

修士論文

Belle II 実験 TOP カウンターの
石英輻射体量産のための光学測定システム構築

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 : 201101196

桐部 直人

2013 年 1 月 21 日

概要

2016年開始予定の Belle II 実験は、B 中間子の稀崩壊現象を調べることで、標準理論を超える物理の探索を行うことを目的とした素粒子実験である。私は、Belle II 実験で K/π 識別を担う粒子識別装置 TOP カウンターの研究開発を行っている。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 から構成される。荷電粒子が石英輻射体内を通過する際に発生するチェレンコフ光を光学素子内で伝播させ、そのリングイメージを MCP-PMT で検出し、粒子識別を行う。私は、その中でも石英輻射体の製作、検査システムについて研究を行った。

現在、全 16 機の TOP カウンター量産のための石英輻射体の製造が始まっている。粒子識別の能力は、検出される光子数の 1/2 乗に比例するため、各輻射体に対して、内部透過率 98.5 %/m、内部表面反射率 99.9 %などが要求される。私は、レーザーとフォトダイオードを用いた測定システムを開発した。レーザーの光路を分割し光量モニターを導入することで、十分なレーザー光量測定精度 $\pm 0.2\%$ を実現した。これにより、試作石英輻射体が、内部透過率、内部表面反射率の要求性能を満たすことを確認した。さらに、量産に対応すべく、測定システムの自動化を行った。レーザーの光路は、石英輻射体表面のゆがみの影響を受けて変化する。したがって、フォトダイオード応答の位置依存性を理解し、各レーザー入射位置に対しフォトダイオード位置をスキャンする事で、自動化を実現した。

石英輻射体表面に欠けがあると、光子の損失や散乱が発生する。石英のような透明体の欠けは写真に写りにくく、試作石英輻射体に対しては測定されなかった。私は、同軸落射照明を用いる事で、欠けを写し出す撮影システムを構築した。また、 $O(0.01) \text{ mm}^2$ の精度で欠けの大きさを測る画像解析法を示した。

TOP カウンターを構成するためには、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 以下で接着する必要がある。私は、オートコリメータやレーザー変位計を用い、相対角度を $O(0.01) \text{ mrad}$ で制御可能なシステムを構築した。また、接着剤の吐出量制御装置を導入し、気泡の発生を防いだ。結果として、実機サイズの試作石英輻射体に対して接着を成功させた。以上により、実機石英輻射体の接着の準備が整った。

本研究により、石英輻射体の量産における内部透過率、内部表面反射率、欠けの評価の準備が整った。また、接着のシステム・手法を構築した。

目次

第 1 章 Belle II 実験	7
1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ	7
1.2 Belle II 実験における物理	7
1.3 SuperKEKB 加速器	8
1.4 Belle II 検出器	10
第 2 章 粒子識別装置 TOP カウンターと石英輻射体	12
2.1 TOP カウンターの原理	12
2.2 K/π 粒子識別性能	13
2.3 TOP カウンターの構造	14
2.3.1 TOP カウンターを構成する光学素子	14
2.3.2 光検出器 MCP-PMT	16
2.4 光学素子に求められる性能	17
2.4.1 石英輻射体への要求	17
2.4.2 接着への要求	18
2.5 実機 TOP カウンター用石英輻射体の仕様	19
2.6 実機石英輻射体の生産環境と完成までの流れ	20
2.6.1 TOP アセンブリルーム	20
2.6.2 受け入れ検査と接着	21
第 3 章 試作石英輻射体の光学性能評価と接着	24
3.1 試作石英輻射体の仕様	24
3.2 試作石英輻射体の光学性能測定	24
3.2.1 測定装置	25
3.2.2 内部透過率測定	27
3.2.3 内部表面反射率測定	29
3.2.4 光路変化測定	31
3.3 試作石英輻射体・試作フォーカシングミラーの接着	34
3.3.1 試作フォーカシングミラーの仕様	34
3.3.2 接着システム	35
3.3.3 接着	42
第 4 章 実機石英輻射体量産における光学測定システム	47
4.1 内部透過率測定システム	47
4.1.1 測定装置	47
4.1.2 測定装置の温度依存	48
4.1.3 フォトダイオードの位置依存	52

4.1.4	測定方法	54
4.1.5	石英ブロックの内部透過率測定	55
4.2	内部表面反射率測定システム	58
4.2.1	測定装置	58
4.2.2	測定方法	58
4.2.3	石英ブロックの内部表面反射率測定	58
4.3	欠け撮影システム	61
4.3.1	撮影装置	61
4.3.2	撮影方法	63
4.3.3	テスト用石英に対する欠けの判別と測定	63
第5章 結論		67

目次

1.1	$B \rightarrow K\pi$ 崩壊のファインマンダイアグラム	8
1.2	superKEKB 加速器の全体図	9
1.3	SuperKEKB におけるルミノシティ、積分ルミノシティに関する計画 ¹ 。2015 年から試運転を開始し、2016 年に実験を開始する。2021–2022 年に積分ルミノシティが目標の 50 ab^{-1} に到達する計画となっている。	9
1.4	Belle II 検出器の全体図	10
1.5	TOP カウンターの配置	11
2.1	TOP カウンターの概観。チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向を軸として円錐状に放出される光である。	12
2.2	TOP カウンターのリングイメージ伝播の概念図	13
2.3	TOP カウンター端面 (光検出器側) で検出される光子のシミュレーション結果。	13
2.4	TOP カウンターの K 中間子識別効率 (左) と誤識別率 (右)。色温度で示された z 軸は、%表示である。	15
2.5	Belle 検出器での K 中間子識別効率 (左) と誤識別率 (右)。色温度で示された z 軸は、%表示である。	15
2.6	TOP カウンターの構造と各光学素子の概略図。	16
2.7	光電面側から見た MCP-PMT の写真。	16
2.8	MCP-PMT 内部構造の模式図。	16
2.9	MCP の電子増幅の原理。	16
2.10	石英輻射体内でのチェレンコフ光の伝播の様子。	18
2.11	TOP カウンターで最終的に得られる光子数の波長依存性	19
2.12	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。	19
2.13	石英輻射体の面の定義。	20
2.14	実機石英輻射体の欠けへの要求。	20
2.15	TOP アセンブリルームの暫定的レイアウト。	22
2.16	クリーンブース内部の写真。	22
3.1	フォトダイオード	26
3.2	レーザーと光量モニター	26
3.3	CCD カメラ	27
3.4	内部透過率測定の設定アップ	28
3.5	内部透過率の測定点	28
3.6	内部表面反射率測定の設定アップ	30
3.7	光路のずれ測定の設定アップ	31
3.8	CCD カメラで取得したデータと 2 次元フィットの典型例	32

3.9	Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225 \text{ mm}$)	33
3.10	Corning7980 0D の光路のずれ結果 ($x = 225 \text{ mm}$)	33
3.11	フォーカシングミラーの面の定義	34
3.12	接着用ジグ模式図。	36
3.13	接着用ジグ写真	37
3.14	アルミ板(上)と試作石英輻射体に挟まれた、ポリアセタール球の写真。	37
3.15	相対角度の調節	38
3.16	相対角度の測定の模式図	39
3.17	平面鏡	39
3.18	オートコリメータ	39
3.19	アルミ板(上)と試作石英輻射体のたわみ	40
3.20	相対位置の調節	40
3.21	相対位置の測定	41
3.22	試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着の配置図	42
3.23	ディスペンサー	44
3.24	試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間接着の様子	45
4.1	内部透過率測定システムの全体図	48
4.2	内部透過率測定システムの写真	48
4.3	レーザーの周辺温度を変化させるセットアップ。	49
4.4	レーザー、測定用フォトダイオードと、それぞれに取りつけた熱電対。	49
4.5	データロガー	50
4.6	レーザーの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果	50
4.7	測定用フォトダイオードの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果	51
4.8	装置全体の温度を変化させた場合の測定結果	52
4.9	フォトダイオードの受光感度の位置依存性。	53
4.10	レーザーとフォトダイオードの距離依存性	53
4.11	フォトダイオードの位置出し方法の模式図	55
4.12	石英ブロックの面の定義	55
4.13	石英ブロック内部透過率測定のセットアップの模式図	56
4.14	石英ブロック内部透過率測定のセットアップの写真	56
4.15	石英ブロックに対するレーザー入射位置	57
4.16	石英ブロックの内部透過率測定結果	57
4.17	石英ブロック内部表面反射率測定のセットアップの模式図	59
4.18	石英ブロック内部透過率測定のセットアップの写真	59
4.19	レーザーと光量モニター	60
4.20	石英ブロックに対するレーザー入射位置	60
4.21	石英ブロックの内部表面反射率測定結果	61
4.22	同軸落射照明。	62
4.23	ドットグリッド	62
4.24	撮影システムの模式図	63

4.25	欠けの撮影テストベンチ	64
4.26	テスト用石英表面の欠けを撮影した写真	64
4.27	撮影したドットグリッドの画像	65
4.28	しきい値の違いによる 2 値化画像の変化	65
4.29	しきい値と欠けの面積の関係	66
4.30	マイクروسコープで撮影した欠け	66

表目次

1.1	KEKB が実際に到達した値と SuperKEKB での設計値。	8
2.1	B 中間子の崩壊における K/π の識別効率と誤識別率	14
2.2	実機石英輻射体の仕様	21
3.1	2 枚の試作石英輻射体の仕様	24
3.2	半導体レーザーの仕様	25
3.3	フォトダイオードの仕様	25
3.4	Suprasil-P710 の内部透過率測定結果	29
3.5	Corning7980 OD の内部透過率測定結果	29
3.6	岡本光学によって研磨された試作石英輻射体の内部反射率測定結果	30
3.7	Zygo 社によって研磨された試作石英輻射体の内部反射率測定結果	31
3.8	試作フォーカシングミラーの仕様	34
3.9	アルミ板 (上、下)、塩化ビニル板のサイズ	38
3.10	マイクロメータヘッドの仕様	38
3.11	オートコリメータの仕様	39
3.12	レーザー変位計の仕様	41
3.13	光学接着剤の仕様	43
3.14	ディスペンサーの仕様	43
4.1	石英ブロックの仕様	56
4.2	ドットグリッドの仕様	63
5.1	試作石英輻射体の光学性能評価	67

第1章 Belle II実験

1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ

Belle 実験は、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において、CP 対称性の破れを検証するために 1999 年から 2010 年まで行われた素粒子実験である。KEKB 加速器 [1] は、8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を衝突させる非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器である。重心系エネルギーは $\Upsilon(4S)$ の質量である 10.58 GeV に合わせており、 B 中間子対の生成に適している。衝突型加速器では世界最高のピークルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を誇り、年間 10^8 個という大量の B 中間子対を生成できる。衝突点を囲むように設置された Belle 検出器 [2] により、 B 中間子の崩壊過程を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。Belle 実験における最大の成果は、 B 中間子系における CP 対称性の破れの観測である。これは、2001 年に $B \rightarrow J/\psi K_S$ 崩壊を用いて観測された [3]。この結果は、小林・益川理論決定的な証拠であり、2008 年の両氏のノーベル物理学賞受賞 (2008 年) につながった。

2016 年開始予定の Belle II 実験は、 B 中間子の稀崩壊現象をより精密に調べ、標準理論を超える物理の探索を行うことを目的としている。Belle 実験で用いられた KEKB 加速器を SuperKEKB 加速器へとアップグレードし、ルミノシティを 40 倍に増強する。Belle 検出器は、ルミノシティ増強に伴うバックグラウンド増加に対応しつつ、より精密な測定が可能な Belle II 検出器へとアップグレードされる。

1.2 Belle II 実験における物理

Belle II 実験では、多くの B 中間子の崩壊モードの測定が計画されている [4]。CP 対称性の破れに関しては、例えば、 $B \rightarrow K\pi$ 崩壊をより精密に測定する事が望まれる。この崩壊に対しては、Belle 実験において、標準模型で説明する事が難しい結果が得られている [5]。 $B \rightarrow K\pi$ 崩壊は、主にツリーダイアグラムとペンギンダイアグラムの 2 つの経路を通して起こる。図 1.1 に 2 つのファインマンダイアグラムを示す。CKM 行列の中で値の小さい $|V_{ub}|$ の寄与により、 $b \rightarrow u$ を含むツリーの崩壊は制限される。そのため、2 つの崩壊経路はほぼ同等の寄与となり、崩壊分岐比に CP 非対称性が大きく現れる。崩壊分岐比における CP 非対称性 A^f は次の式であらわされる。

$$A^f = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) - \Gamma(B \rightarrow f)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) + \Gamma(B \rightarrow f)} \quad (1.1)$$

f は崩壊の終状態を表す。図 1.1 の中で、赤と青で下側に書かれた u, d の寄与がほとんど同じだとすると、荷電 B 中間子と中性 B 中間子の崩壊における CP 非対称性 A^f の差 $\Delta A = A^{K^+\pi^0} - A^{K^+\pi^-}$ はほぼ 0 になると理解される。しかし、Belle 実験で得られた全データを用いた解析結果では、 $\Delta A = +0.112 \pm 0.027 \pm 0.007$ [6] となっており、標準理論では説明できない新物理の寄与が疑われている。

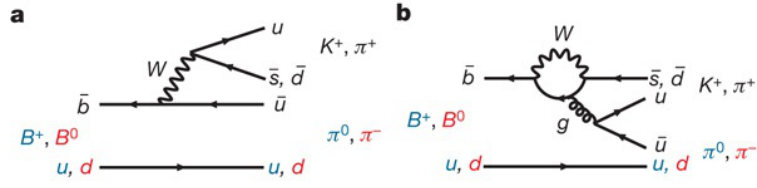


図 1.1: $B \rightarrow K\pi$ 崩壊のファインマンダイアグラム。(a) がツリーダイアグラム、(b) がペンギンダイアグラムと呼ばれている。[5]

Belle II 実験では、Belle 実験の 50 倍のデータ量に加え、 K/π 識別効率向上など、検出器のアップグレードも行われる。 $B \rightarrow K\pi$ 崩壊などをさらに精密に測定し、新物理を解明することが期待されている。

1.3 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器 [7] は、7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器である。KEKB 加速器と同様、重心系でのエネルギーは $\Upsilon(4S)$ の質量に等しく、 B 中間子対の生成に適している。図 1.2 に全体図を示す。電子銃により生成された電子を 7 GeV まで加速させ、Belle II 検出器のあるメインリングで周回させる。陽電子源では、電子をタングステンターゲットに衝突させ、発生した光子から対生成した陽電子を取り出す。取り出された陽電子をダンピングリングを周回させることで、ビームの広がり小さくする。その後、4 GeV まで加速させた陽電子を、メインリングで電子とは逆向きに周回させ、Belle II 検出器が置かれた衝突点で電子と衝突させる。

表 1.1 に KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器のパラメータの比較を示す。KEKB 加速器と比較して、SuperKEKB 加速器では衝突点ビームサイズをさらに絞り、ナノビームスキームと呼ばれる衝突方式を用いることで約 20 倍のルミノシティ向上を図る。さらに、ビーム電流を約 2 倍向上させることで、KEKB 加速器と比較して、トータルでルミノシティを 40 倍にすることが計画されている。データの統計量に相当する積分ルミノシティは、KEKB 加速器の 50 倍となる 50 ab^{-1} を目標としている。図 1.3 にルミノシティ、積分ルミノシティに関する計画を示す。2015 年から試運転を開始し、2016 年の実験開始から徐々にルミノシティが上がり、2021–2022 年に積分ルミノシティが目標の 50 ab^{-1} に到達する計画となっている。

	SuperKEKB(設計値)	KEKB(到達値)
エネルギー [GeV] (e^+/e^-)	4.0 / 7.0	3.5 / 8.0
ビーム電流 [I] (e^+/e^-)	3.60 / 2.62	1.64 / 1.19
衝突点ビームサイズ (1σ) [μm] (水平/垂直)	10 / 0.05	100 / 2
ルミノシティ [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	80	2.11

表 1.1: KEKB が実際に到達した値と SuperKEKB での設計値。

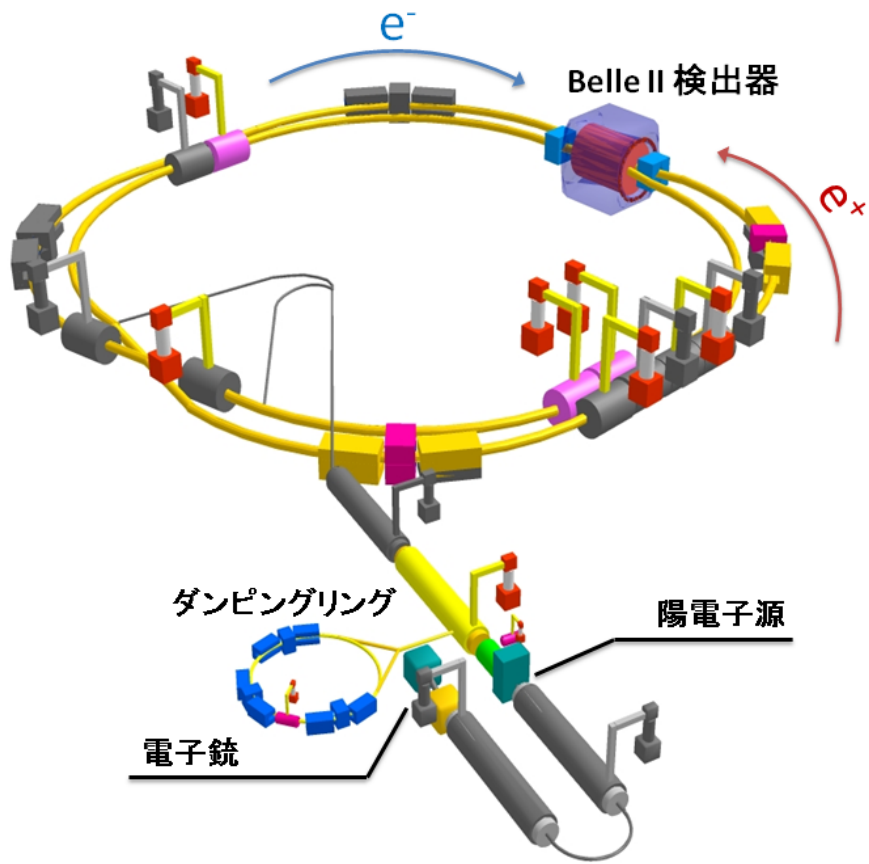


図 1.2: superKEKB 加速器の全体図。

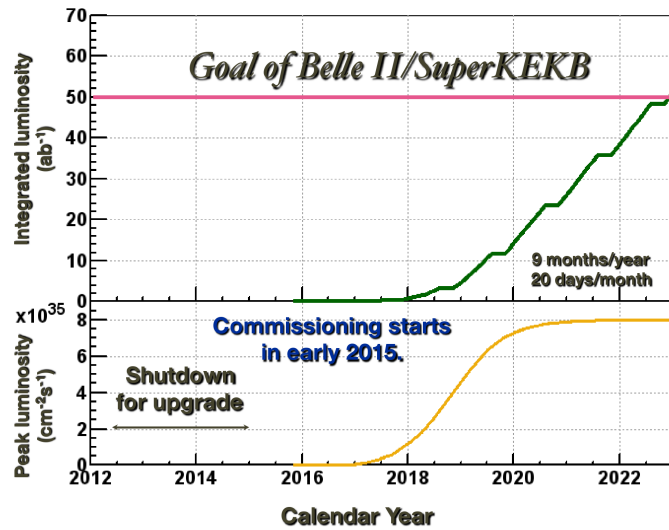


図 1.3: SuperKEKB におけるルミノシティ、積分ルミノシティに関する計画²。2015 年から試運転を開始し、2016 年に実験を開始する。2021–2022 年に積分ルミノシティが目標の 50 ab^{-1} に到達する計画となっている。

1.4 Belle II 検出器

Belle II 検出器 [7] は、複数の検出器群からなる、高さ約 8m、長さと幅約 8 m の粒子検出器である。B 中間子のような重い粒子は、衝突点付近ですぐに崩壊し、検出器まで届かない。そのため、崩壊後に検出器まで到達する、電子・ μ 粒子・光子・荷電 π 中間子・荷電 K 中間子・陽子・ K_L 中間子の 7 種類の粒子を直接検出する。図 1.4 に Belle II 検出器全体図を示す。

