学接着剤・光学グリス・シリコンラバー

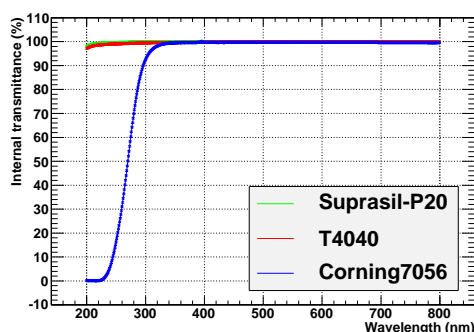
光学素子をガラス基板に挟んだサンプルの透過率に加えて、ガラス基板のみの透過率を測定し、 $((\text{ガラス基板} + \text{光学素子}) \text{の透過率}) \div (\text{ガラス基板の透過率})$ から光学素子の内部透過率を求めた。

結果

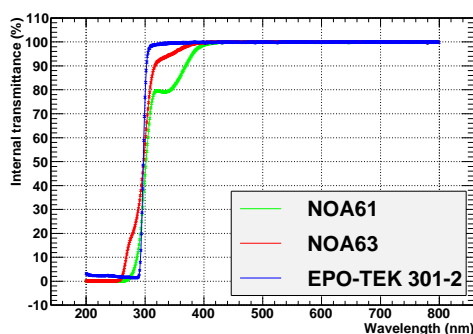
図 3.20 に各光学素子の内部透過率の測定結果を示す。



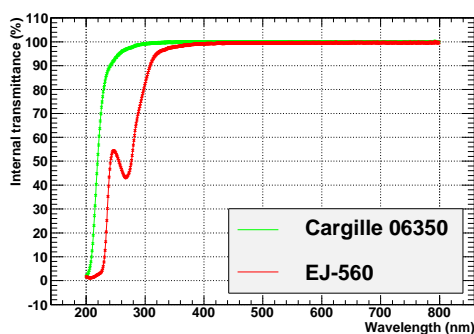
(a) 光学フィルター



(b) MCP-PMT 入射窓



(c) 光学接着剤



(d) 光学グリス・シリコンラバー

図. 3.20: 各光学素子の内部透過率測定結果。異なる光学素子に関する結果を、異なる色のグラフを用いて示す。

光学フィルターの IHU350 と L-37 を除く全ての光学素子が、要求性能である内部透過率 99.0 % 以上 (400–800 nm) を満たすことが明らかになった。また誤差は 400–800 nm の領域で $\sim \pm 0.5\%$ であった。

3.3 TOPカウンター全体での光学性能評価

各光学素子の光学性能評価の結果を用いて、TOPカウンター全体での光学性能評価を行った。

現時点で実機で用いる各光学素子の有力候補は、石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D)、光学フィルター (IHU340)、光学接着剤 (NOA63)、MCP-PMT 入射窓 (Suprasil-P20) である。TOPカウンターで典型的な伝搬距離は約 5m、反射回数は約 100 回、反射角度は約 45° であることから、発生した光子が光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割

合は、近似的に以下の式 (3.4) で表すことができる。ここで、 τ は各光学素子の内部透過率、 R は石英輻射体の内部表面反射率である。

$$(\tau_{Suprasil-P710})^{2.5}(\tau_{Corning79800D})^{2.5}(R_{Suprasil-P710})^{50}(R_{Corning79800D})^{50}(\tau_{IHU340})(\tau_{NOA63})(\tau_{Suprasil-P20}) \quad (3.4)$$

式 (3.4) に TOP カウンターで典型的な波長 400 nm での各測定結果を代入して計算した結果、 $(88 \pm 1)\%$ となった。また、光路のずれは石英輻射体の測定結果から 0.3 mrad 以下であることが明らかになっている。以上より、TOP カウンター実機の各光学素子は要求性能である以下の 2 点

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。

を満たすことが明らかになった。

3.4 まとめ

・石英輻射体

レーザー、フォトダイオード、CCD カメラを用いた高精度の光学性能測定システムを構築し、実機仕様の 2 つの石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D) について光学性能評価を行った。

内部透過率と内部表面反射率を高精度で測定をする上で重要だったのが、レーザーの光量モニターである。光量モニターを用いることで、レーザー光の強度を $^{+0.04}_{-0.17}\%$ の精度で測定できるシステムを構築した。

また、光路のずれ測定では、レーザーと CCD カメラをムービングステージに取り付け、同時に動かして位置スキャンすることで ± 0.1 mrad の精度での測定を可能にした。

その結果、

• 内部透過率

Suprasil-P710 : $(99.44 \pm 0.17) \%$ /m (平均)

Corning7980 0D : $(99.35 \pm 0.17) \%$ /m (平均)

• 内部表面反射率

Suprasil-P710 (岡本光学) : $(99.92^{+0.02}_{-0.01} \sim 99.98^{+0.02}_{-0.01}) \%$ (反射角 56–70 °)

Corning7980 0D (Zygo 社) : $(99.92 \pm 0.01 \sim 99.97^{+0.02}_{-0.01}) \%$ (反射角 56–70 °)

• 光路のずれ

Suprasil-P710 : < 0.1 mrad

Corning7980 0D : < 0.3 mrad

となり、2つの石英輻射体はいずれも光学性能の要求を満たしていることが明らかになった。

・その他の光学素子

光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学グリス、シリコンラバーについて光学性能評価を行った。

その結果、光学フィルターの IHU350 と L-37 を除く全ての光学素子が要求性能である内部透過率 99.0 % 以上 (400–800 nm) を満たすことが明らかになった。また、測定精度も目標とする $\pm 0.5\%$ 以内を達成した。

・TOP カウンター全体

現時点で実機で用いる各光学素子の有力候補は、石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D)、光学フィルター (IHU340)、光学接着剤 (NOA63)、MCP-PMT 入射窓 (Suprasil-P20) である。これらの光学素子の光学性能評価の結果から TOP カウンター全体で、発生した光子が光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合を求めると、TOP カウンターで典型的な波長 400 nm で $(88 \pm 1)\%$ となった。また、その際の光路のずれは 0.3 mrad 以下である。

以上より、TOP カウンター実機の各光学素子は要求性能である以下の 2 点

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。

を満たすことが明らかになった。

第4章 光学素子の放射線耐性試験

Belle II 実験においては、高いルミノシティに付随して多大な放射線が生成される。各光学素子は、多大な放射線にさらされながらも、性能を維持しなければならない。具体的には、10年間の運転で予想される放射線照射後に、光子数の減少が10%以下であることが求められる。本章では、TOPカウンターを構成する各光学素子の放射線耐性試験について述べる。測定精度は、粒子識別性能にほとんど影響を及ぼさないレベルである $\pm 3\%$ 以内を目標とした。各光学素子に Belle II 実験で予想されるガンマ線・中性子線を照射し、光学性能を評価した。

4.1 ガンマ線照射試験

Belle II 実験で予想される放射線の中で、最も光学素子への影響が大きいと考えられているのがガンマ線である。ガンマ線は、例えばビームが磁場で曲げられることによるシンクロトロン放射で生成される。また、ビーム中の粒子が同電荷の粒子の場によってはじかれるタウシェックバックグラウンドが、検出器中の物質に入射しシャワーを作ることなどでも生成される。Belle II 実験で予想されるガンマ線量の見積もり、ガンマ線が光学素子に与える影響、照射試験のサンプル、測定・評価方法、結果について順に述べる。

4.1.1 Belle II 実験で予想されるガンマ線量

Belle II 実験は、Belle 実験の40倍のルミノシティを目指す、ビームに由来するバックグラウンドは20倍程度に抑えられる衝突点付近のデザインを持つ。Belle 実験稼働時に、Belle 検出器のECLに設置されたCsI(Tl)シンチレータを用いてガンマ線量の測定が行われており、その結果を外挿することで Belle II 実験における線量を見積もることができる。CsI(Tl)の蓄積エネルギーから Belle 実験10年間でのバレル領域でのガンマ線量を見積もると、 (74 ± 14) radであった[5]。ここから Belle II 実験10年間でのバレル領域のガンマ線の放射線量は1–2 kradとなる。

4.1.2 ガンマ線が光学素子に与える影響

一般に、ガラスなどの光学素子にガンマ線を照射すると透過率が低下することが知られている。これは、ガンマ線照射によって生じる電離電子がガラスに含まれる不純物や結晶構造の欠陥に捕獲されて正孔-電子対ができることによる[6]。この正孔-電子対が紫外-可視領域に光吸収を持つために透過率が低下する。

石英輻射体および MCP-PMT 入射窓の素材である合成石英とホウケイ酸ガラスについては、これまでに照射試験が行われており、合成石英については高い放射線耐性が確認されている [6] [7]。光学フィルターについてはこれまでにガンマ線照射試験は行われていないが、特定の波長で光を吸収するために金属イオンが添加されているため、放射線耐性が低い可能性がある。また、光学接着剤では EPO-TEK 301-2 は 70 krad までの耐性が確認されているが [7]、NOA61、NOA63 については耐性を調べる必要がある。光学ガラス、シリコンラバーについてもこれまでに耐性試験は行われていない。

4.1.3 照射サンプル

今回ガンマ線照射試験を行うサンプルは第 3 章、第 4 章で光学性能評価を行った全てのサンプルである。ただし、石英輻射体は光学性能評価を行った大きさでは照射が困難であるため、10 cm 程度の大きさのサンプル(サイズは表 4.1 参照)で試験を行った。また、実機で使用する可能性のある Suprasil-P20 (信越石英) と Spectrosil2000 (Heraeus Quarzglas 社¹⁾) についても試験を行った。以下に石英輻射体サンプルの仕様を示す。

品名	サイズ	屈折率 (n_d)	透過率測定面の厚さ
Suprasil-P710	60 × 60 × 20 mm ³	1.47	60 mm
Corning7980 0D	54 × 54 × 112 mm ³	1.47	112 mm
Suprasil-P20	60 × 60 × 20 mm ³	1.47	60 mm
Spectrosil2000	20 × 20 × 99.5 mm ³	1.47	20 mm

表. 4.1: 石英輻射体サンプルの仕様

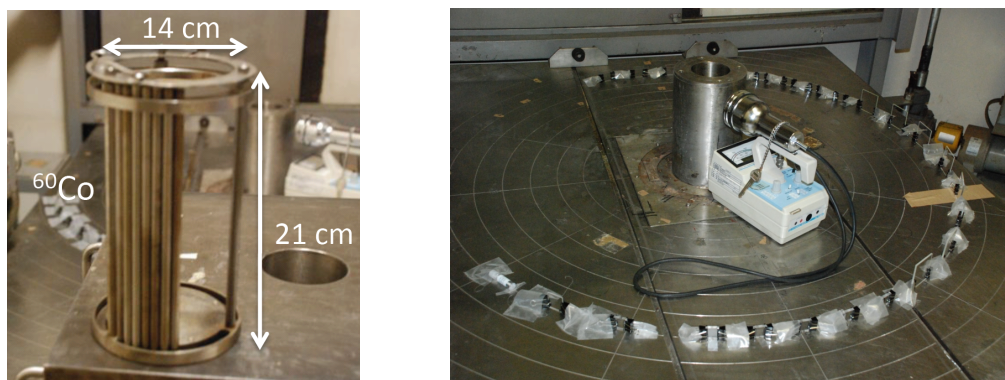
4.1.4 ガンマ線照射

ガンマ線照射は名古屋大学コバルト 60 ガンマ線照射室²で行った。線源は ^{60}Co で、 $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$ の反応によってガンマ線が放出される。また、ガンマ線のエネルギーは 1.17 MeV と 1.33 MeV である。図 4.1(a) がガンマ線源であり、図 4.1(b) のように各光学素子を線源からの距離を一定にして取り囲むようにして配置して照射を行った。照射線量は線源からの距離と照射時間で調節することができる。照射線量は 1 krad、10 krad、100 krad、1 Mrad (石英輻射体のみ) とし、照射線量の測定にはアミノグレイ (日立電線³) を用いた。

¹<http://heraeus-quarzglas.com/en/home/Home.aspx>

²<http://co60.nucl.nagoya-u.ac.jp/>

³<http://www.hitachi-cable.co.jp/>



(a) ガンマ線源。金属の筒に線源の ^{60}Co が入っている。

(b) ガンマ線照射の様子。中央の線源を取り囲むように同心円上に各光学素子を並べた。

図. 4.1: ガンマ線照射

4.1.5 測定・評価方法

ガンマ線照射前と 1 krad、10 krad、100 krad、1 Mrad (石英輻射体のみ) 照射後にそれぞれ各光学素子の透過率の測定を行った。測定には、第 4 章での光学素子の透過率測定に用いた分光光度計 V-570 を用いた。ただし、石英輻射体についてはその大きさから V-570 で測定することができないため、高エネルギー加速器研究機構が所有する分光光度計 U-4100 (日立ハイテクノロジーズ⁴) を用いた。その仕様を表 4.2 に示す。透過率の測定精度は V-570 と同様に $\pm 0.3\%$ (絶対値) であり、NIST 標準物質 (NIST SRM 930) を用いて検査されている。透過率の測定結果から、検出光子数を見積もり放射線による影響を評価した。



図. 4.2: U-4100

⁴<http://www.hitachi-hitec.com/>

光学系	ダブルモノクロダブルビーム方式
光源	重水素放電管、ハロゲンランプ
波長範囲	175–2600 nm
波長正確さ	±0.2 nm
測定精度	±0.3% (透過率)

表. 4.2: U-4100 の仕様

検出光子数の見積もり

検出光子数の見積もりには、

- (1) 厚さ 20 mm の石英輻射体を粒子が通過した際の発生光子数分布 (図 4.3(a))
- (2) 光検出器 MCP-PMT の光電面 (スーパーバイアルカリ) の量子効率分布 (図 2.9)
- (3) 光学フィルター IHU340 の透過率分布 (図 3.20(a))
- (4) 測定した各光学素子の透過率分布

を用いた。IHU340 の透過率を用いたのは、光学性能評価を受けて現時点で最も有力な光学フィルターであるためである。この (1)–(4) の分布を掛け合わせた検出光子数分布 (図 4.3(b)) を 200–800 nm の領域で積分し、その値を“検出光子数”とする。この相対的な変化を見ることによって、各光学素子について、放射線の影響による検出光子数の変化を見積もることができる。

