

特別実験 I レポート

東京大学理学部物理学科4年

11554C 成田憲保

2002年9月18日

目次

第1章 実験の目的	2
1.1 歴史的背景	2
1.2 実験の目標	3
1.3 実験の原理	3
第2章 実験の方法	4
2.1 光学系	4
2.1.1 Michelson 干渉計の原理	4
2.1.2 2位相検出	5
2.1.3 実験のセットアップ	6
2.2 雑音抑制のための工夫	6
2.2.1 真空容器	6
2.2.2 ローパスフィルタ	6
2.2.3 ダンボールハウス	6
2.3 温度制御系	7
2.3.1 LM35 温度計	7
2.3.2 白金抵抗温度計	7
2.3.3 ペルチェ素子と PID 制御	8
2.4 解析	9
2.4.1 解析の原理	9
2.4.2 解析プログラム	9
第3章 実験の結果と考察	13
3.1 それぞれの工夫の効果	13
3.1.1 真空容器の効果	13
3.1.2 ローパスフィルタの効果	13
3.1.3 ダンボールハウスの効果	13
3.1.4 温度制御の効果	14
3.1.5 データ抽出の効果	15
3.1.6 データ補正の効果	15
3.2 最終結果	16
3.3 さらに改善するために	20

第1章 実験の目的

1.1 歴史的背景

Maxwellによって19世紀までに完成された電磁気学の理論は、人間には感知できない物質'エーテル'が存在し、エーテルが媒質となった力学的な作用によって電磁気力が生じるという近接作用の立場で構築されてきた。その考え方が正しいならば、宇宙に満ちたエーテルが静止した系としての絶対静止系を考えることができ、地球はその絶対静止系に対して相対運動していると考えることができる。

Michelsonは1881年にエーテルの存在を証明するため、地球がエーテルの風の中を進んでいると仮定して、ガリレイ変換の速度の加法性から地球のエーテルに対する相対速度を求める実験を行った。この実験結果は空間の異方性のパラメータ h について $h = 3 \times 10^{-9}$ となり、この結果は地球のエーテルに対する相対速度が非常に小さいものであることを示唆していた。そしてMichelsonはこの論文で絶対静止エーテルの否定を結論づけた。

この追試として、1887年にMichelsonとMorleyは光学系を1.5m四方で厚さが30cmある岩石の上に配置して、それを水銀の上に浮かべて実験を行った。この実験ではディレイラインを用いて、光路長は11mまで改良されていた。この実験の結果は $h = 1 \times 10^{-10}$ となり、これより地球の絶対静止エーテルに対する相対速度は公転速度の6分の1にも満たないことになってしまった。

Lorentzは1904年にこのMichelson-Morleyの実験結果をエーテルの考え方を保持したまま説明したが、Einsteinは1905年に発表した特殊相対論においてLorentzの理論を光速不変の原理と相対性原理からエーテルの存在を仮定せず説明した。このことから絶対静止のエーテルを仮定する必要性は失われ、電磁気現象はエーテルによる力学的モデルとは全く異なったものであることが明らかにされた。そしてこれが量子論と並んで20世紀の物理学の柱となった一般相対性理論を導くきっかけとなったことは言うまでもなく、Michelson-Morleyの実験が非常に意義のあるものだったことがわかる。

このようにして光速はあらゆる方向に対して不変であるという空間の等方性が仮定されることとなったが、この等方性の上限を技術の向上と共に向上させていくことも意義のあることである。現在までの最高精度の実験は1979年にBrilletとHallによって行われた実験で、2枚の反射鏡を一定距離で向かい合わせたFabry-Perot共振器を用いて、光学系を回転させ方向による共振周波数の変化を測る方法で行われた。この結果は $h = 5 \times 10^{-15}$ であった。

1.2 実験の目標

今回の特別実験では2つのことを目標とした。

ひとつは Brillat-Hall を上回る精度を目指すことと、もうひとつは今までに行われてきた実験とは異なる手法を試してみることである。

Michelson-Morley の実験では光学系を自分で回転させ、Brillet-Hall の実験ではそこに Fabry-Perot 共振器を使うことを特徴としており、今までの修士・学部生による実験もそれになってきていた。今回の実験ではそれとは異なり、自分から力を加えて光学系を回転させることなく、地上に静止させたままにして地球の自転に光の方向の回転を任せる方法を取ることにした。

この方法では回転の遠心力による光学系の歪みなどが無い反面、熱雑音など自然に存在する雑音が低周波ほど大きくなることや長時間の測定を要するため安定性を保つことが困難であることなどの不利な点が多いが、それを克服して精度を高める工夫を目指した。