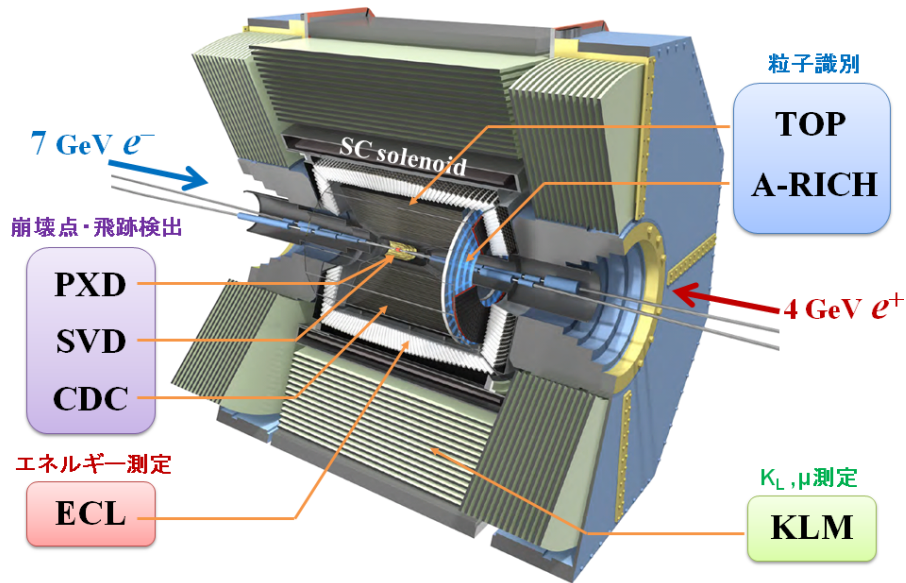


図 1.4: Belle II 検出器の全体図。

崩壊点から近い順に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 : Silicon Vertex Detector)、中央飛跡検出器 (CDC : Central Drift Chamber)、TOP カウンター (TOP : Time Of Propagation counter)・ARICH 検出器 (ARICH : Aerogel Ring Image Cherenkov detector)、電磁カロリメータ (ECL : Electromagnetic Calorimeter)、1.5 T の超伝導ソレノイド、 K_L ・ミューオン検出器 (KLM : K Long and Muon detector) を配置する。以下にそれぞれの検出器の概要を示す。

PXD DEPFET (DEPLETED Field Effect Transistor) 技術を用いたシリコンピクセル検出器。2 層の PXD が崩壊点を円筒形に囲み、粒子の崩壊点検出を行う。ピクセルサイズは $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ または $50 \times 70 \mu\text{m}^2$ である。

SVD 両側シリコンストリップ検出器。PXD の外側に、円筒形の SVD が 4 層設置される。ストリップサイズは $160 \times 50 \mu\text{m}^2$ または $240 \times 70 \mu\text{m}^2$ であり、PXD と合わせて、粒子の崩壊点を $\sim 20 \mu\text{m}$ の精度で測定する。

²<http://www-superkekb.kek.jp/index.html>

CDC ヘリウム・エタン混合ガスを用いたドリフトチェンバー。荷電粒子の飛跡を、内部に張られたワイヤーで検出する。主に荷電粒子の運動量を測定するが、ガス中でのエネルギー損失から、粒子識別を行うことも可能である。特に、運動量が低く後述の粒子識別装置に到達しない粒子に関しては、CDC が粒子識別を行う。

TOP バレル部 (円筒部) の粒子識別を担う粒子識別装置。図 1.5 の様に、バレル部に 16 機配置される。チェレンコフ光の開き角から粒子識別を行う、リングイメージ型チェレンコフ検出器である。詳細は次章で述べる。

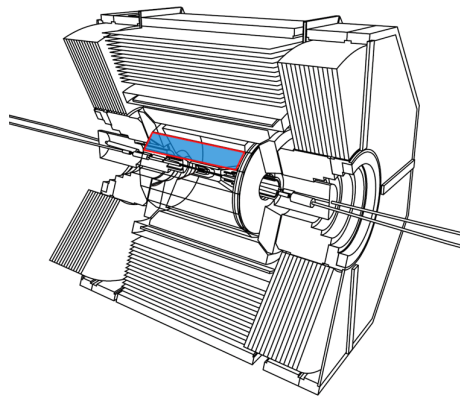


図 1.5: TOP カウンターの配置。バレル部の CDC と ECL の間に 16 機設置される。

ARICH エンドキャップ部の粒子識別を担う粒子識別装置。輻射体として、シリカエアロジェルと呼ばれる多孔質ガラスを用いる。TOP カウンターと同じく、チェレンコフ光の開き角から粒子識別を行う、リングイメージ型チェレンコフ検出器である。

ECL ヨウ化セシウムの結晶を用いた電磁カロリメータ。バレル部・エンドキャップ部に配置され、 $\sim 1.5\%$ の精度で粒子のエネルギーを測定する。これより内側の検出器で反応しない光子の測定において、重要な役割を担っている。

KLM 鉄と RPC と呼ばれるガスチェンバーを交互に積層した粒子検出器。他の検出器全体を覆うように配置されており、物質透過力の高い μ 粒子と、中性の K_L を捕える。

1.2 節で例を挙げたように、B 中間子の崩壊では、終状態に K/π 粒子が現れることが多い。そのため、Belle II 検出器において、粒子識別装置は非常に重要とされている。

第2章 粒子識別装置TOPカウンターと石英 輻射体

この章では、TOP カウンターの動作原理、粒子識別性能、構造を述べる。また、TOP カウンターを構成する光学素子に要求される性能と、実機石英輻射体の仕様を示す。

2.1 TOP カウンターの原理

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る。荷電粒子が物質中の光速を超える速度で通過した際に放出するチェレンコフ光を検出することで、粒子識別を行う。図 2.1 は、TOP カウンターの概観を示す。荷電粒子が放出したチェレンコフ光を、端面に取り付けられた光検出器 MCP-PMT で検出し、粒子の識別を行う。

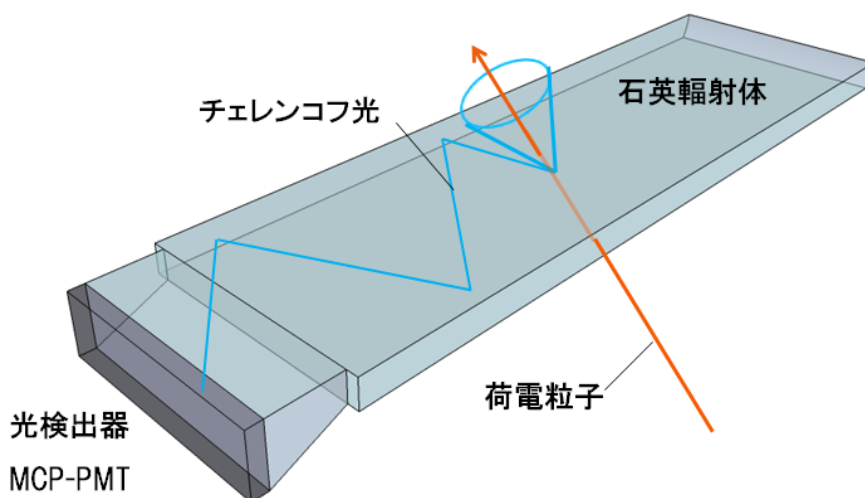


図 2.1: TOP カウンターの概観。チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向を軸として円錐状に放出される光である。

荷電粒子が通過する輻射体の屈折率を n とした場合、その放出角 θ_c と荷電粒子の速度 $\beta (= v/c)$ には、 $\cos \theta_c = 1/n\beta$ の関係が成り立つ。そのため、放出角 θ_c を測定することで TOP カウンターを通過した粒子の β を求めることができる。TOP カウンターでは、チェレンコフ光を発生させる輻射体として石英ガラスを用いている。

粒子の質量 m と速度 β 、運動量 p には以下のような関係式が成り立つ。Belle II 検出器では荷電粒子の運動量 p は内側の CDC で測定されるため、TOP カウンターで得られた粒子の速度 β と併せ

ることで、質量の測定、つまり粒子の識別を行う。

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

TOP カウンターにおいては、光検出器で得られる光子の位置・時間情報を用い、リングイメージを再構成する事で、 β の測定が行われる。 K 中間子と π 中間子それぞれにおけるリングイメージの概念図を図 2.2 に、検出される光子の位置、時間に関するシミュレーションの結果を図 2.3 に示す。一つの粒子が通過した際の検出光子数は 20–30 個であり、図 2.3 中の青色、赤色の点は多数の事象に対する重ね合わせ、水色の点は 1 事象に対する検出の例を示す。

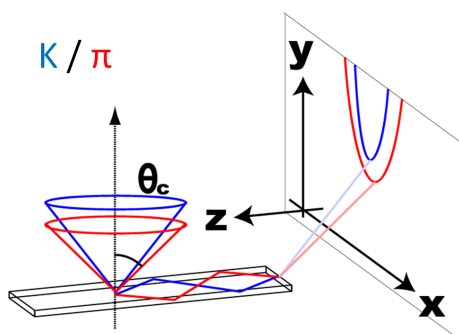


図 2.2: TOP カウンターのリングイメージ伝播の概念図。 K 中間子(青)と π 中間子(赤)が異なるリングイメージを描く。

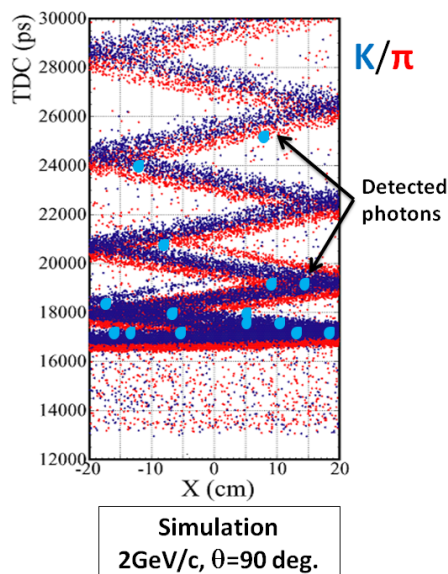


図 2.3: TOP カウンター端面(光検出器側)で検出される光子のシミュレーション結果。

TOP カウンターでは、Likelihood (尤度) 法を用いて粒子識別を行う。まず、他の検出器から、TOP カウンターに対する荷電粒子の入射位置、角度、運動量の情報を得る。その情報を基に、荷電粒子が K/π 粒子であると仮定した場合の光子の検出位置・時間を理論的に計算する。それを、実際のイベントで検出された光子の位置・時間と比較することで、 K/π らしさ (=Likelihood) を求める。

2.2 K/π 粒子識別性能

TOP カウンターはチェレンコフ光の放出角の差を利用して粒子識別を行っており、放出角の差は、ほぼ光検出器における光子の到達時間の差となって現れる。このような粒子識別の原理から、識別能力を以下のように近似することができる。

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

S : 識別能力 [σ]
 N_{det} : 検出光子数 [個]
 σ_{TOP} : 光子検出における時間分解能 [s]

また、識別能力は、検出光子数と時間分解能に大きく影響を受けることが分かる。

TOP カウンターの識別能力は、入射粒子の運動量や入射位置に依存する。これまでに、シミュレーションによって、能力の評価が行われている。評価には、識別効率と誤識別率を用いる。例えば、K 中間子を K 中間子と識別する割合を識別効率、K 中間子を π 中間子や他の粒子と識別してしまう割合を誤識別率と呼ぶ。TOP カウンターと Belle 実験に対するシミュレーション結果を、それぞれ図 2.4、2.5¹に示す。縦軸は粒子の運動量、横軸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。また、B 中間子崩壊の代表的な物理過程に対するそれぞれの識別能力のシミュレーション結果を表 2.1¹にまとめる。このように、TOP カウンターの導入によって Belle 実験と比較して識別効率と誤識別率が大幅に改善することが分かる。

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

表 2.1: B 中間子の崩壊における K/ π の識別効率と誤識別率

2.3 TOP カウンターの構造

2.3.1 TOP カウンターを構成する光学素子

TOP カウンターは、図 2.6 に示すように、2 枚の石英輻射体とフォーカシングミラー、ウェッジに、32 本の光検出器 MCP-PMT(マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管)が接続された形となっている。研磨できる石英輻射体の大きさの限界から、長さ 1.25 m の石英輻射体を 2 枚使用する。加えてフォーカシングミラー、ウェッジを光学接着材を用いて接着することで、全体を構成している。

フォーカシングミラーの端面は球面に研磨されており、金属が蒸着され鏡面となっている。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。これらフォーカシングミラーや光学フィルターは、波長分散効果による時間分解能の悪化を防ぐために導入される。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 が最適とわかっている。また、光学フィルターは 300 - 350 nm 以下の波長領域をカットするものが最適だとわかっている。

ウェッジは、石英輻射体内を伝播してきたリングイメージを広げ、MCP-PMT 表面に伝播させる役割を担う。TOP カウンターでは、図 2.3 で示したように、側面で折りたたまれたリングイメージが検出される。1 イベントで発生した光子のうち、2 つ以上の光子が同じ光検出器に入る確率を下げることで、粒子識別能力を向上させる効果を生む。

¹K. Inami, "B-PID performance," Belle II PID upgrade meeting, 11th November 2011

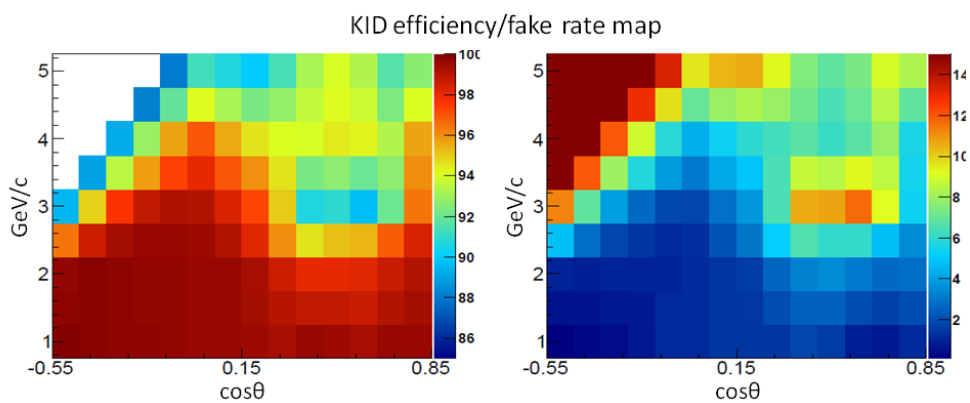


図 2.4: TOP カウンターの K 中間子識別効率 (左) と誤識別率 (右)。色温度で示された z 軸は、%表示である。

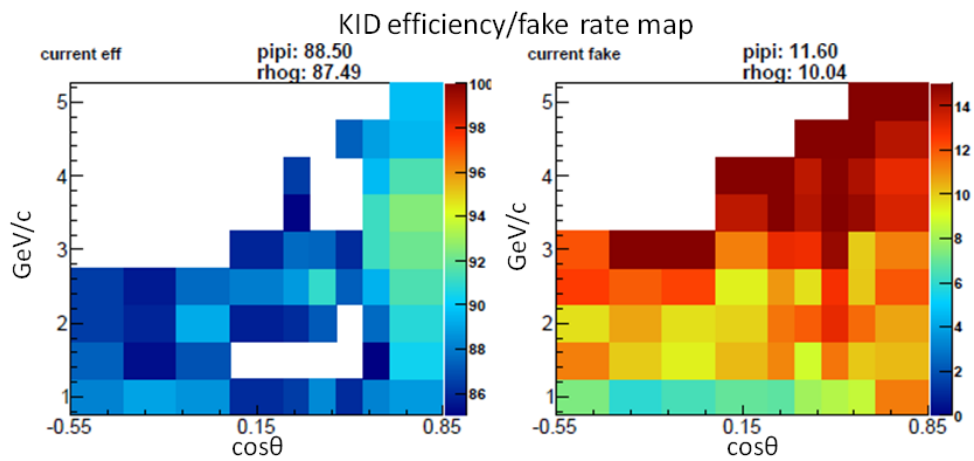


図 2.5: Belle 検出器での K 中間子識別効率 (左) と誤識別率 (右)。色温度で示された z 軸は、%表示である。

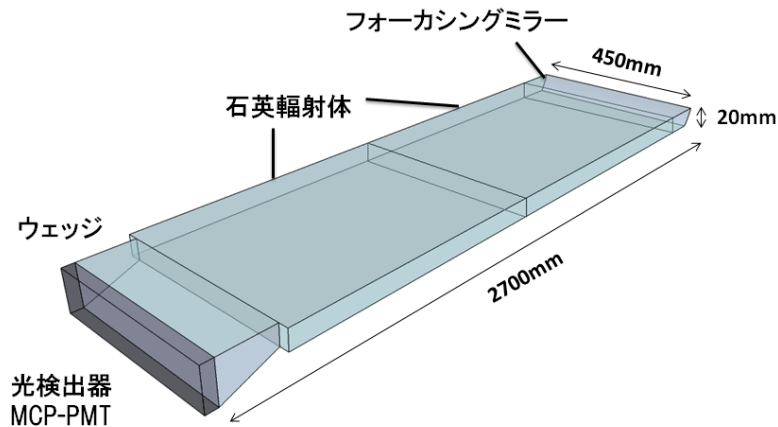


図 2.6: TOP カウンターの構造と各光学素子の概略図。

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は、MCP-PMT や読み出し回路の不具合などによる交換を想定し、シリコンオイルまたはシリコンラバーを用いて行う。

2.3.2 光検出器 MCP-PMT

MCP-PMT(Micro Channel Plate 型 PMT) は光電子増倍管の一種で、 $\sim 10 \mu\text{m}$ の小さな貫通穴 (チャンネル) を多数設けた MCP を 2 次電子増幅部に用いた光検出器である。4×4 チャンネルのマルチアノードとなっており、1つのチャンネルは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の大きさである。MCP-PMT の写真を図 2.7 に、断面の模式図を図 2.8 に、MCP による電子増幅の様子を図 2.9 に示す。



図 2.7: 光電面側から見た MCP-PMT の写真。

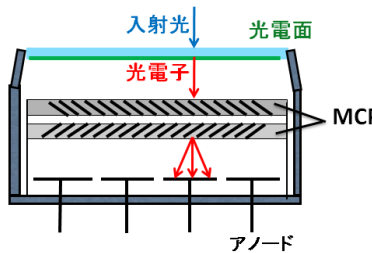


図 2.8: MCP-PMT 内部構造の模式図。

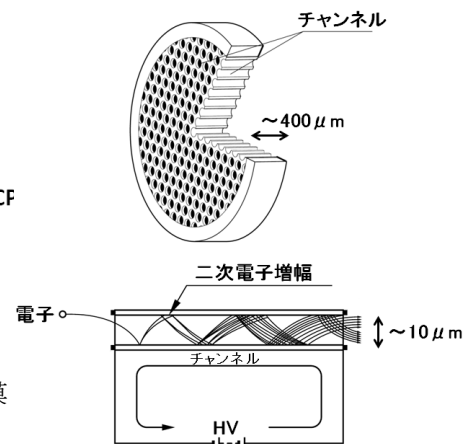


図 2.9: MCP の電子増幅の原理。

MCP-PMT 光電面から入射した光子は光電効果を起こし、MCP-PMT 内部に電子が放出される。図 2.9 で示すように、MCP の両面には電圧が掛けられており、MCP のチャンネルに入射した電子は電場によって加速すると共にチャンネル内壁に衝突することで 2 次電子放出を起こす。結果と

して、指数関数的に電子が増加する。このように、入射した光子は MCP による増幅過程を経てアノードから信号として検出される。

TOP カウンターに使用される MCP-PMT の性能を以下にまとめる。

- 一光子検出が可能
- 時間分解能 < 50 ps
- 位置分解能 < 5 mm
- 波長 360 nm に対する量子効率 > 24 %
- 1.5 T 磁場中で使用可能

