

## 第5章 測定結果

本章では、Michelson 干渉計を用いた吸収測定実験の測定結果について述べる。吸収係数は、2.5 節で説明したように、サンプルに入射させる光の強度を変化させ、光路長変化の入射光強度に対する傾きを求め、これと第3章で説明した数値計算の結果を比較することによって求める。

### 5.1 試料以外の吸収

本実験では、Michelson 干渉計の片腕に試料を配置しない場合でも、図 5.1 のように、光路長変化が見られた。この光路長変化の入射パワーに対する傾きの符号は、後述する試料を配置した場合と逆符号であった。また、試料を配置しない場合の光路長変化には測定ごとにばらつきがみられた。表 5.1 に結果をまとめたものを示す。表 5.1 を見ると、測定を行った日によって異なる値が得られる傾向が見て取れる。そこで本実験では、試料を入れて測定を行う前に、試料を入れない場合の光路長変化を測定し、両者の差をとることによって、試料の吸収のみによる光路長変化を求める。試料を入れない場合の光路長変化の原因として、以下の2つが考えられる。

1. 干渉計内の空気の吸収。空気の屈折率温度係数は負であり [36]、測定した試料と符合が逆である。また、本実験ではビームスプリッターの強度反射率が 99% で、ほとんどの光が試料側の腕を通る。そのため、空気の吸収があると試料を配置した場合と逆の符号を持つ光路長変化が得られると考えられる。この場合、測定日ごとのばらつきの原因は、空気の湿度や温度による空気の吸収係数のばらつきによって説明できる。
2. 干渉計を構成する光学素子の吸収。試料側の腕のエンドミラーとビームスプリッターのコーティングでの吸収によって、これらの素子に熱が発生する (図 5.2)。これらの素子の吸収による光路長変化の原因として、以下の3つが考えられる。
  - (a) 試料側の腕のエンドミラーの熱膨張。
  - (b) ビームスプリッターの熱膨張。
  - (c) ビームスプリッターの屈折率変化。

このうち、支配的なものは (c) であると考えられる。それは、3.4 節の結果から、熱膨張による光路長変化は屈折率変化による光路長変化と比べて 1 桁以上小さいことがわかっているためである。

試料なしの場合の光路長変化が、上記の内のどちらの原因によっているのかを調べるために行った実験の結果について以下で説明する。

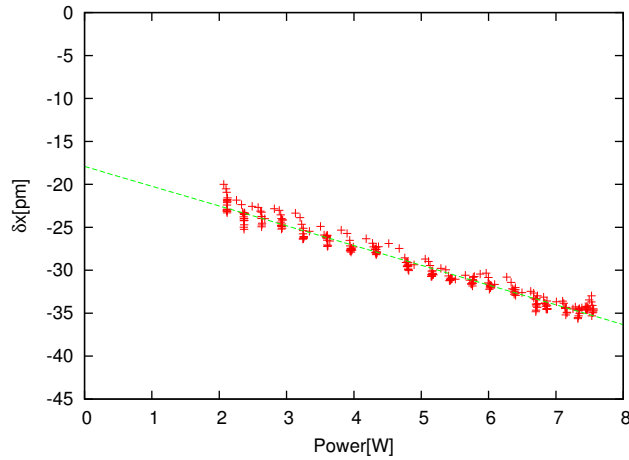


図 5.1: 試料を入れない場合の測定データ。点は測定値、線は直線でフィッティングした結果。試料を配置する側の腕が長くなる方を正の光路長変化としている。

表 5.1: 試料なしの測定結果。同じ列に複数の数値がある日は、同じ日に複数回測定を行った結果。

測定日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
傾き [pm/W]	-1.7	-1.7	-2.2	-1.2	-0.5	-1.2	-2.1	-2.1	-2.8	-3.0
傾き [pm/W]	-1.8	-1.8		-1.3	-0.6	-2.1	-1.7			
傾き [pm/W]				-1.3						

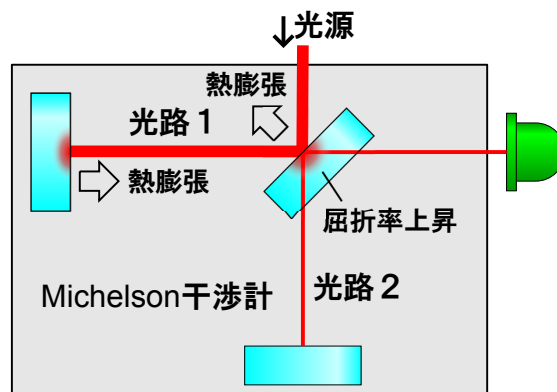


図 5.2: 干渉計を構成する光学素子の吸収による光路長変化。光路 1 側のエンドミラー、及びビームスプリッターの表面での吸収によって、光路 1 の光路長は短く、光路 2 の光路長は長くなる。

まず、1 についてだが、空気の吸収が測定結果に影響を与えるかどうか調べるため、図 5.3 のようにして干渉計を真空中で動作させ、測定を行った。結果を図 5.4 に示す。気圧 7 Pa の下で、傾きは  $-4.3 \text{ pm/W}$  と、空気中での結果と比べて減少することはなかった<sup>1</sup>。この結果から、試料なしの場合に見られる光路長変化の主な原因は、2 のビームスプリッター表面の吸収であると判断できる。また、測定日ごとに結果にばらつきが見られた理由としては、

1. 測定前のアライメントによって、ビームスプリッターにレーザーが当たる位置が変わる。ビームスプリッターのコーティングでの吸収に位置によるばらつきがあることで、光路長変化にもばらつきが現れる。
2. 測定前のアライメントによって、図 5.5 のように、干渉計の腕を往復する光の位置関係がずれる。行きと帰りの光がよく重なっている時は、行きと帰りの光の位置がずれている時よりも光路長変化が大きくなる。
3. ビームスプリッターへの、ホコリ等の汚れの付着状況が日によって変化する。

などが考えられる。

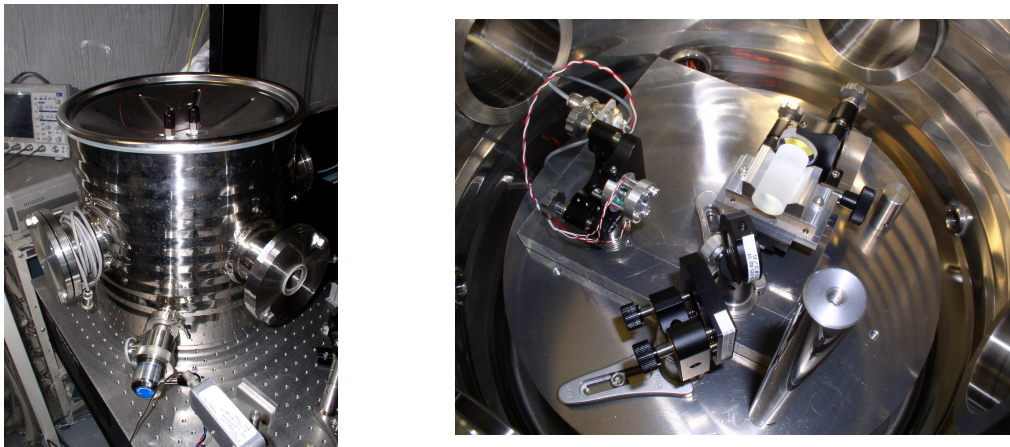


図 5.3: 真空槽（左）と、真空槽内に設置した干渉計（右）。右の写真では片腕に試料を配置しているが、真空中での実験は試料を配置せずに行った。

## 5.2 各試料の測定結果

### 5.2.1 BK7

図 5.6 に、BK7 の測定結果を示す。BK7 は、長さが 10 mm のものと 40 mm のものを用意し、長さに応じた光路長変化が測定されるかどうかを調べた。式 (2.37) では、光路長変化は試料の長さに比例するが、実際にはビーム径の広がりのために単純な比例関係にはない。数値計算の結果、吸収係数  $100 \text{ ppm/cm}$  につき、入射光の強度  $1 \text{ W}$  あたりの光路長変

<sup>1</sup>むしろ空気中より増加しているが、これは何らかの原因によってビームスプリッター表面が汚れ、ビームスプリッターの吸収が増加したためと思われる。