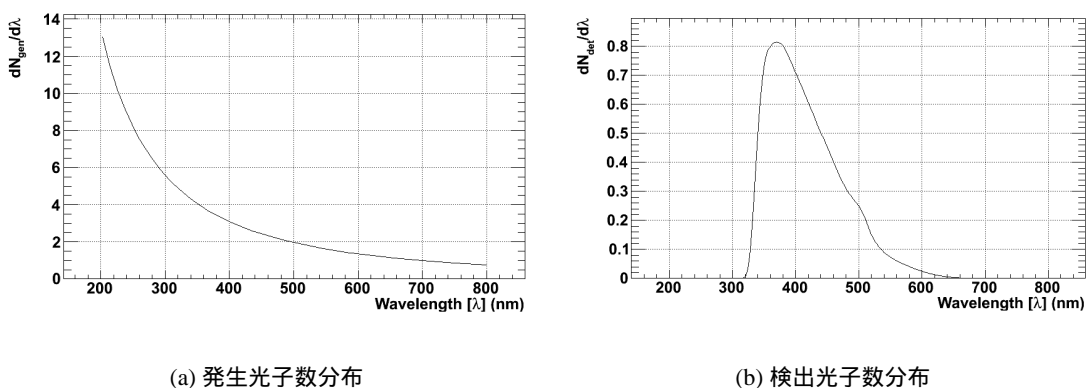
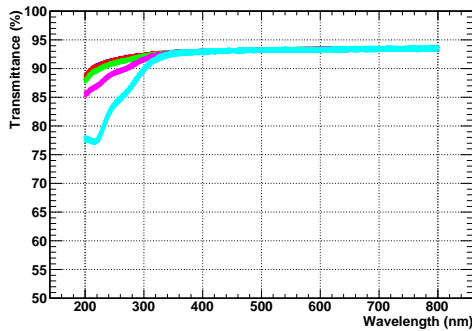


図. 4.3: 検出光子数の見積もり。(b) の検出光子数分布を 200–800 nm の領域で積分し、その値を“検出光子数”とする。

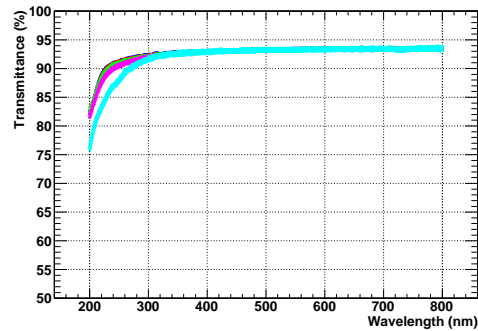
4.1.6 結果

図 4.4 に石英輻射体 Suprasil-P710 と Corning7980 0D の透過率の測定結果を示す。紫外領域では透過率の低下が見られるが、TOP カウンターで重要な 350–800 nm の領域では透過率の低下は見られなかった。ここから上述した方法で検出光子数を見積もると検出光子数の変化は照射前を 100% として、1 krad、10 krad、100 krad、1 Mrad 照射後でい

れも $(100 \pm 1)\%$ となった。石英輻射体の検出光子数はガンマ線照射によって変化しないことが明らかになった。



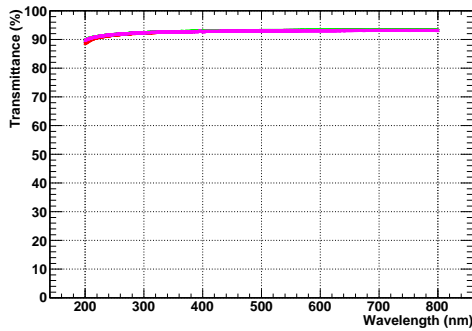
(a) Suprasil-P710



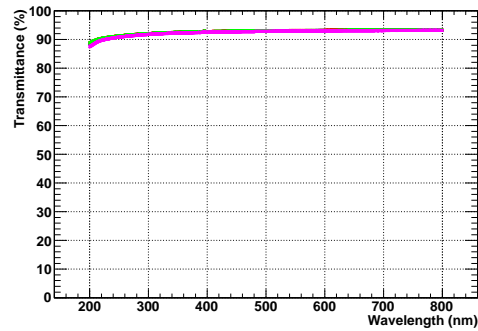
(b) Corning7980 0D

図. 4.4: 石英輻射体のガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後、水色：1 Mrad 照射後。TOP カウンターで重要な 350–800 nm の領域では、有意な透過率低下は見られなかった。

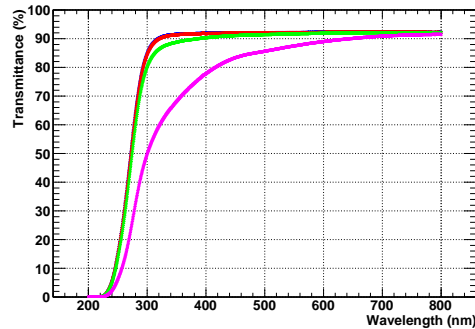
また、図 4.5 に MCP-PMT 入射窓についての結果を示す。合成石英である Suprasil-P20 と T4040 についてはほとんど低下が見られなかったが、ホウケイ酸ガラスである Corning7056 については 10 krad で透過率の低下が見られた。検出光子数の変化は照射前を 100% とし、Suprasil-P20、T4040 が 1 krad、10 krad、100 krad 照射後でいずれも $(100 \pm 1)\%$ 、Corning7056 が $(100 \pm 1)\%$ 、 $(98 \pm 1)\%$ 、 $(85 \pm 1)\%$ であった。



(a) Suprasil-P20



(b) T4040



(c) Corning7056

図. 4.5: MCP-PMT 入射窓のガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後。Corning7056 に対しては若干の透過率低下が見られたが、Suprasil-P20、T4040 に対しては有意な変化は見られなかった。

他のサンプルの結果 (透過率分布) については巻末の付録 C.1 に載せる。

検出光子数のまとめを図 4.6(a) に示す。横軸は図 4.6(b) に示したサンプル番号である。縦軸は各光学素子に対して見積もられる検出光子数の比で、ガンマ線照射前を 100% としたときの各照射後の検出光子数を表している。MCP-PMT 入射窓の Corning7056 のみ検出光子数の減少が見られたが、Belle II 実験 10 年分の 5–10 倍に対応する 10 krad 照射後で $(2 \pm 1)\%$ であった。

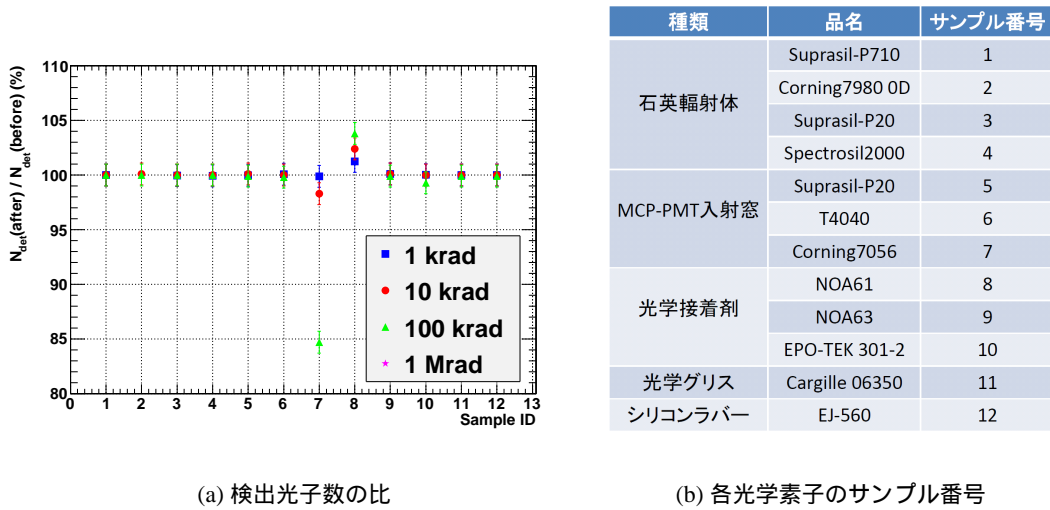


図 4.6: 各光学素子に対して見積もられる、ガンマ線照射の後と前の検出光子数の比。MCP-PMT 入射窓の Corning7056 以外に対しては有意な検出光子数減少は得られなかった。

光学フィルターのガンマ線耐性

上述の検出光子数の見積もりの際に、光学フィルター IHU340 の透過率分布を固定して用いたために(節 4.1.5 参照)、図 4.6 の結果には光学フィルターは含まれていない。光学フィルターについても検出光子数を評価した。固定された IHU340 の透過率分布の代わりに、各光学フィルターの照射前後の透過率分布を用いることで求めた。その結果を図 4.7 に示す。照射した 4 種類全ての光学フィルターで検出光子数の減少が見られたが、10 krad 照射後で $(4 \pm 1)\%$ 以内であった。

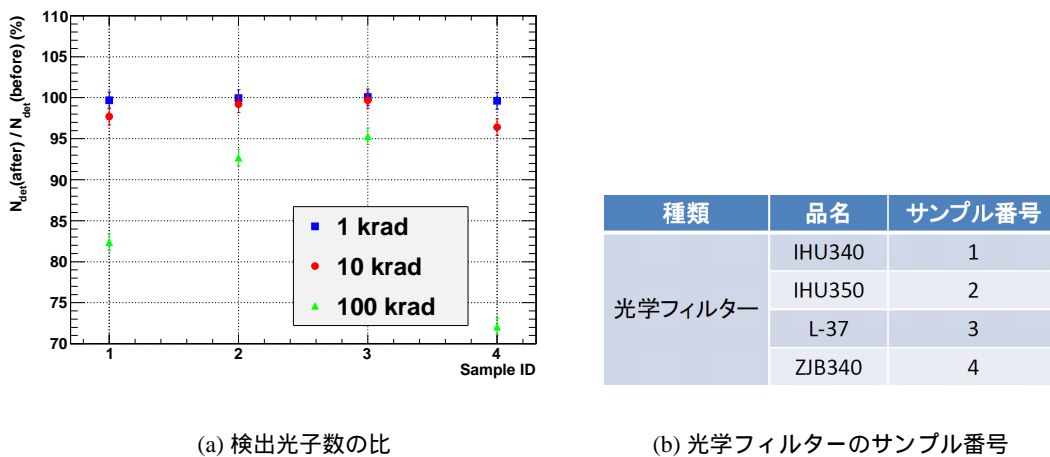


図 4.7: 光学フィルターに対して見積もられる、ガンマ線照射の後と前の検出光子数の比。4 種類全ての光学フィルターで検出光子数の減少が見られたが、10 krad 照射後で $(4 \pm 1)\%$ 以内であった。

TOP カウンター全体での検出光子数の評価

各光学素子について、現時点で TOP カウンター実機で有力なサンプルの透過率

- (1) 石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D) の透過率
- (2) 光学接着剤 (NOA63) の透過率
- (3) 光学フィルター (IHU340) の透過率
- (4) MCP-PMT 入射窓 (Suprasil-P20) の透過率

として、(1)–(4) の分布を掛け合わせたものを TOP カウンター全体の透過率分布とする (図 (4.8)(a))。

これを用いて、各光学素子の検出光子数の見積もりと同様に発生光子数分布と MCP-PMT 光電面の量子効率分布を掛け合わせたものが TOP カウンター全体の検出光子数分布である (図 (4.8)(b))。これを積分したものを TOP カウンター全体での“ 検出光子数 ”とすると、1 krad、10 krad、100 krad 照射後でそれぞれ $(100 \pm 1)\%$ 、 $(98 \pm 1)\%$ 、 $(82 \pm 1)\%$ となった。減少の主な原因は光学フィルター (IHU340) であった。

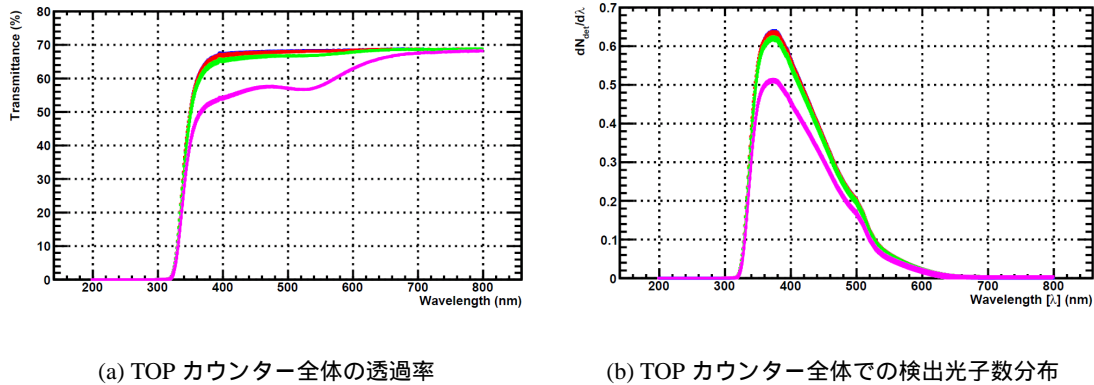


図 4.8: TOP カウンター全体でのガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後。検出光子数は、照射前を 100% として、1 krad、10 krad、100 krad 照射後でそれぞれ $(100 \pm 1)\%$ 、 $(98 \pm 1)\%$ 、 $(82 \pm 1)\%$ となった。

Belle II 実験 10 年間で予想される線量の 5–10 倍の 10 krad のガンマ線照射後で、検出光子数の減少は TOP カウンター全体で $(2 \pm 1)\%$ であった。よって、TOP カウンターは光学的観点からガンマ線について十分な耐性を持つことが実証された。

4.2 中性子線照射試験

Belle II 実験で予想される放射線には、前節で述べたガンマ線以外に中性子線がある。中性子線は、例えばビーム衝突に由来する電子や陽電子がビームパイプに入射した際に発生する。電磁相互作用を起こさないため、ガンマ線と比較して光学素子へ与える影響は小さいと考えられているが、中性子線についても同様に照射試験を行った。

4.2.1 Belle II 実験で予想される中性子線量

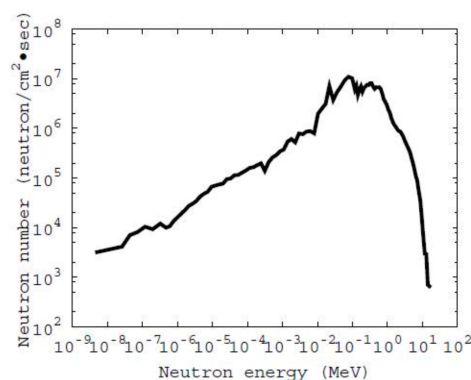
Belle II 実験で予想される中性子線量についてシミュレーションによる中性子線の見積もりが行われており、バレル領域では 10 年間で 5×10^{11} neutron/cm² と予想されている。

4.2.2 中性子線照射

中性子線照射は、茨城県東海村にある東京大学原子炉「弥生」⁵(図 4.9(a))で行った。「弥生」は高濃縮金属ウランを燃料とした、空気冷却型高速炉である。 $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{95}\text{Y} + ^{135}\text{I} + 2n$ などの核分裂反応により、中性子を発生させる。熱中性子やガンマ線の混入のない高速中性子が利用できるのが特長である。「弥生」での中性子線エネルギースペクトルを図 4.9(b) に示す [8]。照射線量は 5×10^{11} neutron/cm²、 1×10^{12} neutron/cm² である。



(a) 「弥生」の全景



(b) 「弥生」のエネルギースペクトル

図. 4.9: 東京大学原子炉「弥生」

4.2.3 照射サンプル

中性子照射試験を行うサンプルは、ガンマ線照射試験を行ったサンプルと同じ仕様のものである。ただし石英輻射体サンプルについては、それぞれ 1 つのサンプルしか得られなかったために、ガンマ線照射したサンプルに、中性子照射を行った。