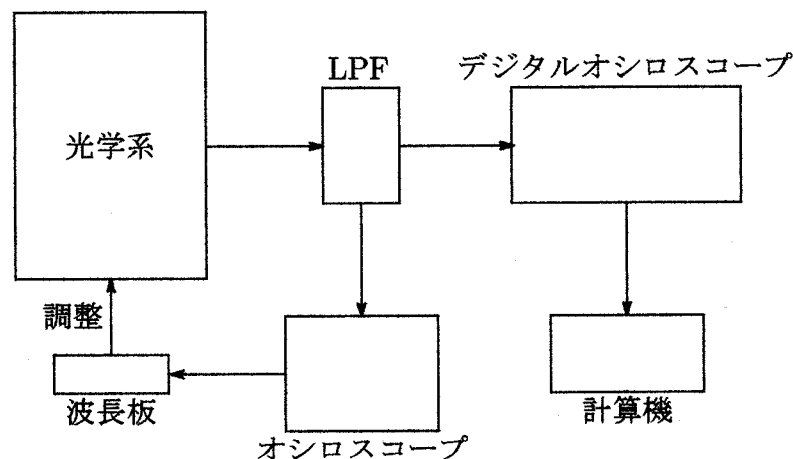
またこの方法によって光学系を回転させることに起因する雑音以外の要素で、空間の等方性を検証する上でどのような要素が精度の上限を決めているのかを考察した。

1.3 実験の原理

空間の等方性を検証するためには、光学系として基線長 L の Michelson 干渉計を用い、今回の場合には 12 時間周期で変動する 2 方向の光路差の変位 ΔL を求め、空間の異方性のパラメータである $h = \Delta L/L$ を求めればよい。ただし、地球の公転のために空間の方向が元に戻る周期は正確には 12 時間ではないが、今回の測定ではオーダーに大きな影響はないと考えて無視することにする。

光学系で得られたデータは適当なフィルターを通した後、デジタルオシロスコープで計測・記録し、それを計算機に取り込んで解析を行う。具体的な実験の方法については次節で説明する。

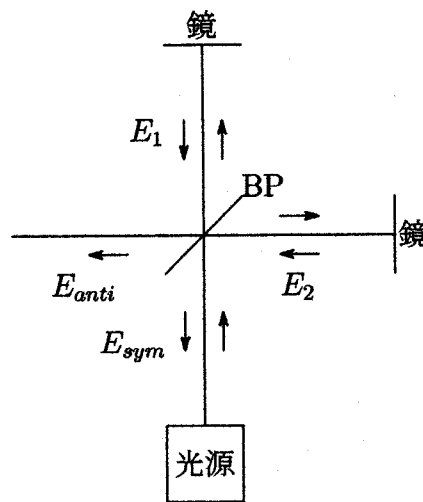
実験系全体の概念図



第2章 実験の方法

2.1 光学系

2.1.1 Michelson 干渉計の原理



Michelson 干渉計の概略図は上のようになる。それぞれの光路長を L_1, L_2 、光速を c_1, c_2 とおいて、光源からの入射電場を

$$E_i = E_0 \exp(i\omega t)$$

とおくと、鏡からビームスプリッター (BP) に戻ってくる電場は、

$$E_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_i \exp\left(-i\frac{2L_1\omega}{c_1}\right) \equiv -\frac{1}{\sqrt{2}} E_i \exp(-i\varphi_1)$$

$$E_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_i \exp\left(-i\frac{2L_2\omega}{c_2}\right) \equiv -\frac{1}{\sqrt{2}} E_i \exp(-i\varphi_2)$$

となるので干渉後の電場は $\varphi_+ \equiv \varphi_1 + \varphi_2$ 、 $\varphi_- \equiv \varphi_1 - \varphi_2$ とおくと以下のようなになる。

$$E_{sym} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_1 + E_2) = -E_i \exp\left(-i\frac{\varphi_+}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi_-}{2}\right)$$

$$E_{anti} = \frac{1}{\sqrt{2}} (-E_1 + E_2) = -iE_i \exp\left(-i\frac{\varphi_-}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_+}{2}\right)$$