ダイノードによる電子増幅を利用した一般的な光電子増倍管と比較して、MCP-PMT は特に時間分解能と磁場中での電子増幅率の点で優れている。現在、浜松ホトニクス社¹において、TOP カウンター用 MCP-PMT の量産が行われており、予備を含めた全 550 本の生産が 2014 年 4 月に完了する予定である。名古屋大学で、量子効率や時間分解能等の基本性能を測定するシステムが構築され、量産された MCP-PMT に対する測定が行われている。

2.4 光学素子に求められる性能

TOP カウンターが 2.2 節で示した識別性能を実現するためには、光学素子が以下の要求を満たす必要がある。これらの要求を満たすため、個々の光学素子の光学性能への要求や、接着した際の位置や角度に対する要求がなされている。

- 発生した光子のうち、光学素子内を伝播して MCP-PMT 表面に到達する光子の割合が 80 % 以上。
- その際の光路のずれが 0.5 mrad 以下。

2.4.1 石英輻射体への要求

石英輻射体内で発生した光子は石英内部表面で全反射を繰り返しながら伝播し、光検出器まで到達する。図 2.4 に石英輻射体内での典型的なチェレンコフ光の伝播の様子を示す。

¹<http://jp.hamamatsu.com>

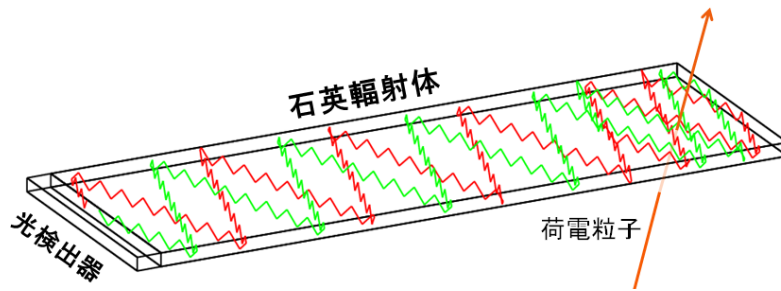


図 2.10: 石英輻射体内でのチェレンコフ光の伝播の様子。 $\beta = 1$ の π 中間子が $\theta = 60^\circ$ で入射した場合を示す。 θ はビーム軸に対する極角である。2つの光路を赤と緑で表している。石英輻射体内を伝播し、MCP-PMT で検出される光子の典型的な値は、光子数 20–30 個、伝播距離 5 m、反射回数 100 回である。

石英輻射体内で光子が失われる要因として主に考えられるのは、以下の 2 つである。

- 石英内部での散乱や吸収
- 内部表面で全反射する際の散乱

これを踏まえ、要求を満たすために石英輻射体に必要な光学性能を以下に示す。

- 内部透過率 : $\geq 98.5\%/\text{m}$
- 内部表面反射率 : $\geq 99.90\%$
- 石英表面の欠け: 面積の和が 25 mm^2 以下

内部透過率は、石英の純度や均質性に関連する。一方、内部表面反射率と欠けは、石英の成形や研磨に関連する。

これまでの研究から、TOP カウンターで最終的に得られる光子の波長は、300–600 nm 程度であることが分かっている (図 2.11)。そのため、内部透過率、内部表面反射率に対する要求は、300–600 nm 程度の光子に対し適用される。

2.4.2 接着への要求

チェレンコフ光の角度情報を保存して伝播させるため、各光学素子の相対角度を、非常に高い精度で合わせて接着することが求められる。また、接着面に段差ができると、そこから光子数の減少につながるため、相対位置の精度も重要である。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 2.12 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以下の通りである。

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

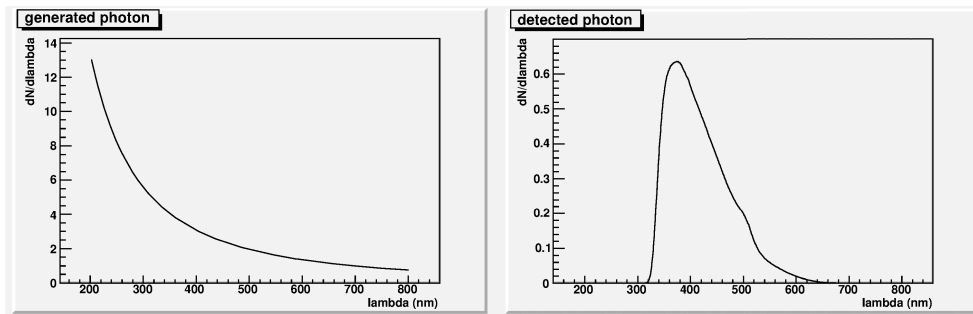


図 2.11: 厚さ 20 mm の石英輻射体を粒子が通過した際のチェレンコフ光の発生光子数(左)と、TOP カウンターで最終的に得られる相対的な光子数の波長依存性(右)。石英ガラス・光学接着剤・波長カットフィルターの透過率と、MCP-PMT の量子効率の典型的な波長依存性を掛け合わせた結果、最終的に得られる光子は 300–600 nm 程度となる [8]。

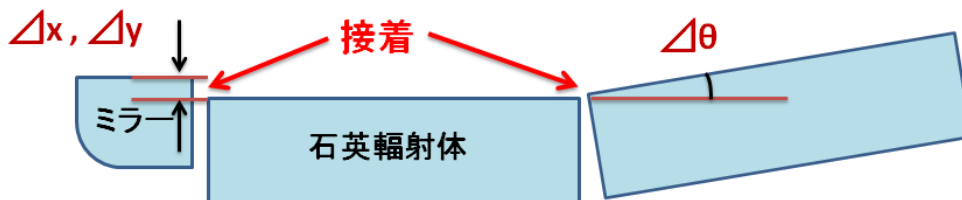


図 2.12: 石英輻射体およびフォーカシングミラーの相対角度・相対位置。

Belle II 実験において、最も K/π 識別が難しい運動量である $3.5 \text{ GeV}/c$ に対する K/π のチェレンコフ角の差は 8.4 mrad である。相対角度 0.2 mrad で得られる光路ずれを 0.2 mrad とすると、チェレンコフ角の差の 40 分の 1 に当たる。これは、2.2 節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、 $100 \mu\text{m}$ 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。

2.5 実機 TOP カウンター用石英輻射体の仕様

実機 TOP カウンター用石英輻射体の仕様を表 2.2 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、珪素を含むシラン化合物に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 $10\text{--}100 \text{ ppm}$ 程度含まれるが、合成石英はさらに純度が高く不純物が 1 ppm 以下しか含まれない。また、屈折率の均質性も高く脈理もほとんどない。TOP カウンターに用いられる石英輻射体・ミラー・ウェッジはすべて合成石英製で、脈理グレード、均質性、純度は非常に高い。

石英輻射体の加工や研磨をする際、角の部分が欠けてしまうことがある。欠けに関し、実機 TOP カウンター用石英輻射体には図 2.14 のような制限が設けられている。

²<http://www.okamoto-optics.co.jp/>

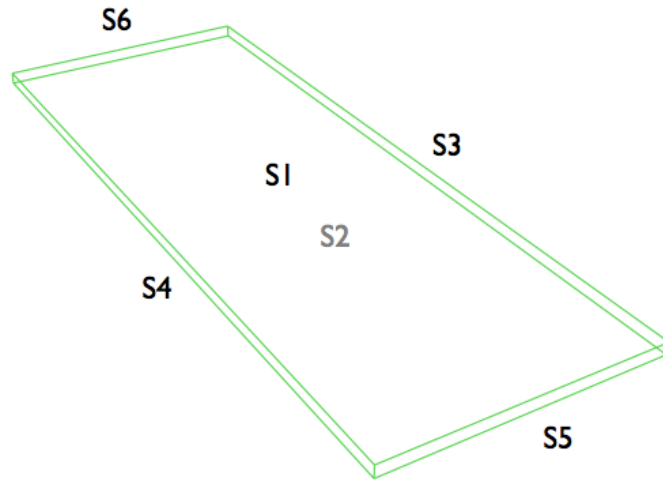


図 2.13: 石英輻射体の面の定義。最も広い1面を S1 と定義し、その裏を S2 とする。S3–S6 は側面と定義される。

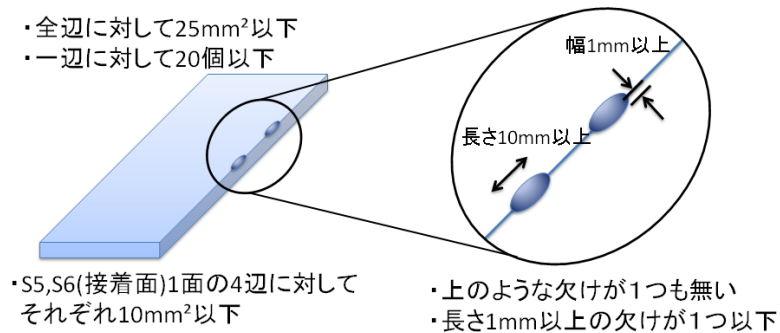


図 2.14: 実機石英輻射体の欠けへの要求。

2.6 実機石英輻射体の生産環境と完成までの流れ

現在、2016年の Belle II 実験開始に向けて、Belle II 検出器の建設が進んでおり、2015 年末には全ての検出器のインストールが終了する予定となっている。TOP カウンターは 2015 年前半にインストールが予定されており、2012 年後半から、実機 TOP カウンター用石英輻射体の量産が始まった。2013 年 2 月から約 1ヶ月に 2 枚の割合で納入され、石英輻射体の光学測定、接着を経て、2014 年末には 16 機の TOP カウンターの光学素子が完成する予定となっている。

2.6.1 TOP アセンブリルーム

TOP カウンターの製造は、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われる。現在、KEK の富士実験ホールの地下 4 階に「TOP アセンブリルーム」と呼ばれるパネルハウ

研磨会社		岡本光学加工所 ²
硝材グレード	屈折率均質性 (Δn) 複屈折 泡等級	≤ 5 ppm ≤ 1 nm/cm 0 (DIN58927 規格)
サイズ (mm)	長さ 幅 厚さ	1250 ± 0.5 450 ± 0.15 20 ± 0.1
面精度 (μm peak to valley)	S1-S4 S5, S6	≤ 6.3 ≤ 25
面粗さ (nm rms)	S1-S4 S5, S6	≤ 0.5 ≤ 2.5
直角度 (秒角)		≤ 20
面取り (mm)		≤ 0.2

表 2.2: 実機石英輻射体の仕様

スを設け、石英輻射体の光学測定と接着を行う準備を進めている。

石英輻射体の光学測定や接着を行う際、空気中の埃が石英表面に付着し、光子の散乱の原因となる。そのため、アSEMBリルームの中にさらにクリーンブースを設け、測定や接着時の石英輻射体に対する埃の付着を減らす環境を構築した。クリーンブース内のクリーン度はクラス 1,000 程度となっている³。TOP アSEMBリルームの暫定的レイアウトを図 2.15 に、クリーンブース内部の写真を図 2.16 に示す。

2.6.2 受け入れ検査と接着

量産された石英輻射体は、TOP アSEMBリルームに運ばれ、まず、大きな傷や欠けが無いかを目視で検査する。その後、図 2.15 の ㉔ で受け入れ検査を行う。石英輻射体の受け入れ検査として、以下の項目を行う。受け入れ検査において、要求性能を満たしていないと判断された各光学素子は、TOP カウンターには使用せず、研磨会社に返品する。

- 内部透過率測定
 ≥ 98.5 %/m
- 内部表面反射率測定
 ≥ 99.90 %
- 欠けの撮影
面積の和が 25 mm^2 以下

フォーカシングミラーとウェッジに関しては、シンシナティ大学が受け入れ検査を行う。受け入れ検査をクリアした 2 枚の石英輻射体とフォーカシングミラー、ウェッジを ㉓ で接着し、実機 TOP カウンターの光学素子が完成するという流れになっている。その後、完成した光学素子は ㉔

³ 1 フィート立方中 (28.8 l) に $0.5 \mu\text{m}$ 以上の微粒子が 1,000 個以下

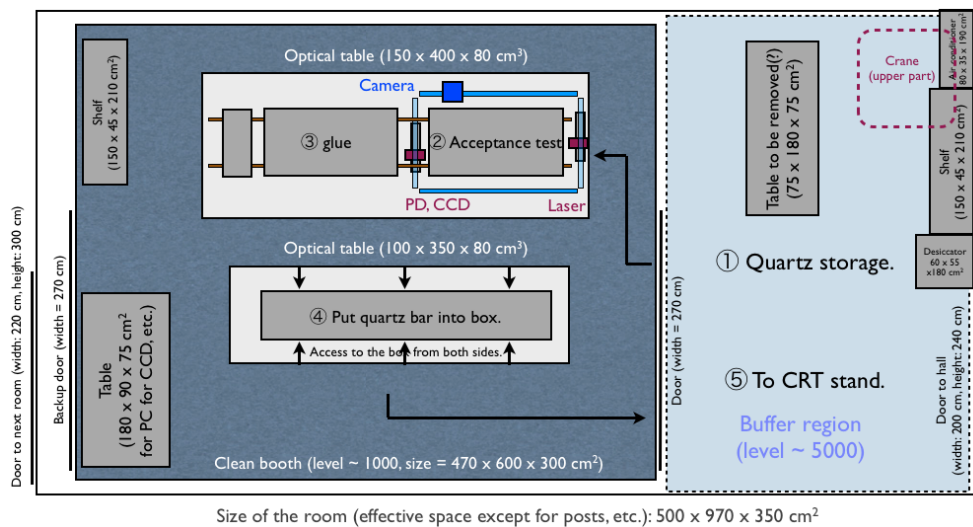


図 2.15: TOP アセンブリルームの暫定的レイアウト。2つの領域に分かれており、右の水色の領域が前室、左の青の領域がクリーンブースとなっている。



図 2.16: クリーンブース内部の写真。ブースの壁面は暗幕になっており、暗室としての機能も備えている。

に移され、専用のアルミハニカム製の箱に組み込まれる。その後、TOP アセンブリルームの外で MCP-PMT と読み出し回路が接続され、TOP カウンターが完成する。

第3章 試作石英輻射体の光学性能評価と接着

この章では、2011 年末に製造された 2 枚の試作石英輻射体の光学測定装置と測定結果について述べる。また、試作石英輻射体 2 枚と試作フォーカシングミラー 1 つを接着するためのジグと接着結果について述べる。

3.1 試作石英輻射体の仕様

2 つの石英輻射体の仕様を表 3.1 に示す。1 つは Suprasil-P710 (信越石英¹) を岡本光学加工所が研磨したもの、もう 1 つは Corning7980 0D (Corning 社²) を Zygo 社³が研磨したものである。

研磨会社 硝材		岡本光学加工所 Suprasil-P710(信越石英)	Zygo Corning7980 0D(Corning)
硝材グレード	脈理	A (MIL-G-174 規格)	5 (ISO 10110-4 規格)
	屈折率均質性 (Δn) 複屈折 泡等級	< 5 ppm (x-y 面), < 10 ppm (y-z 面) 10 nm/cm 0 (DIN58927 規格)	3 ppm < 6 nm/cm 0 (DIN58927 規格)
サイズ (mm)	長さ	1309.84	1199.5
	幅	449.92	450.15
	厚さ	20.085–20.098	20.001
面精度 (μm) (peak to valley)	S1, S2	2.6, 3.0	4.9, 5.1
	S3, S4	1.1, 0.9	0.9, 0.8
	S5, S6	0.9, 0.8	2.0, 2.0
直角度 (分角)		0.08–3.75	0.17
面粗さ (nm rms)		0.4	0.44 (S1–S4), 2.0 (S5, S6)

表 3.1: 2 枚の試作石英輻射体の仕様

3.2 試作石英輻射体の光学性能測定

前節で述べた 2 つの試作石英輻射体について、内部透過率、内部表面反射率の測定を行った。内部透過率、内部表面反射率は、どちらも石英輻射体内部を透過した光の減衰率を基に測定される。本研究では、内部透過率、内部表面反射率に対し、共通の測定系を構築した。また、石英輻射体表面の歪みによって光路が変化するため、光学性能測定における光路変化の影響を調べた。3.2.1 節

¹<http://www.sqp.co.jp/>

²<http://www.corning.com/>

³<http://www.zygo.com/>

で、測定系を構成するレーザー、フォトダイオードなどの測定装置、3.2.2 節と 3.2.3 節で、それぞれ、内部透過率と内部表面反射率の測定方法と測定結果を示す。また、3.2.4 節で光路変化の測定方法と測定結果を示す。

3.2.1 測定装置

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⁴) 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。この半導体レーザーの仕様を表 3.2 に示す。

品名	LDU33-405-3.5
波長	405 nm
出力 (連続光)	3.5 mW
ビーム径	$\sim 2 \times 1 \text{ mm}^2$
ビーム広がり全角	$< 1 \text{ mrad}$
出力安定性	$< \pm 3\%$

表 3.2: 半導体レーザーの仕様

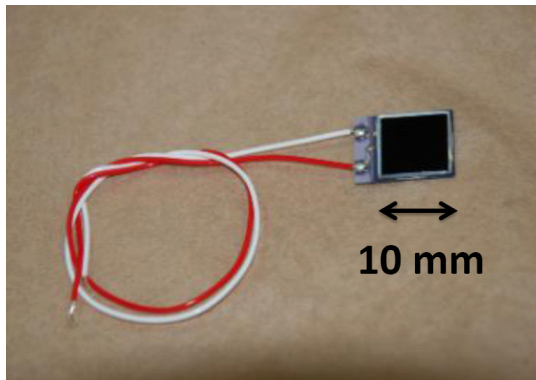
フォトダイオード

レーザー光の強度測定にはフォトダイオード (S3994-01 浜松ホトニクス社) を用いた。フォトダイオードの仕様を表 3.3 に示す。図 3.1 にフォトダイオードの写真を載せる。

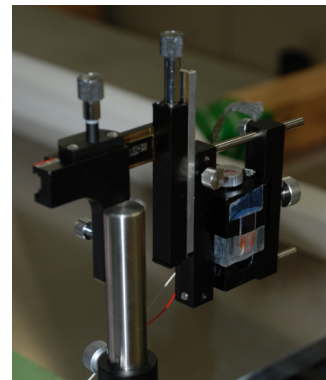
品名	S3994-01
受光面サイズ	$10 \times 10 \text{ mm}^2$
感度波長範囲	320–1100 nm
受光感度 (@400nm)	0.2–0.25 A/W

表 3.3: フォトダイオードの仕様

⁴<http://www.sigma-koki.com/>



(a) フォトダイオード (S3994-01)

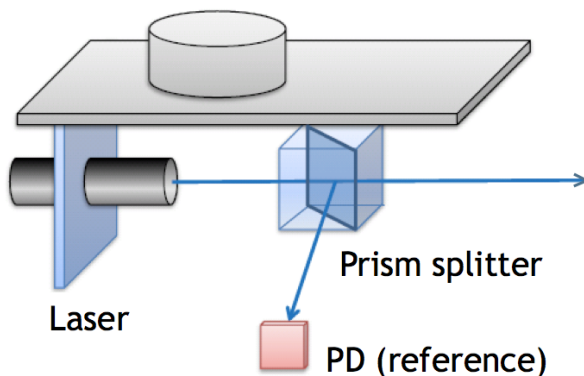


(b) フォトダイオードは手動ステージに取り付けた。

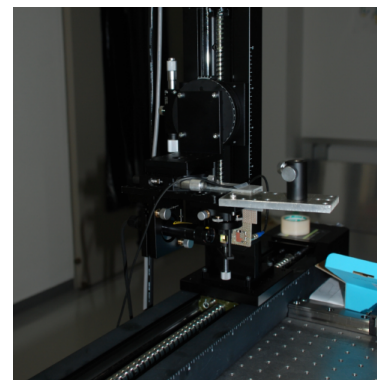
図 3.1: フォトダイオード

光量モニター

レーザーの光量は $\pm 3\%$ でふらつくため、測定を行うためには光量補正が必要である。図 3.2 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、測定用と同じ型のフォトダイオードをリファレンスとし、光量モニターとした。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 $25 \mu\text{m}$ 、繰り返し位置精度は $6 \mu\text{m}$ 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 3.2: レーザーと光量モニター