4.2.4 測定・評価方法

透過率の測定方法および検出光子数の評価方法は、前節のガンマ線照射と全く同様である。

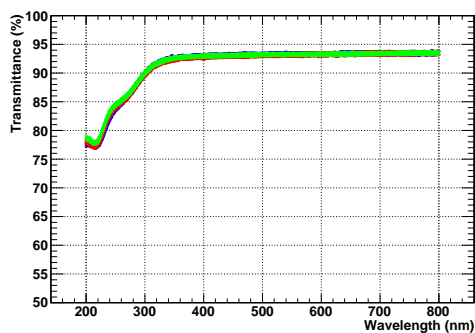
⁵<http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/rokan/>

4.2.5 結果

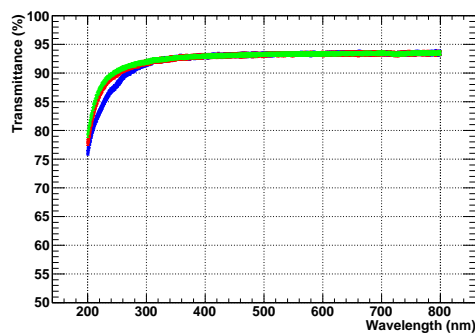
図 4.10 に石英輻射体の Suprasil-P710 と Corning7980 0D 透過率の測定結果を示す。350–800 nm の領域で有意な変化は見られなかった。ガンマ線と同様に“ 検出光子数 ”を評価すると、 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、 1×10^{12} neutron/cm² 照射後でいずれも $(100 \pm 1)\%$ となった。よって石英輻射体の検出光子数は中性子線照射によって変化しないことが明らかになった。

また、図 4.11 に MCP-PMT 入射窓についての結果を示す。合成石英である Suprasil-P20 と T4040、ホウケイ酸ガラスである Corning7056 の全てで有意な変化は見られなかった。検出光子数を評価すると、 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、 1×10^{12} neutron/cm² 照射後でいずれも $(100 \pm 1)\%$ となり、中性子線照射による検出光子数の減少は見られなかった。

また、その他のサンプルの透過率測定結果は巻末の付録 C.2 に載せる。

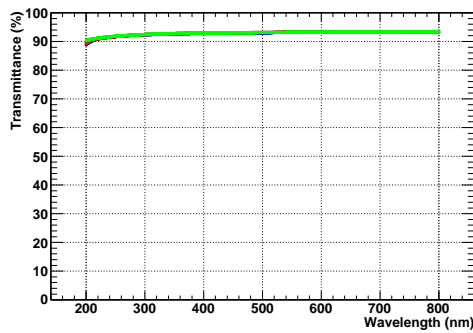


(a) Suprasil-P710

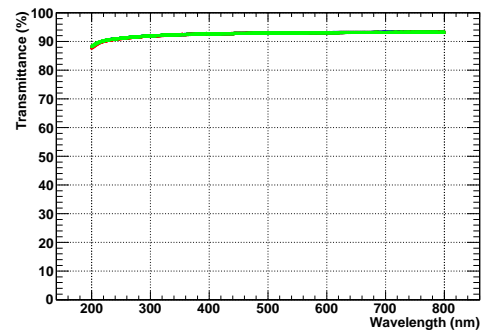


(b) Corning7980 0D

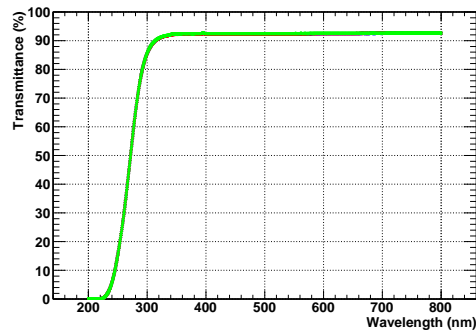
図 4.10: 石英輻射体の中性子線照射結果。青：照射前 (ガンマ線 1 Mrad 照射後)、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。350–800 nm の領域で有意な変化は見られなかった。Corning7980 0D についてはガンマ線 1 Mrad 照射後の中性子線照射で、紫外領域で透過率の向上が見られた。この原因について結論は得られていない。



(a) Suprasil-P20



(b) T4040



(c) Corning7056

図 4.11: MCP-PMT 入射窓の中性子線照射結果。青：照射前、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。有意な変化は見られなかった。

検出光子数のまとめを図 4.12(a) に示す。横軸は図 4.12(b) に示したサンプル番号である。縦軸は各光学素子に対して見積もられる検出光子数の比で、中性子線照射前を 100% としたときの各照射後の検出光子数を表している。全ての光学素子で検出光子数が中性子線照射で有意に減少しないことが分かった。

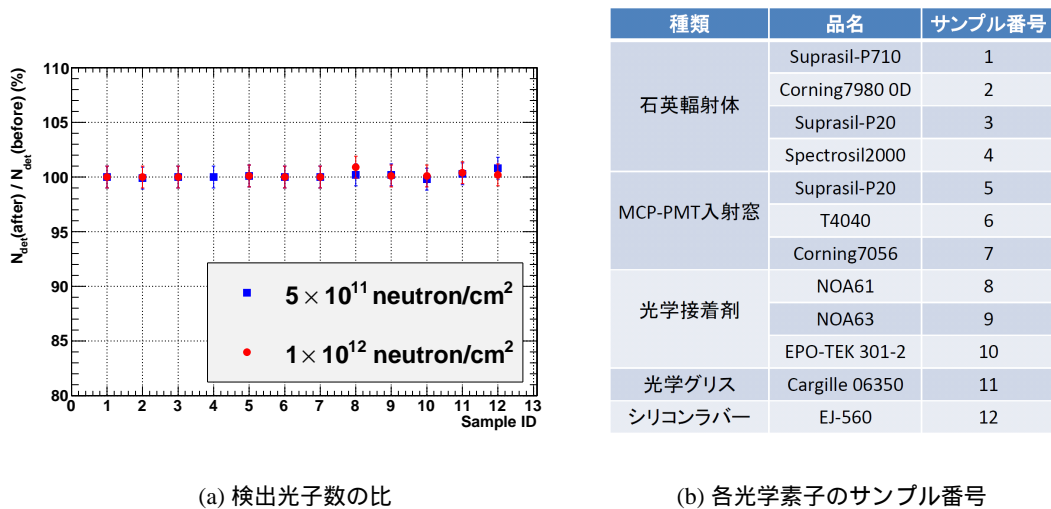


図 4.12: 各光学素子に対して見積もられる、中性子線照射の後と前の検出光子数の比。全ての光学素子で有意な検出光子数減少は得られなかった。

光学フィルターの中性子線耐性

ガンマ線照射と同様に、光学フィルターについても検出光子数の評価を行った。結果を図 4.13 に示す。照射した 4 種類全ての光学フィルターで有意な検出光子数の減少は見られなかった。

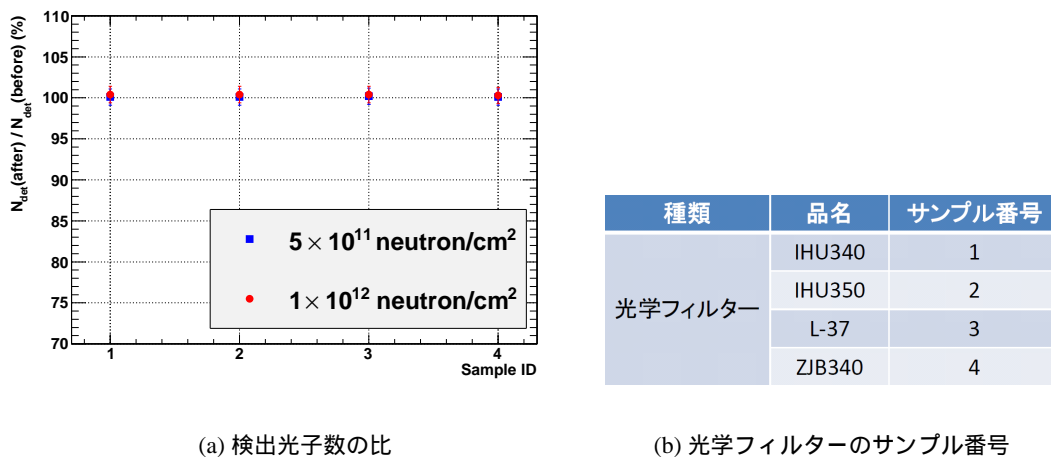


図 4.13: 光学フィルターに対して見積もられる、ガンマ線照射の後と前の検出光子数の比。4 種類全ての光学フィルターで有意な検出光子数減少は得られなかった。

TOP カウンター全体での検出光子数の評価

ガンマ線照射と同様に、TOP カウンター全体での“ 検出光子数 ”を評価した。結果を図 4.14 に示す。照射前の検出光子数を 100%とすると、 5×10^{11} neutron/cm²、 1×10^{12} neutron/cm² 照射後の検出光子数はいずれも $(100 \pm 1)\%$ であった。よって TOP カウンターは光学的観点から中性子線について十分な耐性を持つことが実証された。

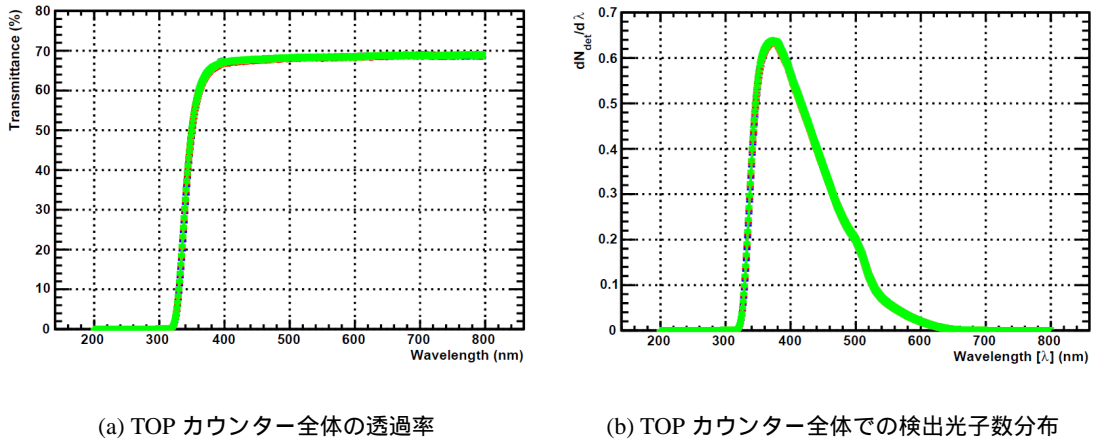


図 4.14: TOP カウンター全体での中性子線照射結果。青:照射前、赤: 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑: 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。検出光子数は、照射前を 100%として、 5×10^{11} neutron/cm²、 1×10^{12} neutron/cm² 照射後でいずれも $(100 \pm 1)\%$ であった。

4.3 まとめ

TOP カウンターを構成する各光学素子について、ガンマ線と中性子線の照射試験を行った。その結果、ガンマ線については Belle II 実験 10 年間で予想される 5–10 倍の 10 krad 照射後で、TOP カウンター全体で期待される検出光子数の減少は $(2 \pm 1)\%$ であった。また、中性子線については Belle II 実験 10 年間で予想される 2 倍の 1×10^{12} neutron/cm² 照射後で、TOP カウンター全体で期待される検出光子数の減少は $(0 \pm 1)\%$ であった。また、測定精度についても、目標の $\pm 3\%$ 以内を達成した。

よって、光学性能の観点から TOP カウンターは Belle II 実験で 10 年間使用可能であり、目標とする識別性能を維持できることが実証された。

第5章 石英輻射体とフォーカシングミラーの接着

本章では、TOP カウンターの実機製作に必要な2つの石英輻射体とフォーカシングミラーの接着について述べる。

チェレンコフ光の角度情報を保存して伝搬させるために、石英輻射体およびフォーカシングミラーの相対角度を、非常に高い精度で接着することが求められる。また、石英輻射体およびフォーカシングミラーの相対位置が平行にずれると、光子のロスにつながるため、相対位置の精度も重要である。今回、石英輻射体およびフォーカシングミラーの相対角度を $O(0.01)$ mrad で制御可能、 ± 0.01 mrad の精度で測定可能、相対位置を $O(10)$ μm で制御可能、 ± 5 μm の精度で測定可能な接着システムを構築した。また、それを用いて実機プロトタイプの接着を行った。

5.1 接着に求められる精度

これまでの研究から、石英輻射体およびフォーカシングミラーの接着に求められる精度が明らかになっている。図 5.1 に石英輻射体とフォーカシングミラーの相対角度・相対位置の模式図を示した。TOP カウンター実機生産の際の接着に求められる精度は相対角度 ($\Delta\theta$) が 0.2 mrad 以内、相対位置 ($\Delta x, \Delta y$) が 100 μm 以内である。

Belle II 実験において最も K/π 識別が難しい運動量である 3.5 GeV/c に対する K と π のチェレンコフ角の差は 8.4 mrad であり、0.2 mrad の光路ずれはその 40 分の 1 に当たる。これは、節 2.3.1 に示す識別性能を達成する上で十分小さいと言える。また、相互位置にずれがあると、光子が石英輻射体の内部表面で反射せず、外に出てしまう。石英輻射体の厚みは 20 mm であるため、100 μm の相互位置ずれは、光子数が 0.5% 減少することに対応し、識別性能に対する影響は無視できるレベルである。

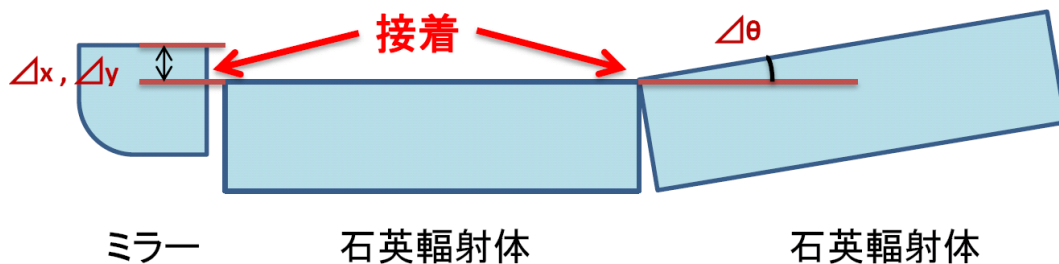


図 5.1: 石英輻射体およびフォーカシングミラーの相対角度・相対位置。接着には、相対角度 ($\Delta\theta$) が 0.2 mrad 以内、相対位置 ($\Delta x, \Delta y$) が 100 μm 以内の精度が求められる。

