

J-PARC KOTO 実験 CsI カロリメータのための
光学接続シリコンの製作と長期安定性の評価

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻
山中卓研究室 前期博士課程 2 年

柳田 陽子

February 6, 2012

概要

J-PARC KOTO 実験は、中性 K 中間子の稀崩壊探査による新たな物理の探査を目指している。要となる、 γ 線を観測するカロリメータは約 2700 本の CsI 結晶と、そのそれぞれに取り付けられた光電子増倍管などから成る。光電子増倍管と CsI 結晶の間を光学接続する透明なシリコンを製作した。また、このシリコンの透過率や接続性の長期安定性について加熱促進試験をおこない、製作から 6 年後でもシリコンの透過率は約 90 %を保ち、KOTO 実験の使用に耐えることがわかった。

目次

第1章 序論	6
1.1 KOTO 実験	6
1.2 CsI Calorimeter	8
1.3 本研究の目的と概要	9
第2章 CsI 結晶と PMT の光接続	11
第3章 シリコンクッキー	13
3.1 製作	13
3.2 選定	20
3.3 仕様	21
3.4 シリコンの時間経過による性質の変化	22
3.5 真空での接続	22
第4章 シリコンの透過率と経年劣化調査	24
4.1 シリコンクッキーの透過率	24
4.1.1 光量の測定方法	24
4.1.2 シリコンクッキーの透過率の定義	24
4.1.3 透過率測定の結果	25
4.2 加熱促進性能評価の方法	27
4.3 サンプルの作成	27
4.4 硬さの測定	28
4.4.1 測定方法	28
4.4.2 サンプルを製作した元のシリコンの板の違い	30
4.4.3 硬さ測定の見積り	32
4.5 アレニウスプロット	33
4.6 結果	33
4.6.1 全てのサンプルの硬さの検証	33
4.6.2 KOTO 実験での使用に向けた見積り	35
4.7 まとめ	36
第5章 課題・考察と展望	37

目次

1.1	CKM行列によるユニタリティ三角形と、その大きさを測定するK中間子の崩壊イベント	6
1.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ダイアグラム	7
1.3	KOTO実験の検出器。 K_L は左から右方向へ飛来する。図には $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のイベント例を示す。	8
1.4	CsIカロリメータ。ビーム軸に対し対称となる円形で、内側を25mm角、外側を50mm角、奥行き500mmのCsI結晶が並ぶ。	9
2.1	PMT holder。結晶の下流側の面に設置。直径1886mm、厚さ60mm。PMTを挿入する丸い穴と、外縁にはVETO検出器のファイバーを取り出す穴がある。	12
2.2	25mm角のCsI結晶とそれに取り付けるPMT等。これが縦と横に48個並ぶ。50mm角の結晶も同様。	12
3.1	シリコンの液を混合し攪拌したのち、デシケーターに入れて脱泡している様子。	15
3.2	クッキーの型となるガラス板2枚の固定方法。黒い枠はガラス板、青い枠はスペーサーを表し、黄色で示した粘着テープでこれらを固定する。	15
3.3	脱泡したのち、ガラス板の隙間にシリコンの混合液を注ぐ様子。テスト用の製作のため、ガラス板は10cm角と小さいものである。	16
3.4	ガラス板の隙間にシリコンの混合液を注ぐ様子。小さな泡は傾きを持って置いていけば徐々に上昇して集まり、全体にはほぼ残らない。	16
3.5	恒温槽から取り出し、ラップフィルムをはがした後の様子。	17
3.6	50mm角の結晶用のクッキーのカッター(左)と25mm角の結晶用のクッキーのカッター(右)。50mm角の結晶用のクッキーのカッターは、KTeV実験でクッキーの切りとりに製作されたもの。刃(Aven Tools 44205S)だけを取りかえて使用している。この円柱がちょうど入る穴をもつアクリル板をカッターの回転のガイドとして用いる。	18
3.7	25mm角の結晶用のクッキーを切抜く様子。	19
3.8	50mm角の結晶用のクッキー。	19

3.9	小型の真空容器を用いてシリコンクッキーの真空中での接続の様子を調査した。25mm 角の CsI 結晶用の PMT の固定方法を再現し、CsI 結晶の代わりにガラス板に対し接続した。この調査に用いたシリコンはシリコンの主剤と硬化剤の混合比が 100:5 のものであるが、混合比が異なっても生じる現象である。	23
4.1	透過率の測定方法	25
4.2	決定した仕様で製作したシリコンクッキーの透過率	26
4.3	硬さ測定の様子。上は横から見た絵、下は斜めから見た写真。フォースゲージは下の手動ステージに厚さ 3mm のアクリル板を介して固定した。ステージは粗いものと細かいものの 2 つの調節ねじがある。	29
4.4	クッキーがない場合の移動量と力の関係。土台と圧力測定器のひずみがわかる。硬さ測定の前後で測定した。	30
4.5	シリコンクッキーの加熱時間に対する硬さ。温度の条件を図の右に示す。	31
4.6	三角のマークで示した 2 枚目のシリコンプレートのそれぞれの位置での厚さの差 (単位は mm)。基準となる 0 は 5.16mm。サンプルと同様にクッキー型に切り取って測定した。	32
4.7	三角のマークで示した 2 枚目のシリコンプレートのそれぞれの位置での硬さ (単位は gf)。サンプルと同様にクッキー型に切り取って測定した。	32
4.8	硬さが 1.05kgf となる条件から得たアレニウスプロット。fitting の結果、この傾きである E/R は $(1.0 \pm 0.1) \times 10^4 [K]$ であった。	34
4.9	$\ln \Delta(\frac{t}{h}) + \frac{E}{RT}$ に対する硬さ。 $\frac{E}{R}$ はアレニウスプロットの図 4.8 に基づいて $(1.0 \pm 0.1) \times 10^4 [K]$ を用いた。温度の条件は図の右に示す。	34
4.10	150 °C で 50 時間加熱した 2 枚目のシリコンプレートからのサンプルの透過率。CsI 結晶の発光波長 310nm で透過率は 89% である。	35

表 目 次

1.1	屈折率の違いによるそれぞれの境界面での反射率。	10
3.1	クッキーの仕様と参考にした PMT などの大きさ	13
3.2	選択したシリコンの主な情報。数値はいずれもカタログ値。†ただし透過率は実測値。	20

第1章 序論

1.1 KOTO 実験

茨城県東海村、J-PARC（大強度陽子加速器施設）のハドロン実験施設で行われる KOTO 実験は、粒子と反粒子の間の対称性を破る標準理論を超える新たな物理を探るために、K 中間子の稀崩壊 ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) の探索をしている。

宇宙が誕生した瞬間には、粒子と反粒子が同数存在した。粒子と反粒子は互いに打ち消し合い、光となって消滅するが、この宇宙にはそうしてできた光だけではなく、我々を構成する粒子が数多く残存している。その原因の一つは CP 対称性が破れていることだと考えられている。ここで C は粒子と反粒子の交換、P は空間の反転である。現在実験室で観測されている CP 対称性の破れは、素粒子の標準理論に登場するカビボ・小林・益川行列 (CKM 行列) に含まれる複素成分で説明できる。CKM 行列は Wolfenstein パラメータ η, ρ, λ を用いて次のように書ける：

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

この CKM 行列を元に、そのユニタリティ条件によりユニタリティ三角形というものが描ける (図 1.1)。

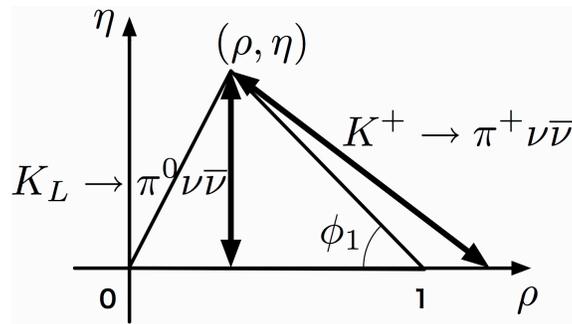


図 1.1: CKM 行列によるユニタリティ三角形と、その大きさを測定する K 中間子の崩壊イベント

標準理論ではこの図 1.1 のように三角形をなし、その面積が CP 対称性の破れの大きさに比例する。しかし、こうして標準理論から導かれた破れの大きさでは、宇宙の物質と反物質の存在比を定量的に説明できない。そのため、標準理論を超えた新しい物理による CP 対称性の破れがあるはずである。

そのような新しい物理による CP 対称性の破れが寄与する崩壊モードを用いると、この三角形の高さの測定値が他の測定値と異なる可能性がある。したがって、KOTO 実験はこのユニタリティ三角形の高さを実験により直接測ることを目指している。

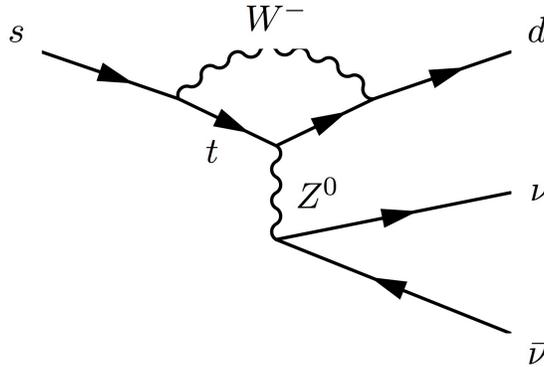


図 1.2: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{l}$ ダイアグラム

KOTO 実験は、三角形の高さを測るために、この高さ η の自乗と比例する $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{l}$ の崩壊の分岐比を測定する (図 1.2)。この崩壊を用いるメリットは 3 つある。それは、

- 崩壊分岐比と三角形の高さの比例係数は理論的不定性が小さいこと
- 標準理論からの寄与が小さいため、新しい物理があれば明確にわかること
- 標準理論から導かれる崩壊分岐比と異なれば、標準理論を超えた未知の粒子が W や t に代わってループダイアグラムを作るという新しい物理の発見に繋がること

である [1][2]。

標準理論では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{l}$ の崩壊分岐比は、現在わかっている CKM パラメータから $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ と予想されている [3]。しかし今までに $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{l}$ 崩壊の事象は見つかっておらず、高エネルギー加速器研究機構 (略称 KEK) でおこなわれた E391a 実験により、崩壊分岐比の上限が 6.7×10^{-8} (90% C.L.) とわかっているだけである [4]。これより 3 桁小さな精度で測定するためには高統計が必要であるため、KOTO 実験は K_L の数をより多く生成できる東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC にて実験をおこなう。