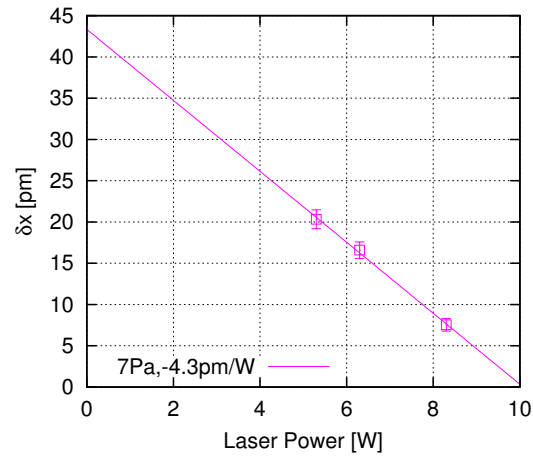


図 5.4: 真空中での測定結果。

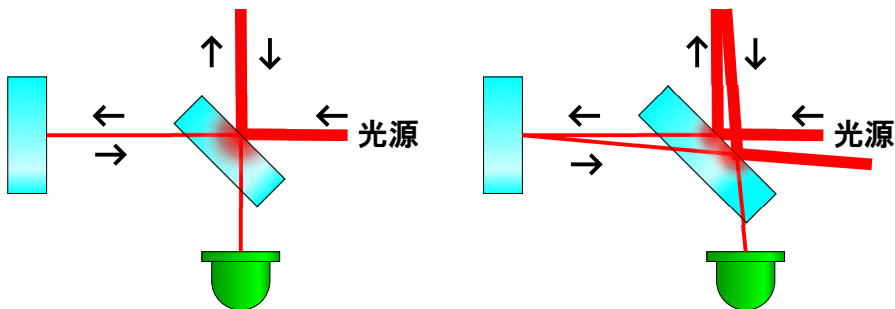


図 5.5: アライメントによるビームの位置関係。左の図は行きと帰りのビームが重なっており、ビームスプリッターの温度変化は、それぞれがずれている場合 (右の図) よりも大きくなる。従ってビームスプリッターでの光路長変化も左の図の方が大きい。

化は、長さが 10 mm の BK7 は 3.67 pm、長さが 40 mm の BK7 は 12.0 pm であった。結果をまとめたものを表 5.2 に示す。長さ 10 mm のものと 40 mm のものではほぼ同じ吸収係数が得られており、このデータから、同じ物質でできたサンプルの相対測定に関しては十分な信頼性があると言える。

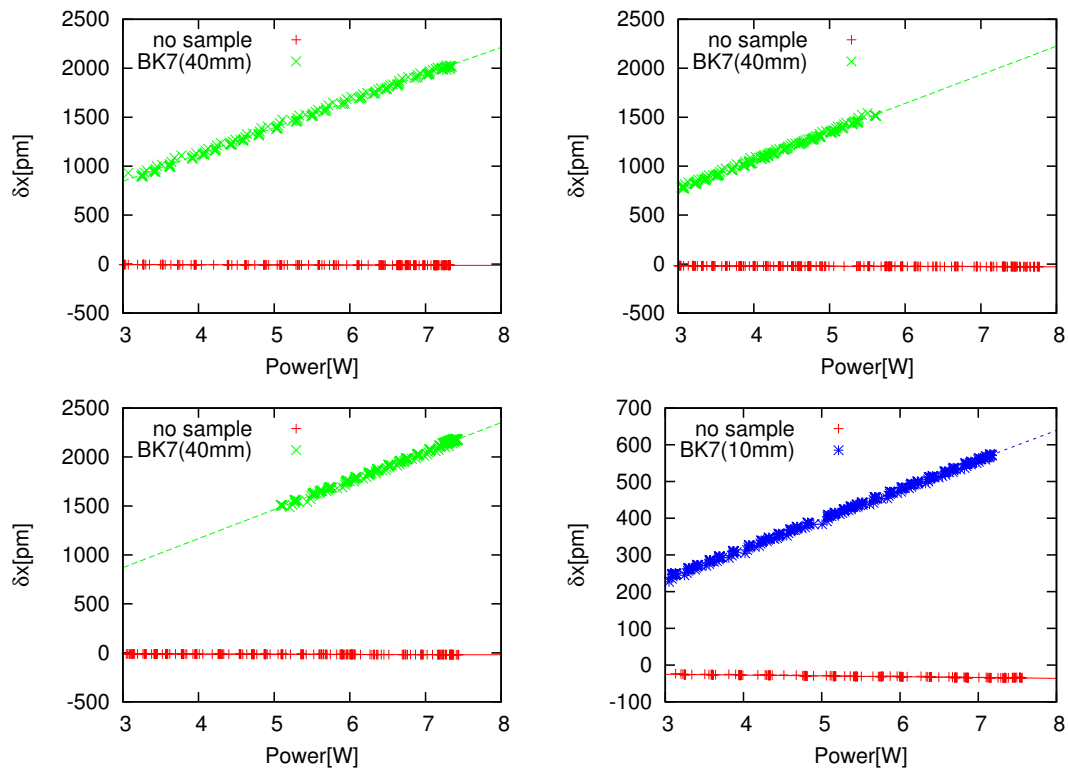


図 5.6: BK7 の測定データ。縦軸は光路長変化、横軸は入射パワーである。点は測定値、線は直線でフィッティングした結果。右下のグラフのみ長さ 10 mm の試料の結果。

表 5.2: BK7 の測定結果のまとめ。光路長変化の傾きは、試料なしの測定結果との差をとったもの。40 mm の試料は、同じ試料を 3 回測定した。

試料の長さ [mm]	40	40	40	10
光路長変化の傾き [pm/W]	275.2	294.3	298.0	82.7
吸収係数 [ppm/cm]	2293	2452	2483	2252

### 5.2.2 サファイア

#### 日本製サファイアの測定結果

日本製サファイアの測定データを図 5.7 に示す。数値計算の結果、吸収係数 100 ppm/cm につき、入射光の強度 1 W あたりの光路長変化は、15.4 pm であった。この結果をまとめたものを表 5.3 に示す。

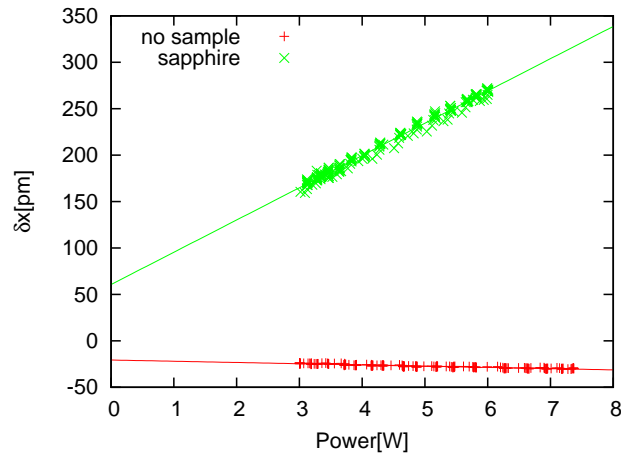


図 5.7: 日本製サファイアの測定データ。縦軸は光路長変化、横軸は入射パワーである。点は測定値、線は直線でフィッティングした結果。

表 5.3: 日本製サファイアの測定結果のまとめ。

	試料なし	サファイア
光路長変化の傾き [pm/W]	-1.3	34.7
試料なしとの差 [pm/W]	-	36.1
吸収係数 [ppm/cm]	-	234

## GT Advanced Technologies 社製サファイアの測定結果

GT Advanced Technologies 社製のサファイアは、結晶作製時の条件が異なるいくつかのプールから切り出したものを用意した。その結果をまとめたものを表 5.4 に示す。図 5.8 はプール P376 から切り出されたサンプルの測定データである。この測定を行った時、光源のファイバーアンプの不調により、雑音が他の測定を行った時より増加しており、試料なしでの光路長変化を測定することが不可能だったため、試料なしの時の光路長変化との差はとっていない。このため、光路長変化の傾きには過去の測定結果から、 $1 \sim 2 \text{ pm/W}$  の誤差があり、吸収係数には  $10 \text{ ppm/cm}$  程度の誤差が含まれる。しかし、各プール毎の吸収係数には、その誤差の範囲を超えて差が見られた。また、同じプールから切り出された試料でも、サンプル毎に差が見られた。このことから、同じプール内でも品質に分布があり、試料が切り出された位置によって吸収係数が異なると考えられる。また、今回測定し