電流計

フォトダイオードの光電流測定には、ピコアンメータ (Model6487 KEITHLEY⁵) とデジタルマルチメータ (DMM4050 Tektronix⁶) を用いた。それぞれ測定用、リファレンス用のフォトダイオードに接続する。測定するレーザーは連続光のため、フォトダイオードには逆電圧をかけず、光電流を測定する。

⁵<http://www.keithley.com/>

⁶<http://www.tek.com/>

CCD カメラ

レーザー光の位置変化を測定するために、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。図 3.3 に CCD カメラの写真を示す。



(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 3.3: CCD カメラ

3.2.2 内部透過率測定

石英輻射体に求められる内部透過率は $98.5 \text{ \%}/\text{m}$ 以上である。また、測定精度の目標は $\pm 0.3 \text{ \%}/\text{m}$ 以内である。

測定方法

図 3.4 に内部透過率測定のセットアップの模式図を示す。レーザーを石英輻射体の S5 または S6 面に対して垂直に入射させ、透過したレーザーの光量をフォトダイオードにより測定する。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。

レーザー出力のふらつきを抑えるため、 I_0 と I_1 は測定用フォトダイオードとリファレンス用フォトダイオードの比を用いた。また、 R_0 と R_1 に対しては、フレネルの式による計算値を用いた⁸。フォトダイオードには受光感度の面依存性があり、中心付近が最も感度が高い。また、レーザーの光路は、石英輻射体表面のゆがみの影響を受けて変化する。そのため、図 3.1(b) で示した手動ステージを用い、測定点毎に測定用フォトダイオードをスキャンし、電流が最大となる位置で測定を

⁷<http://www.sentech.co.jp/>

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。

行った。

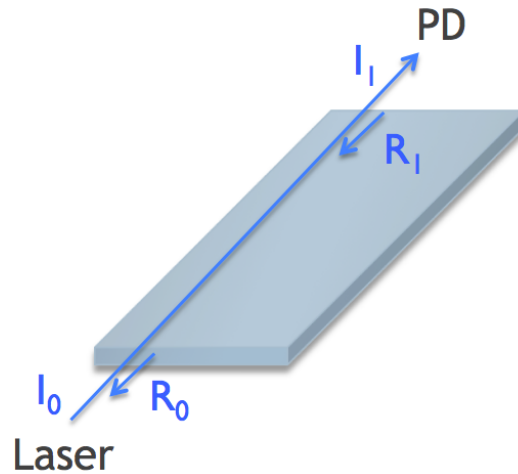


図 3.4: 内部透過率測定の設定アップ。入射レーザー光の強度 I_0 と石英輻射体透過後のレーザー光の強度 I_1 をフォトダイオードを用いて測定する。反射率 R_0 と R_1 に対しては、フレネルの式による計算値を用いた。

内部透過率の位置依存性を見るために、異なる入射位置に対して測定を行った。図 3.5 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 軸を定義する。 $x = (25, 125, 225, 325, 425)$ 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。

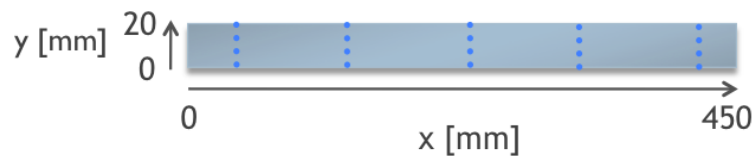


図 3.5: 内部透過率の測定点。石英輻射体を S5,S6 面から見た図を示す。 $x = (25, 125, 225, 325, 425)$ mm と $y = (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17)$ mm の全ての組み合わせの計 35 点で測定を行った。

結果

表 3.4 と表 3.5 に 2 つの試作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 ± 0.17 % となり、目標とした測定精度 ± 0.3 %/m 以内を達成した。2 つの試作石英輻射体について、全ての測定点で内部透過率 98.5 %/m 以上という結果を得た。

$y \backslash x$	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 3.4: Suprasil-P710 の内部透過率測定結果。単位は%/m。

$y \backslash x$	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 3.5: Corning7980 0D の内部透過率測定結果。単位は%/m。

3.2.3 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。また、測定精度の目標は±0.05%以内である。

測定方法

図 3.6 に内部表面反射率のセットアップ模式図を載せる。石英輻射体の S5 または S6 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 をフォートダイオードを用いて測定する。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。

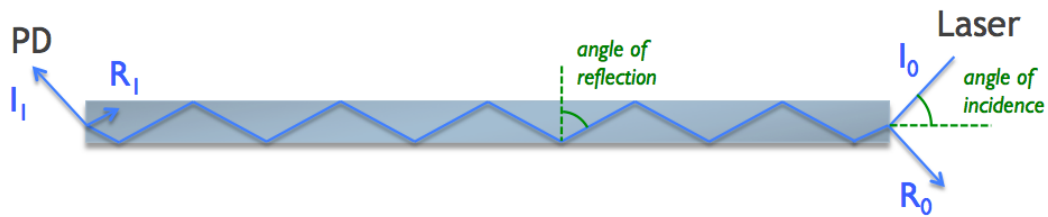


図 3.6: 内部表面反射率測定の設定アップ。石英輻射体の S5 または S6 面から角度を付けてレーザーを入射し、入射レーザー光の強度 I_0 と内部表面反射後のレーザー光の強度 I_1 をフォトダイオードを用いて測定する。 R_0 と R_1 に対しては、フレネルの式による計算値を用いた。

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した。 R_0 と R_1 に対しては、フレネルの式による計算値を用いた。レーザーが石英輻射体内部表面で反射する際、肉眼で微小な散乱光が確認できるため、 N は目視で確認した。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 3.6 と表 3.7 に 2 つの試作石英輻射体の内部表面反射率を示す。 I_0 と I_1 の測定誤差は、内部透過率測定と同様に $^{+0.04}_{-0.17}$ % 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。これらを用いて計算した内部表面反射率の測定誤差は ± 0.01 – 0.02 % であり、目標とした測定精度 ± 0.05 % 以内を達成した。2 つの試作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 99.90 % 以上という結果を得た。

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 3.6: 岡本光学によって研磨された試作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 3.7: Zygo 社によって研磨された試作石英輻射体の内部反射率測定結果

3.2.4 光路変化測定

石英輻射体中で光路変化があると、チェレンコフ光のリングイメージが歪め、TOP カウンターの識別性能を低下させる原因となる。光路変化の影響を調べるため、CCD を用いてレーザーの光路変化を測定した。

測定方法

図 3.7 に光路変化測定の設定アップモード図を示す。試作石英輻射体の S5 または S6 面からレーザーを入射して、反対側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、双方の相対位置を用いて光路変化を測定することができる。

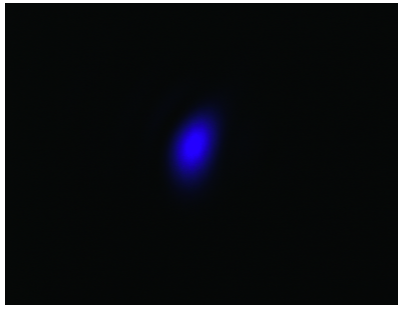


図 3.7: 光路のずれ測定の設定アップ。石英輻射体の S5 または S6 面からレーザーを入射し、反対側から出てくるレーザー光を CCD カメラで測定する。可動ステージに取り付けたレーザーと CCD カメラを同時に動かしてスキャンする。

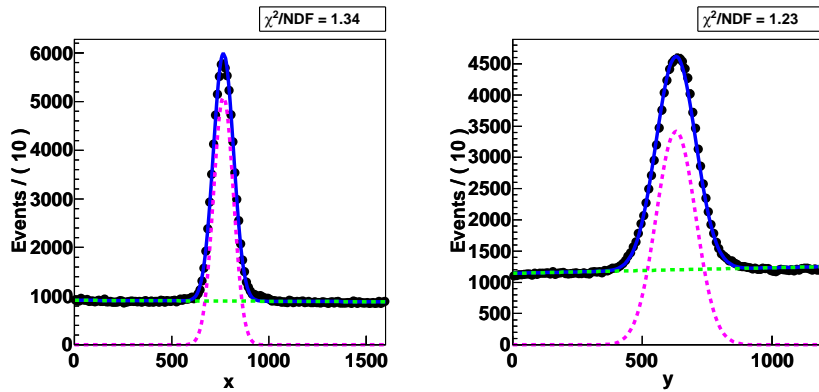
測定は、 $x=225$ mm に対し、 y 方向に 2 mm 毎にレーザーと CCD カメラを動かして行った。CCD カメラで得られたビットマップイメージを、2 次元ヒストグラムに変換する。得られた 2 次元ヒストグラムを、信号成分に対しては 2 次元ガウス関数、バックグラウンド成分に対しては x 方向一次関数と y 方向一次関数の積を用い、得られた 2 次元ヒストグラムのフィットを行う。フィットしたガウス分布の中心値から、表面の歪みによる光路変化を測定する。

結果

図 3.8(a) に CCD カメラで取得したデータの典型例を示す。また、図 3.8(b) に 2 次元フィットの結果を、 x, y 方向に対する投影として示す。



(a) CCD カメラで測定したビットマップイメージの典型例。



(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 3.8: 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 3.9 と図 3.10 に、2 つの試作石英輻射体、Suprasil-P710 と Corning7980 0D に対する測定結果を示す。 $y < 20 \text{ mm}$ 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 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以下と見積もれる。光路の変化は、Suprasil-P710 でおよそ 1 mm 、Corning7980 D でおよそ 3 mm であった。これらは、試作石英輻射体の表面の歪みによって説明できるレベルである。

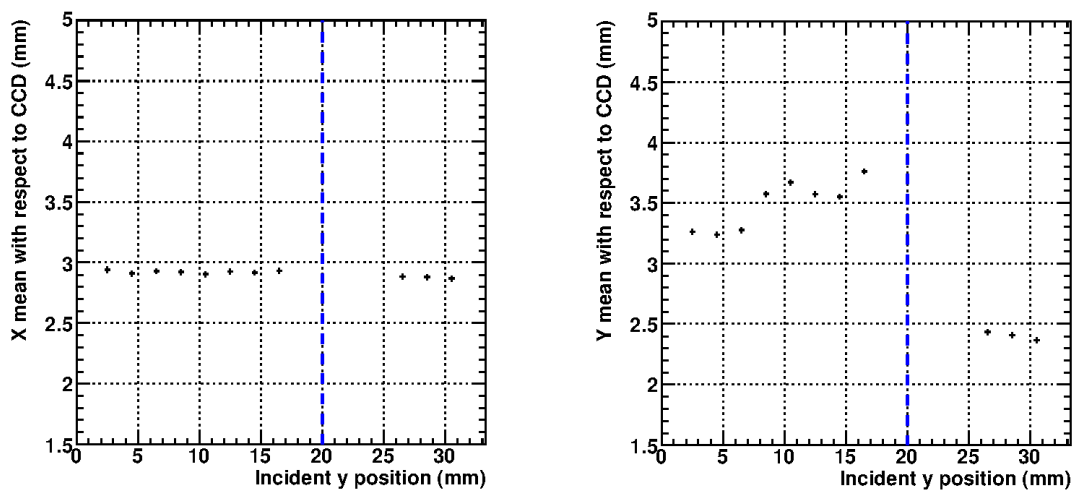


図 3.9: Suprasil-P710 の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)。2つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値である。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

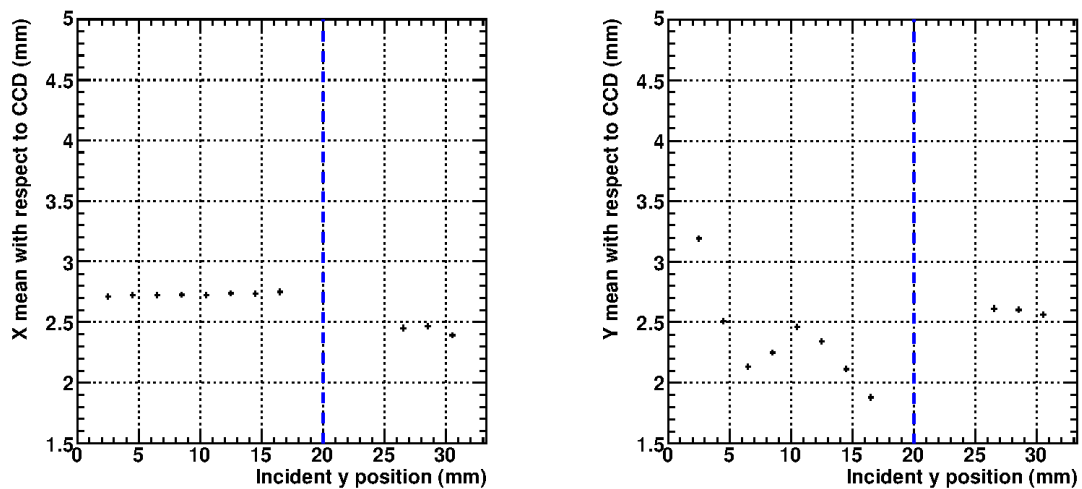


図 3.10: Corning7980 0D の光路のずれ測定結果 ($x = 225$ mm)。2つの図はそれぞれ x 方向、 y 方向について、フィットしたガウス分布の中心値である。 $y < 20$ mm が石英輻射体を透過したレーザー、 $y > 20$ mm は空中を透過したレーザーに対する結果である。

3.3 試作石英輻射体・試作フォーカシングミラーの接着

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。光学素子量産に向け、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、相対位置を $O(10)$ μm で制御可能な接着システムを構築した。また、それを用いて試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着を行った。

3.3.1 試作フォーカシングミラーの仕様

表 3.8 に試作石英輻射体に接着した試作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、アルミが蒸着されている (図 3.11 参照)。

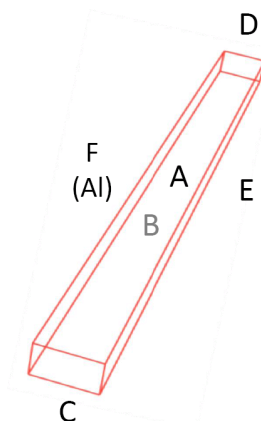


図 3.11: フォーカシングミラーの面の定義。A は上面、B は下面、C-F は側面をそれぞれ示す。F は球面に研磨されており、アルミミラーが蒸着されている。

硝材		Suprasil-P710
サイズ (mm)	長さ	29.95
	幅	450.09
	厚さ	19.95
	球面半径	5066
面精度 (μm) (peak to valley)	A	0.1
	B	0.3
	E	0.6
直角度 (分角)		0.32
面粗さ (nm rms)		0.4

表 3.8: 試作フォーカシングミラーの仕様

3.3.2 接着システム

接着システムは、相対位置・相対角度を調節する接着用ジグと、相対位置・相対角度の測定装置で構成されている。以下で、接着システムについて順に説明する。

接着用ジグ

接着用ジグは 1500 × 4000 mm² の光学実験台 (HA-4015-400LS シグマ光機) に載せられている。図 3.12 に接着用ジグの模式図を、図 3.13 に写真を示す。

光学実験台の上にはレール (SHS25 THK⁹) が 2 本取りつけられ、その上にアルミ板 (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¹⁰) が取り付けられており、その先端でアルミ板 (上) と石英輻射体またはフォーカシングミラーを支える。アルミ板 (下) とマイクロメータヘッドの接触部分には、鋼鉄製の球を埋め込んだジグが取り付けられてあり、マイクロメータヘッドの先端と点接触する形になっている。これにより、アルミ板 (上) の角度が変化しても、安定性を保てる。

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、アルミ板 (上) の上に直径約 4 mm ポリアセタール球を設置する。さらに、ポリアセタール球を保持するため、穴を開けた塩化ビニル板を載せる。塩化ビニルの板厚は 3 mm であり、石英輻射体やフォーカシングミラーはポリアセタール球によって支持される。アルミ板 (上) と試作石英輻射体に挟まれた、ポリアセタール球の写真を図 3.14 に示す。また、ジグに使用したアルミ板 (上)、アルミ板 (下)、塩化ビニル板それぞれのサイズを表 3.9 にまとめた。

⁹<http://www.thk.com/jp/>

¹⁰<http://www.mitutoyo.co.jp/>

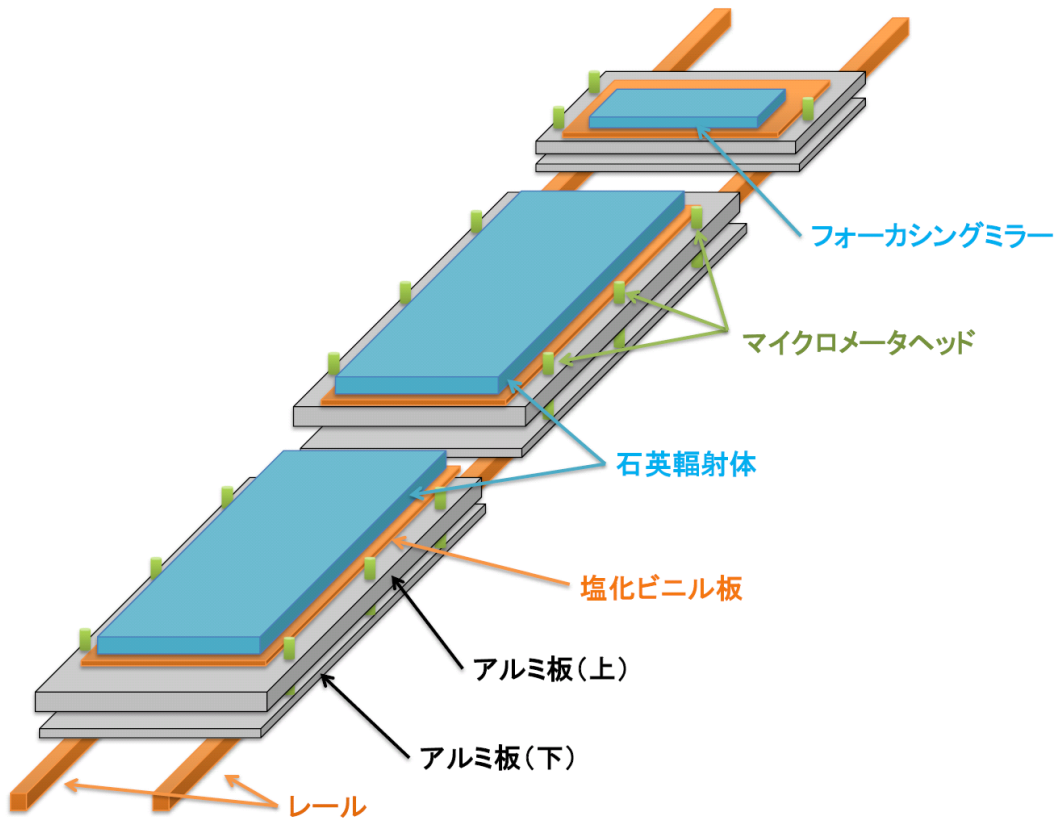


図 3.12: 接着用ジグ模式図。

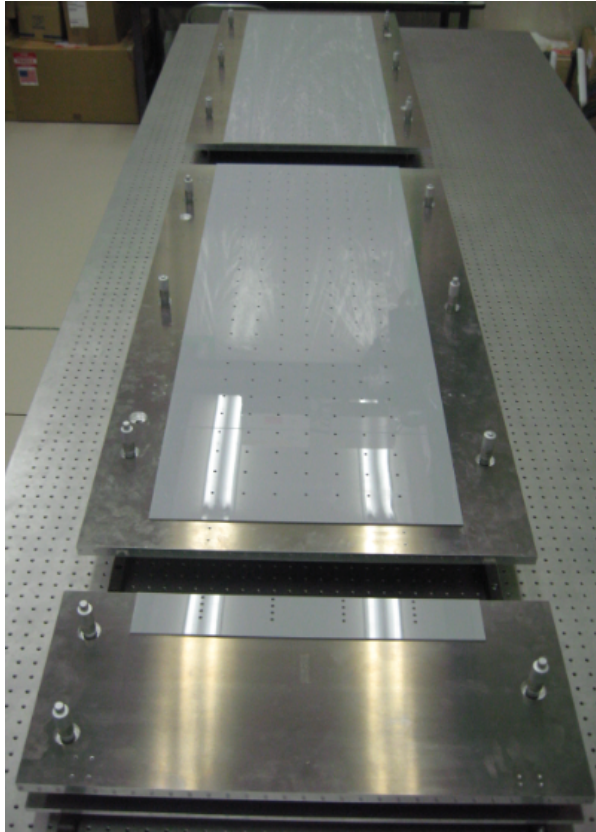


図 3.13: 接着用ジグ写真。光学実験台の上にレールが2本取り付けられており、そのレールにアルミ板(下)が取り付けられている。アルミ板(上)にはマイクロメータヘッドが取り付けられており、その先端がアルミ板(下)につくことでアルミ板(上)を支える。また、石英輻射体とアルミ板(上)の間には、ポリアセタール球と、それを保持するための穴を開けた塩化ビニル板を載せる。