1.2 CsI Calorimeter

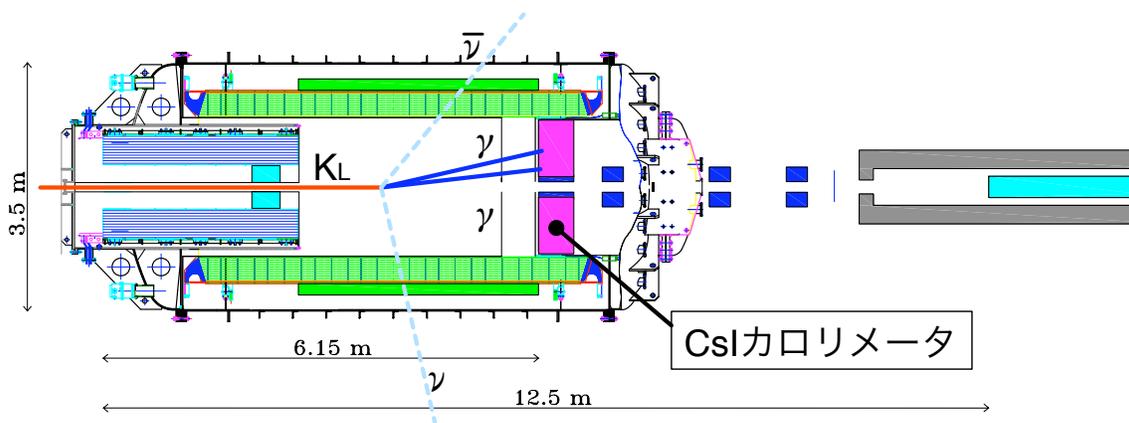


図 1.3: KOTO 実験の検出器。 K_L は左から右方向へ飛来する。図には $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のイベント例を示す。

KOTO 実験では図 1.3 に示す真空タンク内で K_L 粒子が崩壊する様子を捕らえる。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊を同定するには、生成した π^0 が崩壊してできる 2 つの γ を検出すればよい。この 2 つの γ のエネルギーと位置を測定するカロリメータには、CsI の純結晶と光電子増倍管（以下 PMT）を用いる。

CsI カロリメータの全体は、崩壊する K 中間子のビーム軸に対称とするため図 1.4 に示すように円柱形である。その円柱形には、ビームに平行に細長い CsI 結晶を敷き詰める。中心部には 2240 本の $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ の小さい結晶、外側には 476 本の $5.0 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ の大きい結晶を並べる。カロリメータの中央は多数の K 中間子や中性子ビームを通すために、空洞（ビームホール）をもうけてある。

このような円柱形のカロリメータを支えるのは内径 1906mm のシリンダーである。シリンダーの円弧と四角い CsI 結晶との間のすきまは、鉛とシンチレータで作られた検出器（外縁部 VETO 検出器）で埋める。

それぞれの CsI 結晶には反射材¹が巻かれ、結晶の端には PMT が取り付けられている。 γ が CsI 結晶と反応して発生させたシンチレーション光の光量を PMT で測定することにより、CsI 結晶に入射した元の γ のエネルギーを決定する。

ただし、シンチレーション光には、減衰時定数が 6 ns の波長 310 nm をピークとする光と、減衰時定数が 35 ns の波長 420 nm の光の 2 種類がある。時間分解能を高めるために、波長 400 nm 以上の光は PMT 表面に貼り付けた光学フィルターによって遮断し、減衰時定数の短い 310 nm をピークにもつ光のみで測定をおこなう。

¹アルミを蒸着したマイラーのフィルム。中には黒くぬられているものがある

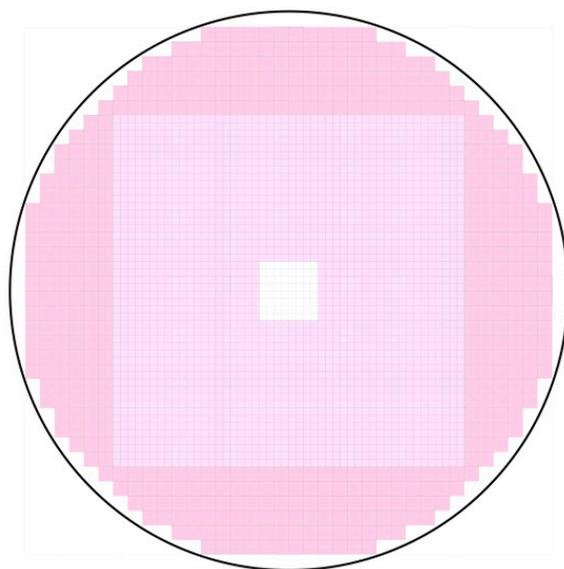


図 1.4: CsI カロリメータ。ビーム軸に対し対称となる円形で、内側を 25mm 角、外側を 50mm 角、奥行き 500mm の CsI 結晶が並ぶ。

1.3 本研究の目的と概要

γ のエネルギーを正確に測るために、CsI 結晶が出すシンチレーション光を出来るだけ多く PMT に入射させ、測定分解能を上げなければならない。そのために、CsI 結晶と PMT は光学的に接続させる必要がある。接続せずに真空中で接するだけであれば、屈折率の違いにより、CsI 結晶と真空、真空と PMT の表面で反射がおこり、読み出す光量が減る。このため、できるだけ CsI 結晶と PMT の表面をそれらの屈折率に近いもので接続し、光の反射を減らしたい。

ただし、PMT は不具合があれば取り外さなければならないため、CsI 結晶と PMT の接続に接着剤を用いることはできない。また、PMT の並んでいる密度が高いため、下流方向へ引き抜くことで容易にはずすことができなければならない。

そこで、シリコーン（シリコン樹脂）をその接続に用いる。シリコーンを用いる利点を以下に示す。

- シリコーンは紫外線に対し透明度が高いこと。
- 屈折率が CsI の屈折率に近いこと。
真空中で CsI 結晶と PMT が接する場合、垂直に入射した光がそれぞれの境界での反射によって失う反射光は全体で 15% であるのに対し、シリコーンで接続した場合は 3% と低い (表 1.1)。

- やわらかく粘性をもつシリコンを使用すれば、PMT、CsI 結晶との接続、取り外しが容易である。

表 1.1: 屈折率の違いによるそれぞれの境界面での反射率。

光が屈折率 n_1 と n_2 の物質の間を垂直に透過するとき生じる反射率を $(\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2})^2$ として計算。屈折率はそれぞれ、CsI 結晶は波長 315nm で 1.95(SAINT-GOBAIN CsI(pure) Cesium Iodide Scintillation Material による)、PMT に取り付けられた光学フィルタは波長 365nm で 1.6(Schott UG11 Glass Filter, Optical-Filters.com による)、真空は 1、シリコンは波長 589nm で 1.41 の値を用いて計算した。

	CsI 結晶	PMT の光学フィルタ	CsI から PMT のフィルタへの反射率の合算
真空	10.4%	5.3%	15.1%
シリコン	2.6%	0.4%	3%

円柱形をした PMT の先端に貼るために、丸いクッキーの形をしていることからこのうすいシリコンをクッキーと呼ぶ。CsI 結晶の発光を導くこと、接続の役目をはたすことがクッキーの目的であるため、その素材となるシリコンは以下に示す 4 つの要求を満たさなければならない。

- CsI 結晶の発する波長 310nm の光を透過すること
- 取り外し可能であること
- CsI 結晶の面と PMT の光電面に隙間なく引っ付くこと
- KOTO 実験が実験をおこなう 6 年間で性能が劣らないこと

この要求を満たすシリコンをクッキーの素材として選出し、接続性を高めるために必要な粘着力と柔軟性を調査し硬化剤の配合の割合をきめ、カロリメータに必要な約 3000 個を製作した。さらに、透過率の長期安定性を調べ、KOTO 実験がデータを取得する 6 年の間、50℃の環境でクッキーが必要な透過率を保つかどうかを調べた。

はじめに、CsI 結晶と PMT の設置と接続の課題について説明する (第 2 章)。次にそのシリコンの製作方法と原料選びについて議論し (第 3 章)、本実験に使用することにきめたシリコンの透過率について、性能評価の方法とその結果を議論したのち (第 4 章)、最後に考察をおこなう (第 5、6 章)。

第2章 CsI結晶とPMTの光接続

1.3章で述べたように、シリコンクッキーの役目はPMTとCsI結晶を接続することである。CsI結晶はシリンダーに隙間なく積み重ねられ、シリンダーと隙間埋め、そして自重によって固定されるが、PMTはそれぞれの結晶に対し中央に固定する枠組みを設けなければならない。本章では、そのPMTの設置方法を述べる。

PMTの支持には、PMTホルダーと呼ぶ鉄の一体型の固定具を用いる(図2.1)。PMTホルダーは60mm厚の炭素鋼(SS400)ででき、CsI結晶の配置に対応し、PMTを挿入する多数の穴をあけた円盤である。これはCsI結晶の下流面に接する場所にシリンダーに対し金具で固定する。

PMTホルダーを用いてPMTを固定する様子を、一つのCsI結晶に着目して図2.2に示す。PMTホルダーの穴には、地磁気や実験装置等による磁場、電場からPMTを遮蔽するパーマロイ製の円筒形の磁気シールドをはめる。パーマロイ管の内径とPMTの外径の差は、小さい結晶用で約2mm、大きい結晶用で約4mmあるが、PMTの側面にはやわらかいスペーサーとしてそれぞれに厚さの違う面ファスナーを貼り、結晶面に対しほぼ垂直にPMTをあてることができる。PMTホルダーの穴ではないわずかな面に、フックと呼んでいる細長いJの字型の針金を2つずつ、バネつきで取り付け、このフック2本を一つのPMTの下流に引っ掛けることで、PMTを上流方向へ押さえこむ。PMTの光電面側には、シリコンクッキーを取り付け、フックで押さえクッキーをやや圧縮して光電面と結晶を接続する。

このように、クッキーをPMTに貼付けてそのPMTをCsI結晶に押し当てて接続するため、クッキーの表面は平らで、押し当ててクッキーの全面がCsI結晶に接触し、その粘着力で外れないものでなければならない。そのための粘着力、硬さの選定については、この後の3.2章で述べる。