表 5.4: GT Advanced Technologies 社製サファイアの測定結果。複数の値があるものは、同じプールから切り出された異なる試料の測定結果。

プール	光路長変化の傾き [pm/W]				プール	吸収係数 [ppm/cm]			
P376	13.5				P376	88			
AA149	7.3	7.2			AA149	47	47		
AC150	35.2	21.2	104.7	103.9	AC150	229	138	680	675
P401	5.2	5.0	9.9	10.3	P401	34	32	64	67

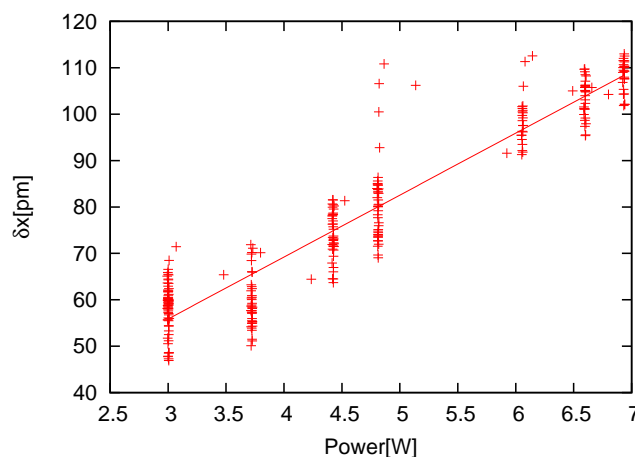


図 5.8: GT Advanced Technologies 社製サファイア (P376) の測定データ。縦軸は光路長変化、横軸は入射パワーである。点は測定値、線は直線でフィッティングした結果。

たサファイアで最も吸収の小さかったものの吸収係数は、 $32 \text{ ppm/cm}$  であり、 $20 \text{ ppm/cm}$  以下という LCGT の要求は満たしていなかった。LCGT の実現のためには、さらなる改善が必要となることがわかった。





## 第6章 測定結果の検証

本研究で用いた Michelson 干渉計を用いる吸収測定法は、参照物質との比較なしに吸収係数の絶対値を求めることのできる絶対測定である、という点が大きな特徴の1つである。しかし、測定値の信頼性を保証するためには何らかの方法で結果の検証を行う必要がある。そこで、干渉計を用いた方法で比較的吸収の大きかった試料を、本章で説明する傾き合成法という方法で測定し、それぞれの測定方法での結果を比較することで測定結果の検証を試みたので、本章で説明する。

### 6.1 温度計による吸収測定

この測定では、試料に光を入射させ、光の吸収によって生じる熱による温度変化を、試料にはりつけたサーミスタによって測定する。概略を図 6.1 に示す。

この測定では、試料内部の温度は一様であるとする。試料と外気の温度差を  $\delta T(t)$  と置

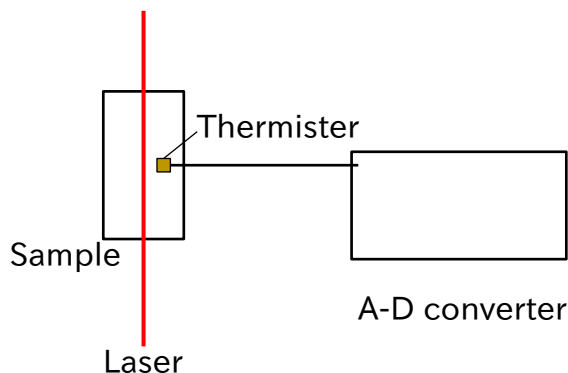


図 6.1: 温度計を用いた吸収係数測定方法。

き、試料の質量を  $m$ 、比熱を  $c$ 、入射パワーを  $I$ 、吸収係数を  $\beta$ 、試料の長さを  $L$ 、試料の表面積を  $S$ 、試料表面から外気への熱伝達率を  $h$  とすると、発熱、温度の上昇、外部へ逃げる熱の釣り合いから、

$$mc \frac{d}{dt} \delta T(t) = \beta IL - hS \delta T(t) \quad (6.1)$$

が成り立つ。時刻  $t = 0$  にレーザーを ON にした場合について、これを解くと、

$$\delta T(t) = \frac{\beta IL}{hS} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{hS}{mc}t\right) \right] \quad (6.2)$$

となる。ここで、 $\tau = mc/hS$  を時定数と呼び、測定結果からこの時定数を求めることで、熱伝達率  $h$  が求まる。また、 $t \rightarrow \infty$  の極限では、 $\delta T = \beta IL/hS$  となるので、平衡状態で

の温度差から、吸収係数  $\beta$  を求めることができる。しかし、この方法では試料の温度が平衡状態になるまで加熱しつづける必要があることから、以下のような問題がある。

- 平衡状態に達するまで、時間がかかる。(今回測定に用いたサンプルでは、時定数  $\tau \sim 800$  s 程度だった。)
- 平衡状態に達する間での間、試料の周囲の温度が安定していなければならない。

そこで、以下で説明する傾き合成法という手法をとった。

### 6.1.1 傾き合成法

傾き合成法は、レーザーの ON、OFF を繰り返し、それぞれの場合の温度の時間変化の差をとることによって外部への伝熱の効果をキャンセルし、吸収による発熱量を測定する方法である。レーザー ON、OFF 時の温度の時間変化はそれぞれ、

$$\begin{aligned} mc \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{on}} &= \beta IL - hS\delta T \\ mc \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{off}} &= -hS\delta T \end{aligned} \quad (6.3)$$

であるから、その差を取ると、

$$mc \left( \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{on}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{off}} \right) = \beta IL \quad (6.4)$$

となって、外部への伝熱の効果がキャンセルされ、吸収による発熱のみがわかる。この方法では温度の平衡状態を達成する必要はないので、短時間で、かつ外部の気温の変化の影響を受けにくい測定を行うことができる。また、この方法でも試料内部の温度は一様であると仮定しているが、この仮定は測定結果にほとんど影響を与えない。これについては、6.1.2 節で述べる。

### 結果の解析方法

具体的な解析方法は以下ようになる。傾き合成法によって、図 6.2 のような測定データが得られる。このデータから、レーザーが ON の時の傾きと OFF の時の傾きを求め、両者の差をとれば吸収係数が求まる。ここで、傾きの差をとる時には同じ温度の時の差を取る必要がある。そのためには、まず各温度での温度変化の傾きを求める<sup>1</sup>。そして、温度変化を横軸に、その時の傾きを縦軸にしてプロットする。すると、図 6.3 のようになり、2本の直線が得られる。式 (6.4) から、図 6.3 の2本の直線の間隔  $\Delta = \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{on}} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{off}}$  は、