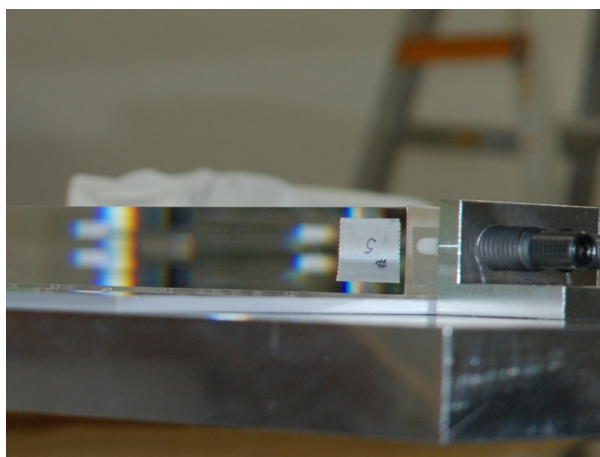


図 3.14: アルミ板(上)と試作石英輻射体に挟まれた、ポリアセタール球の写真。

	石英輻射体用	フォーカシングミラー用
アルミ板(上)	700 × 1380 × 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 3.9: アルミ板(上、下)、塩化ビニル板のサイズ

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 3.15(a) の模式図のように、マイクロメータヘッドを伸縮することで、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。表 3.10 にマイクロメータヘッドの仕様を示す。角度の調節には主に MHF2-2.5V が用いられ、MHF2-1 は荷重分散のために補助的に用いられる。

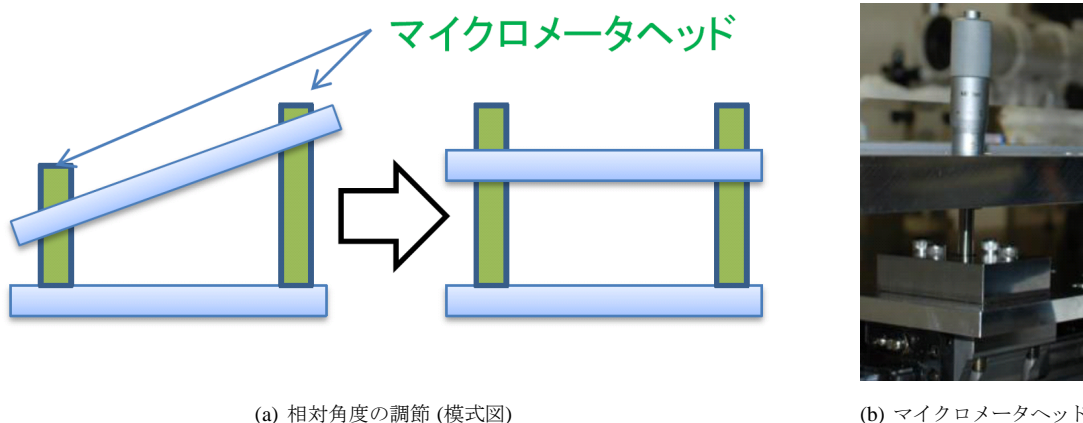


図 3.15: 相対角度の調節。マイクロメータヘッドのストロークを伸縮することで、石英輻射体やフォーカシングミラーの相対角度を調節することができる。

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 3.10: マイクロメータヘッドの仕様。MHF2-2.5V が角度・位置調節に主に用いられ、MHF2-1 は荷重分散のために補助的に用いられる。

相対角度の測定は、平面鏡とオートコリメータ(6D ニコン¹¹)を用いて行う。それぞれの写真を図 3.17、3.18 に示す。図 3.16 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。

平面鏡はポリアセタール製のジグと一体になっており、石英輻射体の上面3点、側面2点の計5点で接触する。これにより、上下方向と水平方向の角度のずれを同時に測定することができる。

¹¹<http://www.nikon.co.jp/>

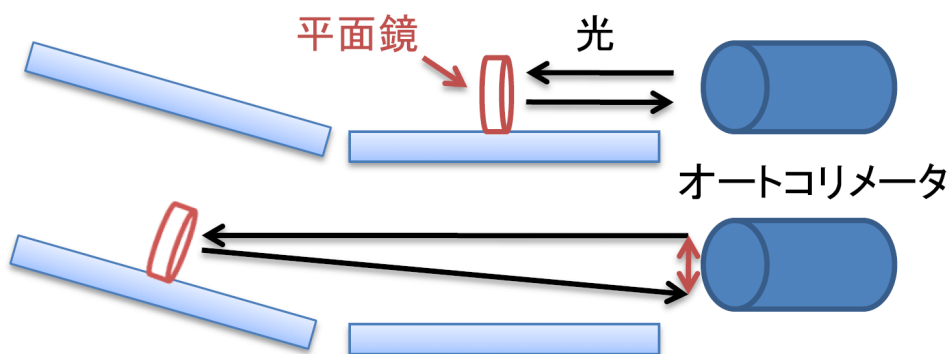


図 3.16: 相対角度の測定の模式図

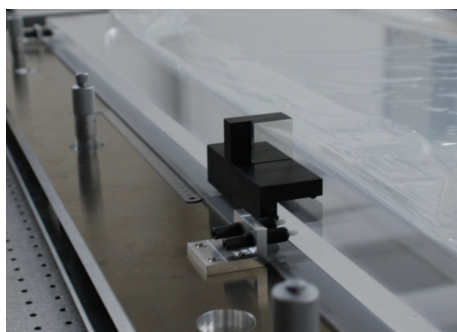


図 3.17: 平面鏡

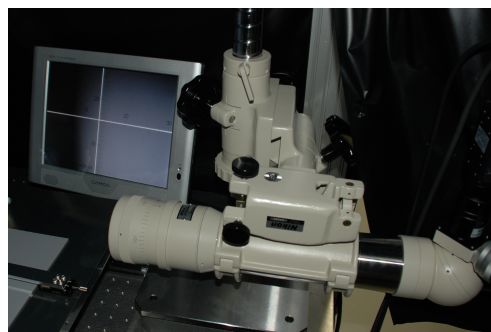


図 3.18: オートコリメータ

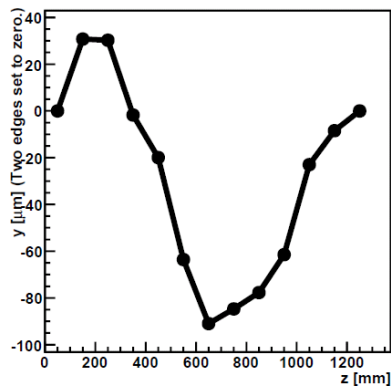
表 3.11 にオートコリメータの仕様を示す。仕様では測定精度 (測定範囲 5 分以内) は 0.5 秒だが、実際の測定ではディスプレイに映る光軸を目で読み取る必要があるため、実用上の測定精度は 10-15 秒である。これは ± 0.01 mrad に相当する。

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

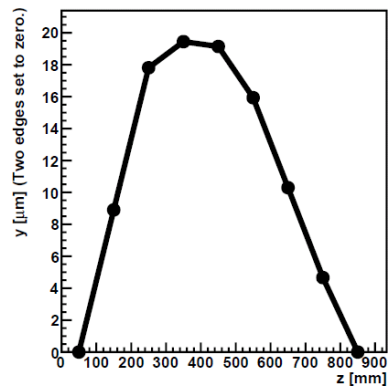
表 3.11: オートコリメータの仕様

石英輻射体のたわみ

平面鏡とオートコリメータを用いて、アルミ板 (上) と、その上に載せた試作石英輻射体のたわみを測定した。結果を図 3.19 に示す。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、ポリアセタール球の弾性により、石英輻射体のたわみは吸収され、 $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ に抑えられている。これは接着に十分な平面性である。



(a) アルミ板 (上) のたわみ

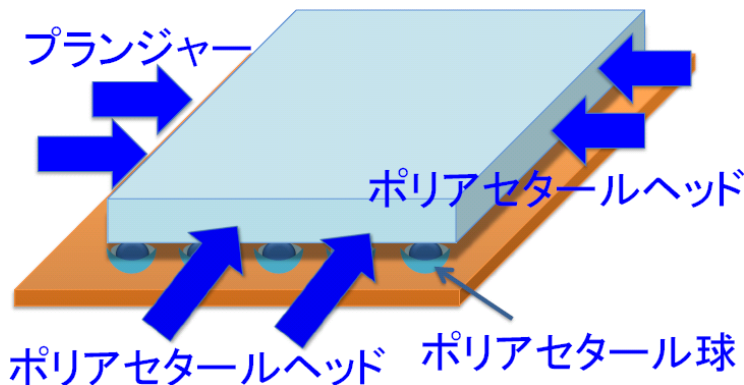


(b) 試作石英輻射体のたわみ

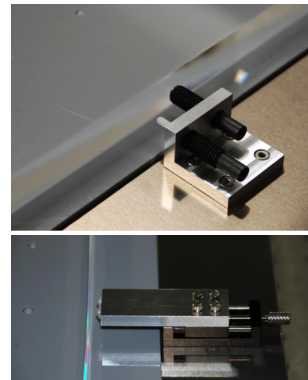
図 3.19: アルミ板 (上) と試作石英輻射体のたわみ。横軸は長さ方向の位置、縦軸は両端の位置を 0 としたときの相対位置である。長さ方向の各点で、オートコリメータを用いて相対角度を測定した。相対角度から相対位置を求め、両端の位置を 0 とする面を再構成することでたわみを見積もった。アルミ板 (上) のたわみは $\sim \pm 50 \mu\text{m}$ 、石英輻射体のたわみは $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ であった。

相対位置の調節・測定

相対位置の調節は、アルミ板 (上) に取り付けられたポリアセタールヘッドと、マイクロメータヘッドを用いて行う。図 3.20(a) の模式図のように、試作石英輻射体および試作フォーカシングミラーはプランジャ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 $\pm 5 \text{ mm}$ の押しねじ式の手動ステージに取り付けられており、ステージを動かすことで水平方向の相対位置の調節を行うことができる。上下方向の相対位置は、相対角度の調節と同じく、アルミ板 (上) に取り付けられたマイクロメータヘッドを用いて行う。



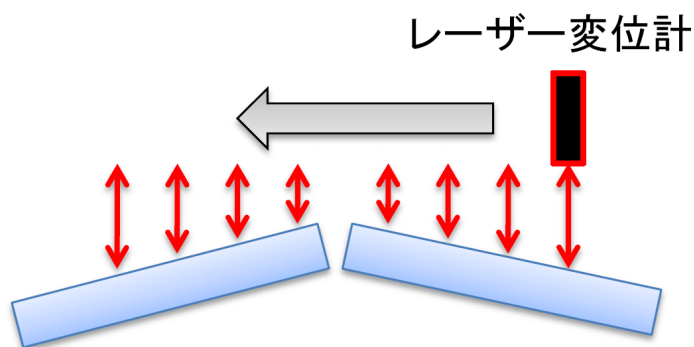
(a) 相対位置の調節 (模式図)



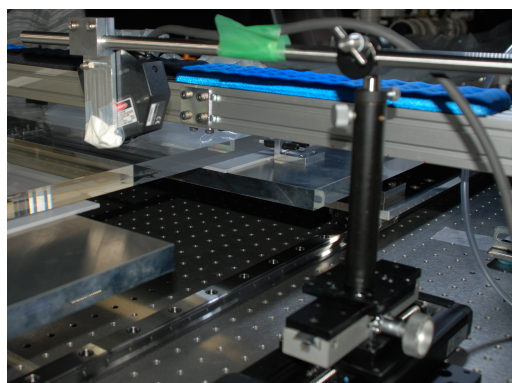
(b) プランジャ(上) とポリアセタールヘッド(下)

図 3.20: 相対位置の調節。試作石英輻射体および試作フォーカシングミラーはプランジャ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 $\pm 5 \text{ mm}$ の押しねじ式ステージに取り付けられており、ステージを動か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¹²) を用いて行う。図 3.21 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 3.12 にレーザー変位計の仕様を示す。



(a) 相対位置の測定の模式図



(b) レーザー変位計

図 3.21: 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 3.12: 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 μm の平行平面基板 (OPSQ-20S2.3-1-10 シグマ光機) を用いて繰り返し測定を行い、測定精度 ±5 μm を得た。

¹²<http://www.keyence.co.jp/>

3.3.3 接着

前節までに説明した接着システムを用いて、2枚の試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着を行った。以下で接着時の試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの配置、使用した光学接着剤、接着剤吐出装置、接着手順について順に説明する。また、接着後の相対位置、相対角度の測定結果について述べる。

試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの配置と、相対角度・位置に関する要求

図 3.22 に接着の配置図を示す。

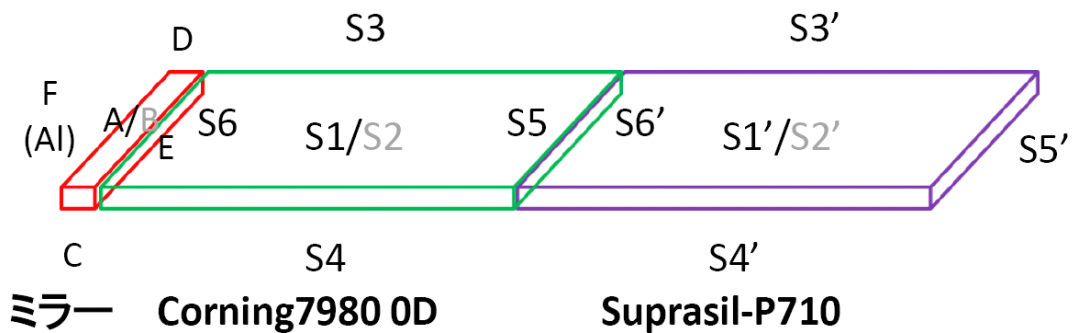


図 3.22: 試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着の配置図。S1-S6 と S1'-S6' は石英輻射体、A-F はフォーカシングミラーの各面を表す(図 2.13、図 3.11 参照)。S2、S2'、B は下面を表す。

接着に関する要求を以下にまとめる。

- 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) - 試作石英輻射体 (Suprasil-P710) 間
相対角度 (≤ 0.2 mrad) : S1 - S1', S2 - S2', S3 - S3', S4 - S4'
相対位置 (≤ 100 μm) : S1 - S1', S2 - S2', S3 - S3', S4 - S4'
- 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) - 試作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 (≤ 100 μm) : S1 - A, S2 - B, S3 - D, S4 - C

接着剤の厚さは、

- 試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間 : 30 μm (S3 - S3' 側) - 230 μm (S4 - S4' 側)
- 試作石英輻射体 - フォーカシングミラー間 : 30 μm

として接着を行った。30 μm 以下だと接着剤が浸透しないため、接着剤の厚さは 30 μm 以上にした。また、試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間の接着剤の厚さが 30-230 μm 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。

接着剤

試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間の接着には紫外線硬化型の光学接着剤 NOA63(Norland Products 社¹³)を用いた。また、試作石英輻射体 - 試作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 社)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実機仕様のものより短いためである。今回接着した試作石英輻射体は、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た。表 3.13 に NOA63、NBA107 の仕様を示す。

品名	硬化条件	屈折率 (@400 nm)	粘度	引張強度
NOA63	紫外線	1.56	2000 cps ¹⁴	5000 psi ¹⁵
NBA107	紫外線	1.54	350 cps	800 psi

表 3.13: 光学接着剤の仕様

接着剤吐出装置

2 枚の試作石英輻射体、試作フォーカシングミラーの接着には、精密ディスペンサー (MS-1 武蔵エンジニアリング¹⁶)を用いた。ディスペンサーは、外部から供給された圧縮空気の圧力と吐出時間を制御する装置である。接着剤を詰めたシリンジの後ろから、ディスペンサーで制御された圧縮空気を送り込むことで、接着剤の吐出速度と時間を制御する。ディスペンサーの仕様を表 3.14 に、写真を図 3.23 に示す。

品名	MS-1
吐出圧力	0.02–0.7 MPa
バキューム圧力	0–20 kPa

表 3.14: ディスペンサーの仕様

¹³<http://www.norlandprod.com/>

¹⁴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。

¹⁵重力ポンド毎平方インチ (Pound-force per Square Inch)。1 psi = 0.07 kg/cm²

¹⁶<http://www.musashi-engineering.co.jp/>

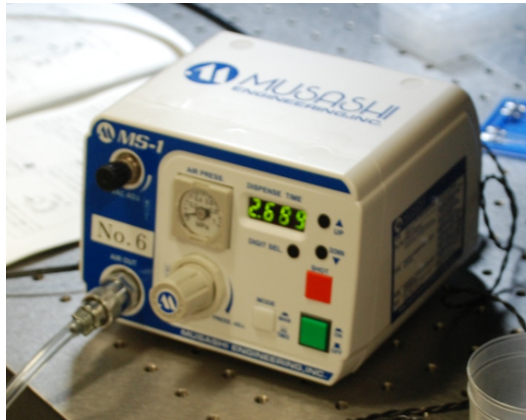


図 3.23: ディスペンサー

接着手順

接着の手順を以下に述べる。

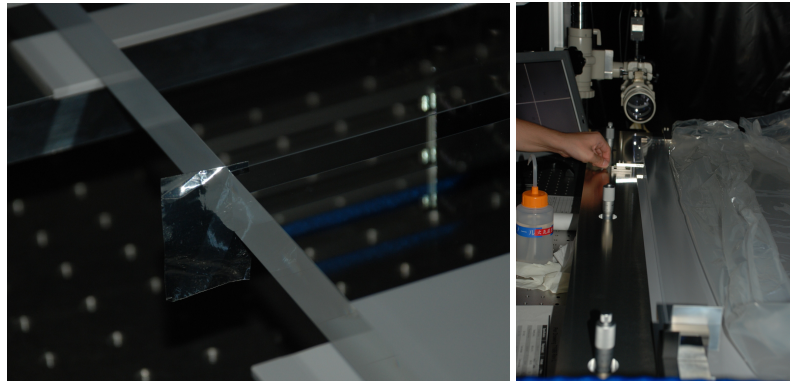
1. 2つの試作石英輻射体(もしくは試作フォーカシングミラー)を近づけ、接着面に厚さ $30\ \mu\text{m}$ のシクネスゲージ¹⁷を挟んで厚さを調節する。(試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間には S3 - S3' 側、石英輻射体 - 試作フォーカシングミラー間には両側にシクネスゲージを挟む)
2. 相対角度と相対位置を交互に調節する。両方が要求精度を満たすまで繰り返し調節を行う¹⁸。
3. ディスペンサーを用いて上面から隙間に接着剤を載せていく。毛細管現象で接着剤が浸透していく。
4. 接着剤が接着面全体に行き渡った後、ブラックライト (FL20SBL NEC¹⁹) で紫外線を照射する。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、試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間と試作石英輻射体 - 試作フォーカシングミラー間の接着を行った。試作石英輻射体 - 試作石英輻射体接着時の写真を図 3.24 を載せる。