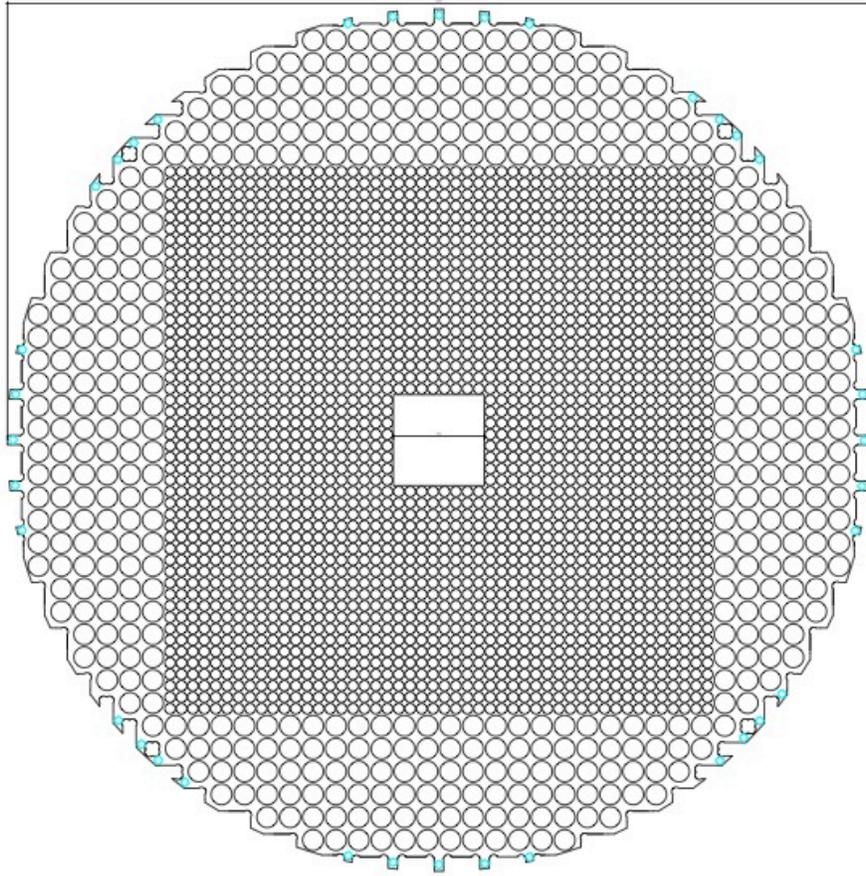


図 2.1: PMT holder。結晶の下流側の面に設置。直径 1886mm、厚さ 60mm。PMT を挿入する丸い穴と、外縁には VETO 検出器のファイバーを取り出す穴がある。

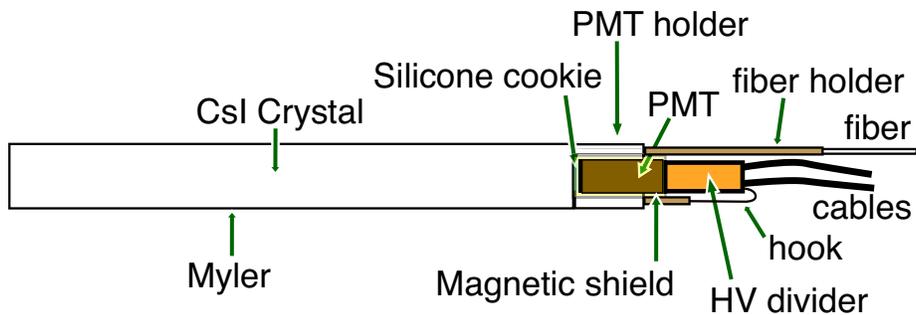


図 2.2: 25mm 角の CsI 結晶とそれに取り付ける PMT 等。これが縦と横に 48 個並ぶ。50mm 角の結晶も同様。

第3章 シリコンクッキー

この章では、熱で硬化させるタイプのシリコンを用いたクッキーの製作手順と、多数の種類がある製品の中からクッキーとして必要な特性を持つシリコンを選んだ方法、そして決定した素材から最適なクッキーを作るための仕様について述べる。

3.1 製作

25mm 角と 50mm 角の CsI 結晶用のクッキーの大きさ、硬化に必要な時間と温度等を表にまとめた。硬化条件は製品により温度と時間が異なることがある。

表 3.1: クッキーの仕様と参考にした PMT などの大きさ

	25 mm 角の結晶	50 mm 角の結晶
クッキーの直径	18 mm	36 mm
切断方法	パイプ型カッターでくり抜き	刃を回転して切断
必要数	2240 個	476 個
PMT 光電面の直径	18 mm	36 mm
PMT UV 透過 filter の直径	18 mm	37 mm
パーマロイ管の内径	22 mm	44 mm

クッキーの製作には、次の道具を用いた。

- 200mm × 200mm × 5mm のガラス板 (アズワン) … クッキーの面を平らにする
- アクリル板 (日東樹脂工業、クラレックス) … スペーサとして用い、クッキーの厚さをきめる
- 1000cc ビーカー … シリコンを量り入れ、ここで攪拌する
- ピペット … 硬化剤を取る
- 電子天秤 … 最小目盛り 0.1g

- ハンドミキサー (テスコム、THM1000) … シリコンを攪拌する
- ポリカデシケータ (アズワン、300 型-G2) … 脱泡するための容器
- 油回転真空ポンプ … 脱泡する
- 恒温槽 (SANYO、MOV-212F(U)) … 高温にして硬化させる
- プラスチックフィルム (KOKUYO VF-10 手書き用 OHP フィルム、0.055mm 厚) … クッキーの保護
- 粘着テープ (3M 透明美色) … アクリル板とガラスの接着、2 枚のガラス板の隙間のカバー、クッキー上のちりの除去

よく洗ったビーカーを電子天秤にのせ、430g 程のシリコンを入れ、その重量に対し必要な硬化剤を算出し、ピペットを用いてビーカーに硬化剤を加える。これをハンドミキサーでよく攪拌する。ビーカーの底はまざりにくいため、さらにスプーン状のものを用いて手で底からかき混ぜる。攪拌により、粘性のあるシリコンの液体に泡が入るため、デシケータに入れて真空ポンプで空気を引き、脱泡する (図 3.1)。このとき、ビーカーから泡が溢れない程度にまでポンプで引き、大気圧にもどして泡をつぶすという作業を泡が見えなくなるまで繰り返す。ポンプ引きを止めても徐々に泡が合体していきあふれることがあるため、長時間目を離さないよう注意する。

この間、シリコンを流し入れて固化させるためのガラス板の型を用意する。2 枚のガラス板の間の四隅に図 3.2 のようにスペーサを粘着テープで固定する。このスペーサーには製作するクッキーの厚さのアクリル板を用いる。シリコンを流し込む一つの側面以外のガラス板の隙間は、シリコンが漏れないよう粘着テープでふさぎ、ラップフィルムで覆う。

脱泡を終えたらビーカーをデシケータからとりだし、ガラス板の型に流し込み (図 3.3、3.4)、ラップフィルムをかぶせてとじ、100 °C に余熱していた恒温槽に 1 時間のタイマーをセットして入れる。1 時間の加熱が終わったら取り出し、自然冷却した後ガラス板からはがす (図 3.5)。はがすときは、スペーサーを外した隙間に割り箸などのガラスを痛めないものを差し込み、ゆっくり力を入れてガラスとガラスの間隔を広げ、上のガラス板を取り外す。ほこりが入らないようにすぐにプラスチックフィルムをかぶせ、このフィルムでシリコンを持ち、下のガラス板から剥がし、下面にもフィルムを貼る。フィルムとシリコンにしわがなく気泡がはいらなくなるように貼り直しをし、シート状のシリコンを完成させる。