$$\Delta = \frac{\beta IL}{mc} \quad (6.5)$$

<sup>1</sup>一定数の測定データごとに区切り、直線でフィッティングして求める。

となるから、

$$\beta = \frac{mc}{IL} \Delta \quad (6.6)$$

と、吸収係数  $\beta$  が求まる。また、式 (6.3) から、図 6.3 の直線の傾きは、

$$-\frac{hS}{mc} \quad (6.7)$$

となるので、外部への熱伝達係数を求めることもできる。

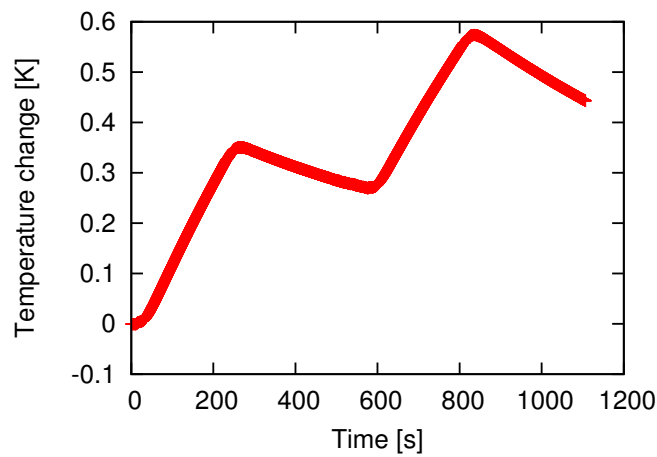


図 6.2: 試料の温度変化。横軸は時間、縦軸は温度変化である。グラフの折れ曲がっているところでレーザーの ON、OFF が切り替わっている。

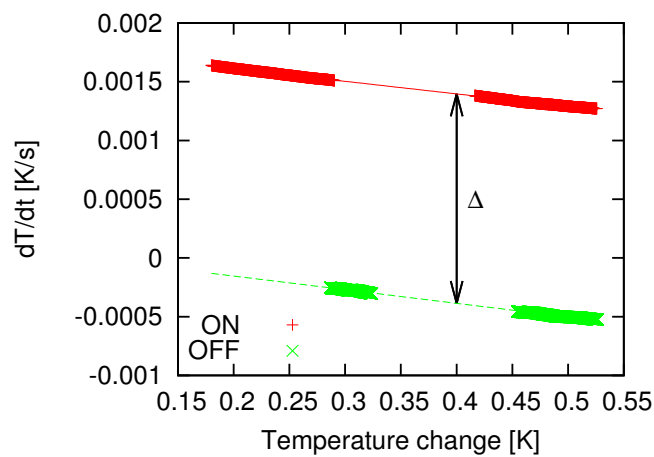


図 6.3: 温度変化 (横軸) と温度変化の時間に対する傾き (縦軸)。

### 6.1.2 温度一様の検証

傾き合成法の理論では、試料内部の温度は一様であると仮定していた。しかし実際には、熱源  $Q(\mathbf{r}, t)$  が存在する時の温度  $T(\mathbf{r}, t)$  は、以下の熱伝導方程式

$$c\rho \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = Q(\mathbf{r}, t) + \nabla \cdot (\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)) \quad (6.8)$$

に従い、試料内部の温度は一様ではない。にもかかわらず傾き合成法でこのような仮定を用いたのは、レーザーの ON、OFF の周期を長くしてゆっくりと温度を変化させると、試料内部の温度を一様と見なしても測定結果には影響が少ないと考えられるためである。この仮定が問題ないかどうか調べるため、有限要素法ソフト COMSOL を用いて熱伝導方程式を解き、以下のような検証を行った。

1. 吸収係数を  $\beta = 100 \text{ ppm/cm}$  と仮定する。100 s 毎に ON、OFF<sup>2</sup>する光を入れた時の温度の時間変化を計算し、試料側面の中央<sup>3</sup>の温度変化を求める。
2. 計算によって得られたデータを 6.1.1 節で説明した方法と同じ方法で解析し吸収係数を求め、最初に仮定した吸収係数  $\beta = 100 \text{ ppm/cm}$  を再現するかどうか調べる。

以上を長さ 40 mm、直径 20 mm の BK7 に対して行った。計算の結果、温度の時間変化は図 6.4 のようになった。図 6.5 に、計算結果を温度変化と温度変化の傾きに変換した図、及びそこから求まる吸収係数を示す。この結果から、熱伝達係数が  $1 \sim 10 \text{ W/K/m}^2$  のとき、誤差は数%にとどまることがわかる。6.3 節で示す測定結果では、 $h \sim 10 \text{ W/K/m}^2$  程度であったから、試料内部の温度は一様であるという仮定を用いることによる測定結果への影響は少ないと判断できる。以上の結果は BK7 の場合だが、サファイアの場合でも、BK7 よりも熱伝導率が大きいので問題ないと考えられる。

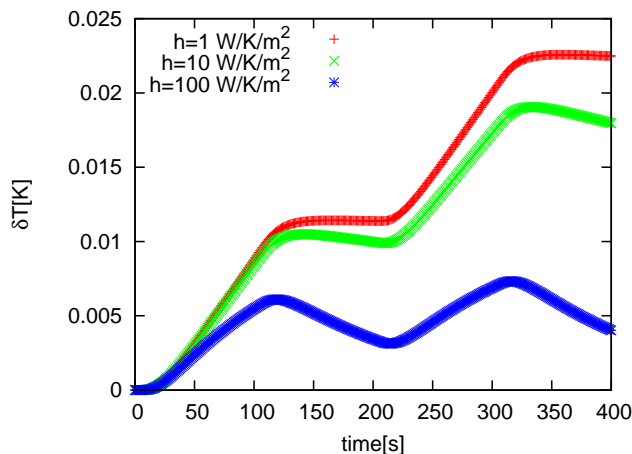


図 6.4: 試料の温度変化の数値計算結果。

<sup>2</sup>実際に測定する時と同程度の間隔。

<sup>3</sup>実際に測定する時にサーミスタを貼り付ける位置。

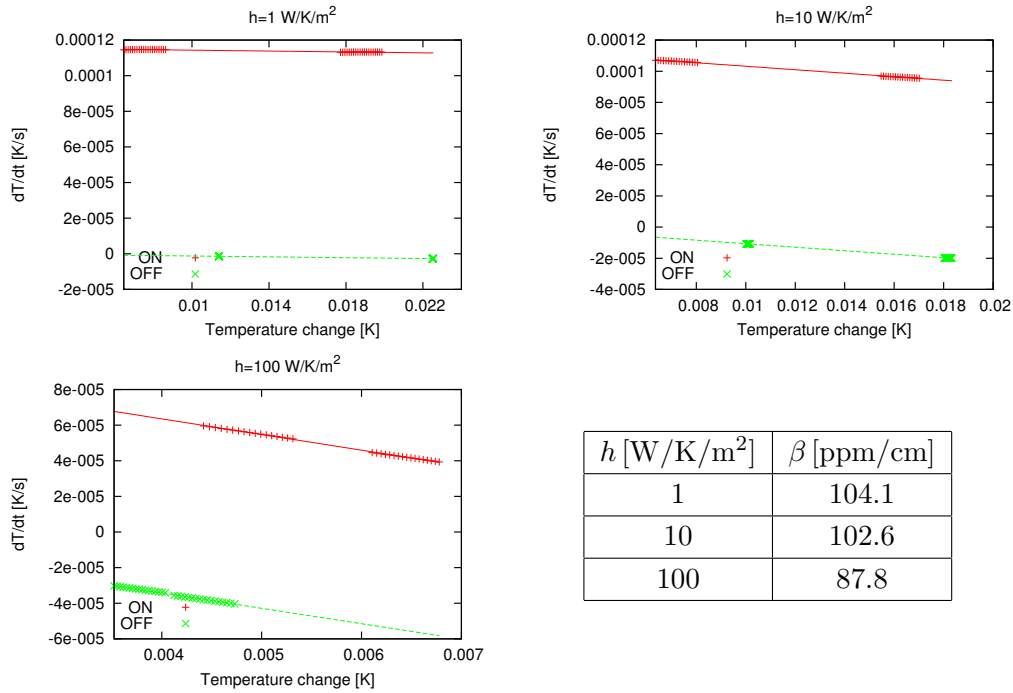


図 6.5: 数値計算による検証の結果。

## 6.2 実験の詳細

### 6.2.1 サーミスタ

サーミスタは、温度によって抵抗が変化する素子で、温度の測定に用いられる。本実験で用いたサーミスタは、石塚電子 103JT-025 である。図 6.6 に写真を、表 6.1 に定格値を示す。温度  $T$  [K] の時のサーミスタの抵抗  $R(T)$  は、温度  $T_0$  [K] の時のサーミスタの抵抗  $R_0$  と、B 定数と呼ばれる定数を用いて次の式で表せる。

$$R(T) = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (6.9)$$

本実験で用いた 103JT は、 $T = 25^\circ\text{C} = 298.15\text{ K}$  の時  $R = 10.0\text{ k}\Omega$ 、B 定数は  $3435\text{ K}$  なので、式 (6.9) は、

$$R(T) = 10.0 \times \exp \left[ 3435 \times \left( \frac{1}{T [\text{K}]} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \quad (6.10)$$