5.2 接着システム

図 5.2 に接着用ジグの模式図を、図 5.3 にその写真を示す。接着用ジグについて順番に説明する。接着用ジグは $1500 \times 4000 \text{ mm}^2$ の光学実験台 (HA-4015-400LS シグマ光機) に載せられている。光学実験台の上にはレール (SHS25 THK¹) が 2 本取りつけられており、そのレールにアルミ板 (下) が取りつけられている。アルミ板 (上) にはマイクロメータヘッド (MHF2-2.5V、MHF2-1 ミットヨ²) が取り付けられており、その先端がアルミ板 (下) につくことでアルミ板 (上) と石英輻射体 (フォーカシングミラー) を支える。マイクロメータヘッドの先端とアルミ板 (下) の接触部分には鋼鉄製の球を埋め込んだジグが取り付けられてあり、安定性が高い構造になっている。また、石英輻射体やフォーカシングミラーが傷付くのを防ぐため、石英輻射体とアルミ板 (上) の間にポリアセタール球を入れる。アルミ板 (上) の上には、ポリアセタール球を保持する目的と、石英輻射体とアルミ板の接触を防ぐ目的で、穴を開けた塩化ビニル板を載せる。アルミ板 (上)、アルミ板 (下)、塩化ビニル板のサイズを表 5.1 にまとめた。

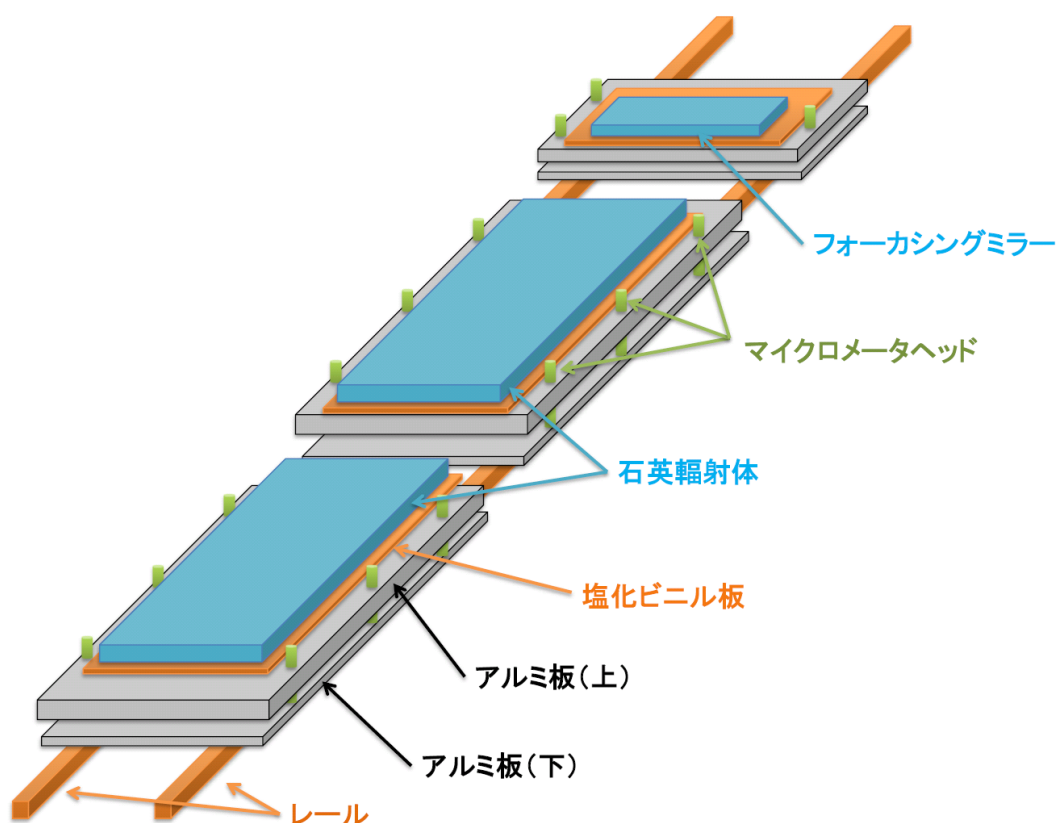


図. 5.2: 接着用ジグ模式図

¹<http://www.thk.com/jp/>

²<http://www.mitutoyo.co.jp/>

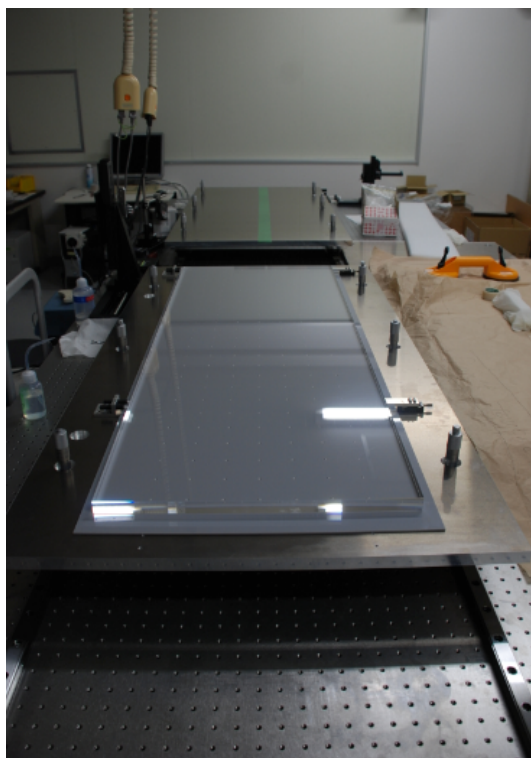


図. 5.3: 接着用ジグ写真。光学実験台の上にレールが2本取り付けられており、そのレールにアルミ板(下)が取り付けられている。アルミ板(上)にはマイクロメータヘッドが取り付けられており、その先端がアルミ板(下)につくことでアルミ板(上)を支える。また、石英輻射体とアルミ板(上)の間には、ポリアセタール球と、それを保持するために穴を開けた塩化ビニル板を載せる。

	石英輻射体用	フォーカシングミラー用
アルミ板(上)	700 × 300 × 20 mm ³	700 × 300 × 20 mm ³
アルミ板(下)	700 × 1050 × 10 mm ³	700 × 300 × 10 mm ³
塩化ビニル板	490 × 1320 × 3 mm ³	490 × 71 × 3 mm ³

表. 5.1: アルミ板(上、下)、塩化ビニル板のサイズ

図 5.4 にアルミ板(上)と、その上に載せた石英輻射体のたわみを示す。剛性の高い厚さ 20 mm のアルミ板を用いることで、アルミ板(上)のたわみは $\sim \pm 50 \mu\text{m}$ に抑えられている。さらに、石英輻射体とフォーカシングミラーは弾力性のあるポリアセタール球の上に載せられているため、たわみは $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ に抑えられている。これは接着に十分な設置である。尚、たわみは、6.2.1 節に示すオートコリメータで角度を測定し面を再構成することで見積もった。

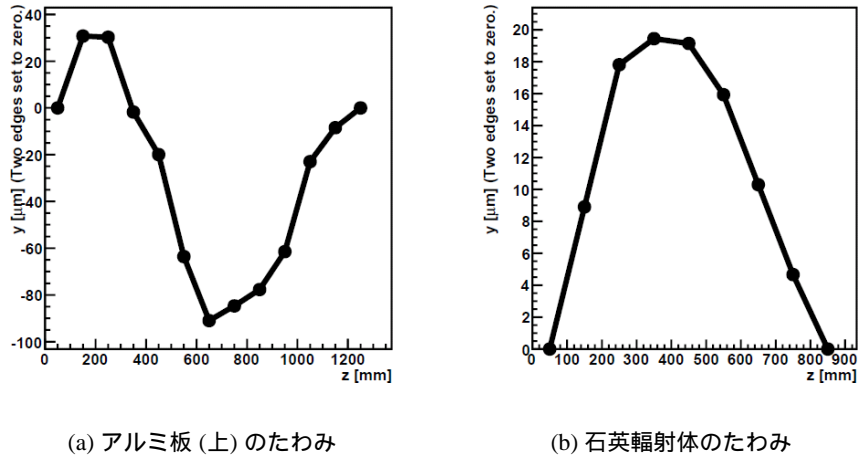


図. 5.4: アルミ板 (上) と石英輻射体のたわみ。横軸は長さ方向の位置、縦軸は両端の位置を 0 としたときの相対位置である。長さ方向の各点で、オートコリメータを用いて相対角度を測定した。相対角度から相対位置を求め、両端の位置を 0 とする面を再構成することでたわみを見積もった。アルミ板 (上) のたわみは $\sim \pm 50 \mu\text{m}$ 、石英輻射体のたわみは $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ であった。

5.2.1 相対角度の調節・測定

相対角度の調節は、マイクロメータヘッドを用いて行う。図 5.5(a) の模式図のように、マイクロメータヘッドのストロークを伸縮することで、アルミ板 (上) の上に載せた石英輻射体やフォーカシングミラーの相対角度を調節することができる。相対位置も、マイクロメータヘッドによって調節される。表 5.2 にマイクロメータヘッドの仕様を示す。

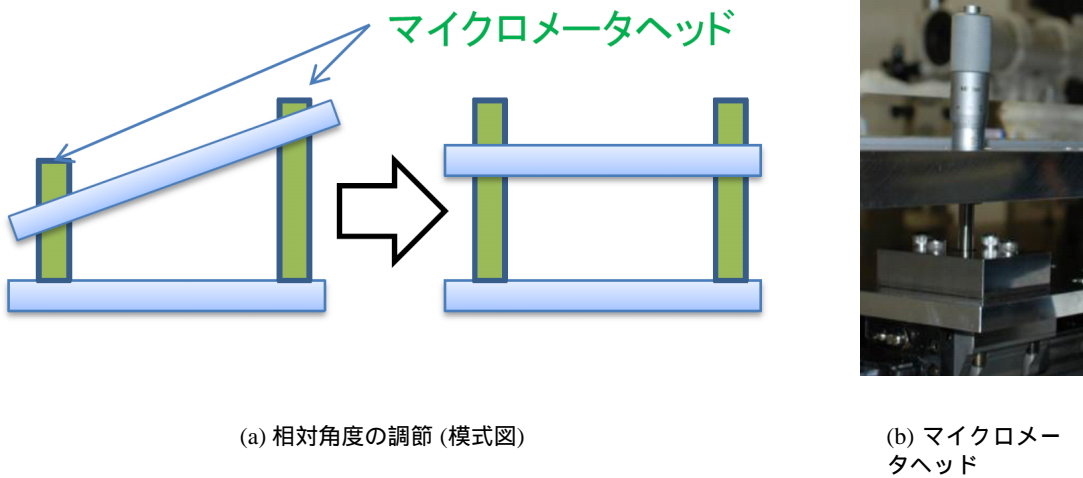
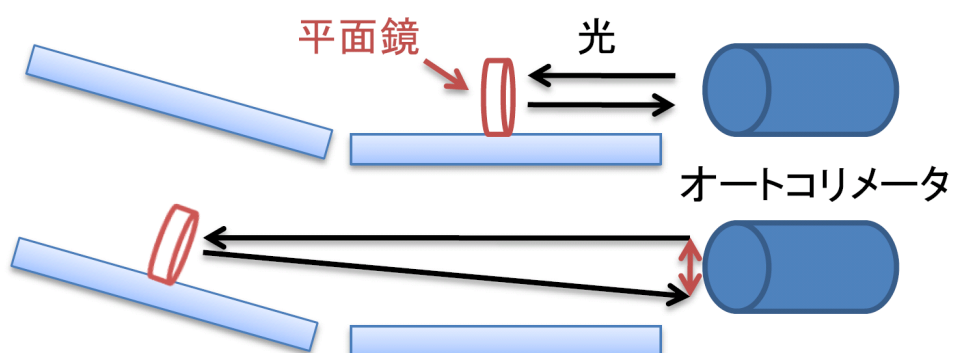


図. 5.5: 相対角度の調節。マイクロメータヘッドのストロークを伸縮することで、石英輻射体やフォーカシングミラーの相対角度を調節することができる。

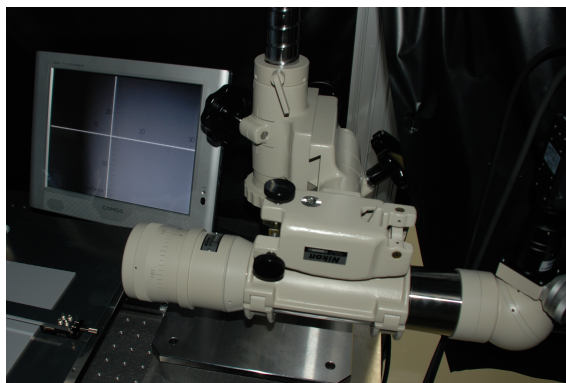
型番	測定(可動)範囲	目盛り	先端形状	送り機構
MHF2-2.5V	0-2.5 mm	0.0001 mm	平面(超合金チップ付)	スピンドル直進式
MHF2-1	0-1 mm	0.001 mm	平面(超合金チップ付)	スピンドル直進式

表. 5.2: マイクロメータヘッドの仕様

相対角度の測定は、オートコリメータ(6D ニコン³)を用いて行う。図 5.6(a)の模式図のように、測定したい2つの面に平面鏡を載せ、反射光の光路のずれを見ることで、2つの面の相対角度を測定することができる。



(a) 相対角度の測定(模式図)



(b) オートコリメータと読み取り用ディスプレイ。ディスプレイに映した視野目盛で相対角度を読み取る。

図. 5.6: 相対角度の測定。測定したい2つの面に平面鏡を載せ、オートコリメータを用いて反射光の光路のずれを見ることで、2つの面の相対角度を測定することができる。

³<http://www.nikon.co.jp/>

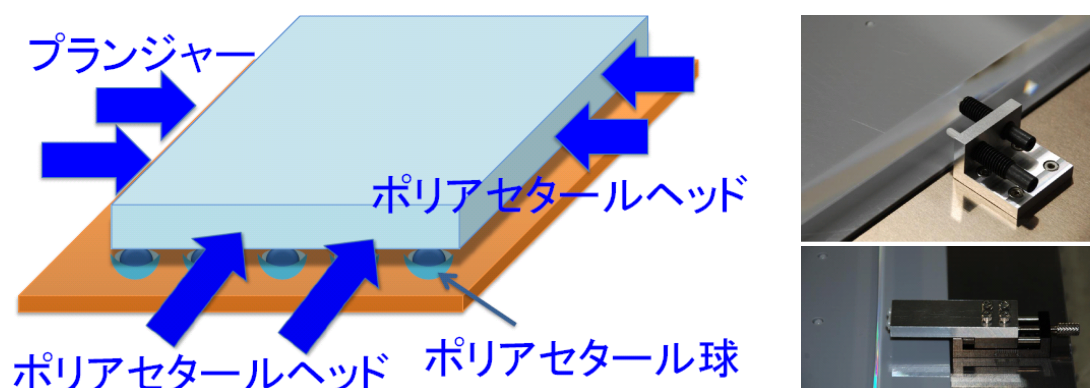
表 5.3 にオートコリメータの仕様を示す。仕様では測定精度 (測定範囲 5 分以内) は 0.5 秒だが、実際の測定ではディスプレイに映る光軸を目で読み取る必要があるため、実用上の測定精度は 10–15 秒である。これは ± 0.01 mrad に相当する。