図 3.1: シリコンの液を混合し攪拌したのち、デシケーターに入れて脱泡をしている様子。

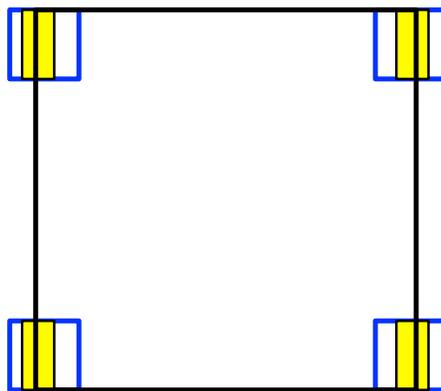


図 3.2: クッキーの型となるガラス板 2 枚の固定方法。黒い枠はガラス板、青い枠はスペーサーを表し、黄色で示した粘着テープでこれらを固定する。

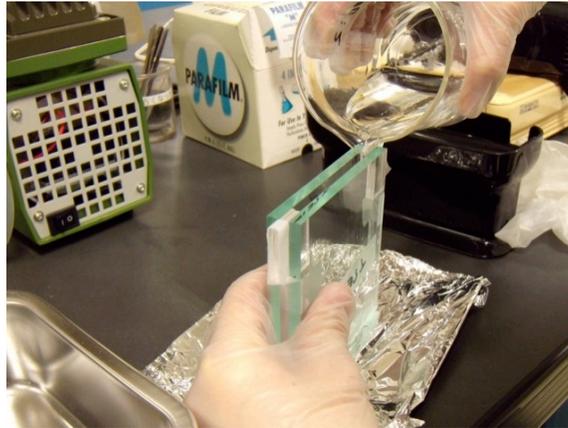


図 3.3: 脱泡したのち、ガラス板の隙間にシリコンの混合液を注ぐ様子。テスト用の製作のため、ガラス板は10cm角と小さいものである。

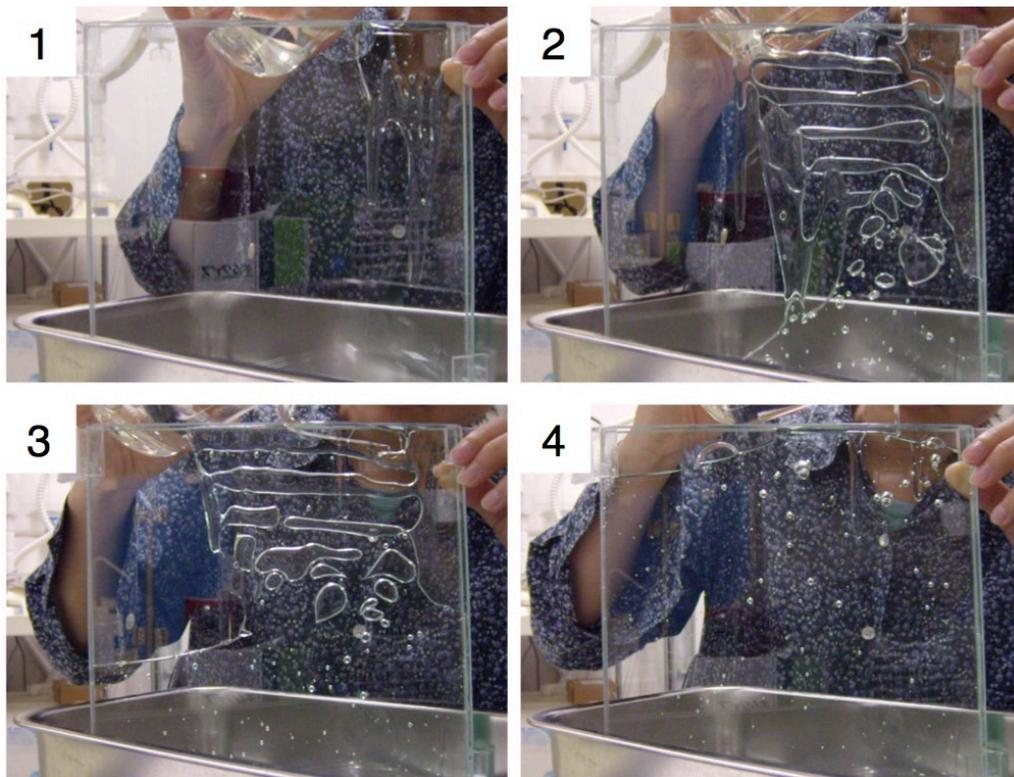


図 3.4: ガラス板の隙間にシリコンの混合液を注ぐ様子。小さな泡は傾きを持って置いていれば徐々に上昇して集まり、全体にはほぼ残らない。



図 3.5: 恒温槽から取り出し、ラップフィルムをはがした後の様子。

25mm 角の結晶用のクッキー

200mm×200mm のシリコンシート 1 枚から 25mm 角の結晶用のクッキーが 100 個取れる。表面のフィルムの一方を外し、硬くない平らな台の上のせクッキーカッターで切り出す (図 3.7)。クッキーカッター (図 3.6 右) は内径 18mm、長さ 10cm のステンレスパイプの先端を外側から削り尖らせたもので、これをシリコンシートに垂直に立て、手で押し切る。切り出したクッキーの切断面に付着している切りくずは粘着テープで取り除く。これは CsI 結晶や PMT に接続する面にくずが移ると気泡が入り透過率を悪くするためである。切抜いたクッキーは、未使用で一度も触れておらず塵のついていないプラスチックフィルムに順々に乗せる。切抜きが終わったら上面もフィルムをかぶせて閉じ、使用できる状態となる。100 個くりぬくと、5 個程度の失敗が発生する。よくあるのは、くりぬく型の位置を誤り端が欠けたクッキーとなる場合や、型を押す力の方向が鉛直とならずに斜めに切り取る場合である。このような失敗をふせぐためには、端からやや離れた位置にカッターを定め、カッターの真上に肩を置き手のひらでゆっくり押すようにする。

50mm 角の結晶用のクッキー

200mm×200mm のシリコンシート 1 枚から 50mm 角の結晶用のクッキーが 20 個取れる。ガラス板からシリコンを取り外したら、プラスチックフィルムに気泡をいれずに置き、上面もフィルムでカバーする。それを、刃のついた円柱のカッター (図 3.6 左) でフィルムごと切抜く (図 3.8)。このカッターは KTeV 実験¹でのクッキーを作成したものを利用している。くりぬくとき、カッターの回転によってシリコー

¹アメリカ、フェルミ国立研究所 (FNAL) でかつて行われた実験。

ンプレートを横にずらしてしまい、円形から外れることをふせぐため、プレートをしっかり押さえなければならない。

作成時間例

- 6枚のシリコンプレートを一人で作成する場合、作業時間は約6時間である。
- 量る、脱泡、ガラス板の用意 … 2時間
- ガラス板に入れる … 1時間
- 恒温槽で硬化 … 1時間
- はがして切抜き (25mm 角用、50mm 角用とも) … 2時間

これを合計8回、すなわち約50時間で必要な全てのクッキーができる。



図 3.6: 50mm 角の結晶用のクッキーのカッター (左) と 25mm 角の結晶用のクッキーのカッター (右)。50mm 角の結晶用のクッキーのカッターは、KTeV 実験でクッキーの切りとりに製作されたもの。刃 (Aven Tools 44205S) だけを取りかえて使用している。この円柱がちょうど入る穴をもつアクリル板をカッターの回転のガイドとして用いる。



図 3.7: 25mm 角の結晶用のクッキーを切抜く様子。



図 3.8: 50mm 角の結晶用のクッキー。

3.2 選定

はじめに、光検出器として最も重要であるのが透過率である。カロリメータからの要求として、クッキーの波長 310nm での透過率は 90%程度でなければならない。表 3.2 に示す調査したシリコンはいずれも 95%を超えている。この透過率の測定については 4.1 章で詳しく述べる。

次に接続の観点から硬さが 35 (デュロメータタイプ A²による値) より低いものが次の 3.3 章の考察により必要である。硬化剤の配分でより柔らかいものが可能であるため、35 以上のものでも調整して硬さ 35 以下にすることができる。

製作時に破損しないための要求として、円形に切断する際に崩れないこと、板から取り外す際の曲げに対しちぎれず耐えるための引張り強さ³が大きいものがよい。他に調査した KE-103 (信越化学社製) は引張り強さが 0.2MPa と他に比べ弱く、実際に円形に切断するとき形がくずれ、製作が困難であった。以上の試験と考察をもとに選んだ TSE3032、RTV615、XE14-C2042 (いずれも Momentive Performance Materials 社製) を表 3.2 に示す。このうち、TSE3032 は価格が他より低く入手しやすいことから、これに決定した。

表 3.2: 選択したシリコンの主な情報。数値はいずれもカタログ値。†ただし透過率は実測値。

	TSE3032	RTV615	XE14-C2042
成分	2成分	2成分	2成分
混合比 (主剤:硬化剤、質量比)	100:10	100:10	100:100
透過率†	95%	95%	95%
屈折率	1.406	1.406	1.41
硬さ (タイプ A)	35	44	43
引張り強さ (MPa)	4.5	6.3	6.0
切断時伸び (%)	210	120	170
硬化条件 (°C/h)	100/1	100/1	150/1
熱伝導率 (W/m・K)[cal/(cm・s・°C)]	0.17[4.1×10 ⁻⁴]	—	—

²ゴムの硬さ試験に関する ISO 規格に定められた、硬さの測定器具。

³引張り強さとは試料を引き伸ばして切断したときの応力のこと。切断時伸びとは切断時に伸びた長さのこと。

3.3 仕様

CsI 結晶と PMT を隙間なく接続させることは、透過率の次にクッキーへの要求として重要なことである。一部に接触しない空間があると、屈折率の違いから PMT へ導かれる光量が減る。先に述べたフックのバネによって PMT は結晶側に押しつけられるが、クッキー表面がたわんでいるとクッキーと結晶の間に気泡が入ったりはがれが生じる問題がある。クッキーの表面全体を接続させるように、接続力、硬さ(いずれも硬化剤の量で調整する)、厚さを決定した。

PMT がパーマロイ管の中で傾いてもはがれない接続力を持つこと、また、PMT が傾いたときにクッキー自身がひずんで傾きを補い接続を保つほどの柔軟性が必要である。硬化剤の量が少なければ、シリコンは接着力を持ち、やわらかくなるため、クッキー自身の形を保つ下限まで硬化剤を減らしたシリコンが接続に向いている。そこで、硬化剤の低いものから順に評価し、仕様を決定する。

- 選択した TSE3032 で製作できる最も硬化剤の少ない混合比は 100:2 である。これは接着力が強すぎるために土台のガラス板からはがす際に切断することがあり、またやわらかくよく伸びるため、扱いが難しい。また、シリコンは f わずかにでもふれるとチリが貼り付いてしまい、PMT や CsI 結晶との間に隙間を作る原因となる。そのためクッキーを取り扱う際は、その切断面である側面を軽く持ち、CsI 結晶や PMT 表面にはりつけたフィルターに接触する面には触れない。しかし 100:2 の混合比のものは側面で持ち上げるとたわみ、表面が指に触れてしまう。したがって製作でき、取り扱えるのは混合比が 100:2 より硬いものである。
- 100:3 の混合比で厚さが 4mm のクッキーでは、やわらかいために PMT 表面に乗せる際にクッキー表面が波打ち、CsI 結晶との間に空間ができてしまう。あるいは、そっと側面を持ち、平らを保って PMT 表面に置くようにしてもやわらかいために平らにならずにたわみ、PMT 表面とクッキーの間に気泡ができる。気泡を抜くには端から接続させるが、貼り付いた面と手に持っている面に角度があれば下の面が伸びたままはりつき、上面が波打つ。波打つと、CsI 結晶に対し押し付けても気泡が残ったままとなり、全面を接続できない。
- 100:4 の混合比で厚さが 5mm のクッキーでは、厚さが大きいためにクッション性を持ち、硬化剤を多くしたため硬くなって形を保つためにうねりが生じず、かつ接着力は十分にある。
- 100:4.5 の混合比で厚さが 5mm のクッキーでは、100:4 と同様に硬化剤が多いために平らを保つが、実際に CsI 結晶に対し貼り付きテストを行った結果、100:4 のクッキーに比べて接着力が低い。

以上の試験から、混合比は100:4、厚さは5mmで製作することにきめた。硬化条件は表3.2にあるように100℃、1時間とする。

3.4 シリコンの時間経過による性質の変化

シリコンは硬化剤が少なくても、時間の経過により少しずつ硬くなるが、PMTの設置時まで適度な硬さであればよい。また、空気に触れていると接着力は時間の経過とともに悪くなることがわかったが、一度貼り付けると時間の経過とともにその接着力はより強くなるため、結晶面に対しPMTが傾きを持っていても初期に貼り付いていれば時間が経過した後でも引っ付きは保たれると考えられる。

3.5 真空での接続

シリコンクッキーを板に貼り付けて真空に置くと、クッキーと板の間に気泡が発生することに関して述べる。

KOTO実験ではシリコンクッキーを1Pa以下の真空容器の中で使用するため、小型の真空容器を用いて真空中での接続試験を行った。PMTホルダーの一部のモックアップと実際に用いるフック、CsI結晶の代わりにガラス板を用いてPMTの固定方法を真空容器内に再現し、シリコンクッキーを貼り付けたPMTを挿入してターボ分子ポンプにより100Paに真空引きをした(図3.9)。その結果、シリコンの両側の表面に複数の気泡が現れたが、3時間ほど経過すると気泡は縮んでしだいに消え、クッキーはその全面がガラスとPMTに貼り付いた。気泡が消えるまで真空容器内を真空にし、一日間大気圧にして、接続を外さないまま再び真空にすると再び気泡が現れ、同様に真空の状態でも3時間経過すると気泡は消えた。