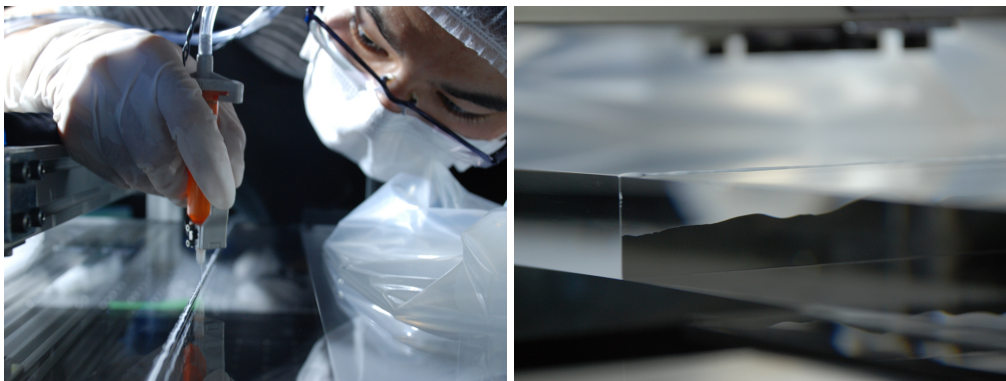
¹⁷すきまゲージとも呼ばれる。今回用いたシクネスゲージの素材はアルミである。

¹⁸試作石英輻射体 - 試作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、試作石英輻射体 - 試作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。

¹⁹<http://www.nec.co.jp/>



(a) 2 枚の試作石英輻射体間に、シクネスゲージ挟む。(b) 手動ステージを動かし、ポリ
アセタールヘッドで水平方向の
相対位置を調節。同時に、オー
トコリメータで角度を測定。



(c) ディスペンサーを用いて、隙間の上に接着剤を載せる。(d) 毛細管現象で接着剤が浸透する。

図 3.24: 試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間接着の様子

接着後の測定結果

試作石英輻射体 - 試作石英輻射体間と試作石英輻射体 - 試作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。

- 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) - 試作石英輻射体 (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
- 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) - 試作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 2.4 で述べた要求を全て満たしていることが分かる。よって、2 つの試作石英輻射体と試作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。以上により、TOP カウンターの実機生産に必要な精度で接着が可能な、接着システム・手法が実証された。

第4章 実機石英輻射体量産における光学測定システム

この章では、量産化に対応した内部透過率、内部表面反射率測定システムの構築と、石英ブロックに対する測定結果について述べる。また、石英表面の欠けを評価する撮影装置と手法について述べる。

4.1 内部透過率測定システム

実機石英輻射体の受け入れ検査のため、レーザーとフォトダイオードを用いた内部透過率の自動測定システムの構築を、名古屋大学で行った。測定システムの安定性を確認するため、レーザーとフォトダイオードの温度依存を測定した。3.2.4節で示した様に、石英輻射体の表面歪みによって、レーザーの光路変化が起こる。そのため、フォトダイオードの位置依存を調べた。4.1.1節で測定装置について述べる。4.1.2節でレーザーとフォトダイオードの温度依存の測定結果、4.1.3節でフォトダイオードの位置依存の測定結果を示す。4.1.4節で光路変化に対応した測定方法を示す。また、4.1.5節で測定装置のテストのために行った、石英ブロックの内部透過率の測定結果を示す。

4.1.1 測定装置

内部透過率の自動測定システムの全体図を図 4.1 に、写真を 4.2 に示す。内部透過率の自動測定システムでは、試作石英輻射体の光学性能測定で使用したと同じ、半導体レーザー、フォトダイオード、電流計を用いた (3.2.1 節参照)。図 4.1 の左側に示した様に、レーザーと光量モニターを、2つの回転ステージ (KSPB-906M、KSP-786M シグマ光機) を介して、可動ステージ (SGSP46-500(XY)、SGSP33-200(Z) シグマ光機) に取りつけた。光量モニターは、ハーフミラーを用いてレーザー光を2つに分け、リファレンス用フォトダイオードで光量のモニターを行う。リファレンス用フォトダイオードは、デジタルマルチメータ (DMM4050 Tektronix) に接続した。図 4.1 の右側に示した様に、測定用のフォトダイオードをゴニオステージと回転ステージを介して、可動ステージ (SGSP46-500(XY)、SGSP26-200(Z) シグマ光機) に取りつけた。測定用のフォトダイオードは、ピコアンメータ (Model6487 KEITHLEY) に接続した。4つの可動ステージは、ステージコントローラ (SHOT-304GS シグマ光機) を介して PC から制御する。また、デジタルマルチメータ、ピコアンメータも PC から制御し、電流値を読み取る。

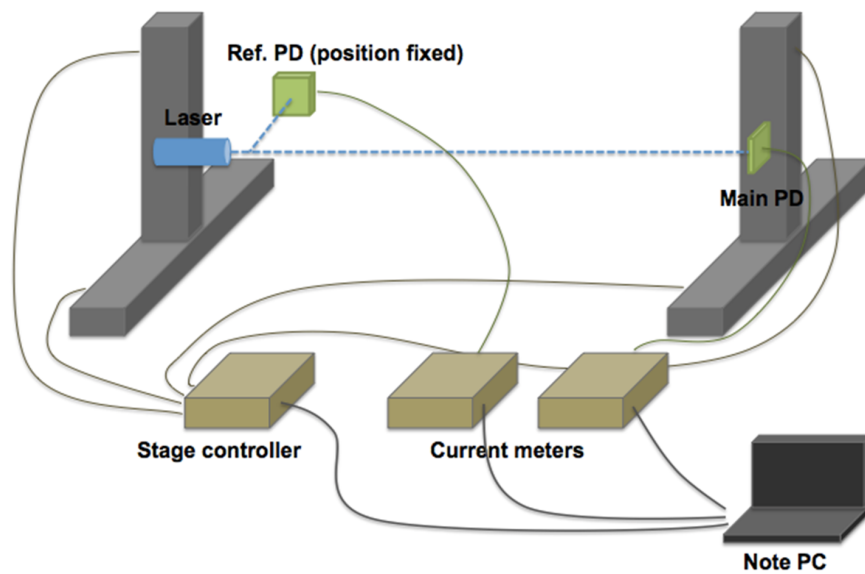


図 4.1: 内部透過率測定システムの全体図。可動ステージ、電流計を PC から制御する。

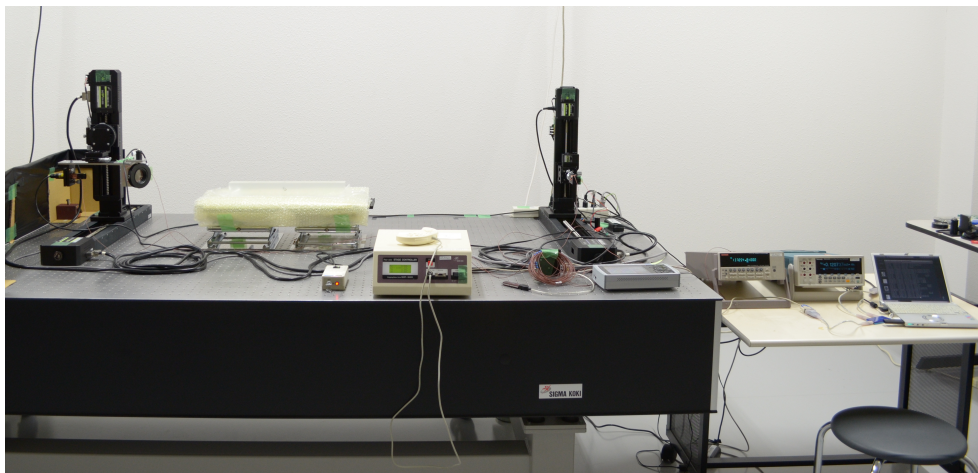


図 4.2: 内部透過率測定システムの写真。

4.1.2 測定装置の温度依存

周囲の気温の変化に対するレーザー光の強度変化、測定用フォトダイオードの応答を測定した。また、室温を変化させ、光学測定装置全体の温度依存を測定した。

測定装置

レーザーの周辺温度だけを変化させるため、梱包用シートで可動ステージごとレーザーを囲み、ファンとダクトを用いて除湿機の排気熱を流し込んだ。写真を図 4.3 に示す。測定用フォトダイオードも同じ方法で周辺温度を変化させた。温度変化は、写真 4.4 の様に、レーザー、測定用フォ

トダイオード、ピコアンメータに熱電対を取りつけて測定した。熱電対の値はデータロガー (GL800 GRAPHTEC¹⁾) で記録した。写真を図 4.5 に示す。

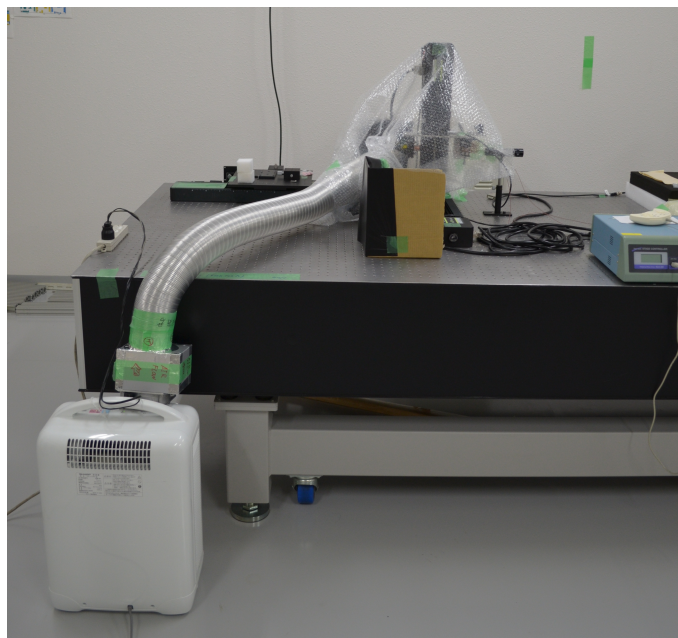
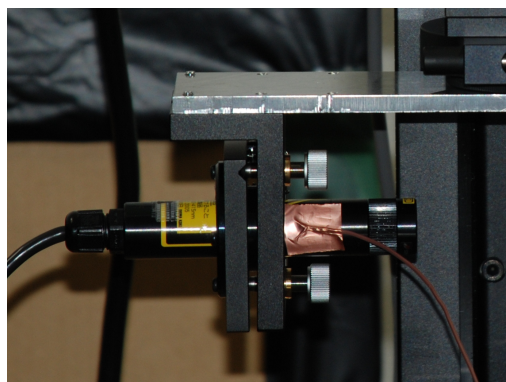
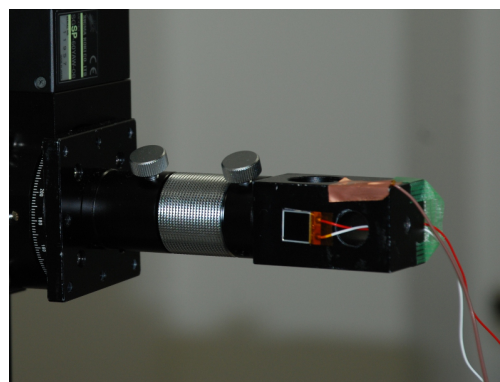


図 4.3: レーザーの周辺温度を変化させるセットアップ。梱包用シートで可動ステージごとレーザーを囲み、ファンとダクトを用いて除湿機の排気熱を流し込んだ。



(a) レーザー



(b) 測定用フォトダイオード

図 4.4: レーザー、測定用フォトダイオードと、それぞれに取りつけた熱電対。

¹<http://www.graphtec.co.jp/>

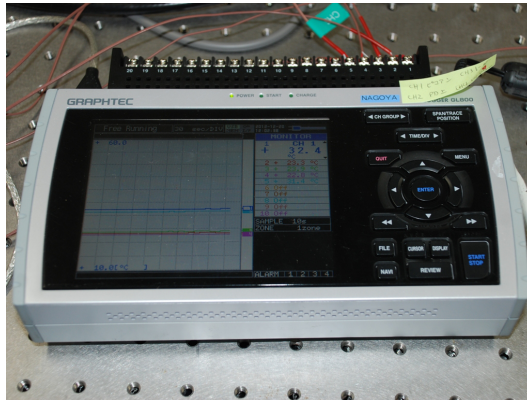
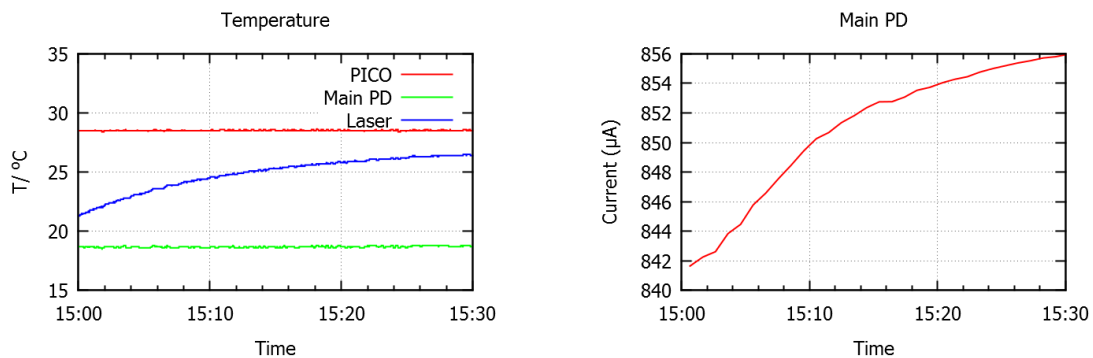


図 4.5: データロガー。複数の熱電対の温度を記録する。

測定結果

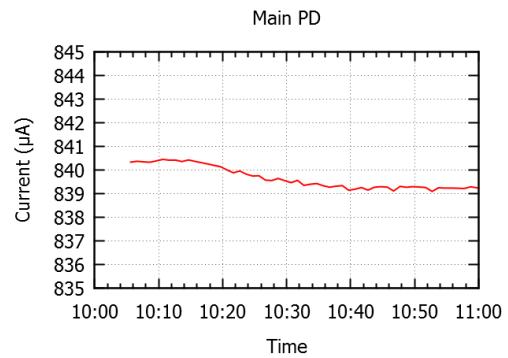
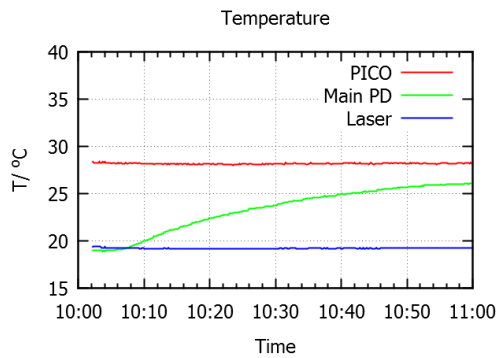
レーザー、測定用フォトダイオードの温度をそれぞれ変化させ、レーザー光を当てた測定用フォトダイオードの光電流と、熱電対の温度を 1 分毎に測定した。また、装置全体の温度を変化させ、測定用フォトダイオードと光量モニターの光電流を測定した。図 4.6 にレーザーの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果、図 4.7 に測定用フォトダイオードの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果を示す。5℃の温度上昇に対して、レーザーの光量は 1.6%増加したが、フォトダイオードの応答は $\pm 0.1\%$ の範囲で安定していた。また、図 4.8 に、装置全体の温度を変化させた場合の測定結果を示す。測定用フォトダイオードと光量モニターの電流値の比は、 $\pm 0.05\%$ 以下の範囲で安定していた。光学測定には、この比を用いるため、測定装置の温度変化が光学測定に与える誤差は $\pm 0.05\%$ 以下と見積もられる。



(a) 測定装置の温度変化。赤がピコアンメータ、緑が測定用フォトダイオード、青がレーザーの温度。

(b) 測定用フォトダイオードの電流値

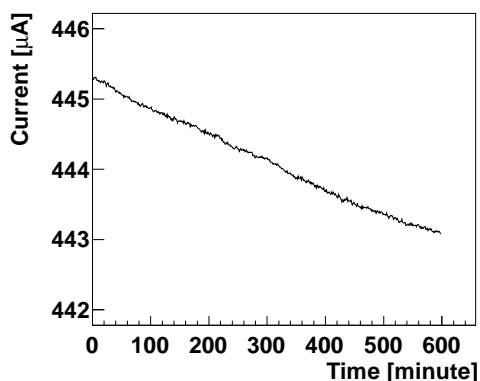
図 4.6: レーザーの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果。およそ 5℃の温度上昇に対して、レーザーの光量は約 1.6%増加した。



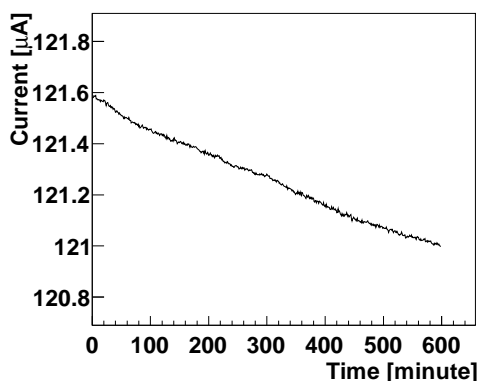
(a) 測定装置の温度変化。赤がピコアンメータ、緑が測定用フォトダイオード、青がレーザーの温度。

(b) 測定用フォトダイオードの電流値

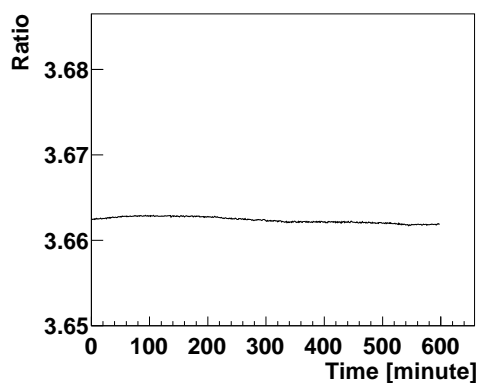
図 4.7: 測定用フォトダイオードの周辺温度を変化させた場合の、測定用フォトダイオードの光電流測定の結果。およそ 6 °C の温度上昇に対して、測定用フォトダイオードの電流値は $\pm 0.1\%$ の範囲で安定していた。



(a) 測定用フォトダイオードの電流値



(b) 光量モニターの電流値



(c) 測定用フォトダイオードと光量モニターの電流値の比

図 4.8: 装置全体の温度を変化させた場合の測定結果。測定用フォトダイオードと光量モニターの電流値の比は、 $\pm 0.05\%$ 以下の範囲で安定していた。

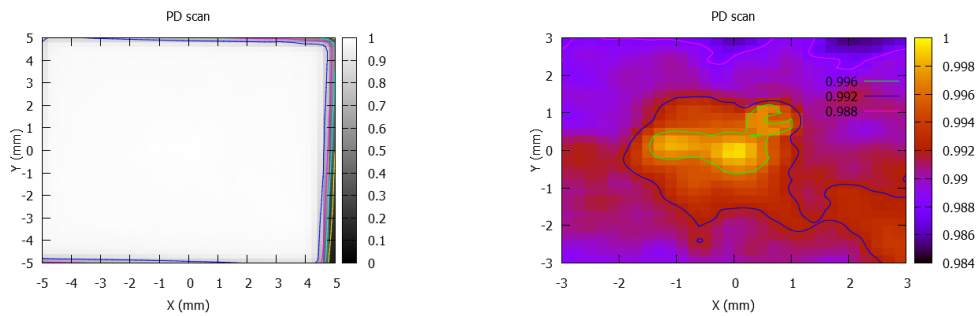
4.1.3 フォトダイオードの位置依存

受光感度の位置依存性

表 3.1 より、試作石英輻射体、Suprasil-P710 の S5, S6 面の表面精度は、それぞれ $0.9, 0.8 \mu\text{m}$ である。また、Corning7980 D の S5, S6 面の表面精度は、それぞれ $2.0, 2.0 \mu\text{m}$ である。また、表 3.9, 3.10 より、試作石英輻射体での光路変化は、Suprasil-P710 でおよそ 1 mm 、Corning7980 D でおよそ 3 mm であった。実機仕様の石英輻射体では、S5, S6 面の表面精度 $\leq 25 \mu\text{m}$ となっており、測定した試作石英輻射体と比較して 10 倍以上の値まで許容されている。光学性能測定では、各レーザー入射位置に対して、測定用フォトダイオードを手動でスキャンすることで測定精度を確保していた。しかし、光学測定システムの自動化を行う際、測定用フォトダイオードのスキャン無しでは、測定精度を維持できない可能性がある。