型番	6D
光源	6V15W 特殊電球
読取方式	視野目盛とマイクロメータ
測定精度	測定範囲 5 分以内 : 0.5 秒 測定範囲 30 分以内 : 1 秒

表. 5.3: オートコリメータの仕様

5.2.2 相対位置の調節・測定

相対位置の調節はアルミ板 (上) に取り付けられた、プランジャーとポリアセタールヘッドを用いて行う。図 5.7(a) の模式図のように、石英輻射体およびフォーカシングミラーはプランジャーとポリアセタールヘッドに挟まれている。ポリアセタールヘッドは可動範囲が ± 5 mm の押しねじ式ステージに取り付けられており、押しネジを回すことで相対位置の調節を行うことができる。



(a) 相対位置の調節 (模式図)

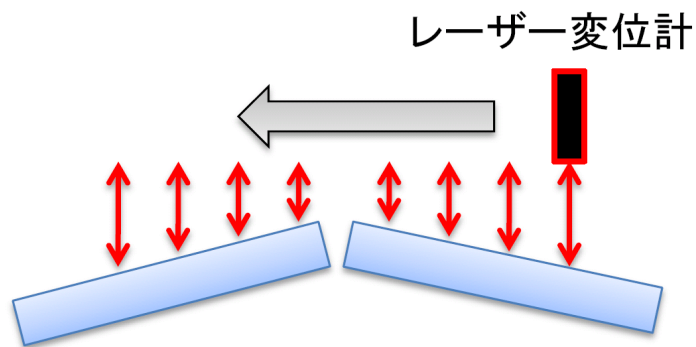
(b) プランジャー (上) と
ポリアセタールヘッド
(下)

図. 5.7: 相対位置の調節。石英輻射体およびフォーカシングミラーはプランジャーとポリアセタールヘッドに挟まれている。ポリアセタールヘッドは可動範囲が ± 5 mm の押しねじ式ステージに取り付けられており、押しネジを回すことで相対位置の調節を行うことができる。

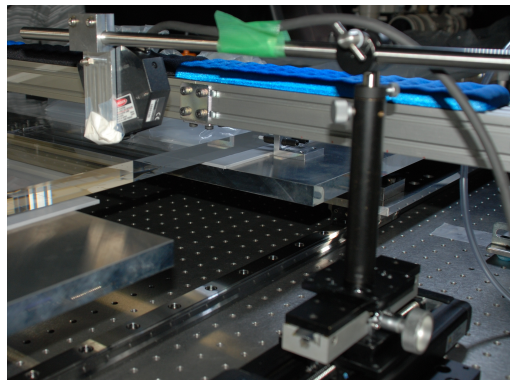
相対位置の測定はレーザー変位計 (LK-G30 キーエンス⁴) を用いて行う。レーザー変位

⁴<http://www.keyence.co.jp/>

計は、内蔵した半導体レーザーと光センサーを用いて、対象物の変位を測定することができる。図 5.8 の模式図のように、可動ステージに取り付けたレーザー変位計を用いてスキャンをすることで、2つの面の相対位置(段差)を測定することができる。表 5.4 にレーザー変位計の仕様を示す。



(a) 相対位置の測定 (模式図)



(b) レーザー変位計

図 5.8: 相対位置の測定。可動ステージに取り付けたレーザー変位計を用いてスキャンをすることで、2つの面の相対位置(段差)を測定することができる。

型番	LK-G30
光源	赤色半導体レーザー (650 nm)
測定範囲	±4.5 mm
直線性	±2.5 μm
繰り返し精度	±0.05 μm

表. 5.4: レーザー変位計の仕様

レーザー変位計は可動ステージに取り付けられているため、可動ステージの性能も測定精度に影響する。本研究では、面精度が $0.63 \mu\text{m}$ の平行平面基板 (OPSQ-20S2.3-1-10 シグマ光機) を用いてシステム全体としての位置測定精度評価を行い $\pm 5 \mu\text{m}$ を得た。

5.3 実機プロトタイプ of 接着

本節では、前節までに説明した接着システムを用いて行った実機プロトタイプ of 接着について述べる。今回接着したのは、2つの石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D) とフォーカシングミラーである。2つの石英輻射体は第3章で光学性能評価を行ったものである。フォーカシングミラーについて述べたあと、接着の配置と要求、接着手順、接着後の測定結果について順に述べる。

5.3.1 フォーカシングミラーの仕様

表 5.5 に実機プロトタイプ of フォーカシングミラーの仕様を示す。硝材は Suprasil-P710 であり、岡本光学加工所によって研磨されたものである。F 面は球面に研磨されており、アルミミラーが蒸着されている (図 5.9 参照)。

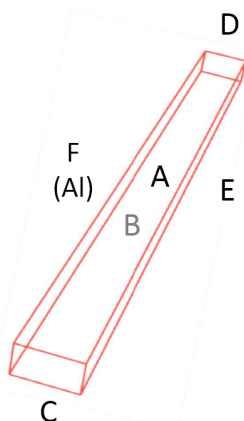


図. 5.9: フォーカシングミラーの面の定義。A は上面、B は下面、C-F は側面をそれぞれ示す。F は球面に研磨されており、アルミミラーが蒸着されている。

硝材	Suprasil-P710
長さ (mm)	29.95
幅 (mm)	450.09
厚さ (mm)	19.95
球面半径 (mm)	5066
直角度 $A \perp E$, $B \perp E$ (分角)	0.32, 0.32
面精度 A, B, E ($\mu\text{m PV}$)	0.1, 0.3, 0.6
面粗さ (nm rms)	0.4

表. 5.5: フォーカシングミラーの仕様

5.3.2 接着の配置と要求

図 5.10 に接着の配置図を示した。

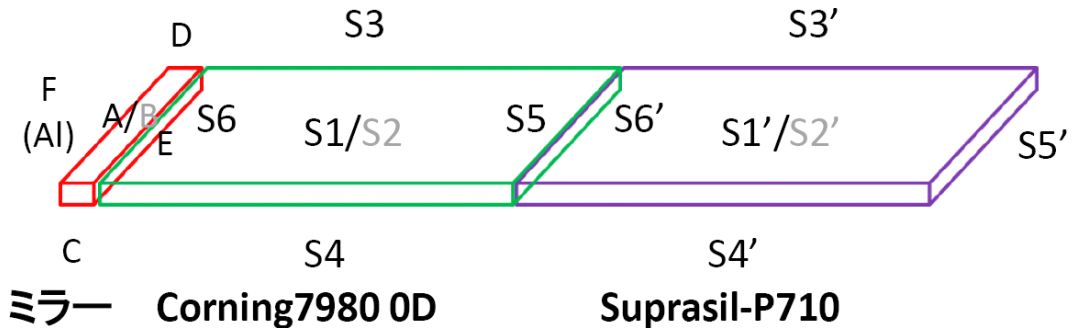


図. 5.10: 石英輻射体とフォーカシングミラーの接着の配置図。S1-S6 と S1'-S6' は石英輻射体、A-F はフォーカシングミラーの各面を表す(図 3.2、図 5.9 参照)。S2、S2'、B は下面を表す。

接着に関する要求を以下にまとめる。

- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - 石英輻射体 (Suprasil-P710) 間
 相対角度 (≤ 0.2 mrad) : S1 - S1', S2 - S2', S3 - S3', S4 - S4'
 相対位置 ($\leq 100 \mu\text{m}$) : S1 - S1', S2 - S2', S3 - S3', S4 - S4'
- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - フォーカシングミラー間
 相対角度 (≤ 0.2 mrad) : S1 - A, S2 - B, S6 - E
 相対位置 ($\leq 100 \mu\text{m}$) : S1 - A, S2 - B, S3 - D, S4 - C

また、接着剤の厚さは、

- 石英輻射体 - 石英輻射体間 : $30 \mu\text{m}$ (S3 - S3' 側) - $230 \mu\text{m}$ (S4 - S4' 側)
- 石英輻射体 - フォーカシングミラー間 : $30 \mu\text{m}$

で接着を行った。 $30 \mu\text{m}$ 以下だと接着剤が浸透しないため(接着手順は節 5.3.3 参照)、接着剤の厚さは $30 \mu\text{m}$ 以上にした。また、石英輻射体 - 石英輻射体間の接着剤の厚さが $30\text{--}230 \mu\text{m}$ となるのは、Suprasil-P710 の S3' - S6' (S4' - S6') の相対角度が直角から ~ 0.4 mrad ずれているためである。S3 - S3' 面と S4 - S4' 面に平行を要求すると、石英輻射体 - 石英輻射体間の距離は一定ではなくなる。

接着剤について

石英輻射体 - 石英輻射体間の接着には光学接着剤 NOA63 を用いた。これは、NOA63 が他の候補 (NOA61、EPO-TEK 301-2) と比較して粘度が高く、最大 $230 \mu\text{m}$ の隙間を埋めるのに最適であることと、紫外線硬化型の方が紫外線を照射するまでは硬化しないので失敗のリスクを減らせるためである。

また、石英輻射体 - フォーカシングミラー間にはアセトンを用いて剥離可能な光学接着

剤 NBA107 (Norland Products) を用いた。これは、今回接着するフォーカシングミラーの長さが Belle II での実機のものより短いためである。今回接着した実機プロトタイプは実機のバックアップとして用いる可能性があるため、剥離可能な接着剤を用いることにした。表 5.6 に NBA107 の仕様を示す。NBA107 の光学性能評価を行い、25 μm の厚さで内部透過率が 99.0% 以上 (400–800 nm) を満たすことを確認した。ただし、NBA107 はプロトタイプと実機のサイズの違いを考慮して使うことにしたものであり、TOP カウンター実機に使う予定はない。したがって、放射線耐性試験は行っていない。

硬化条件	紫外線
屈折率 (n_d)	1.51
粘度	350 cps
引張強度	78 psi
剥離方法	温かい薄めの石鹼水またはアセトンに浸す

表. 5.6: NBA107 の仕様

5.3.3 接着手順

接着の手順を以下に述べる。

1. 2 つの石英輻射体 (もしくはフォーカシングミラー) を近づけ、接着面に厚さ 30 μm のシクネスゲージ⁵を挟んで厚さを調節する。(石英輻射体 - 石英輻射体間には S3 - S3' 側、石英輻射体 - フォーカシングミラー間には両側にシクネスゲージを挟む)
2. 相対角度と相対位置を交互に調節する。両方が要求精度を満たすまで繰り返し調節を行う⁶。
3. 精密ディスペンサー (MS-1 武蔵エンジニアリング⁷) を用いて上面から隙間に接着剤を載せていく。毛細管現象で接着剤が浸透していく。
4. 接着剤が接着面全体に行き渡ったら、ブラックライト (FL20SBL NEC⁸) で紫外線を照射する。2 分程度照射した時点で一度照射を止め、準硬化状態を作った上で上面や下面にあふれた接着剤を拭き取る。
5. さらに 10 時間程度紫外線を照射し、完全に硬化させる。

この手順で、石英輻射体 - 石英輻射体間と石英輻射体 - フォーカシングミラー間の接着を行った。

⁵すきまゲージとも呼ばれる。今回用いたシクネスゲージの素材はアルミである。

⁶石英輻射体 - 石英輻射体間は相対角度 : S1 - S1', S4 - S4'、相対位置 : S1 - S1' (S3 側と S4 側), S3 - S3', S4 - S4' を測定する。また、石英輻射体 - フォーカシングミラー間は相対角度 : S1 - A、相対位置 : S1 - A (S3 側と S4 側), S3 - D, S4 - C を測定する。

⁷<http://www.musashi-engineering.co.jp/>

⁸<http://www.nec.co.jp/>

5.3.4 接着後の測定結果

石英輻射体 - 石英輻射体間と石英輻射体 - フォーカシングミラー間の接着について、それぞれ接着後の相対角度と相対位置の測定結果を示す。

- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - 石英輻射体 (Suprasil-P710) 間
 - ・ 相対角度
S1 - S1' : 0.10 mrad, S4 - S4' : 0.03 mrad
 - ・ 相対位置
S1 - S1' : 40 μm (S3 側)–50 μm (S4 側), S3 - S3' : 60 μm , S4 - S4' : 90 μm
- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - フォーカシングミラー間
 - ・ 相対角度
S1 - A : 0.02 mrad
 - ・ 相対位置
S1 - A : 10 μm (S3 側)–50 μm (S4 側), S3 - D : 30 μm , S4 - C : 30 μm

この測定結果から、節 5.3.2 で述べた要求を全て満たしていることが分かる。

よって、実機プロトタイプの 2 つの石英輻射体とフォーカシングミラーを要求精度で接着することに成功した。

5.4 まとめ

実機生産の際の接着に必要な、相対角度を $O(0.01)$ mrad で制御可能、 ± 0.01 mrad の精度で測定可能、相対位置を $O(10)$ μm で制御可能、 ± 5 μm の精度で測定可能な接着システムを構築した。相対角度はマイクロメータヘッドで調節可能で、オートコリメータを用いて測定できる。また、相対位置はプランジャとポリアセタールヘッドで調節可能で、レーザー変位計を用いて測定できる。

また、この接着システムを用いて実機プロトタイプ of 2 つの石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D) とフォーカシングミラーの接着を行った。

その結果、

- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - 石英輻射体 (Suprasil-P710) 間
 - 相対角度 : 0.03–0.10 mrad
 - 相対位置 : 40–90 μm
- 石英輻射体 (Corning7980 0D) - フォーカシングミラー間
 - 相対角度 : 0.02 mrad
 - 相対位置 : 10–50 μm

での接着に成功した。

よって、TOP カウンターの実機生産に必要な

- 石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 100 μm 以下の精度で接着。

が可能な接着システム・手法が実証された。

第6章 結論

本研究では、TOP カウンター実機を構成する全ての光学素子について光学性能評価、放射線耐性試験を行った。また、石英輻射体とフォーカシングミラーの接着システムを構築し、実機プロトタイプの接着を行った。以下にそれぞれについてまとめを述べる。

光学性能評価

・石英輻射体

レーザー、フォトダイオードを用い、レーザー光の強度を $\begin{matrix} +0.04\% \\ -0.17\% \end{matrix}$ の精度で測定できるシステムを構築した。また、レーザーと CCD カメラをそれぞれ可動ステージに取り付け、同時に動かして位置スキャンすることで ± 0.05 mrad 以内の精度で光路のずれ(相対値)を測定できるシステムを構築した。このシステムを用いて実機仕様の2つの石英輻射体(Suprasil-P710、Corning7980 0D)について、内部透過率、内部表面反射率、光路のずれの測定を行った。

その結果を以下に示す。

	内部透過率 (%/m)	内部表面反射率 (%)	光路のずれ (mrad)
Surrasil-P710	99.44 ± 0.17	$99.92^{+0.02}_{-0.01}$ – $99.98^{+0.02}_{-0.01}$	< 0.1
Corning7980 0D	99.35 ± 0.17	99.92 ± 0.01 – $99.97^{+0.02}_{-0.01}$	< 0.3