この実験により、真空中でシリコンクッキーとガラス等の板との境界面には気泡が発生するが、数時間放置すれば気泡は消滅し、クッキーは正常に接続することがわかる。

考察

シリコンを製作しガラス板から外さずに真空に置くと気泡は発生せず、一度ガラス板から離して再度くっつけたものからは気泡が見られた。このことから、発生する気泡はシリコン自身のアウトガスではなく空気であると考えられる。クッキーと板の間のわずかな隙間にある空気が減圧により大きくなって気泡を生じたと推測する。

シリコンは気体を透過する性質を持つことから、減圧により気体はシリコンの中を通過して排出し、加圧によって逆に元の隙間に気体に戻るため、再度減圧すると繰り返し気泡が現れると考える。

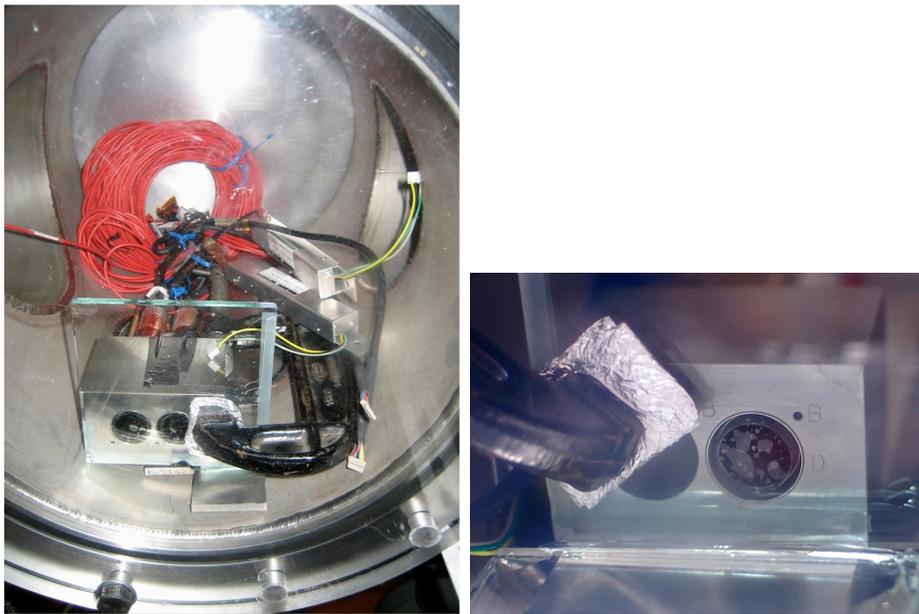


図 3.9: 小型の真空容器を用いてシリコンクッキーの真空中での接続の様子を調査した。25mm 角の CsI 結晶用の PMT の固定方法を再現し、CsI 結晶の代わりにガラス板に対し接続した。この調査に用いたシリコンはシリコンの主剤と硬化剤の混合比が 100:5 のものであるが、混合比が異なっても生じる現象である。

第4章 シリコンの透過率と経年劣化調査

クッキーへの要求で最も重要なことは透過率である。製作したクッキーの透過率を測定し、これが長期間の使用に耐える安定性を持つことを調べた。

4.1 シリコンクッキーの透過率

はじめに、シリコンクッキーの透過率の測定方法と、決定した仕様で製作したクッキーの透過率を述べる。

4.1.1 光量の測定方法

仕様通りに製作した、25mm角のCsI結晶用のシリコンクッキーを用いてその透過率を測定した。測定には、以下の光源と分光器を用いた。

- 紫外線LED：SET, Inc. UVTOP310 … 波長 310nm にピークを持つ光源。
- 分光器：Ocean Optics USB2000 … 波長 184nm から 870nm まで約 0.4nm ごとにカウント数 (0 から 4095) を出力する。

分光器は、入射光がなくても 250 カウントほどのノイズによる信号を出力する。そのため、分光器に光を入れずにこのデータを取得し、光を観測したデータから各測定波長ごとにこのノイズを差し引き、光量の測定値とする。

4.1.2 シリコンクッキーの透過率の定義

シリコンクッキーの透過率とは、シリコンの内部で光が透過する率である。これを求めるにはシリコン内部に入射する光量と、透過して出てくる光を測定しなければならない。しかし、実際に測定できるのは、シリコンがある場合とない場合の比であり、シリコンがある場合、光源の光の一部はシリコンの表面で反射するため、入射光が減少する。そこで、図 4.1 に示すように、まず土台となるクッキー

を透過する光量 I_1 を測る。これには反射と吸収が寄与する。次に、この土台のクッキーに調べたいクッキーを貼り、その透過光 I_2 を測定する。反射の効果は両者で共通であるから、調べたいクッキーの透過率 T は次のように定義できる：

$$T = \frac{I_2}{I_1} \times 100 \quad (4.1)$$

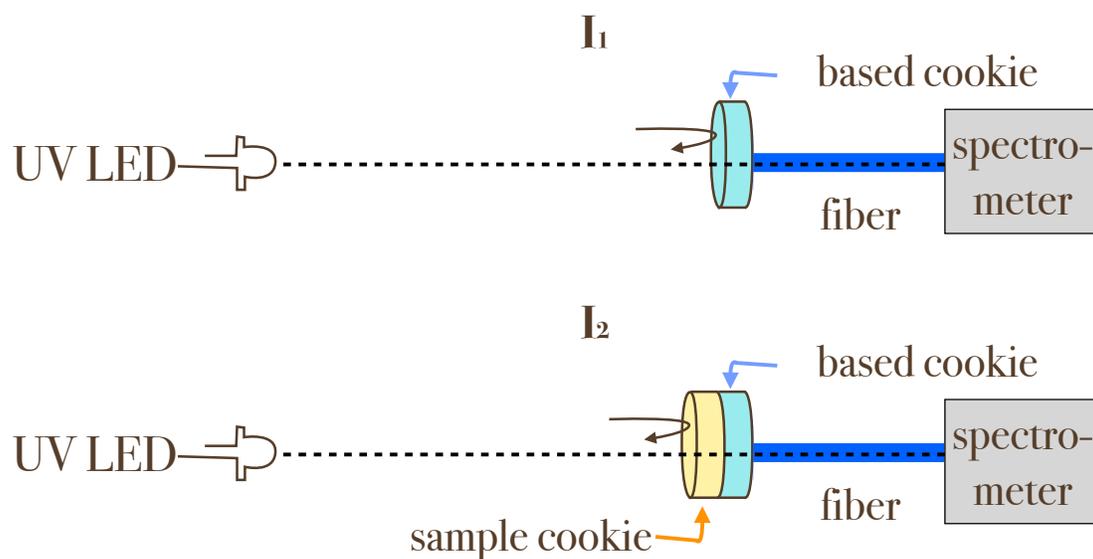


図 4.1: 透過率の測定方法

4.1.3 透過率測定の結果

3.2章で決定した仕様で製作したクッキーの、波長 310nm での透過率は 95%であった (図 4.2)。

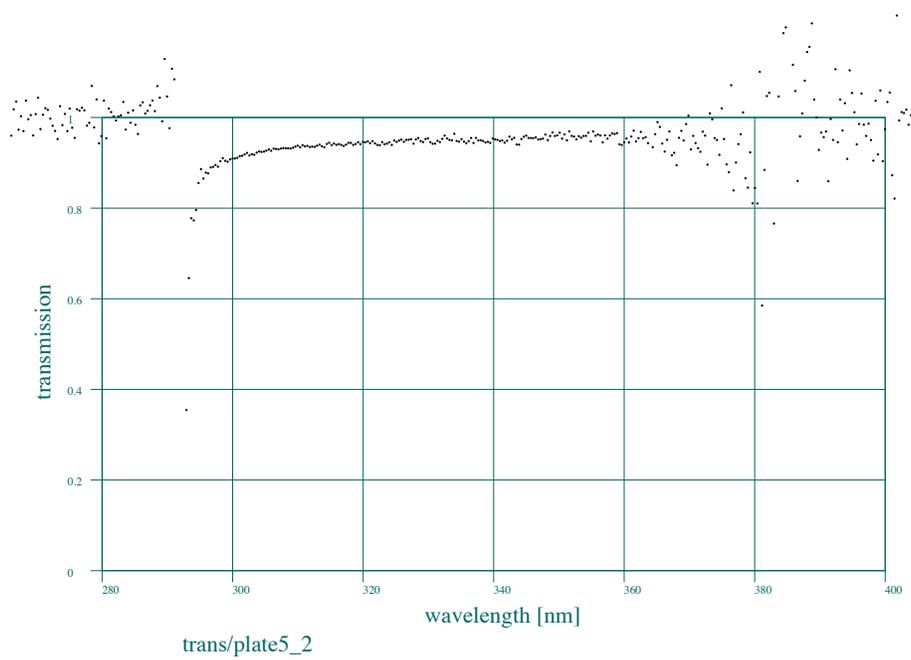


図 4.2: 決定した仕様で製作したシリコンクッキーの透過率

4.2 加熱促進性能評価の方法

シリコンクッキーは2011年に製作し、予定された実験スケジュールの2017年まで6年間使用する。6年後でも透過率が低下しないかを知るために、クッキーを高温に加熱して劣化を速め、短時間で6年後の劣化を予測しその性能を見積もる。

時間と温度の関係は次に述べる関係式から求める。一般に、劣化する化学変化の過程における温度と時間の関係は、その物質固有の活性化エネルギーで表される。反応速度を意味する速度定数 k はアレニウスの式とよばれる次の式で表せる [5]：

$$k = ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (4.2)$$

ここで、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は温度、 a は定数である。これを時間 t で積分すると、 Δt の時間における生成物の増加 ΔC は

$$\Delta C = ae^{-\frac{E}{RT}} \Delta t \quad (4.3)$$

となり、 \log をとって

$$\Delta C' = \ln \Delta t - \frac{E}{RT} \quad (4.4)$$

となる。 $\Delta C'$ は $\ln(\Delta C/a)$ である。材料の劣化によって変わる引張り強さや弾性率、硬さや耐電圧、収縮などの物理的状態は $\Delta C'$ や ΔC によって表される。すなわち、ある物理的状態に至る時間と温度の関係は式 4.4 となり、 E/R を知れば任意の温度 T 、時間 t で起きる量と等しい化学変化を与える高温での短期間の条件を知ることができる。その高温、短時間で加速させたサンプルの劣化を調べることによって6年後の劣化状況を調べる。