E_{sym} と E_{anti} をそれぞれフォトディテクターで検出すると、それぞれの強度は入射電場の強度を $P = |E_i|^2$ とおいて、

$$P_{sym} = |E_{sym}|^2 = P \frac{1 + \cos \varphi_-}{2}$$

$$P_{anti} = |E_{anti}|^2 = P \frac{1 - \cos \varphi_-}{2}$$

となる。この和と差を取ると、次の式が求まる。

$$P_{sym} + P_{anti} = P$$

$$P_{sym} - P_{anti} = P \cos \varphi_- \cdots ※$$

和を取った式は自明なエネルギー保存則を示し、差を取った式からは異方性の情報が得られる。すなわち φ_- を $c_+ = c_{typ} = \frac{c_1 + c_2}{2}$, $c_- = \frac{c_1 - c_2}{2}$ を用いて書き換えると、

$$\varphi_- = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\omega \left(\frac{L_1}{c_1} - \frac{L_2}{c_2} \right) = 2\omega \frac{(L_1 - L_2)c_+ - (L_1 + L_2)c_-}{c_+^2 - c_-^2}$$

となるので、 $c_1 = c_2 = c$ あるいは $L_1 = L_2$ とおけば、空間の異方性のパラメータである $h = \Delta L/L$ あるいは $h = \Delta c/c_{typ}$ と関連付けることができ、

$$h = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta c}{c_{typ}} = \frac{c_{typ}}{2\omega L} |\varphi_-| = \frac{\lambda}{4\pi L} |\varphi_-|$$

となる。

2.1.2 2位相検出

※の式から得られるのは $\cos \varphi_-$ であり、 φ_- を直接求めることはできない。このためこの実験では $\lambda/2$ 板と $\lambda/8$ 板を用いて φ_- を求める2位相検出を行っている。

λ/n 板は偏光方向によって屈折率が異なっており、屈折率が最小になる結晶軸を高速軸、最大となる軸を低速軸と呼び、この偏光板を通ると低速軸に平行な偏光の波長が λ/n だけ、つまり位相が $2\pi/n$ だけ遅れるという特徴を持つ。

この実験ではまず光源から出た直線偏光を $\lambda/2$ 板に通して、S偏光とP偏光の強度が等しくなるように調整する。さらにビームスプリッターで分けた光路の一方に $\lambda/8$ 板を置き、往復で位相を $\pi/2$ 遅らせる。

すると干渉光を偏光ビームスプリッターでS偏光とP偏光に分けて検出すれば、※より

$$\Delta P_S = P \cos \varphi_-$$

$$\Delta P_P = P \cos(\varphi_- + \pi/2) = -P \sin \varphi_-$$

となって、

$$\varphi_- = \arctan \frac{-\Delta P_P}{\Delta P_S}$$

から φ_- を求められる。

2.1.3 実験のセットアップ

今回の実験では金属製の机の上に実験装置を置いて測定を行った。実験装置は上面に光学系、中段にレーザー光源、下段は足となっており、足には傾き制御機能が備わっているが今回は使用しなかった。

光源は波長 1064nm の Nd:YAG レーザーを用いて、中段の $\lambda/2$ 板を通して上面の光学系に光を送るようになっている。先に説明した 2 位相検出の光路を通ってきた干渉光は、偏光ビームスプリッターを通してフォトディテクターで検出される。そしてそれぞれの偏光の差の成分を電圧の大きさとしてオシロスコープで観察し、台を叩くなどの振動を与えた時に XY モードのオシロスコープ上で輝線が大きく円を描くように $\lambda/2$ 板と $\lambda/8$ 板を調整した。

今回はこの初期状態から少しずつ雑音抑制の試行錯誤を重ねて実験を行った。実験は解析用プログラムの作成と雑音抑制のための工夫を同時進行で進めていった。以下にその流れをまとめる。

2.2 雑音抑制のための工夫

2.2.1 真空容器

測定はまず ΔL を求めることから始めた。しかし初期状態において数時間の測定で得られた ΔL は非常に大きく変動し、位相にして 6π 以上の変動をしていた。

この変動の大きな原因として実験室中の空気の流れが考えられた。初期状態では光学系は実験装置の上面にあり、実験室の空気に剥き出しになっているので、レーザー光は光学系を通る際にこの空気の流れから大きな雑音を拾ってしまうと考えられる。

そこでこの光学系に真空容器のふたをかぶせ、空気の流れを抑えることにした。これ以降の実験は、ふたをかぶせたまま真空容器内は大気圧で測定を行った。

2.2.2 ローパスフィルタ

この実験のターゲットは 12 時間周期 ($\sim 10^{-5}\text{Hz}$) で変動する成分であるが、初期状態では昨年度の学生実験で作成された 1.06Hz のローパスフィルタが取り付けられていた。このローパスフィルタを改造し、カットオフ周波数を $7.2 \times 10^{-2}\text{Hz}$ とした。