表. 6.1: 石英輻射体の光学性能測定結果

・その他の光学素子

分光光度計を用いて光学フィルター、光学接着剤、MCP-PMT 入射窓、光学グリス、シリコンラバーの外部透過率測定を行った。分光光度計の測定精度は $\pm 0.3\%$ である。測定した外部透過率の値から、光学フィルターと MCP-PMT 入射窓に対してはフレネルの式を用いて反射率の補正を行うことで、内部透過率を求めた。また、光学素子単体では測定困難な光学接着剤、光学グリス、シリコンラバーについては、石英ガラスの基板に挟んだサンプルを作って外部透過率の測定を行い、基板のみの外部透過率測定結果を用いて補正することで内部透過率の値を得た。

その結果、光学フィルターの IHU350 と L-37 を除く全ての光学素子で内部透過率 99.0% 以上 (400–800 nm) を満たした。測定精度は $\pm 0.5\%$ 以内である。

・TOP カウンター全体での評価

現時点で実機で用いる各光学素子の有力候補である、石英輻射体(Suprasil-P710、Corn-

ing7980 0D)、光学フィルター (IHU340)、光学接着剤 (NOA63)、MCP-PMT 入射窓 (Suprasil-P20) の光学性能評価の結果を用いて、TOP カウンター全体での光学性能評価を行った。

発生した光子が光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合は、近似的に以下の式 (6.1) で表すことができる。ここで、 τ は各光学素子の内部透過率、 R は石英輻射体の内部表面反射率である。

$$(\tau_{Suprasil-P710})^{2.5}(\tau_{Corning79800D})^{2.5}(R_{Suprasil-P710})^{50}(R_{Corning79800D})^{50}(\tau_{IHU340})(\tau_{NOA63})(\tau_{Suprasil-P20}) \quad (6.1)$$

式 (6.1) に TOP カウンターで典型的な波長 400 nm での各測定結果を代入して計算した結果、 $(88 \pm 1)\%$ となった。また、その際の光路のずれは 0.3 mrad 以下である。

以上より、TOP カウンター実機の各光学素子は要求性能である以下の 2 点

- 発生した光子が、光学素子内を伝搬して MCP-PMT に到達する割合が 80% 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。

を満たすことが明らかになった。

放射線耐性試験

TOP カウンターを構成する全ての光学素子について、Belle II 実験で予想されるガンマ線・中性子線を照射し、分光光度計を用いて透過率を測定した。また、測定した透過率分布、石英輻射体での発生光子数分布、MCP-PMT 光電面の量子効率分布から、放射線照射による検出光子数の減少を見積もった。

その結果、ガンマ線については 10 年間の運転で予想される 5–10 倍の 10 krad 照射後で検出光子数の有意な減少が見られたのは、MCP-PMT 入射窓の Corning7056 (4%) と光学フィルターの IHU340 (3%)、IHU350 (1%)、ZJB340 (4%) であった (誤差はいずれも $\pm 1\%$)。また、中性子線については、10 年間の運転で予想される 2 倍の 1×10^{12} neutron/cm² 照射後で全ての光学素子で検出光子数の有意な減少は見られなかった。

また、上記の光学性能評価と同様に、TOP カウンター全体での評価を行った。その結果、ガンマ線については 10 krad 照射後で検出光子数の減少は $(2 \pm 1)\%$ であった。また中性子線については 1×10^{12} neutron/cm² 照射後で、検出光子数の減少は $(0 \pm 1)\%$ であった。よって、TOP カウンター実機を構成する各光学素子は、3 点目の要求性能である

- 10 年間の運転で予想される放射線照射による光子数の減少が 10% 以下。

を満たすことが明らかになった。

石英輻射体とフォーカシングミラーの接着

実機生産の際の接着に必要な、相対角度を $O(0.01)$ mrad で制御可能、 ± 0.01 mrad の精度で測定可能、相対位置を $O(10)$ μm で制御可能、 ± 5 μm の精度で測定可能な接着システムを構築した。相対角度はマイクロメータヘッドで調節可能で、オートコリメータを用

いて測定できる。また、相対位置はプランジャーとポリアセタールヘッドで調節可能で、レーザー変位計を用いて測定できる。剛性の高い厚さ 20 mm のアルミ板を利用することで、石英輻射体やフォーカシングミラーのたわみを $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ に抑えた。また、石英輻射体やフォーカシングミラーが傷つくのを防ぐため、これらはアルミ板の上に置かれたポリアセタール球と接するように設計されている。このシステムを用いて、実機プロトタイプの 2 つの石英輻射体とフォーカシングミラーの接着を行った。

その結果、接着後に行った測定で

- ・ 石英輻射体 (Suprasil-P710) - 石英輻射体 (Corning7980 0D) 間
相対角度：0.03–0.10 mrad、相対位置：40–90 μm
- ・ 石英輻射体 (Corning7980 0D) - フォーカシングミラー間
相対角度：0.03–0.10 mrad、相対位置：50–80 μm

であった。よって、

- 石英輻射体とフォーカシングミラーを相対角度 0.2 mrad 以下、相対位置 100 μm 以下の精度で接着。

が可能な接着システム・手法が実証された。

本研究によって、各光学素子を用いて TOP カウンター実機を製作した際に、期待通りの識別性能が得られることが光学的観点から実証された。

謝辞

本研究を遂行し修士論文をまとめるにあたり様々なご指導をいただいた、飯嶋徹教授、戸本誠准教授、居波賢二准教授、早坂圭司准教授、宮崎由之特任助教、鈴木一仁特任助教、堀井泰之特任助教、松岡広大研究員をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝いたします。特に指導教官である居波准教授には、本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始ご指導をいただきました。また、堀井特任助教には研究を進めていく中で、様々なことを丁寧に教えていただきました。一緒に石英輻射体やフォーカシングミラーの性能評価や接着を行った桐部直人君にも深くお礼申し上げます。最後に、長い学生生活を支援していただいた両親に深く感謝の意を表して謝辞といたします。

参考文献

- [1] A. Abeshian *et al.*, “ The Belle Detector, ” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **479**, 117–232 (2002).
- [2] 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。
- [3] T. Abe *et al.*, “ Belle II Technical Design Report, ” KEK Report 2010–1, arXiv:1011.0352 (2010).
- [4] I. Adam *et al.*, “ The DIRC particle identification system for the BaBar experiment, ” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **538**, 281–357 (2005).
- [5] K. Tamai *et al.*, “ Radiation Damage of Photodiode in the Belle Electromagnetic Calorimeter, ” Belle Internal Note, 1137.
- [6] 西野洋平, 末松芳法, 木挽俊彦, 一本潔, 常田佐久, 武山芸英, 「 次期体用観測衛星用ガラスの放射線耐性試験 」, 国立天文台報, 145-150, 1998。
- [7] J. Cohen-Tanugi *et al.*, “ Optical properties of the DIRC fused silica Chrenkov detector, ” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **515**, 680–700 (2003).
- [8] 今村美貴, 「 Belle II エアロジェル RICH の実機へ向けた光検出器 HAPD の性能改善と最終評価 」, 修士論文, 2011。
- [9] Y. Horii, Y. Koga, N. Kiribe, K. Inami, and T. Iijima “ Optical properties of the quartz bars, ” Belle II Internal Note, 13.
- [10] 栗本謙, 「 新型粒子識別装置 TOP カウンターのビームによる特性研究 」, 修士論文, 2009。
- [11] 志知秀治, 「 Focusing TOP Counter の形状測定 」, 卒業論文, 2009。

付録A フレネルの式

第3章の各光学素子の性能評価の際に、光学素子 - 空気間の反射率をフレネルの式を用いて計算した。ここではフレネルの式についてまとめる。

A.1 フレネルの式

フレネルの式 (Fresnel equations) は、O. J. フレネルが導き出した光の反射に関する等式である。P 波 (P 偏光：電界成分が入射面に平行) の反射率を R_P 、S 波 (S 偏光：電界成分が入射面に垂直) の反射率を R_S とする。図 A.1 のように、光が絶対屈折率 n_1 から絶対屈折率 n_2 の物質へ入射角 α で入射するとき、屈折角を β として、 R_P 、 R_S は以下のように表せる。

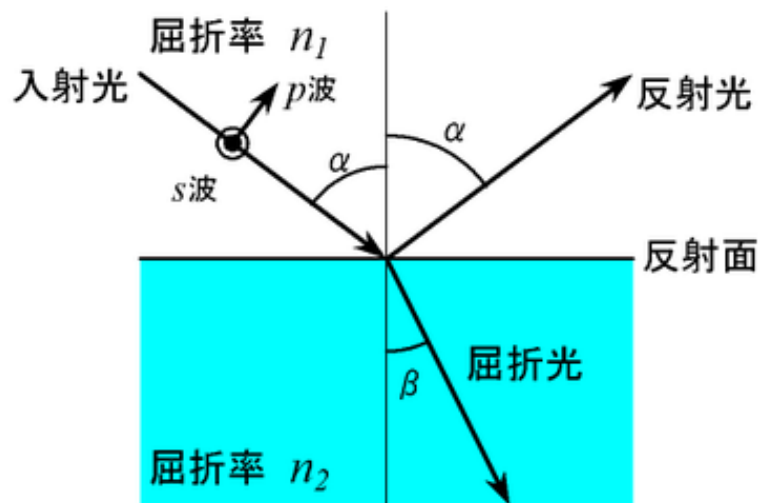


図. A.1: 光の反射の模式図

$$R_P = \left(\frac{n_1 \cos \beta - n_2 \cos \alpha}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

$$R_S = \left(\frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

さらに、スネルの法則 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ を用いると入射角 α のみを用いて (屈折角 β を使わずに) 以下の式で書ける。

$$R_P = \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha} - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos \alpha}{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha} + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos \alpha} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$R_S = \left(\frac{\cos \alpha - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha}} \right)^2 \quad (\text{A.4})$$

付録B 石英輻射体の光路のずれ測定結果

レーザーと CCD カメラを用いて、実機仕様の石英輻射体 (Suprasil-P710、Corning7980 0D) の光路のずれ測定を行った (節 3.1.6 参照)。ここでは、Suprasil-P710、Corning7980 0D について $x = 25, 125, 325$ mm での光路のずれ測定結果を示す。

B.1 Suprasil-P710

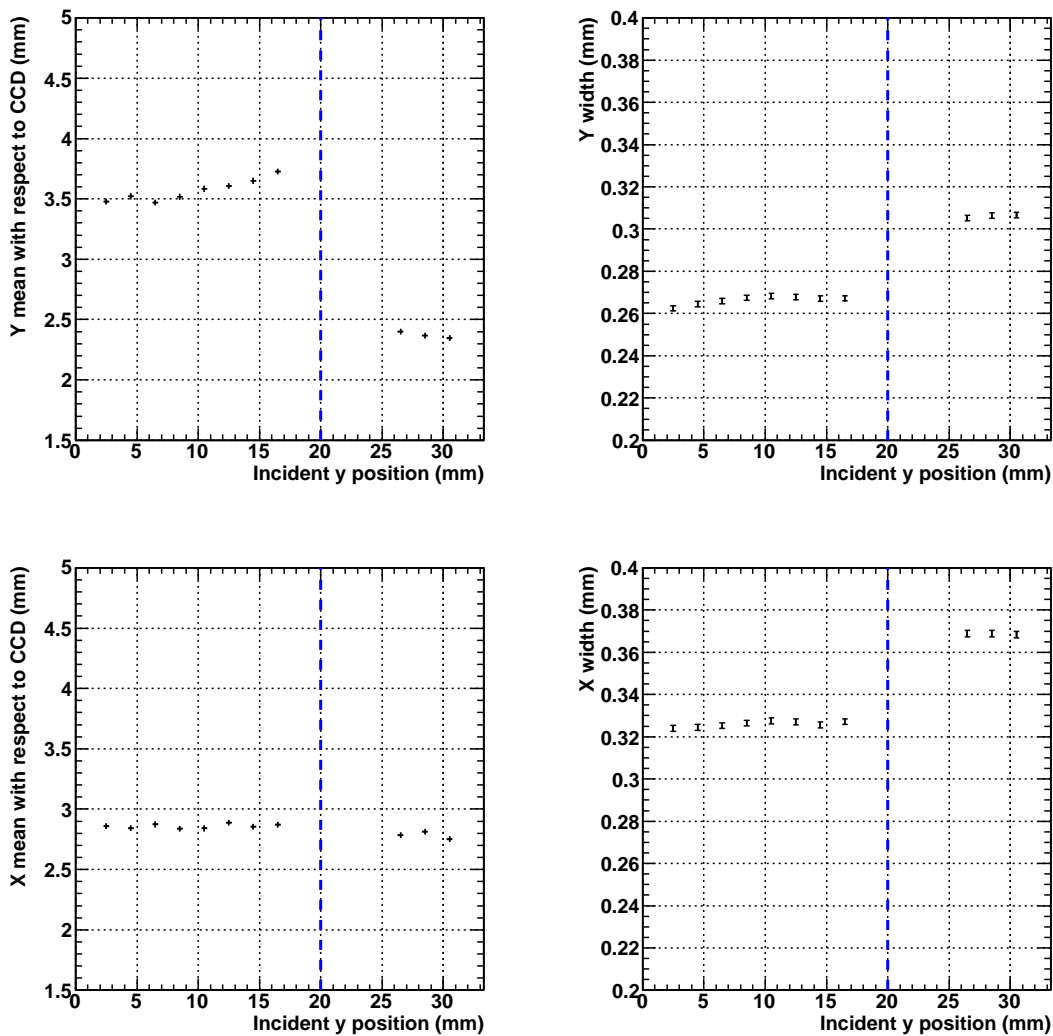
B.1.1 $x = 25$ mm

図. B.1: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 25$ mm)。4つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