となる。この式を利用し、サーミスタに電流を流し、出力電圧を測定することで、温度を測定することができる。

表 6.1: 石塚電子製サーミスタ 103JT の定格値 [37]。 $R_{25}$  は  $25^\circ\text{C}$  の時の抵抗値。

$R_{25}$ [k $\Omega$ ]	B 定数 [K]	熱放散定数 [mW/ $^\circ\text{C}$ ]
$10.0 \pm 1\%$	$3435 \pm 1\%$	0.7



図 6.6: 測定に用いたサーミスタ。

### 6.2.2 サーミスタを用いた温度計の線形化

本実験で期待される温度変化は小さく、測定の際には温度計の出力を増幅する必要がある。AD コンバータの入力電圧範囲を超えず、かつ高い増幅率を実現するためには、温度計の出力からオフセットを引き算した後で増幅すればよい。この時、温度計の出力は温度に対して線形に変化することが望ましいが、式 (6.9) のように、サーミスタの抵抗値は温度に対して非線形に変化する。しかし、回路の工夫をすることで、ある温度の範囲内では近似的に線形応答させることができる。サーミスタを用いた温度計を線形化する方法として、本実験では図 6.7 に示す方法をとった。この方法は、サーミスタに並列にある値の抵抗を接続し、そこに一定の電流を流し、サーミスタにかかる電圧を測定する方法である。ここで並列に接続する抵抗  $R_1$  の値は、線形化する範囲に応じて異なり、線形化する範囲が狭いほど、より出力電圧は温度に対して直線的になる。本実験では、 $15^{\circ}\text{C}$  から  $35^{\circ}\text{C}$  の範囲で線形動作するように、回路を設計した。 $R_1$  の値の求め方については、以下で説明する。

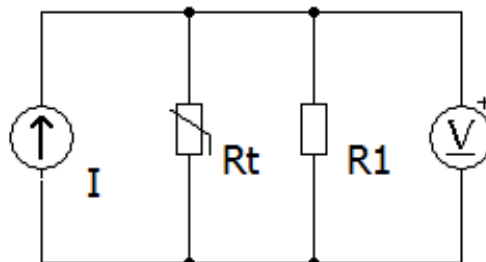


図 6.7: サーミスタの線形化。

サーミスタを用いた温度計を線形動作させる温度範囲の上限の温度を  $T_H$  [K]、下限の温

度を  $T_L$  [K]、それらのちょうど中間の温度を  $T_M$  [K] とする。また、温度  $T$  [K] の時のサーミスタの抵抗値を  $R_t(T)$  とおく。すると、サーミスタ及び並列に接続された抵抗の、全体の抵抗  $R_{\text{tot}}(T)$  は、

$$R_{\text{tot}}(T) = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_t(T)} \right)^{-1} \quad (6.11)$$

となる。ここで、式 (6.11) を、以下の式で近似することを考える。

$$R'_{\text{tot}}(T) = aT + b \quad (6.12)$$

式 (6.11) の  $R_{\text{tot}}(T)$  と式 (6.12) の  $R'_{\text{tot}}(T)$  を、 $T_L < T < T_H$  のすべての  $T$  で一致させることは不可能だが、 $T_L$ 、 $T_M$ 、 $T_H$  の3点で  $R_{\text{tot}}(T)$  と  $R'_{\text{tot}}(T)$  の値が一致するように  $R_1$  を選ぶことで、サーミスタを用いた温度計をほぼ線形化することが可能である。そのためには、連立方程式

$$\begin{aligned} aT_H + b &= \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_t(T_H)} \right)^{-1} \\ aT_M + b &= \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_t(T_M)} \right)^{-1} \\ aT_L + b &= \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_t(T_L)} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (6.13)$$

を解けばよい。式 (6.13) を、 $T_H - T_M = T_M - T_L$  に注意して解くと、

$$R_1 = \frac{R_t(T_M) [R_t(T_H) + R_t(T_L)] - 2R_t(T_H)R_t(T_L)}{R_t(T_H) + R_t(T_L) - 2R_t(T_M)} \quad (6.14)$$

と、 $R_1$  が求まる。また、直線の傾き  $a$  は、

$$a = \frac{R_{\text{tot}}(T_H) - R_{\text{tot}}(T_L)}{T_H - T_L} \quad (6.15)$$

となる。表 6.1 に示した定格値から、並列に接続する抵抗は  $R_1 = 7070 \Omega$  が最適で、そのときの傾きは、 $a = -65.5 \Omega/^\circ\text{C}$  となる。このときのサーミスタを用いた温度計の抵抗値の計算結果を図 6.8 に示す。

### 6.2.3 測定に用いた回路

図 6.9 にサーミスタを用いた温度計の回路図を示す。この回路では、まず基準電圧 IC MAX6241 によって定電圧をつくり、オペアンプの入力抵抗で決まる定電流を 6.2.2 で説明した線形化されたサーミスタ回路に流す。その出力と一定のオフセット電圧（可変抵抗によって調整可能）とを、計装アンプ AD620 で差動増幅する。AD620 の増幅率はトグルスイッチによって切り替えが可能で、はじめに低増幅率にしてオフセット電圧を調整し、出力を 0 V 付近に合わせた後、増幅率を上げ、測定を行う。増幅率を最大にした時、この回路の出力電圧の、温度に対する傾きの設計値は  $-2.734 \text{ V}/^\circ\text{C}$  である。

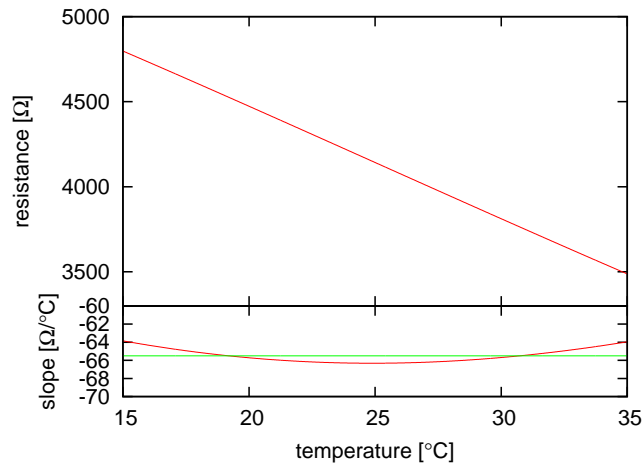


図 6.8: 線形化されたサーミスタの抵抗 (上) とその傾き (下)。下段の緑色の線は直線で近似したときの傾き (式 (6.12) の  $a$ )。

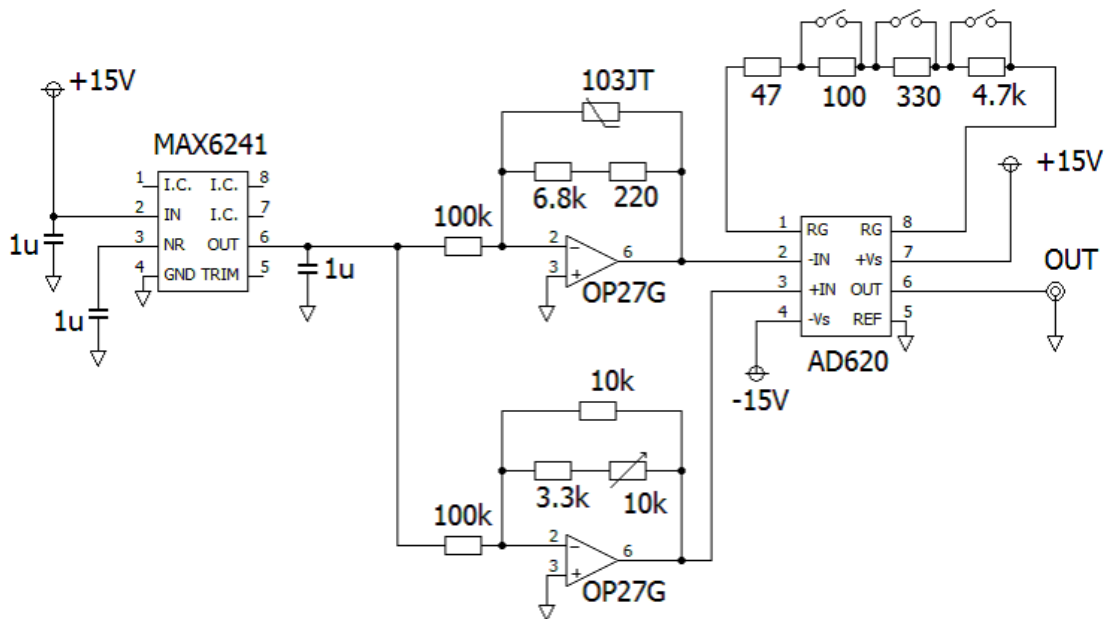


図 6.9: サーミスタを用いた温度計の回路図。出力電圧の温度に対する傾きは最大で  $-2.734 \text{ V}/^\circ\text{C}$  である。MAX6241 は基準電圧 IC で、出力電圧は  $4.096 \text{ V}$  である。AD620 は計装アンプである。