測定システムの自動化に向けて、測定用フォトダイオードの受光感度の位置依存性を測定した。スキャンは x, y 方向それぞれ 0.2 mm ステップで行った。測定結果を図 4.9 に示す。(a) は 10×10

mm² の範囲、(b) は (a) の中心付近 6×6 mm² の範囲を見たものである。結果、フォトダイオードは中心付近が最も感度が高く、中心 0.4×0.4 mm² の範囲内では、光学測定に十分な精度 ±0.1 % であった。



(a) フォトダイオードの位置依存。10×10 mm² の範囲を見つめたもの。右端にフォトダイオードの端が見える。 (b) フォトダイオードの位置依存。6×6 mm² の範囲を見つめたもの。

図 4.9: フォトダイオードの受光感度の位置依存性。

レーザーとフォトダイオード間距離の依存性

内部表面反射率測定の際、空气中を透過させた場合と、石英輻射体内部を透過させた場合では、レーザーが通過する距離が異なる。レーザーとフォトダイオード間距離の依存性を調べるため、レーザーとフォトダイオード間の距離 $z = (68, 92, 124, 156, 180)$ cm の時の光電流を測定した。測定結果を図 4.10 に示す。

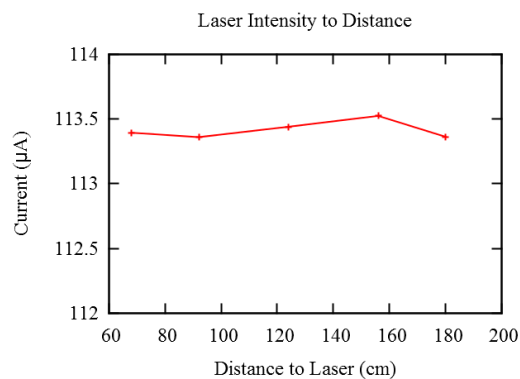


図 4.10: レーザーとフォトダイオードの距離依存性。

距離を変えた際の光電流の変化は、光学測定に十分な範囲 ±0.08 % であった。

4.1.4 測定方法

レーザーを石英輻射体の S5 または S6 面に対して垂直に入射させ、透過したレーザー光をフォトダイオードにより測定する。内部透過率は 3.2.2 節と同様に、式 3.1 から求めることができる。

測定用フォトダイオードの位置出し

測定用フォトダイオードには、図 4.9 で示したような受光感度の面依存性がある。また、レーザーの光路は、石英輻射体表面のゆがみの影響を受けて変化する。そのため、常にフォトダイオードの同じ位置でレーザー光を測定するように、測定点毎に測定用フォトダイオードの位置出しを行った。フォトダイオードの位置出し方法の模式図 4.11 に示す。スキャンは x, y 方向共に 0.1 mm ステップで行う。

- ① フォトダイオードを $-y$ 方向にスキャンし、レーザー光を測定する。
- ② 光電流の値が 1/2 以下になるまでスキャンする。この位置をフォトダイオードの上端とする。元の位置から動かした距離を y_1 とする。
- ③ 元の位置に戻し、フォトダイオードを $+y$ 方向にスキャンし、レーザー光を測定する。
- ④ 光電流の値が 1/2 以下になるまでスキャンする。この位置をフォトダイオードの下端とする。元の位置から動かした距離を y_2 とする。

x 方向にも同じ方法でスキャンを行い、

元の位置から y 方向に $((y_1+y_2)/2)-y_1$ 、 x 方向に $((x_1+x_2)/2)-x_1$ 動かした位置を、測定位置とする。この位置出しにより、レーザーの光路の変化によらず、常にフォトダイオード中心 $0.4 \times 0.4 \text{ mm}^2$ の範囲内で測定を行う。

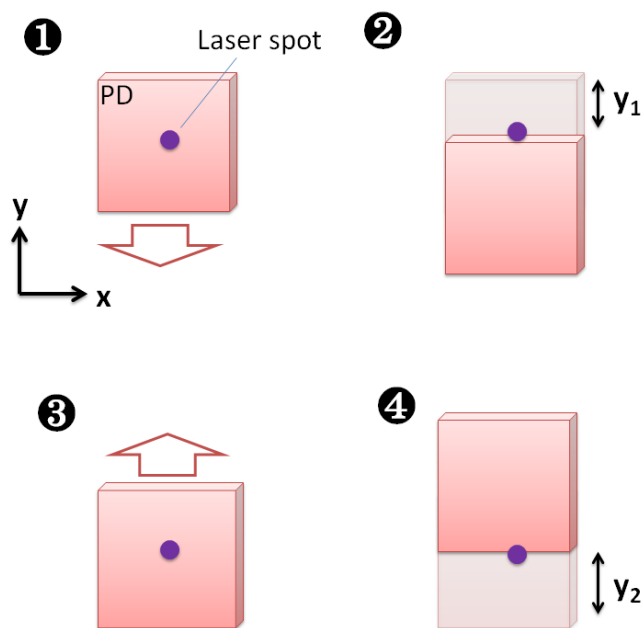


図 4.11: フォトダイオードの位置出し方法の模式図。光電流の値を利用し、フォトダイオードの端にレーザー光が当たる位置まで動かす。そこから、レーザー光に対するフォトダイオードの中心位置を計算する。

4.1.5 石英ブロックの内部透過率測定

前節までで構築した測定システムと、測定方法のテストとして、石英ブロックの内部透過率測定を行った。

石英ブロックの仕様

石英ブロックの仕様を表 4.1 に、面の定義を図 4.12 に、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。

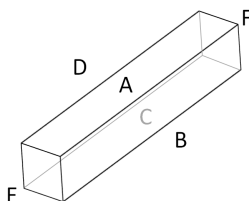


図 4.12: 石英ブロックの面の定義。

硝材		Suprasil-P710
サイズ (mm)	長さ	50.005
	幅	399.9
	厚さ	49.995
面精度 (μm) (peak to valley)	A-D	0.25
	E	0.085
	F	0.040
直角度 (分角)		0.45
面粗さ (nm rms)		0.5

表 4.1: 石英ブロックの仕様

測定方法

図 4.13 に石英ブロック内部透過率測定の設定アップの模式図、4.14 に写真を示す。レーザーを石英ブロックの E 面から垂直に入射させ、内部を透過したレーザー光 I_1 を測定する。また、空气中を透過させたレーザー光 I_0 を測定し、内部透過率を式 (3.1) から求める。

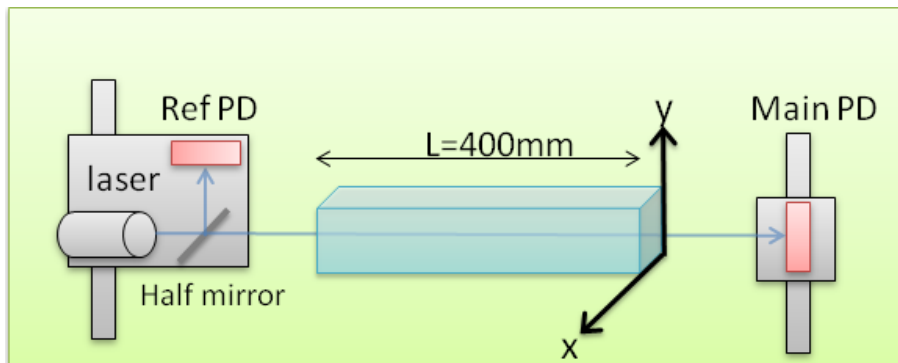


図 4.13: 石英ブロック内部透過率測定の設定アップの模式図。

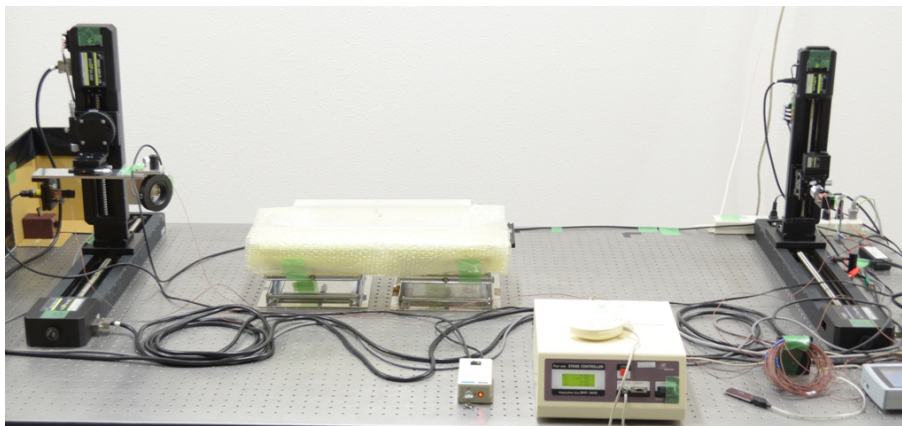


図 4.14: 石英ブロック内部透過率測定の設定アップの写真。

内部透過率の位置依存性を見るために、異なる入射位置に対して測定を行った。図 4.15 のようにレーザー入射方向から見た x - y 軸を定義する。 $x = (4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46)$ mm、 $y = (4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46)$ mm の全ての組み合わせ、計 64 点に対し測定を行った。4.1.4 節で述べた手法を用いて、測定点毎に測定用フォトダイオードの位置出しを行い、常にフォトダイオードの中心付近にレーザー光が当たる様に測定を行った。

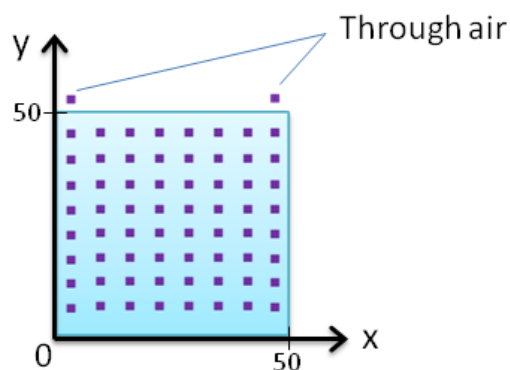


図 4.15: 石英ブロックに対するレーザー入射位置。6 mm 間隔で 8×8 点をスキャンする。 I_0 を測定するため、石英上部の 2 点で空气中を透過させる。

測定結果

図 4.16 に石英ブロックの内部透過率測定結果を示す。平均値は 99.77 %/m であった。

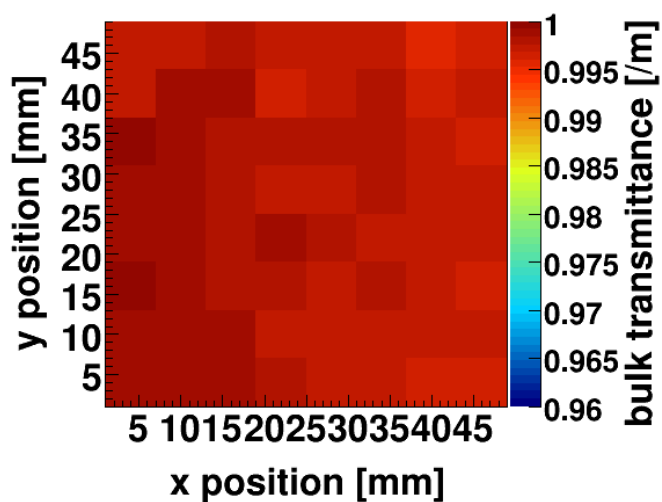


図 4.16: 石英ブロックの内部透過率測定結果。

4.2 内部表面反射率測定システム

実機石英輻射体の受け入れ検査のため、レーザーとフォトダイオードを用いた内部表面反射率の自動測定システムの構築を、名古屋大学で行った。測定装置は内部反射率の自動測定システムと同じセットアップを用いた。

4.2.1 節、4.2.2 節で測定装置と測定方法について述べる。4.2.3 節で測定装置のテストのために行った、石英ブロックの内部表面反射率の測定結果を示す。

4.2.1 測定装置

内部表面反射率の自動測定システムは、前節で述べた、内部透過率の自動測定システムとほぼ同じセットアップを用いる。偏光度を制御するため、光量モニターの前直前に、偏光素子を加える。レーザーの光軸に対し、レーザーと偏光素子を共に回転させることで、石英表面に対する偏光度を調整する。

4.2.2 測定方法

石英輻射体の S5 または S6 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。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する。内部表面反射率は 3.2.3 節と同様に、式 3.2 から求めることができる。 R_0 と R_1 に対しては、フレネルの式による計算値を用いる。3.2.3 節とは異なり、レーザーの偏光度は、レーザーの光軸に対し、偏光素子を回転させることで、石英輻射体表面に対し、S または P 偏光にする。レーザーが石英輻射体内部表面で反射する際、肉眼で微小な散乱光が確認できるため、 N は目視で確認する。

4.2.3 石英ブロックの内部表面反射率測定

測定方法のテストとして、4.1.5 節と同じ石英ブロックの内部表面反射率測定を行った。

測定方法

図 4.17 に石英ブロック内部表面反射率測定のセットアップの模式図、図 4.18 に写真を示す。レーザーを石英ブロックの E 面から角度を付けて入射させ、内部表面で反射したレーザー光 I_1 を測定した。実機石英輻射体の測定とは異なり、水平方向に角度を付けて測定を行った。また、空気中を透過させたレーザー光 I_0 を測定し、内部表面反射率を式 (3.2) から求めた。図 4.19 にレーザー付近のセットアップの写真を示す。レーザーと光量モニターの間、偏光素子として偏光ビームスプリッターを入れた。偏光ビームスプリッターで分割されたレーザー光は、測定に使用しない。レーザーと偏光ビームスプリッター、および光量モニターは、アルミ製のベースプレートを介してゴニオステージに固定した。

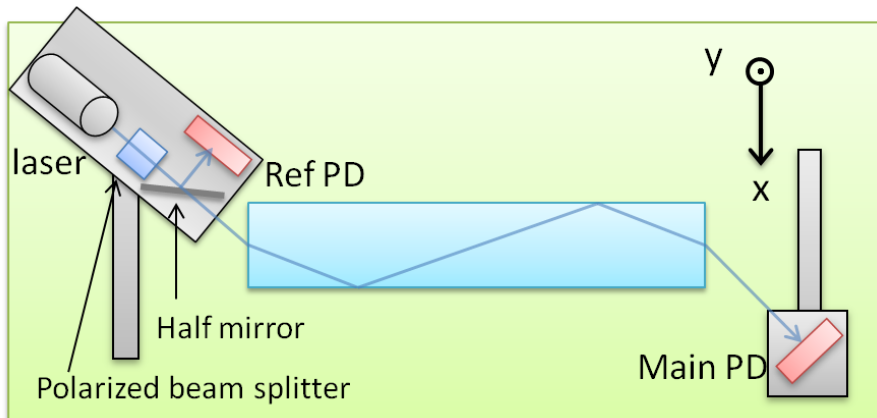


図 4.17: 石英ブロック内部表面反射率測定の設定アップの模式図。

c v

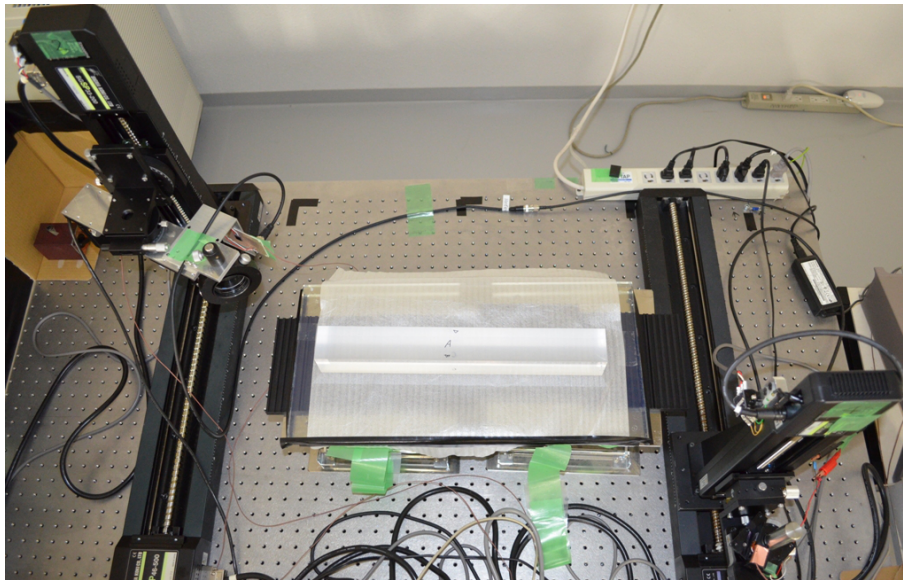


図 4.18: 石英ブロック内部透過率測定の設定アップの写真。

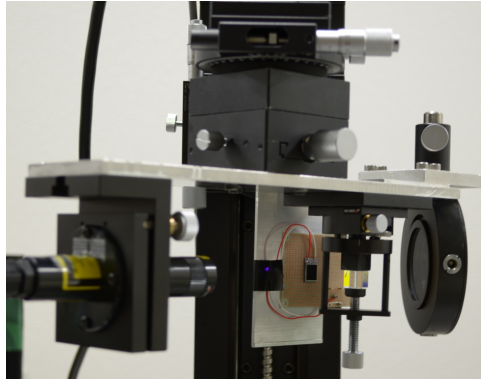


図 4.19: レーザーと光量モニター。偏光素子として偏光ビームスプリッターを用いた。

測定前の準備として、偏光度の調節を行った。レーザーをブリュースター角に近い 56° で石英ブロックに入射させ、ゴニオステージを調節することで、ベースプレートをレーザーの光軸で回転させ、光電流が最大になる位置に調節した。これにより、石英ブロックの表面に対し、レーザーはほぼ P 偏光となる。偏光度を確認するため、石英ブロック表面で反射したレーザー光をフォトダイオードで測定した。測定結果より、P 偏光 99.96 % と見積もった。

内部表面反射率の位置依存性を見るために、異なる入射位置に対して測定を行った。図 4.20 のようにレーザー入射方向から見た x-y 軸を定義する。x = (4, 7, 10, 13, 16, 19) mm、y = (9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39) mm の全ての組み合わせ、計 66 点に対し測定を行った。

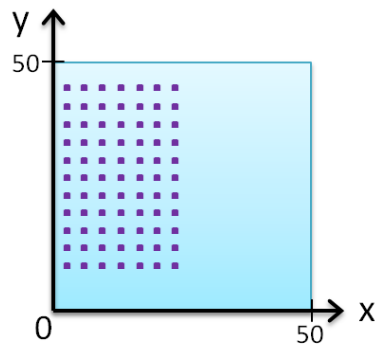


図 4.20: 石英ブロックに対するレーザー入射位置。3 mm 間隔で 6×11 点をスキャンする。

測定結果

図 4.21 に石英ブロックの内部表面反射率測定結果を示す。平均値は 99.94 %/m であった。

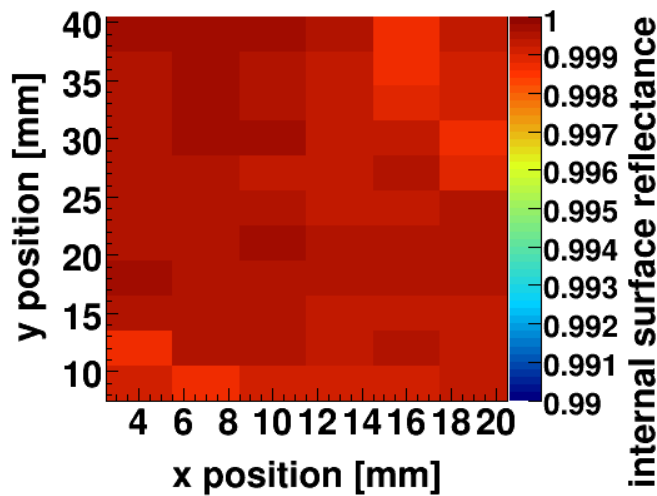


図 4.21: 石英ブロックの内部表面反射率測定結果。

4.3 欠け撮影システム

実機石英輻射体の受け入れ検査のため、石英輻射体表面の欠けを撮影する装置を構築し、画像解析により、面積を算出する手法を確立した。石英輻射体の様な透明体表面の欠けの撮影のため、同軸落射照明を導入した。これにより、画像解析しやすい高コントラスト画像が得られた。本研究では、名古屋大学にて、テスト用石英の欠けを撮影するテストベンチを構築し、撮影システムのテストを行った。4.3.1 節で撮影装置について述べる。4.3.2 節で、撮影システムのセットアップと、撮影方法について述べる。4.3.3 節で、テストベンチでのテスト用石英に行った、欠けの撮影、画像解析、欠けの面積の算出の結果を述べる。