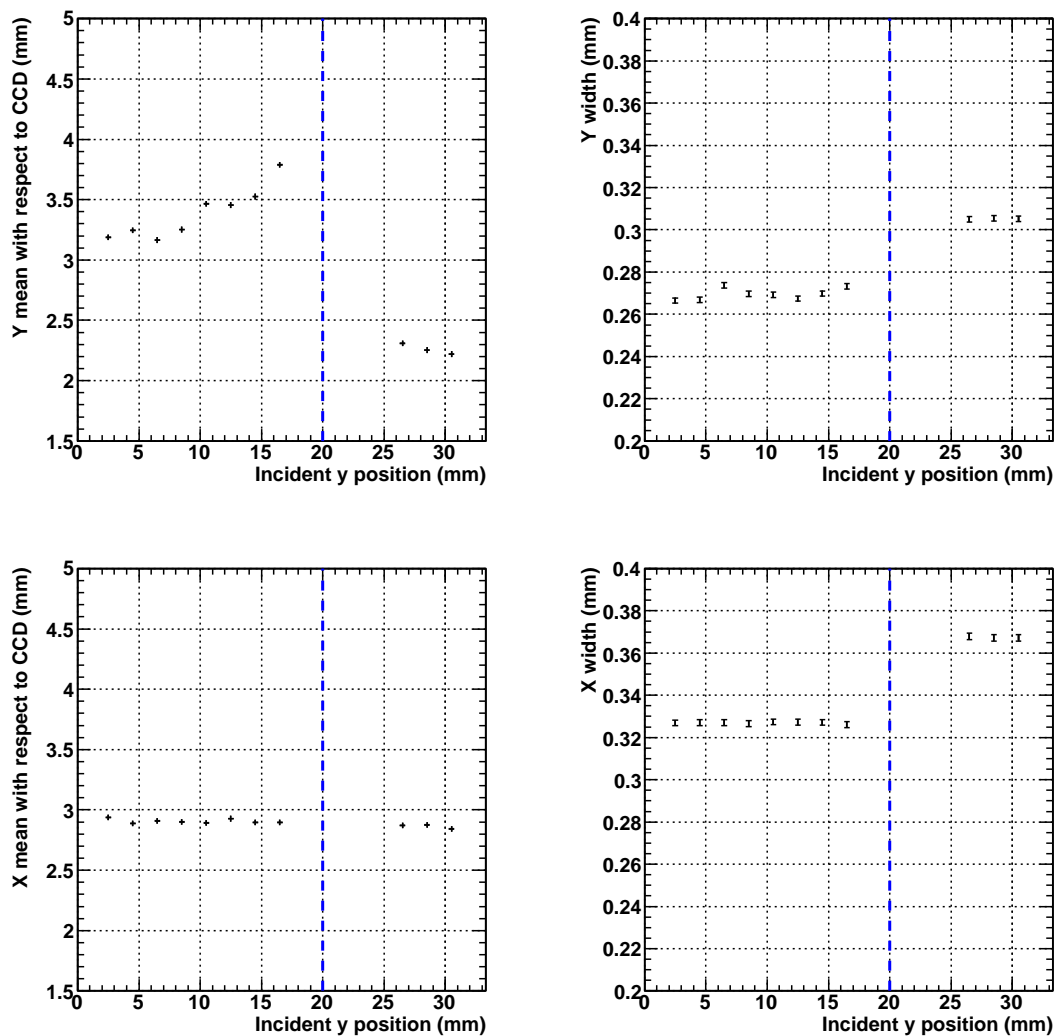
B.1.2 $x = 125$ mm

図. B.2: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 125$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

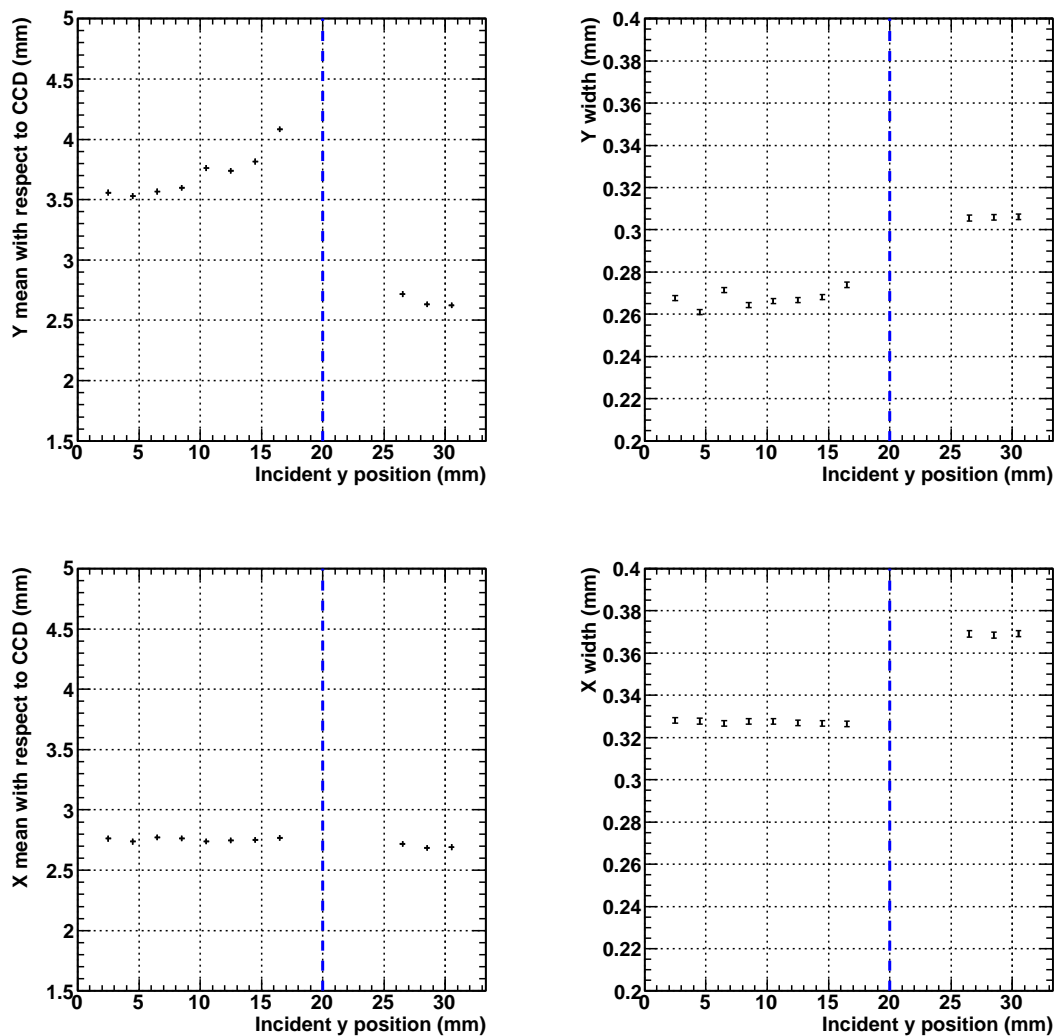
B.1.3 $x = 325$ mm

図. B.3: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 325$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

B.2 Corning7980 0D

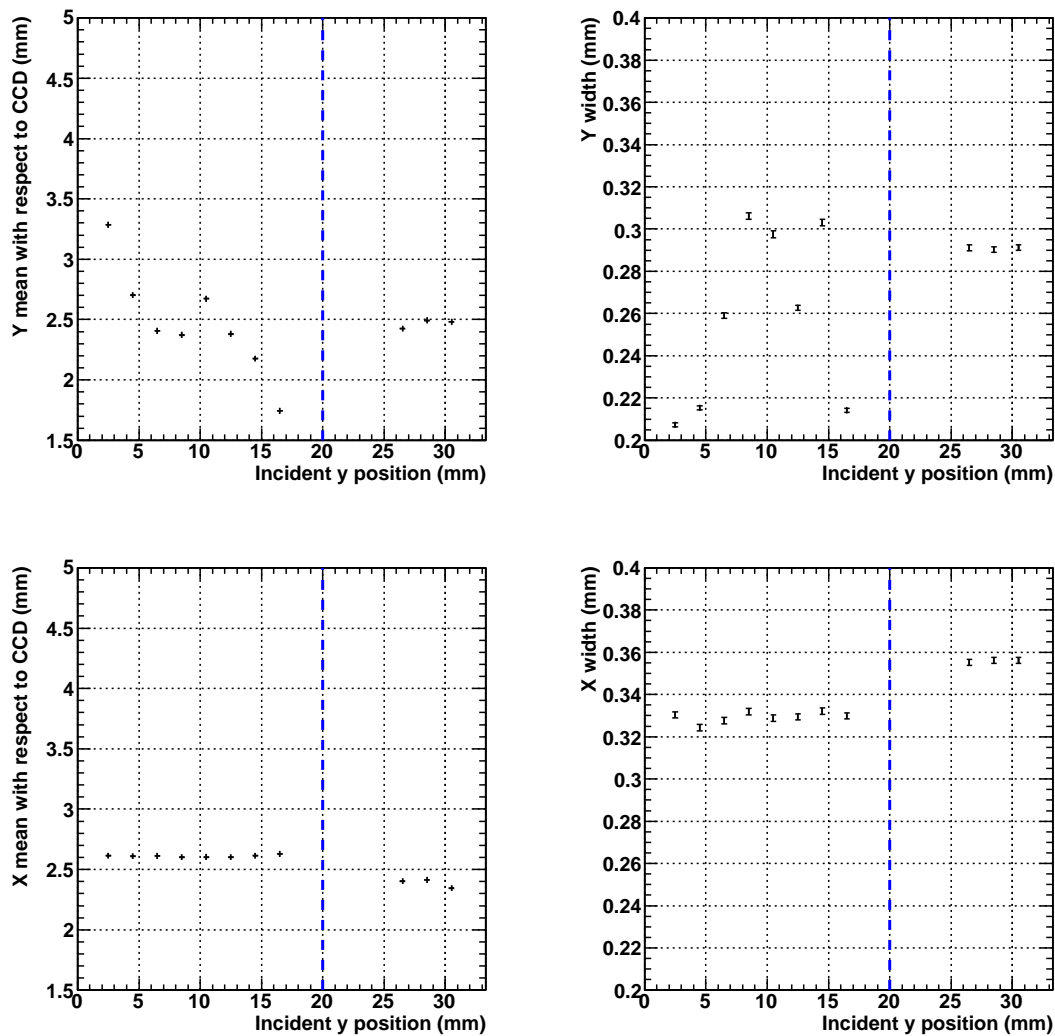
B.2.1 $x = 25$ mm

図. B.4: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 25$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

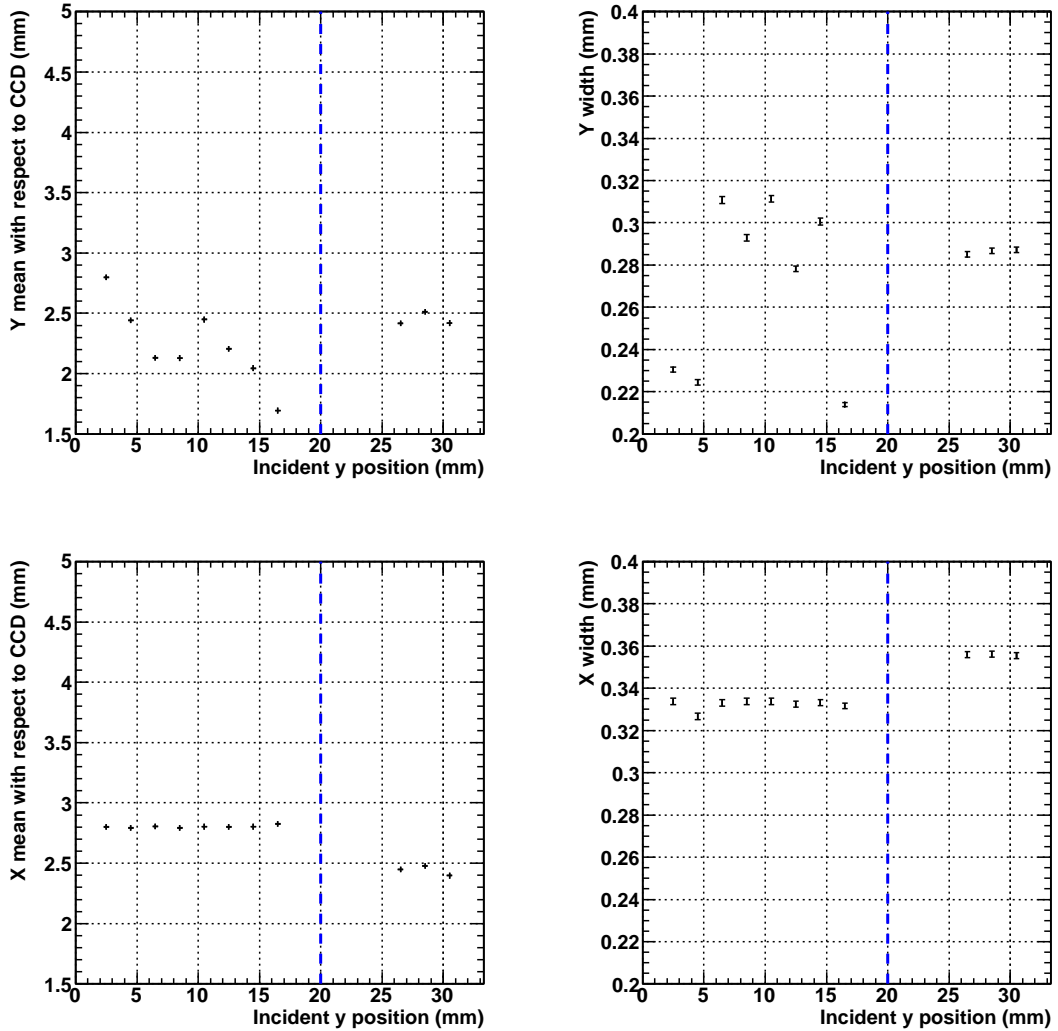
B.2.2 $x = 125$ mm

図. B.5: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 125$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

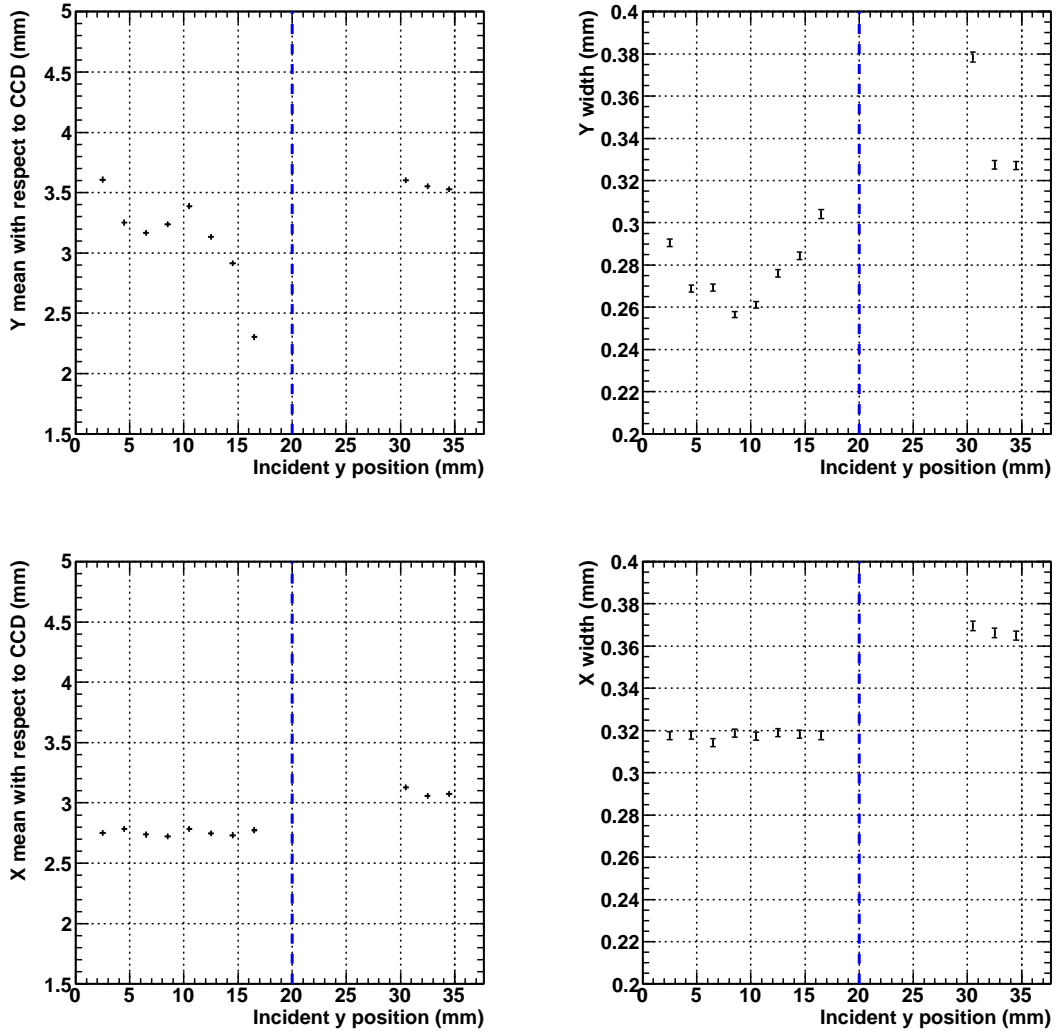
B.2.3 $x = 325$ mm

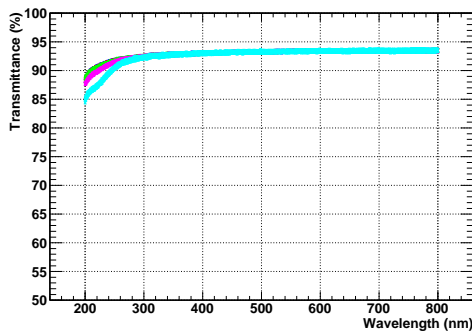
図. B.6: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 325$ mm)。4 つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値と幅の結果を示す。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