## 6.2.4 温度計の動作確認

図 6.9 の温度計が設計通りに動作するかを確認するため、IC 型の温度センサ<sup>4</sup>との比較を行った。図 6.10 のようにして、アルミ板に温度センサとサーミスタを取り付ける。アルミ板の反対側に取り付けられたヒーターによってアルミ板を加熱し、アルミ板の温度を変化させる。結果を図 6.11 に示す。このデータを直線でフィッティングしたところ、傾きは、 $-2.764\text{V}/^\circ\text{C}$ であった。設計値の  $-2.734\text{V}/^\circ\text{C}$  と比べると 1% ほどの差が見られるが、これはサーミスタの B 定数などの定格値（表 6.1）に 1% の誤差があるためで、回路自体は設計通りに動作していると判断できる。

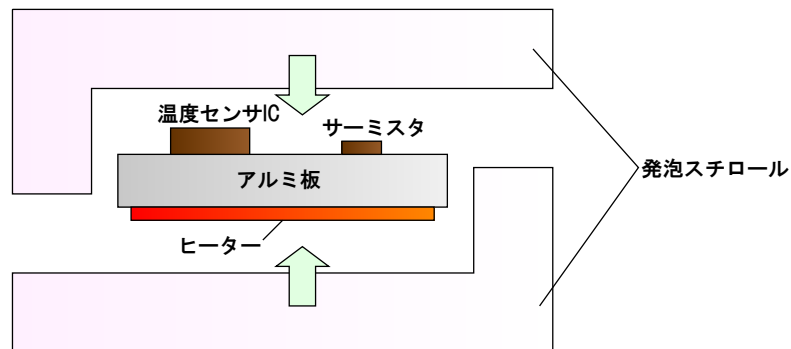


図 6.10: 温度計の動作確認。温度センサ及びサーミスタとアルミ板の接着部分には熱伝導グリス、ヒーターとアルミ板の接着には熱伝導両面テープを用いた。測定時には上下を発泡スチロールで覆い、外気の影響を少なくしている。

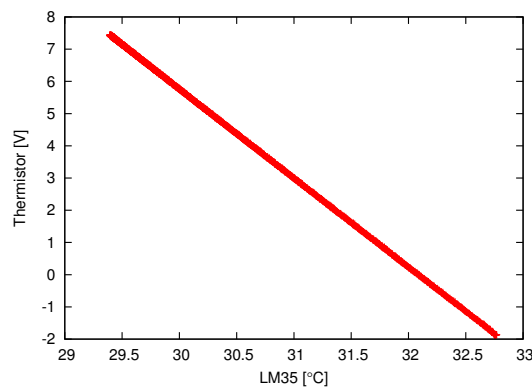


図 6.11: サーマスタを用いた温度計の動作確認の結果。横軸は温度センサーによって測定された温度、縦軸はサーミスタを用いた温度計の出力である。

<sup>4</sup>テキサスインスツルメンツ社 LM35DT を用いた。

### 6.2.5 試料

サーミスタを試料に取り付ける際には、シリコンの熱伝導グリスを塗布し、接触熱抵抗を低減している。また、試料には気泡緩衝シートを巻きつけてある。これは、試料と試料を置く台が直接接触することによる熱伝達を防ぐためと、周囲の温度変化による影響をなるべく小さくするためである。測定される状態の試料の写真を図 6.12 に示す。



図 6.12: サーミスタを取り付け、断熱材を巻きつけた状態の試料 (BK7)。

## 6.3 傾き合成法による測定結果

傾き合成法では、以下の試料の測定を行った。

- BK7。長さ 10 mm と 40 mm の 2 本。
- サファイア。GT Advanced Technologies 社製、プール P376 から切り出されたものと AC150 から切り出されたものの 2 本。

図 6.13~6.16 にこれらの試料の測定データを、表 6.2 に測定結果を、Michelson 干渉計での測定結果と併せて示す。

表 6.2: 傾き合成法による測定結果。干渉計での測定結果も併記した。

試料 \ 測定方法	傾き合成法	干渉計
BK7(10 mm)	1604 ppm/cm	2252 ppm/cm
BK7(40 mm)	1613 ppm/cm	2293 ppm/cm
サファイア (P376)	180 ppm/cm	88 ppm/cm
サファイア (AC150)	822 ppm/cm	675 ppm/cm

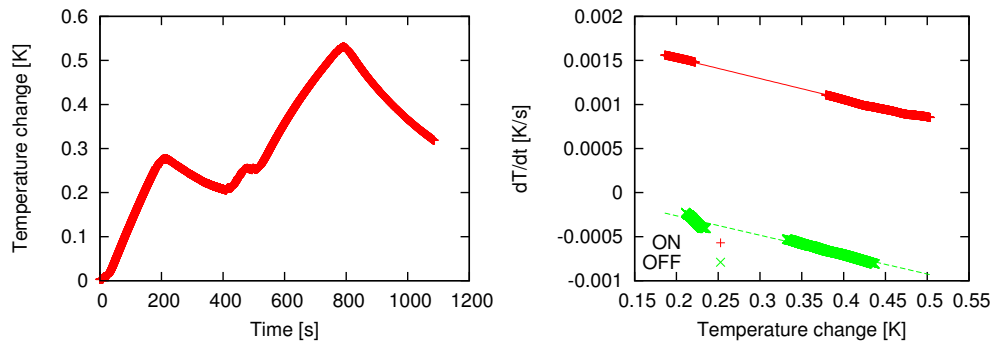


図 6.13: 長さ 10 mm の BK7 の測定データ。500 秒付近の小さな山は、この時レーザーが意図せず停止してしまったので、すぐに点け直したためである。