4.3.1 撮影装置

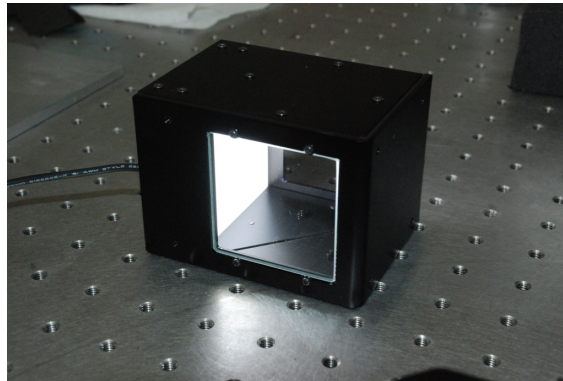
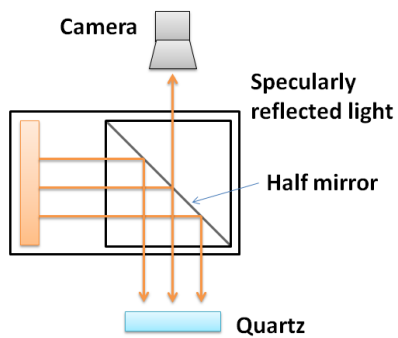
カメラ

石英輻射体表面の欠けを撮影するため、市販のカメラ (D5100 ニコン) を用いた。

同軸落射照明

石英輻射体の様な透明体表面の欠けの撮影のため、同軸落射照明 (TCA50-70x95WD-4 アイテックシステム²) を用いた。図 4.22 に模式図と写真を載せる。光源からの均一な拡散光が、内部のに設けられたハーフミラーにより、カメラの軸と同じ方向からの照明となる。石英表面の平坦な部分では、照明が正反射して明るく写る。石英表面に欠けがあると、反射光がカメラの軸からずれるため、その部分が暗く写る。これにより、コントラストが高く、欠けの有無が判別しやすい画像が得られる。

²<http://www.aitecsystem.co.jp/>



(a) 同軸落射照明の模式図。石英表面の平坦な部分で正反射した光が、カメラに映し出される。

(b) 同軸落射照明の写真。光源は白色 LED。

図 4.22: 同軸落射照明。

ドットグリッド

石英輻射体を撮影した際、画像から欠けの面積を算出するためのリファレンスが必要となる。画像のピクセルサイズを実空間での大きさに変換するため、ドットグリッド (Edmund Optics³) を用いた。写真を図 4.23 に、仕様を表 4.2 に示す。ドットグリッドは、青板ガラス基板にクロム蒸着でドットパターンを施した、撮像系キャリブレーション用の図表である。欠けの面積を求めるリファレンスとして、十分な精度を持つ。

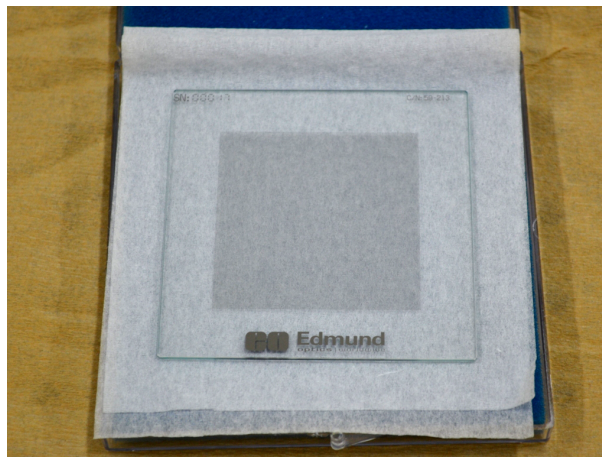


図 4.23: ドットグリッド。

³<http://www.edmundoptics.com/>

パターンエリア (mm)	正方形 50×50
ドット径 (mm)	0.125±0.002
隣接するドット中心間距離 (mm)	0.250±0.001

表 4.2: ドットグリッドの仕様

4.3.2 撮影方法

撮影システムの模式図を図 4.24 に示す。可動ステージの上に、ジグに載せたカメラと同軸落射照明を設置する。可動ステージを石英輻射体と平行に動かし、石英輻射体表面の欠けを撮影する。可動ステージとカメラは、PC から操作する。

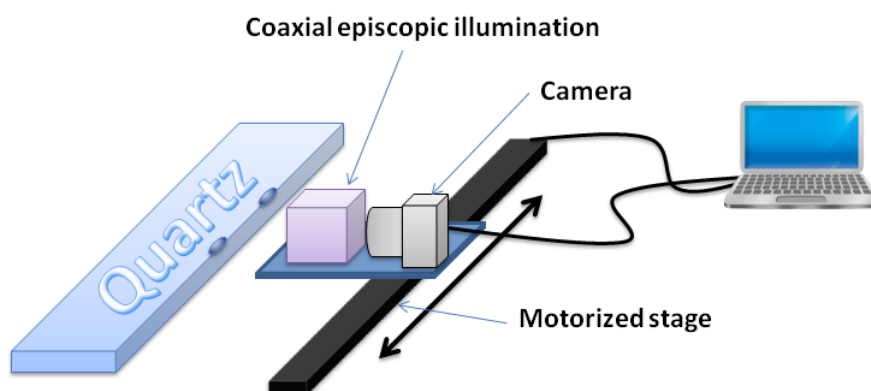


図 4.24: 撮影システムの模式図。

4.3.3 テスト用石英に対する欠けの判別と測定

本研究では撮影システムのテストベンチを名古屋大学にて構築し、テスト用石英の表面の欠けの撮影を行った。撮影した画像の2値化処理を行い、2値化画像から、欠けの判別、面積測定を行った。以下で、テストベンチのセットアップ、テスト用石英表面の欠けの撮影と、ドットグリッドの撮影、撮影した画像に対する処理、2つの欠けに対する評価について説明する。

欠けの撮影テストベンチ

構築したテストベンチの写真を図 4.25 に載せた。手前からカメラ、同軸落射照明が可動ステージ上に固定した。

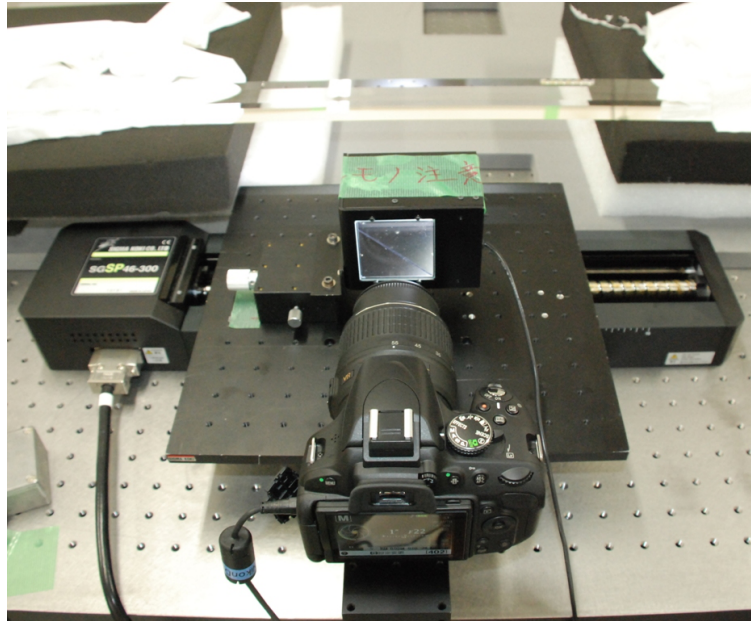


図 4.25: 欠けの撮影テストベンチ

テスト用石英表面の欠けの撮影

テストベンチを用いて、テスト用石英表面の欠けを撮影した画像を図 4.26 に載せた。テスト用石英は、実機と同じ厚さ 20 mm だが、面取りはされていない。同軸落射照明によって、石英表面の平坦な部分は一様に白く、欠けのある部分が暗い、コントラストの高い画像が得られた。

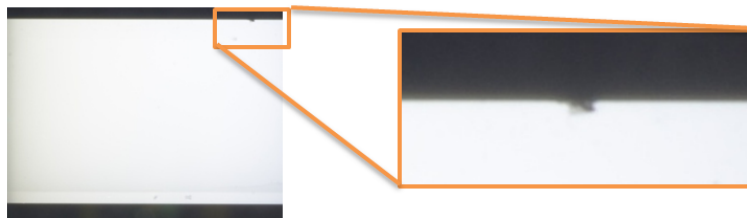


図 4.26: テスト用石英表面の欠けを撮影した写真。右は欠けの部分拡大したもの。石英表面の平坦な部分は一様に白く、欠けのある部分と背景が黒く写る。

ドットグリッドの撮影

画像から欠けの面積を算出するため、リファレンスとしてドットグリッドの撮影を行った。テスト用石英表面に保護シートを貼り、その上からドットグリッドを貼りつけた。撮影したドットグリッドの写真を図 4.27 に載せる。この画像から、1 ピクセルのサイズを求め、1 ピクセルの長さ = $25.3 \mu\text{m}$ となった。この結果から、図 4.26 で示した欠けの幅は約 0.24 mm、長さ約 0.55 mm だと計算された。実機石英輻射体では面取りがあるため、想定される欠けの最小幅は 0.20 mm である。図 4.26 の欠けが、実機で想定される最小の幅に近いものであることが分かった。



図 4.27: 撮影したドットグリッドの画像。

画像の 2 値化処理

得られた画像 (図 4.26) に対し、2 値化処理を行った。画像処理は OpenCV⁴を用いて行った。画像の各ピクセルは、明るさに相当する輝度値情報を持つ。輝度は 0–255 の 256 段階の値を持ち、0 が黒、255 が白である。2 値化処理は、しきい値を設定し、しきい値以上の輝度を持つピクセルを白に、それ以外を黒に変換する。石英輻射体の欠けを撮影した画像に対して、適切なしきい値を設定することで、石英表面の平坦な部分は白に、それ以外の部分を黒に変換することができる。図 4.28 に、しきい値 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 の 7 段階で 2 値化した画像を並べた。画像は欠けの部分を拡大したものである。220 以上のしきい値で 2 値化を行うと、石英表面の平坦な部分も黒に変換されるため、220 を上限とした。

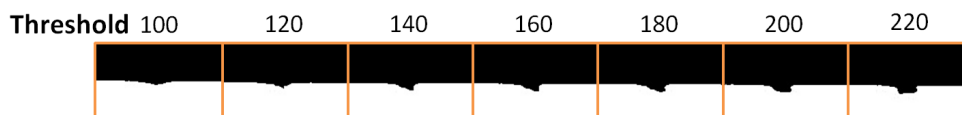
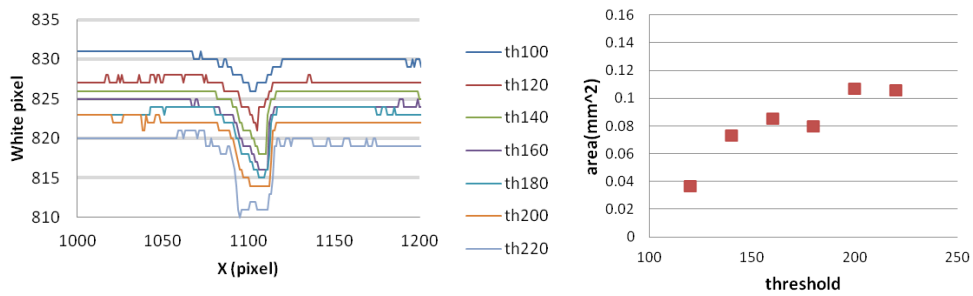


図 4.28: しきい値の違いによる 2 値化画像の変化

欠けの面積算出

しきい値 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 の 7 段階で 2 値化した画像に対し、縦一列毎に白ピクセル数を算出し、横方向にスキャンした。スキャンした結果を用いて、欠けの面積を算出した。図 4.29 に白ピクセル数のスキャン結果と、欠けの面積の算出結果を示す。この欠けに対しては、横方向のピクセル $x = 1060-1119$ の 60 ピクセル部分に欠けが含まれるとし、[欠けの無い部分の縦一列の平均白ピクセル数]-[$x = 1060-1119$ の白ピクセル] を求め、 $x = 1060-1119$ で積分した。積分した値に、ドットグリッドから求めた実空間でのピクセルの面積を掛け合わせ、欠けの面積を算出した。しきい値が高くなるにつれて、算出される欠けの面積が大きくなっていく。これは、欠けの部分の輝度が石英表面の平坦な部分から、連続的に変化しているためである。

⁴<http://opencv.org/>



(a) それぞれのしきい値における、横方向白ピクセル数のスキャン。 (b) それぞれのしきい値における、欠けの面積。

図 4.29: しきい値と欠けの面積の関係

2 値化処理における適切なしきい値を見積もるため、顕微鏡で同じ欠けを撮影し、測定を行った。4.30 に顕微鏡で撮影した欠けの画像を示す。この画像から、肉眼で欠けの形状を見積もり、欠けの面積をおよそ 0.15 mm^2 と算出した。



図 4.30: 顕微鏡で撮影した欠け。肉眼では欠けの形状が分かる。欠けの一部も明るく写っているため、画像処理には向かない。

第5章 結論

現在、全16機のTOPカウンター量産のための石英輻射体の製造が始まっている。石英輻射体に求められる光学性能は、

- 内部透過率: $\geq 98.5\%$ /m
- 内部表面反射率: $\geq 99.90\%$
- 石英表面の欠け: 面積の和が 25 mm^2 以下

である。そこで、量産された石英輻射体に対する受け入れ検査として、内部透過率、内部表面反射率、石英表面の欠けの測定を行う。

また、TOPカウンターを構成するためには、2つの石英輻射体とフォーカシングミラーを接着する必要がある。接着に求められる相対位置、相対角度は、

- 相対角度: $\leq 0.2\text{ mrad}$
- 相対位置: $\leq 100\text{ }\mu\text{m}$

である。本研究では、レーザーとフォトダイオードを用いた光学測定システムを開発し、試作石英輻射体の内部透過率、内部表面反射率の測定を行った。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、実機サイズの試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着を成功させた。さらに、実機石英輻射体量産に対応すべく、光学測定システムの自動化を行った。石英輻射体表面の欠けを評価する撮影システムを構築した。それぞれについて以下でまとめを述べる。

試作石英輻射体の光学性能評価

レーザーとフォトダイオードを用いた光学測定システムを開発した。光量モニターを導入し、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。レーザーと CCD カメラを同時に動かしてスキャンすることで、 $\pm 0.1\text{ mm}$ の精度で光路変化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、2つの試作石英輻射体、Suprasil-P710、Corning7980 0D について、内部透過率、内部表面反射率、光路変化の測定を行った。その結果を以下に示す。

	内部透過率 (%/m)	内部表面反射率 (%)	光路変化 (mm)
Surrasil-P710	99.44 ± 0.17	$99.92^{+0.02}_{-0.01} - 99.98^{+0.02}_{-0.01}$	0.3
Corning7980 0D	99.35 ± 0.17	$99.92 \pm 0.01 - 99.97^{+0.02}_{-0.01}$	0.1

表 5.1: 試作石英輻射体の光学性能評価

試作石英輻射体と試作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、接着システムを構築した。マイクロメータヘッドで相対角度をを調節し、オートコリメータと平面鏡を用いて測定するシステムを構築した。また、プランジャーとポリアセタールヘッドで相対位置を調節し、レーザー変位計を用いて測定するシステムを構築し

た。これらにより、石英輻射体とフォーカシングミラーの相対角度を ± 0.01 mrad、相対位置を ± 5 μm の精度で制御可能なシステムが完成した。

剛性の高い厚さ 20 mm のアルミ板を使用することで、石英輻射体やフォーカシングミラーのたわみを $\sim \pm 10$ μm 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、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設計した。

ディスペンサーを用いて接着剤の吐出速度を制御した。このシステムを用いて、2つの試作石英輻射体と試作フォーカシングミラーの接着を行った。その結果、

- ・ 試作石英輻射体 (Suprasil-P710) - 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) 間

相対角度：0.03–0.10 mrad、相対位置：40–90 μm

- ・ 試作石英輻射体 (Corning7980 0D) - 試作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、TOP カウンターの実機生産に必要な精度で接着が可能な、接着システム・手法を実証した。

実機石英輻射体量産における光学測定システム

石英輻射体量産に対応するため、光学測定システムの自動化を行った。レーザーの光路は、石英輻射体表面のゆがみの影響を受けて変化する。試作石英輻射体での光路変化測定から、実機石英輻射体では、 $O(10)$ mm の光路変化が予想される。光路変化に対応するため、フォトダイオードの受光感度の位置依存性を測定した。その結果を基に、各レーザー入射位置に対しフォトダイオードをスキャンし、位置出しを行う手法を導入することで、自動化を実現した。また、光量の測定精度 ± 0.1 % を達成した。このシステムを用いた測定で、石英ブロックの内部透過率を測定した結果、平均 99.77 %/m であった。内部表面反射率測定においても、同じ測定システムと、フォトダイオードの位置出し手法を用い、平均 99.94 %/m を得た。

石英輻射体表面の欠けの面積を算出するため、同軸落射照明を用いた撮影系を構築した。テストベンチでのテスト用石英の撮影から、画像処理に適した、コントラストの高い画像が得られることが実証された。また、撮影画像を解析し、実機で想定される最小の幅に近い欠けが、十分に判別可能な画像が得られることが分かった。テスト用石英表面の欠けに対し、撮影と画像の処理を行った結果、およそ 0.05 mm² の精度で欠け面積を算出できることを実証した。

よって、実機石英輻射体の量産における内部透過率、内部表面反射率の自動測定システムが完成した。また、石英輻射体表面の欠けを評価するための撮影システム、画像解析の準備が整った。

以上より、実機石英輻射体の受け入れ検査に必要な測定項目、TOP カウンターを構成する光学素子製作の手順の全てを構築できた。

謝辞

本研究を行うにあたり、同研究室のスタッフや学生の皆様に様々な場面で支えていただき、感謝致します。研究の様々な場面で飯嶋徹教授、戸本誠准教授、居波賢二准教授、早坂圭司准教授、鈴木一仁特任助教、堀井泰之特任助教、松岡広大研究員、早川知克研究員、加藤悠司研究員をはじめとする研究室の皆様からは様々な指導や助言を頂きました。深く感謝致します。特に指導教官である居波准教授には、本研究の遂行にあたって終始適切なお指導をいただきました。また、堀井特任助教には研究をはじめとして、修士論文をまとめるにあたり数多くの丁寧なお指導、助言や助力を頂きました。本研究の中で、試作石英輻射体の性能評価や接着を進めるにあたり、共同実験者である古賀 裕介氏とは特に多くの議論を交わし、多くの刺激と示唆を得ることができました。また、測定装置の自動化に関し、シンシナティ大学の Boqun Wang 研究員に多大な助力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. Kurokawa and E. Kikutani, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **499**, 1 (2003), and other papers included in this volume.
- [2] A. Abashian *et al.* (Belle Collaboration), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **479**, 117 (2002).
- [3] K. Abe *et al.*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **87**, 091802, (2001).
- [4] A. G. Akeroyd *et al.*, KEK Report 2009–12, arXiv:1002.5012 (2010).
- [5] S.-W. Lin *et al.* (Belle Collaboration), Nature, **452**, (2008), 332.
- [6] Y.-T. Duh *et al.*, Belle Preprint 2012–22, KEK Preprint 2012–19, arXiv:1210.1348 (2012).
- [7] T. Abe *et al.*, KEK Report 2010–1, arXiv:1011.0352 (2010).
- [8] 古賀裕介 名古屋大学大学院理学研究科 修士論文「Belle II 実験 TOP カウンター実機の光学性能評価」 (2012)