クッキーに使用するシリコンの E/R を知るには、温度と時間のパラメータを変えたサンプルを用意し、その劣化を調べ、同じ劣化状態となる温度と時間から $1/T$ と $\ln \Delta t$ のグラフをプロットすればよい。この $1/T$ に対する $\ln \Delta t$ のグラフはアレニウスプロットと呼ばれる。

本実験での物理的状態の測定には硬さを用いた。硬さはシリコンの劣化で顕著に変化する要素であり、また測定が容易であるためである。 $\Delta C'$ は硬さに関係するが、その関数の形は分からない。したがって単に同じ硬さ、すなわち同じ劣化状況であるということだけを元に議論する。

4.3 サンプルの作成

いくつかの温度、時間で加熱したシリコンのサンプルを作った方法を述べる。サンプルは決定した仕様で製作した2枚のシリコンの板から小さい結晶用のクッキーを切り出し、恒温槽に入れて加熱した。温度・時間の条件一つにつき2つ以上のサ

ンプルを用意した。あらかじめ土台とするガラス板を入れて目標の温度まで加熱し、そこへクッキーを乗せ、取り出すまでの時間を加熱時間と定義する。クッキーは、下の面はガラス板と接触し、上面は空気と接した状態である。使用した恒温槽は、50℃までの温度制御が可能である SANYO MIR-552、200℃までの高温の制御が可能な SANYO MOV-212F(U) の二つで、50℃のサンプルの製作は前者、60℃以上の高温のサンプルには後者の恒温槽を用いた。いずれも ± 1 ℃の精度でコントロールできる。恒温槽に入れた時間以外は、約 15℃から 20℃の実験室でガラス板に乗せ、上面をラップフィルムで覆って保管した。サンプルは、50℃、60℃、100℃、150℃の4つの温度で加熱し、その期間は 10分から長いもので 28日間である。

4.4 硬さの測定

4.4.1 測定方法

劣化の物理量として定義した硬さの測定方法を述べる。

力測定器（フォースゲージ）でサンプルのクッキーを押しあて、一定の押し込みに対する反発力を測定し、それを硬さとする。サンプルのクッキーやフォースゲージは図 4.3 に示すように光学台に固定する。クッキーはスタンドを用いて光学台に固定したガラス板にはりつけ、フォースゲージは手動のステージに固定する。フォースゲージの移動には X 軸スチールステージ（表示分解能 粗：0.01mm、微：0.0005mm）、フォースゲージは IMADA DS2-20N（表示分解能 1gf、測定レンジ 2kgf）を用いた。

はじめに、フォースゲージ自身の縮みを補正するため、クッキーをつけずに土台のガラス板を押し、力の表示に対するフォースゲージの縮みを測定した。この縮みにはガラス板が押されてたわむことによる変位も含まれている。測定系はガラス板とフォースゲージを含めた全体であるため、フォースゲージとガラス板の変位は切り分けず、ひとまとめとして考える。ただし、他の方法で固定した金属柱をフォースゲージで押した場合の変位と力の関係はガラス板を押した場合との違いがないため、変位のほぼ全体はフォースゲージによるものである。フォースゲージがガラス板に触れ、表示が 1gf となる位置を基準にステージの微動ネジを少しずつ回して力表示を記録した。微動ネジの最小目盛りは 0.0005mm である。その結果を図 4.4 に示す。このグラフを元に、クッキーを押し得た力の値に応じて移動量を決定する。

クッキーを押しするのは 1.500mm とした。これは高温で長時間加熱し硬くなったクッキーをフォースゲージの最大測定値 2kgf の範囲内で測るためである。1.5mm 移動させるときには粗い方のネジを用いる。粗いネジの最小目盛りは 0.01mm である。

フォースゲージの先端には直径 5.1 mm のアクリル柱を固定し、これでクッキーの中央を押し。中央の位置はおおよそよく、クッキーを貼り直して何度か測定する。

次のような流れで硬さを測定する。まずクッキーをガラス板に置く。フォースゲージを移動し、フォースゲージの先端がクッキーに触れ、表示が 0 から 1gf になる位置

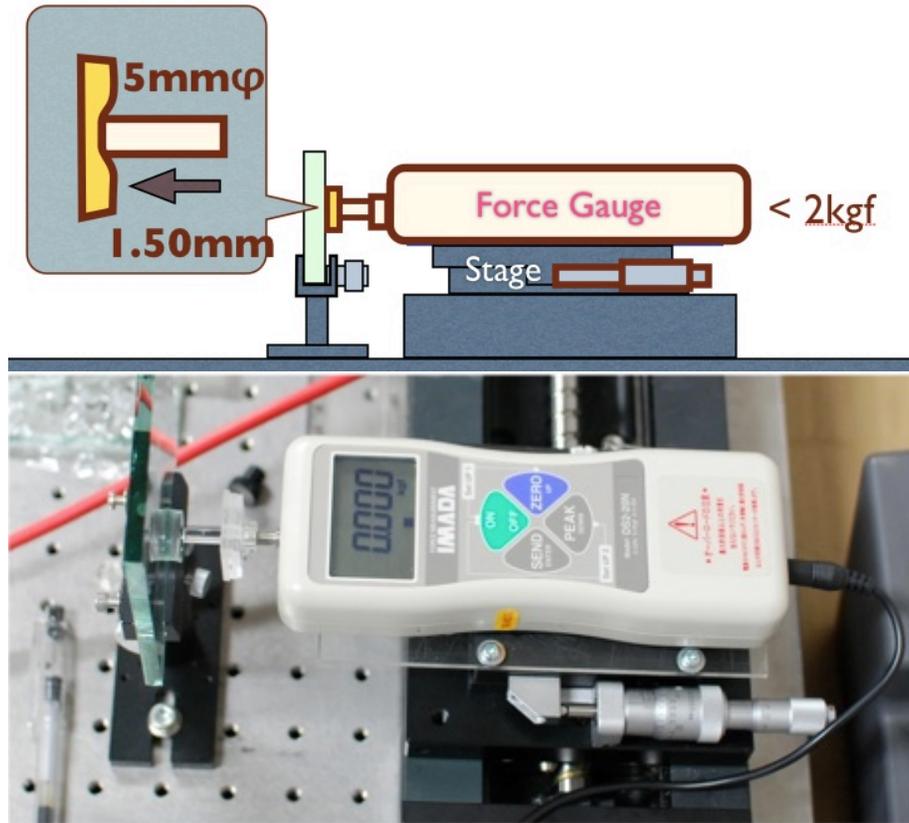


図 4.3: 硬さ測定の様子。上は横から見た絵、下は斜めから見た写真。フォースゲージは下の手動ステージに厚さ 3mm のアクリル板を介して固定した。ステージは粗いものと細かいものの 2 つの調節ねじがある。

を基準位置とし、粗いネジで 1.500mm 押す。そこで、たとえば 1100gf と表示されたら、図 4.4 からこの力に対する変位は 0.065mm であることを読み取り、ステージをさらに 0.065mm だけ移動させる。再びフォースゲージの値を読み、その力に対する変位が 0.07mm であればさらに 0.005mm だけ移動させる。こうした微小な追加移動を調整できるまで繰り返し、最終的な変位とそのときのフォースゲージの値を読み取る。

目盛りは $\pm 0.002\text{mm}$ まで正確に読取れるため、位置の調整精度は力に換算すると $\pm 2\text{gf}$ である。

測定の結果得られた、加熱時間と硬さの関係を図 4.5 に示す。

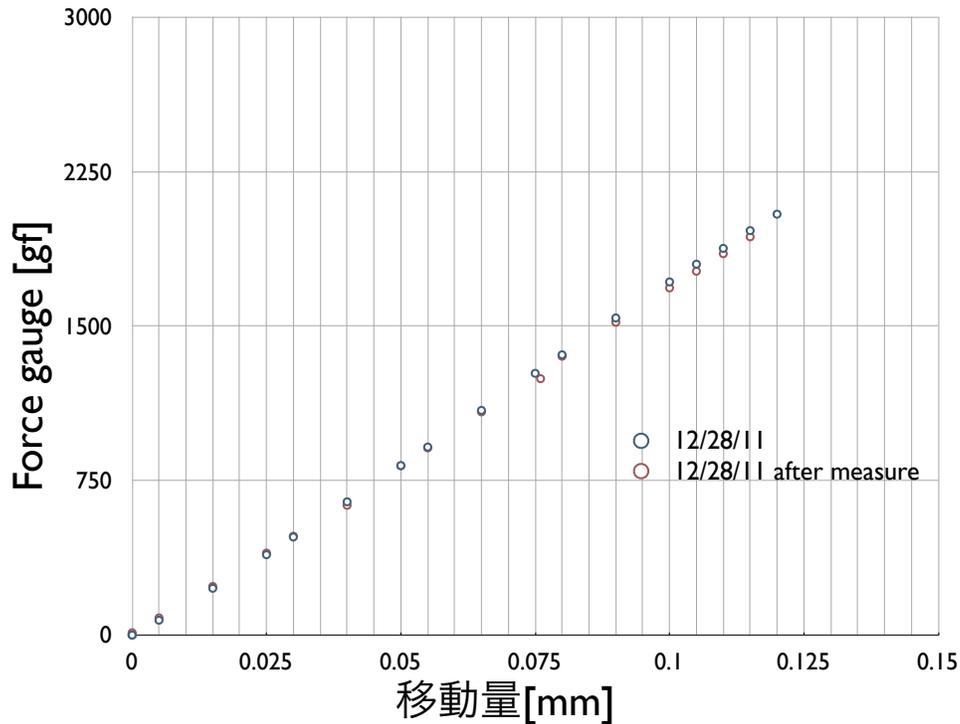


図 4.4: クッキーがない場合の移動量と力の関係。土台と圧力測定器のひずみが変わる。硬さ測定の前後に測定した。

4.4.2 サンプルを製作した元のシリコーンの板の違い

4.3章で述べたように、サンプルは200mm×200mmのシリコーンプレート2枚から製作した。図4.5の丸いマークはシリコーンの1枚目の板、三角のマークは2枚目の板から取り出したサンプルである。丸いマークのプレートの方が全体的に硬くなっている。シリコーンの主剤と硬化剤の混合比は同じであるが、シリコーン液を硬化するとき板によって恒温槽での温度変化が異なるため、製作直後の硬さが異なっている。したがって、2つのシリコーンからのサンプルは区別してそれぞれ解析を行い、いずれも等しい結果となるかどうかを調べた。