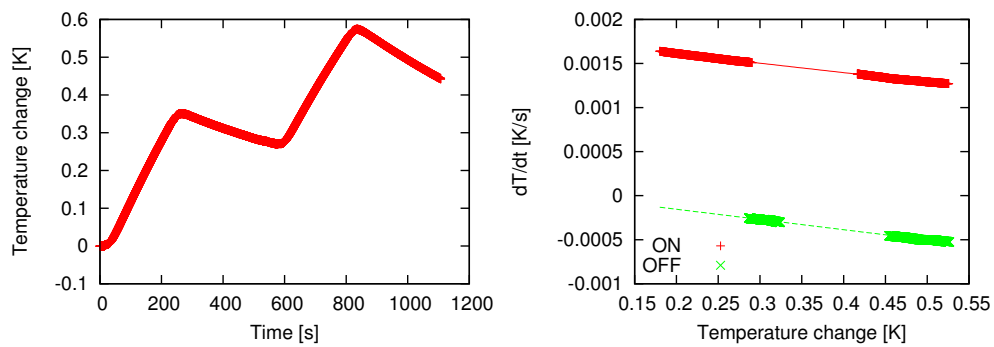


図 6.14: 長さ 40 mm の BK7 の測定データ。

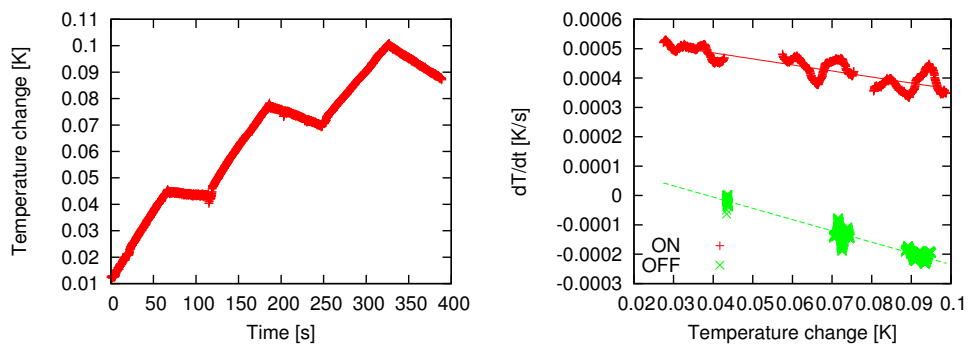


図 6.15: サファイア (P376) の測定データ。

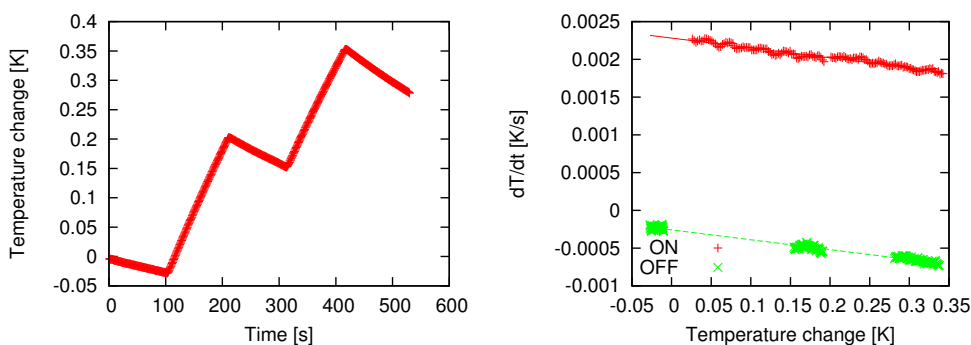


図 6.16: サファイア (AC150) の測定データ。

## 6.4 考察

図 6.2 から、

1. BK7 の場合、同じ方法での測定では、長さに関わらずほとんど同じ結果が得られた。しかし、干渉計による測定結果が傾き合成法での測定結果よりも 1.4 倍ほど大きな値となった。
2. サファイアの場合、どちらの試料も傾き合成法の方が干渉計による方法よりも 100 ppm/cm ほど大きな値となった。
3. BK7 とサファイアで、2 つの測定方法の大小関係が逆になった。

まず、1. であるが、このような結果となる原因の 1 つとして、光弾性効果が考えられる。光弾性効果とは、応力によって屈折率が変化する効果である [23]。干渉計で吸収係数を測定する時、局所的な温度上昇によって熱応力が生じ、これまで考えてきたよりも大きな屈折率変化が起こっていた可能性がある。そのため、干渉計による測定で吸収係数が大きめに得られたと考えられる。特に BK7 はサファイアに比べて光弾性係数が大きく [31]、かつ熱伝導率も小さいので熱分布が局所的になりやすく、光弾性効果が現れやすいと考えられる。

次に 2 だが、この原因として、試料内部で散乱された光がサーミスタに当たり、熱が発生していることが考えられる。図 6.17 は、レーザーをオンにする前後の温度変化の様子である。12 秒付近でレーザーを ON にした瞬間、温度が跳ね上がり、その後緩やかに温度が上昇していることが見てとれる。これは散乱光によるものと考えられる。レーザーを ON にすると、レーザーの当たっている試料中心部の温度が上がり始める。この時点では、この熱はまだ試料側面には到達していない。しかし、サーミスタは散乱光が当たることで発熱し、温度が急激に上がる。サーミスタの熱容量は試料に比べて十分小さいので、まだ温度の上がない試料外周部との間で、すぐに熱平衡に達する。その後、試料の中心部で発生した熱が試料の側面まで到達して温度が上がると、サーミスタの温度も上がり始める。この状態での温度変化の傾きが、測定結果にあらわれる。この時測定系で発生して

いる熱は、吸収によって生じる熱と散乱光によってサーミスタで発生した熱の和になるので、大きめの吸収係数が得られたと考えられる。

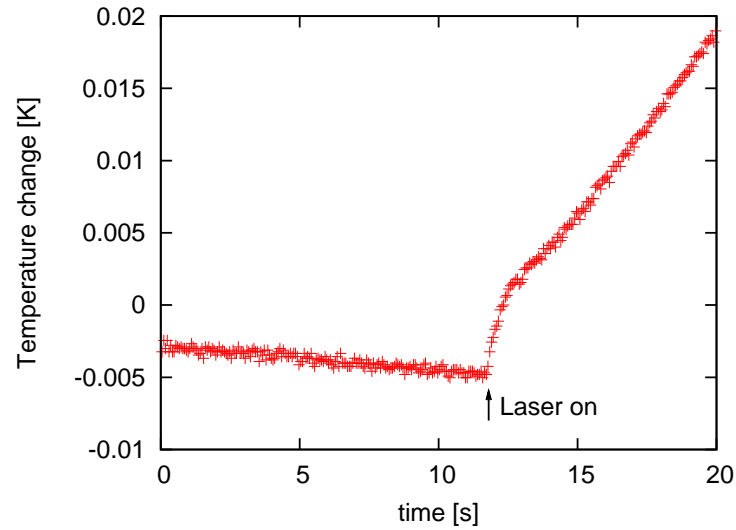


図 6.17: レーザー ON 直後の温度の振る舞い。

以上をまとめると、BK7では、光弾性効果によって干渉計を用いた測定で実際より大きな吸収係数が測定されるが、サファイアの場合は光弾性効果が小さく、散乱光の影響によりサーミスタによる測定で大きな吸収係数が測定されることが考えられる。光弾性効果の定量的な取り扱いや、低光弾性ガラスを用いた検証等が今後の課題となる。



## 第7章 まとめ

### 7.1 研究の概略

LCGT 計画で用いる鏡基材を評価することを目的とし、単一周波数ファイバー増幅器を用いた高性能光源を用いて、微小光吸収測定装置を作製した。この装置は、Michelson 干渉計の片腕に配置した測定対象の試料に強いレーザー光を入射させ、光吸収による温度変化を屈折率変化と熱膨張による光路長変化を取得し、吸収係数を求めるというものである。光路長変化から吸収係数への変換には数値計算を利用し、解析の高精度化を図った。そして、比較的吸収係数の大きな BK7 や、LCGT で鏡基材として用いられるサファイアなどの測定を行った。測定結果を表 7.1 に示す。サファイアについては異なるブルから切り出された複数の試料を用意し、結晶作製時の条件による吸収係数への影響を調べるため、製造会社への情報提供を行った。また、干渉計による方法とは別に、温度変化を直接測定する方法で吸収係数を測定し、測定結果の検証を行った。

表 7.1: Michelson 干渉計による測定結果。

BK7	
試料の長さ [mm]	吸収係数 [ppm/cm]
10	2252
40	2293

日本製サファイア

234 ppm/cm

GT Advanced Technologies 社製サファイア

ブル 吸収係数 [ppm/cm]

P376	88			
AA149	47	47		
AC150	229	138	680	675
P401	34	32	64	67

### 7.2 今後の展望

第 2 章から第 5 章までの Michelson 干渉計を用いる方法と、第 6 章での温度計を用いる方法とでは測定結果に差が見られた。この差の原因を解明し、測定結果の信頼性を向上させていくことが、今後の課題となる。そのためには、

- 光弾性効果の定量的な取り扱い。
- 低光弾性ガラスを用いた検証。

などが考えられる。



## 謝辞

この研究は多くの方々のご協力のおかげで進めることができました。最後に簡単ではありますが、ここで感謝の意を申し上げたいと思います。

指導教員の三尾典克特任教授には、卒業研究の時から3年間、この研究の最初の基礎的なことや、実験がうまくいかない時の解決策など、多くのご指導をいただき、大変お世話になりました。先生のご指導のおかげでこの研究を進めることができました。また、今年はお自身もお忙しい中、よく学生の居室に来て温かい言葉をかけていただき、励ましていただきました。本当にありがとうございました。来年度以降もお世話になりますが、よろしく申し上げます。

三尾研究室の助教の森脇成典氏には、回路の作り方や工作機械の使い方、装置の使い方、工具の扱い方など、たくさんの実験技術を教えて頂きました。また、私のあいまいな質問にも1つ1つ丁寧に答えていただき、大変お世話になりました。その他にも、研究室の備品等、実験環境の面でも、細かい心配りをしていただき、不自由なく実験をすることができました。ありがとうございました。