付録C 放射線耐性試験結果

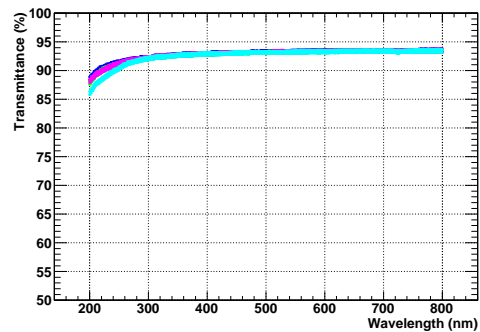
TOP カウンターを構成する各光学素子に対して、放射線耐性試験を行った(第4章参照)。各光学素子に Belle II 実験で予想されるガンマ線・中性子線を照射し、光学性能を評価した。具体的には照射前後での透過率を分光光度計(V-570、U-4100)を用いて測定した。ここでは、石英輻射体(Suprasil-P20、Spectrosil2000)、光学フィルター(IHU340、IHU350、L-37、ZJB340)、光学接着剤(NO A61、NO A63、EPO-TEK 301-2)、光学グリス(Cargille 06350)、シリコンラバー(EJ-560)のガンマ線・中性子線の照射試験結果をそれぞれ示す。

C.1 ガンマ線照射試験

C.1.1 石英輻射体



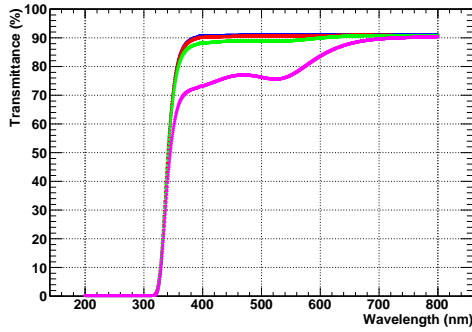
(a) Suprasil-P20



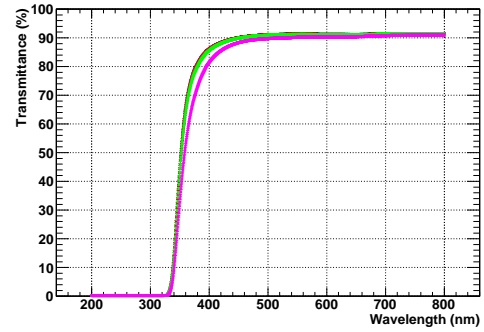
(b) Spectrosil2000

図. C.1: 石英輻射体のガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後、水色：1 Mrad 照射後。

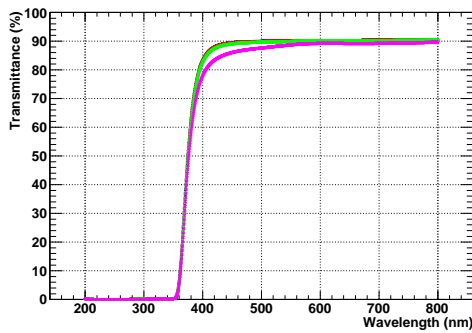
C.1.2 光学フィルター



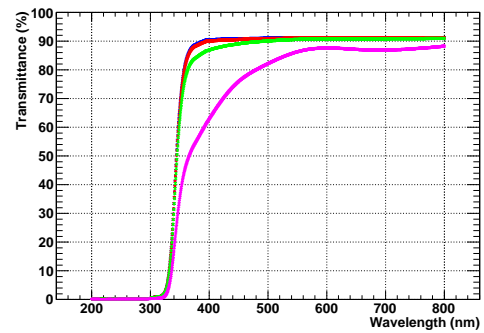
(a) IHU340



(b) IHU350



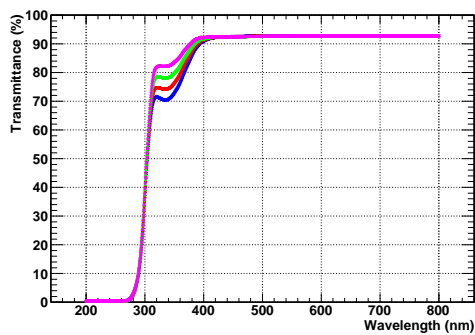
(c) L-37



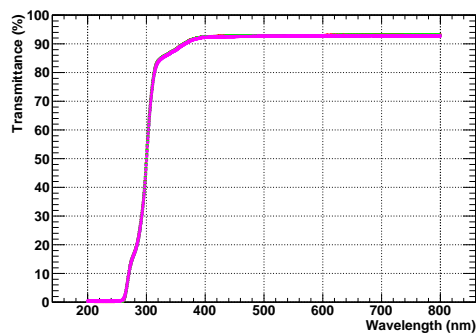
(d) ZJB340

図. C.2: 光学フィルターのガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後。

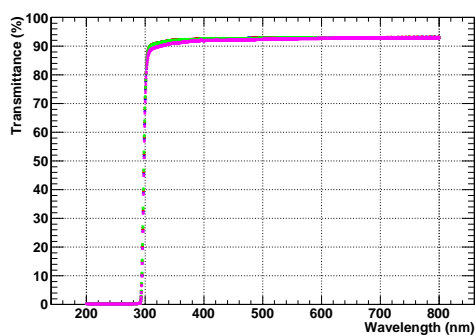
C.1.3 光学接着剤



(a) NOA61



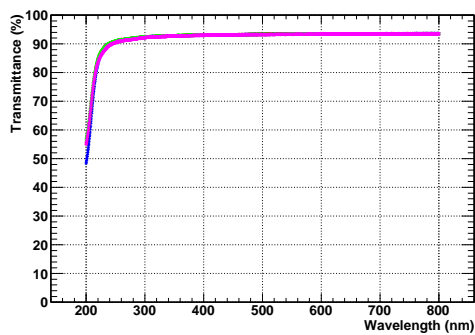
(b) NOA63



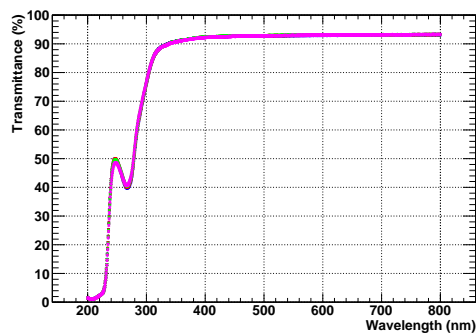
(c) EPO-TEK 301-2

図. C.3: 光学接着剤のガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後。

C.1.4 光学グリス・シリコンラバー



(a) Cargille 06350

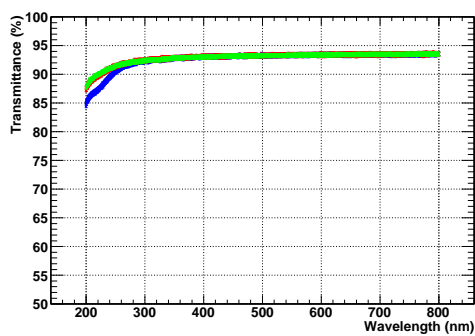


(b) EJ-560

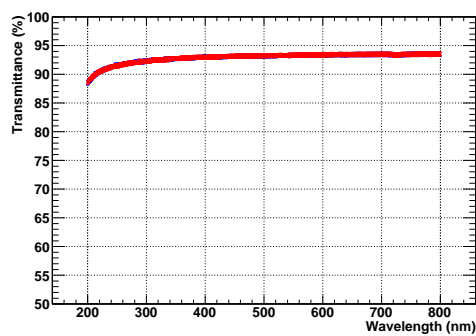
図. C.4: 光学グリス・シリコンラバーのガンマ線照射結果。青：照射前、赤：1 krad 照射後、緑：10 krad 照射後、ピンク：100 krad 照射後。

C.2 中性子線照射試験

C.2.1 石英輻射体



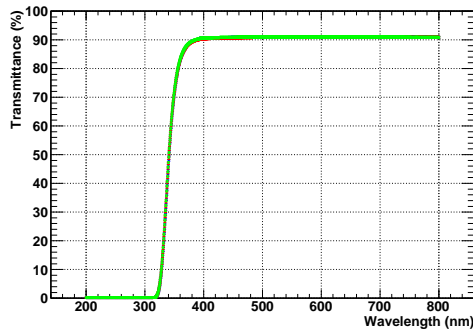
(a) Suprasil-P20



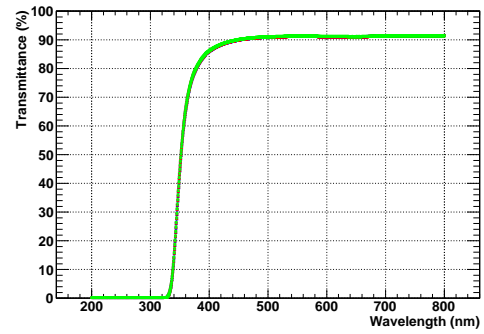
(b) Spectrosil2000

図. C.5: 石英輻射体の中性子線照射結果。青：照射前、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。

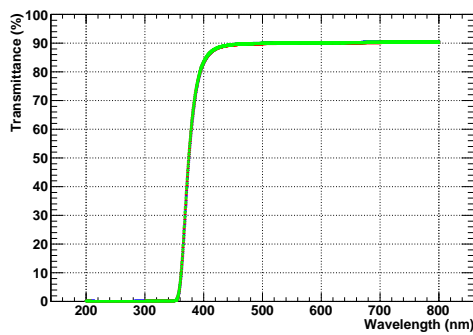
C.2.2 光学フィルター



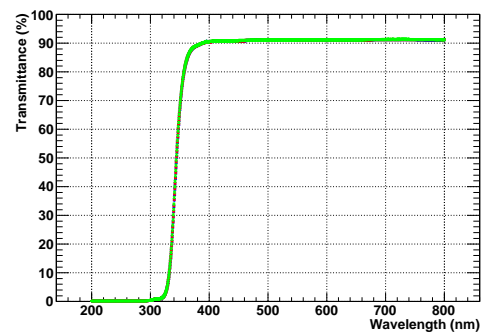
(a) IHU340



(b) IHU350



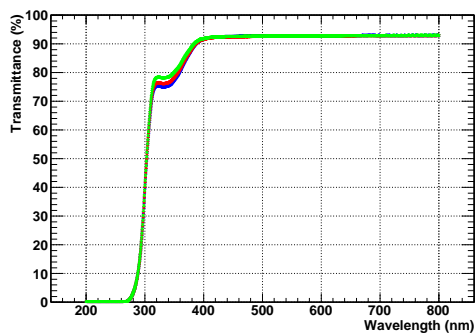
(c) L-37



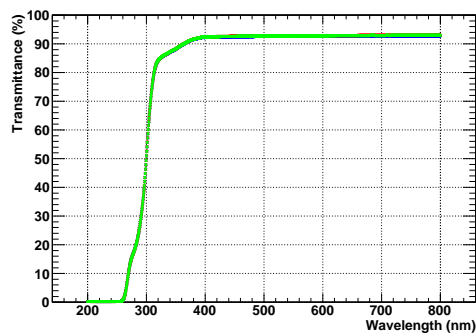
(d) ZJB340

図. C.6: 光学フィルターの中性子線照射結果。青：照射前、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。

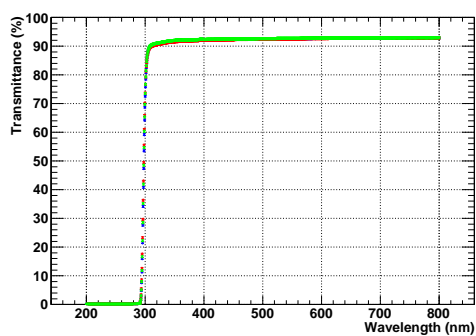
C.2.3 光学接着剤



(a) NOA61



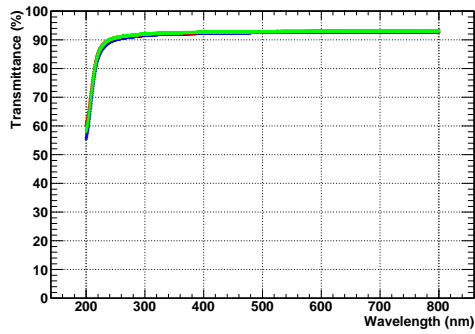
(b) NOA63



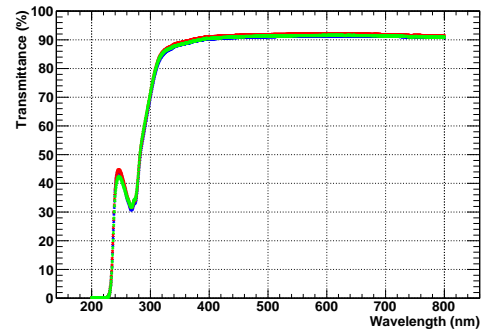
(c) EPO-TEK 301-2

図. C.7: 光学接着剤の中性子線照射結果。青：照射前、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。

C.2.4 光学グリス・シリコンラバー



(a) Cargille 06350



(b) EJ-560

図. C.8: 光学グリス・シリコンラバーの中性子線照射結果。青：照射前、赤： 5×10^{11} neutron/cm² 照射後、緑： 1×10^{12} neutron/cm² 照射後。