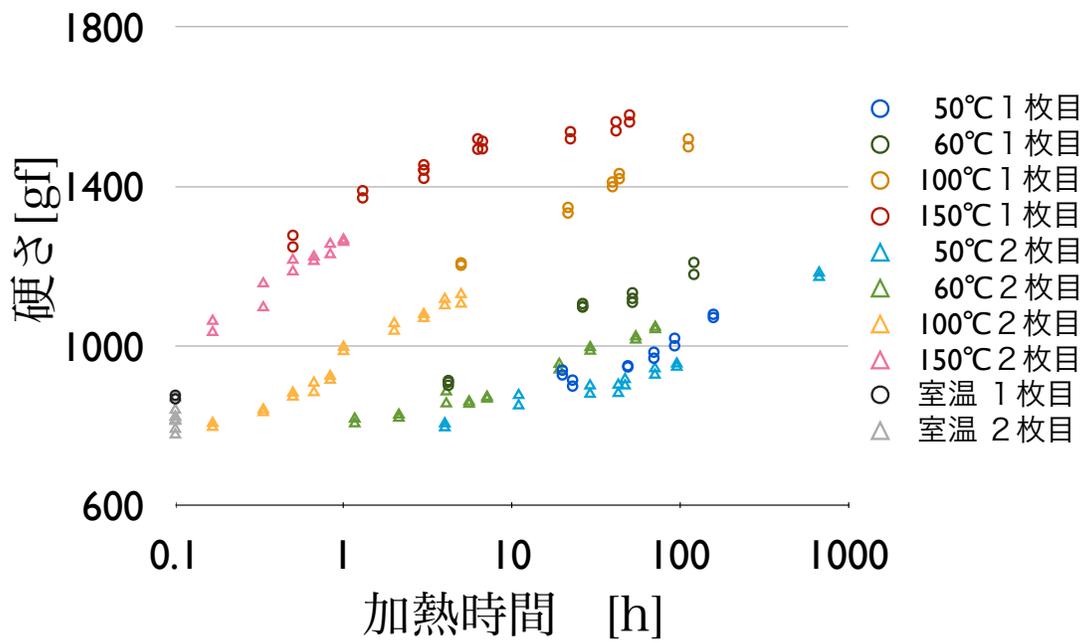


図 4.5: シリコンクッキーの加熱時間に対する硬さ。温度の条件を図の右に示す。

4.4.3 硬さ測定誤差

2枚目のシリコンの板の中でいくつかの場所から切り出したクッキーの厚さと硬さを測定した結果、図4.6、4.7に示すように厚さと硬さが位置によって異なった。硬さの違いは80gfほどあるため、図4.5上のそれぞれのクッキーの硬さには80gfの誤差が含まれる。その他の要因で生じる誤差は小さいことを以下に示す。

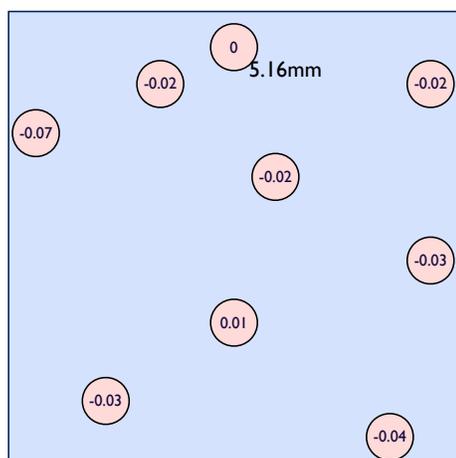


図 4.6: 三角のマークで示した2枚目のシリコンプレートそれぞれの位置での厚さの差(単位はmm)。基準となる0は5.16mm。サンプルと同様にクッキー型に切り取って測定した。

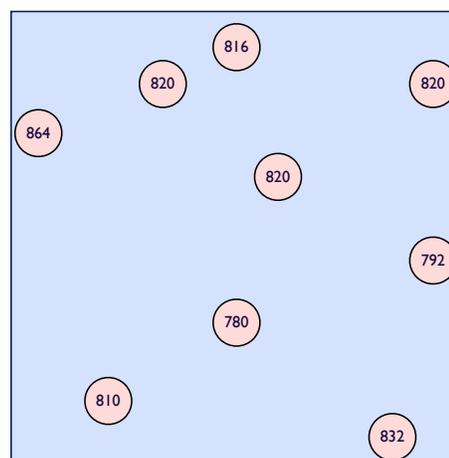


図 4.7: 三角のマークで示した2枚目のシリコンプレートそれぞれの位置での硬さ(単位はgf)。サンプルと同様にクッキー型に切り取って測定した。

厚さの違い

クッキーは力を加えると縮むため、バネと同じように長さと力を考えることができる。クッキーのバネ定数が一定であるとして、図4.6で得られた厚さの差0.08mmにより測定する硬さがどれくらい変わるかを計算する。厚さが最小の5.09mmで硬さが F であるとすれば、最大の5.17mmでは硬さは $F \times (5.17/5.09) = (F \times 1.016)$ であり、1.6%しか違わない。したがって、シリコンプレートの厚さの違いは無視する。

厚さ、位置の精度

クッキーの厚さは、フォースゲージがクッキーに触れて1gfの値を出す位置とガラス板に触れて1gfの値を出す位置から算出する。クッキーを7回ガラス板に貼り付け

なおして測定すると、中央近辺の厚さの最大と最小の差は0.01mmであった¹。硬さ測定の際にクッキーの表面の位置を真の値から0.005mm間違えると、最も硬いもので±6gf変わる。

同一シリコンプレート内での硬さの違いの原因

同一プレート内で元々の硬さが異なる原因としては3つの要素が考えられる。一つはガラス板からシリコンを取り外すときにシリコンに力を加えるため、押し縮められて密度が高くなったこと。もう一つはシリコンを硬化させるために100℃の恒温槽に入れるが、板の耳の部分は側面から熱が与えられて中央に比べて温度が上がり、硬化が進むこと。三つ目は、板の中央部分は側面に比べラップフィルムが重なるため温度が上がりにくく、外側に比べて硬化が進まなかったことである。

4.5 アレニウスプロット

硬さの測定から得られた図4.5を元に、2枚目のシリコンプレートのそれぞれの温度で硬さが1.05kgfとなる時間を算出し、加熱促進試験の要である、 $1/T$ と $\ln \Delta(t/h)$ のアレニウスプロットを描いた(図4.8)。1.05kgfを選んだ理由は、2枚目のシリコンプレートの全ての温度のサンプルでデータがあるからである。

図4.8に示すように、4つの温度と時間の点はアレニウスの式の通り1次関数となった。これを最小二乗法によりフィットした結果、この傾きである E/R は $(1.0 \pm 0.1) \times 10^4 [K]$ であり、シリコンの劣化速度と温度の関係が得られた。

4.6 結果

4.6.1 全てのサンプルの硬さの検証

こうして4.5章で得られた E/R を式4.4に代入して $\Delta C'$ をプロットし、全てのサンプルの硬さ測定を検証する(図4.9)。

この図を見ると、全ての測定点が一つの曲線の近傍にある。これは、アレニウスプロットの妥当性を支持するものであるから、4.5章で得られた E/R の値は正しい。

¹クッキーの外側の厚さはその最大からさらに0.01mm大きかった。

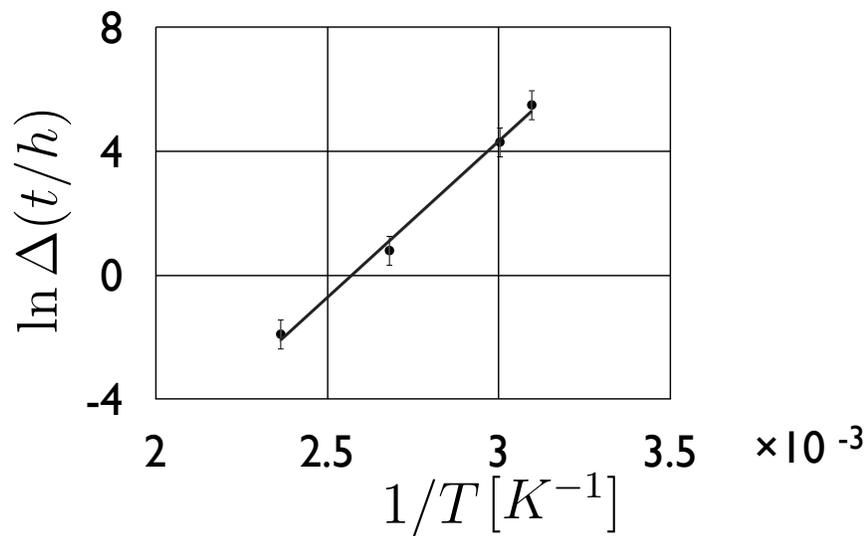


図 4.8: 硬さが1.05kgfとなる条件から得たアレニウスプロット。fittingの結果、この傾きである E/R は $(1.0 \pm 0.1) \times 10^4 [K]$ であった。

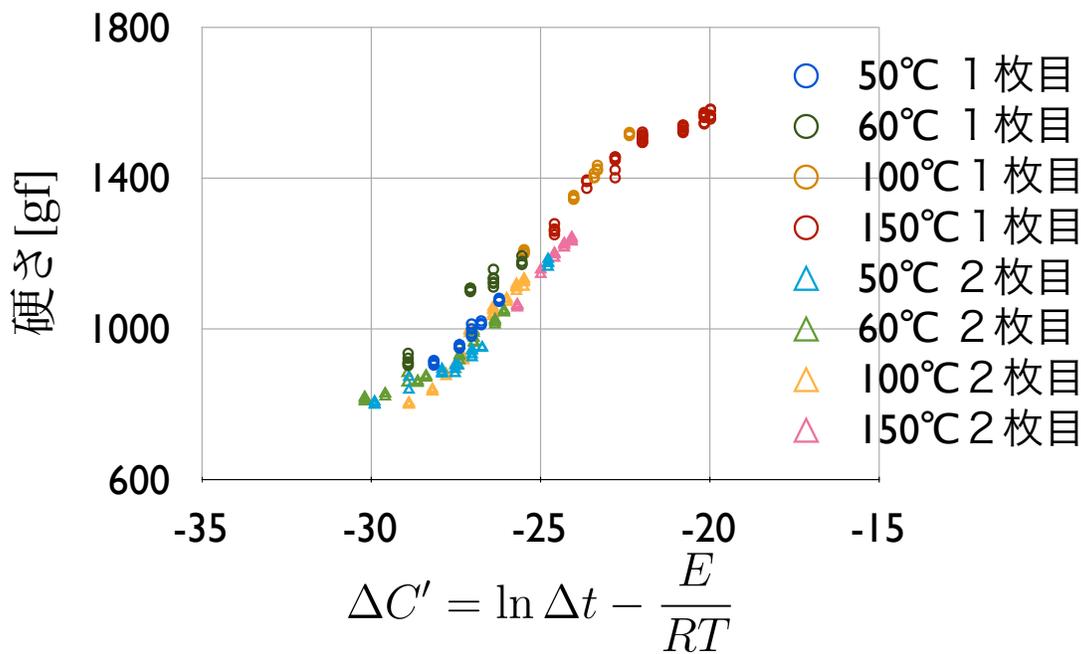


図 4.9: $\ln \Delta(t/h) + \frac{E}{RT}$ に対する硬さ。 $\frac{E}{R}$ はアレニウスプロットの図 4.8 に基づいて $(1.0 \pm 0.1) \times 10^4 [K]$ を用いた。温度の条件は図の右に示す。