博士課程3年の森匠氏には、氏の実験が国立天文台で行われるようになって以降、あまりお会いできませんでしたが、柏に来た際には的確な助言をいただき、大変感謝しています。来年以降も是非、三尾研究室の飲み会などに参加し、熱い男ぶりを発揮してください！お待ちしております。

修士課程2年の高山圭吾氏の豊富な知識には、同学年として刺激を受けました。こうすればもっと感度良く測定できるのではないか、ああすればもっと簡単に実験できるのではないか、といった議論を氏としたことは、とても為になりました。就職先でのご活躍を祈っています。

修士課程1年の及川溪氏は、家が遠いにもかかわらず、研究室内で一番早く学校に来ることが多く、氏の研究態度を私も見習わなければと思いました。また、勉強熱心な姿に感心させられました。来年度以降もよろしく申し上げます。

修士課程1年の平谷真也氏は、おそらく三尾研究室初の計算屋で、研究室内に詳しい人が少ない中、よく外部の人と連絡をとって研究をすすめる姿に感心しました。また、氏の計算用の巨大なマッキントッシュに皆興味津々でした。来年度以降もよろしく申し上げます。

学部4年生の千葉智弘氏、古里博志氏の両氏は、よく論文を読んで勉強している姿が印象的でした。私も見習わなければと思いました。連名での卒論執筆は何かと大変かと思いますが、頑張ってください。両氏の卒業論文が素晴らしいものになることを期待しています。

研究室OBの大前宣昭氏には、実験の基礎的なことから、結果のまとめ方、発表資料の作り方、発表の仕方まで、非常に多くのことを教えて頂きました。ありがとうございました。

昨年度の卒研究生で、現在は物理工学専攻修士課程1年の安田真也氏とは、昨年1年間、共に実験し、主に非線形結晶の吸収測定を行いました。氏の冷静な意見のおかげで、本研究の測定装置をより洗練されたものにすることができました。ありがとうございました。

最後に、私の学生生活を支えてくれた両親に感謝します。ありがとうございました。この他にも、多くの方々に支えられて研究を進めることができました。本当にありがとうございました。

なお、本研究は文部科学省「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の支援によって実施しました。

## 参考文献

- [1] 三尾典克. 相対性理論 -基礎から実験的検証まで-. 臨時別冊・数理科学 SGC ライブラリ 56. サイエンス社, 6 2007.
- [2] J. Weber. Detection and generation of gravitational waves. *Phys. Rev.*, Vol. 117, No. 1, pp. 306–313, 1960.
- [3] J. M. Weisberg and J. H. Taylor. Relativistic binary pulsar b1913+16: Thirty years of observations and analysis. *ASP Conference Series*, Vol. 328, pp. 25–31, 2005.
- [4] 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健 (編). 重力波をとらえる: 存在の証明から検出へ. 京都大学学術出版会, 1998.
- [5] LCGT design document, 2003.
- [6] W. Winkler, K. Danzmann, A. Rüdiger, and R. Schilling. Heating by optical absorption and the performance of interferometric gravitational-wave detectors. *Phys. Rev. A*, Vol. 44, No. 11, pp. 7022–7036, DECEMBER 1991.
- [7] 三尾典克, 大橋正健 (編). 重力波アンテナ技術検討書. 1992.
- [8] 浅村憲郎, 高島宏平. 超低損失光学素子用合成石英の吸収係数の測定. 卒業論文, 東京大学, 1995.
- [9] 浅野大雅. 微弱光学吸収の測定法の開発. 卒業論文, 東京大学, 1996.
- [10] 白瀧一道. 低損失光学素子の吸収係数測定法の研究. 修士論文, 東京大学, 2000.
- [11] 桐原明宏. 光学吸収係数の絶対測定法の研究. 卒業論文, 東京大学, 2001.
- [12] 渡部恭平. マイケルソン干渉計を用いた微小光学吸収測定法の研究. 卒業論文, 東京大学, 2010.
- [13] 安田真也. 低損失光学結晶の吸収係数測定. 卒業論文, 東京大学, 2011.
- [14] P. Y. Baures and C. N. Man. Measurement of optical absorption at 1.06  $\mu\text{m}$  in low-loss materials. *Opt. Mater.*, No. 2, pp. 241–247, 1993.
- [15] V. Lorette and C. Boccara. Absorption of low-loss optical materials measured at 1064 nm by a position-modulated collinear photothermal detection technique. *Appl. Opt.*, Vol. 42, No. 4, pp. 649–656, 2003.

- [16] S. Hild, H. Lück, W. Winkler, K. Strain, H. Grote, J. Smith, M. Malec, M. Hewitson, B. Willke, J. Hough, and K. Danzmann. Measurement of a low-absorption sample of oh-reduced fused silica. *Appl. Opt.*, Vol. 45, No. 28, pp. 7269–7272, 2006.
- [17] LIGO. <http://www.ligo.caltech.edu>.
- [18] VIRGO. <http://www.cascina.virgo.infn.it>.
- [19] GEO600. <http://www.geo600.org>.
- [20] 国立天文台重力波プロジェクト推進室. [http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tama\\_j.html](http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tama_j.html).
- [21] 東京大学宇宙線研究所重力波グループ. <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/homej/grj.html>.
- [22] N. Ohmae. *Laser System for Second-Generation Gravitational-Wave Detectors*. PhD thesis, Tokyo univ., 2011.
- [23] B. E. A. Saleh and M. C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. Wiley, Inc., 1991.
- [24] K. Kuroda, M. Ohashi, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, K. Yamamoto, K. Kasahara, M-K. Fujimoto, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, D. Tatsumi, A. Ueda, M. Fukushima, S. Sato, S. Nagano, Y. Tsunesada, Z. H. Zhu, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Saito, T. Haruyama, N. Sato, Y. Higashi, T. Tomaru, K. Tsubono, M. Ando, T. Takamori, K. Numata, Y. Aso, K-I. Ueda, H. Yoneda, K. Nakagawa, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, K. Somiya, A. Araya, N. Kanda, S. Telada, H. Togashi, T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka, K. Oohara, H. Takahashi, O. Miyakawa, and M. E. Tobar. Current status of large-scale cryogenic gravitational wave telescope. *Class. Quantum. Grav.*, Vol. 20, pp. S871–S884, 2003.
- [25] F. Benabid, M. Notcutt, L. Ju, and D. G. Blair. Rayleigh scattering in sapphire test mass for laser interferometric gravitational-wave detectors I. measurement of scattering attenuation coefficient. *Opt. Commun*, Vol. 167, No. 7, 1999.
- [26] Z. Yan, L. Ju, F. Eon, S. Gras, C. Zhao, J. Jacob, and D. G. Blair. Large-scale inhomogeneity in sapphire test mass revealed by rayleigh scattering imaging. *Class. Quantum. Grav.*, Vol. 21, No. S1139, 2004.
- [27] Z. Yan, L. Ju, S. Gras, C. Zhao, P. Baringa, and D. G. Blair. Automatic rayleigh scattering mapping system for optical quality evaluation of test mass for gravity wave detectors. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, 015104, , 2005.
- [28] P. Hello and J.Y. Vinet. Analytical models of thermal aberrations in massive mirrors heated by high power laser beams. *J. Phys. France*, Vol. 51, pp. 1267–1282, 1990.

- [29] P. Hello and J. Y. Vinet. Analytical models of transient thermoelastic deformations of mirrors heated by high power cw laser beams. *J. Phys. France*, Vol. 51, pp. 2243–2261, 1990.
- [30] COMSOL 社. <http://www.comsol.com>.
- [31] M. J. Weber. *Handbook of Optical Materials*. CRC Press, 2003.
- [32] 株式会社オハラ. <http://www.ohara-inc.co.jp/jp/product/optical/dl/data/jsbsl07.pdf>.
- [33] 水上憲. 自動制御. 朝倉書店, 1968.
- [34] 京セラ. <http://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/tankessho.pdf>.
- [35] GT advanced technologies. <http://www.gtat.com/>.
- [36] 国立天文台 (編). 理科年表 第 8 3 冊. 丸善, 2010.
- [37] 石塚電子. <http://semitec.co.jp/index.html>.