4.6.2 KOTO 実験での使用に向けた見積り

KOTO 実験はシリコンクッキーを 6 年間使用するが、6 年後の劣化状況を 4.6.1 章の結果から見積もる。クッキーの温度は、接続する PMT と CsI 結晶の温度、そしてこれらの熱伝導率によってきまる。熱源は主に PMT の電源とアンプであり、この熱が PMT を介してクッキーに伝わる。2011 年 9 月に行われた KOTO 実験のカロリメータ部分のみの真空試験では、真空タンクの外から連結された銅の板と PMT の電源を介して冷却したが、アンプと電源は 45 °C 近くまで上昇した。このような温度では PMT の信号の質や、CsI 結晶の発光量を悪くするため、本実験では冷却方法を改良する。しかし、安全のために 50 °C で 6 年間使用した場合を考える。

50 °C、6 年後のクッキーの透過率を知るには、その時間と温度から $\ln \Delta \left(\frac{t}{h} \right) - \frac{E}{RT}$ を計算し、図??を参考にしてこれと同じ硬さのクッキーの透過率を知ればよい。製作したサンプルでは 150 °C で 6.7 時間と 22.3 時間の間にその値がある。それより長い 50 時間のサンプルの透過率は図 4.10 に示すように波長 310nm で 89±2% である。したがって、50 °C、6 年後のクッキーの透過率は 89±2% より高い。

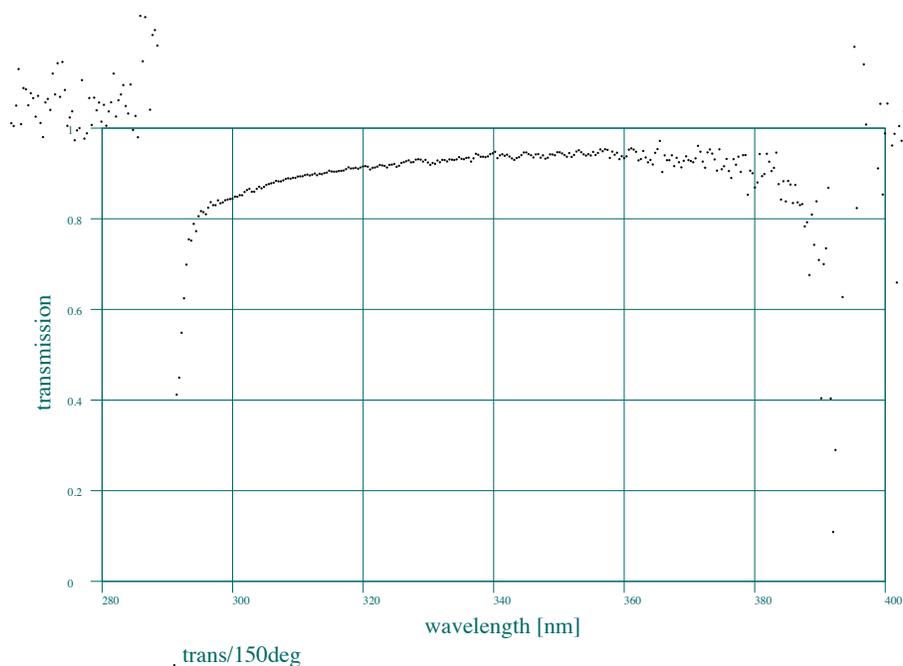


図 4.10: 150 °C で 50 時間加熱した 2 枚目のシリコンプレートからのサンプルの透過率。CsI 結晶の発光波長 310nm で透過率は 89% である。

4.7 まとめ

シリコンのクッキーの経年劣化を、加熱劣化促進試験により硬さを指標として調査した。その結果、シリコンのクッキーは、製作直後の透過率は95%であるが、50℃の環境に6年間置いても $89\pm 2\%$ 以上であることを見積もった。

また、クッキーとCsI結晶、PMTとの接続の力は、ガラスで調査した結果、一度も外さない限り時間とともに強くなる。

したがって、KOTO実験がデータを取得する6年の間、50℃以下の環境であれば、クッキーはCsI結晶の光をPMTの光電面に導く役目を果たすことがわかった。

第5章 課題・考察と展望

以下に、光接続にシリコンを用いることの課題と考察、展望を述べる。

- 真空中に置くことによる劣化について、室温で2.5ヶ月置いたものを測定した結果、波長 310nm での透過率は 90%であった。これの長期試験は継続中であり、さらに減少しないか調べなければならない。
- 2011 年 8 月から 9 月にかけて、KOTO 実験のカロリメータ部分のみの真空試験を行ったところ、シリコンクッキーの波長 310nm での透過率が全体的におよそ半分に低下した。真空容器内に置いていた機器や道具の、真空での使用前の物とともにシリコンクッキーを真空中に置き、透過率の調査をしたところ、PMT の電源とアンプをつなぐケーブル¹とともに真空中に置いたものの透過率のスペクトルが、悪くなったクッキーのそれに一致した。このケーブルに含まれる何かが真空中で揮発し、シリコンに取り込まれてその透過率が悪くなったと考えられる。真空試験では真空度は約 0.04Pa に達し、このケーブルは、それと繋がる電源やアンプの温度から 40℃ほどの熱を持っていたと考えられる。こうした問題を避けるために、真空中での使用の前には、同じ真空容器に入るすべての物質について、シリコンの透過率に悪影響がないか調査し、悪いものがあれば、実験前に揮発させて取り除く必要がある。
- 製作する回によって、製作直後の透過率が波長 310nm で 91%ほどのシリコンがあった。この原因は分かっていないが、製作中に透過率を悪くするものが吸着した、あるいは、そのシリコンの液がそもそも悪かったなどの理由が考えられる。製作したロットごとに、その透過率を確認することが必要である。繰り返される場合はいろいろな条件を変えて製作し、原因を調査しなければならない。
- シリコンの素材の中には、高屈折率のもの（波長 589nm で 1.54 など）がある。これを用いた場合の CsI 結晶から PMT への垂直入射光の反射率は 1.4%と、選定した TSE3032 に比べて 1.6%高い。わずかでも光量を上げたい場合はこの高屈折率のシリコンを検証すること。ただし、引張り強さ、硬さを調べ、また価格が高いことをふまえて検討しなければならない。

¹2012 年 3 月末、助教の外川学氏の調査による。

第6章 まとめ

KOTO実験のカロリメータに用いる、CsI結晶とその光を電気信号に変換するPMTの光学的接続のためのシリコンの選定を行い、TSE3032をシリコンの主剤と硬化剤の重量比を100:4で混合した厚さ5mmのクッキーを選び、製作した。また、その透過率の長期安定性について加熱劣化促進試験を行った。その結果、製作から実験を終える6年後まで50℃で使用しても、波長310nmでの透過率は89%以上を保ち、KOTO実験の使用に耐えることがわかった。

謝辞

これらの研究活動にあたって、多くの皆様のお世話になりました。この場をかりて感謝します。

ご指導いただいた山中卓教授には、多くの研究の機会を与えてくださり、熱心な指導、助言、そして心強く暖かいご支援をいただいたことを、心から感謝します。日々の研究生活から、「研究への姿勢、行動力、好奇心による探求、考察・議論の方法、計算機の使い方と遊び方、困難の乗り越え方」などを習得し、はるかに成長することができました。

助教の外川学さんには、多くのアドバイスを頂いたり、相談をさせていただいたりと支援をしていただきました。CsI結晶のための大変な手仕事は何種類もありましたが、作業をしながら気兼ねなくいろいろなことを話すことができ、楽しくこなすことができました。

生命機能研究科の藤田一郎教授と研究室のみなさまには、シリコン作りの初期に実験室とデシケータ、恒温槽等を使わせていただきました。

KEKの渡辺丈晃さん、山形大学の田島靖久さんに、E391a実験でのクッキー作りの参考資料をいただき、Lim GeiYoub准教授には実物を送っていただき、参考になりました。シカゴ大学のYau W. WAH教授には真鍮のクッキーカッターを送って下さいました。お隣の久野研究室から、真空試験のため小型の真空容器とポンプをお借りしました。透過率を調べる紫外線LEDは京都大学KOTOグループからお借りしました。KEKの小松原健教授には、ミーティング等での議論や事務的な支援をしてくださいました。KOTOグループのみなさん、山中研のみなさんには研究や研究生活の様々な面でアドバイスやご支援をいただきました。秘書の亀井さん、川口さんには、物品購入や出張、事務の仕事等のサポートをしていただきました。

みなさん、ありがとうございました。

最後に、山中研究室の同期である中谷洋一君へ。中谷君には、クッキーの真空中での振舞いや、接続に必要な厚みと混合比の初期の調査をしてもらいました。学部 の頃、大学院に入ってから何度か、私が落ち着きなく騒ぐせいで迷惑をかけてしまい、助けてもらったことがありました。中谷君は手先が器用でかしくくて頼もしく、気楽に話ができ、いつも笑顔で、ともに過ごすことが楽しく、そしてうれしかったです。本当に、ありがとう。

参考文献

- [1] L.S.Littenberg, Phys. Rev. D**39**, 3322 (1989).
- [2] A.J.Buras, F.Schwab, and S.Uhlig, hep-ph/0405132, and references therein.
- [3] F. Mescia and C. Smith, Phys. Rev. D**76**, 034017 (2007).
- [4] E391a Collaboration, J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. D**81**, 072004 (2010).
- [5] 川口信一、西本吉助：物理化学序説 (化学同人、1985) p.101 .