2.2.3 ダンボールハウス

最終的に精度の向上に実験装置の温度を一定に保つ必要が出てきたため、能動的な温度制御と平行して受動的な温度制御を行うため実験装置をすっぽりと囲むダンボールハウスを作成した。ダンボールハウスと共にそれらを取り囲むことができる大きなビニール袋も併用して、外部との断熱を目指した。

2.3.3 ペルチェ素子とPID制御

ペルチェ素子は電流を供給することによって、一方の面から他方の面へ能動的に熱の移動を起こさせる素子である。電流の向きに応じて熱の移動する方向が変化するので、この素子によって冷却と加熱の両方を行うことができる。

今回の実験においては、ダンボールハウスに一箇所だけ開けた穴に大きなヒートシンクをはめ込み、このヒートシンクを一定温度に保つことで実験装置内部を一定温度に保つことを試みた。このためヒートシンクの実験装置内部に入った部分に白金抵抗温度計を装着し、実験装置外部に面した部分に約1Aまで電流を流せるようにしたペルチェ素子を3個取り付けた。

ペルチェ素子を有効に作動させるためには、設定温度と測定温度の差に応じて適切なゲインを与える制御系が必要となる。そのためこのペルチェ素子の性能をなるべく最適化したPID制御回路を作成した。

PID制御とはそれぞれ比例 (Proportional) 制御、積分 (Integral) 制御、微分 (Derivative) 制御の頭文字を取ったもので、これらを併用することによりペルチェ素子の制御量を最適化することができる。

P制御では設定温度と測定温度に差があった時、その差に比例した制御量を出力する。この実験においては、基準電圧と白金抵抗温度計の出力電圧との偏差を差動回路を用いて取り出して、その電圧に応じた電流をペルチェ素子に流すことで実現される。

一見するとこの方法だけでも設定温度への制御が可能に見えるが、実際には偏差が小さくなってくると制御量も小さくなってしまい、設定値とある程度ずれた位置で外界との温度差による自然な熱の移動とペルチェ素子による能動的な熱の移動がつりあってしまうため、定常的な偏差が生じて設定値に収束することができなくなる。

この困難を克服するためにI制御を加える。I制御はそれまでの制御量の積分値に比例した制御量を出力する。この実験においては設定温度と測定温度の偏差が小さくなった時に、制御回路のゲインを大きくする効果を持つ。これによって定常的な偏差を小さくし、設定値へと収束させることができる。

しかしPI制御における欠点は、偏差が小さくなった時にゲインを大きくしてしまうため、設定値に向かって収束して来た測定温度が設定値を追い越して発振してしまい、収束への時間がかかってしまうことである。

この過渡特性の欠点を改善するためにD制御を加える。D制御はその瞬間の偏差の微分に比例した制御量を出力する。この実験においては測定温度が設定温度に向かって収束してくる時には制御回路のゲインを小さく、逆に離れていく時にはゲインを大きくする効果を持つ。この制御によって偏差は発振することなく設定値に向かって収束していくことになる。

今回作成したPID制御回路は金属片を用いて性能を試した結果、設定値から $\pm 5K$ 程度ずれていても設定値に収束させることができた。

2.4 解析

2.4.1 解析の原理

今回測定される量は地球の自転によって12時間周期で方向が1回転するような、あるサンプリング時間間隔 Δt で測定された位相 φ_- についてのN個のデータ列である。ただし $N\Delta t$ は12時間より長い必要がある。

このデータの中から $n\Delta t$ が12時間となるような連続したn個のデータ列を取り出し、そのデータに複素 Fourier 変換を施せば ΔL の12時間周期成分を取り出すことができる。この取り出すデータ列をひとつずつずらして複素平面上に Fourier 成分をプロットしていくと、これは複素平面上を連続的に動く点列となる。統計的な誤差を除去するためには、この点列を複素平面上で平均してやればよく、その平均された複素 Fourier 成分の絶対値が求める ΔL の12時間周期成分である。

今回の実験では解析用ソフトウェアとしてMATLAB6.1を使用した。測定に際してはNを $10^5 \sim 10^6$ 程度のオーダーで取得し、そのデータを処理しやすくするためデジタルフィルターをかけて 10^3 程度に圧縮した。これはデータを取得するデジタルオシロスコープのサンプリングレートの下限が1Hzだったための措置である。

2.4.2 解析プログラム

解析プログラムの主要部とその意味を以下にまとめる。

```
data=resample(dat,1,ratio);  
%ratio:リサンプリング効率  
x0=data(:,1);  
y0=data(:,2);  
z0=data(:,3);  
w0=data(:,4);  
%0つき:最初と最後の修正なし  
%z:温度  
%w:設定温度と測定温度の差  
x=x0(10:m0-7);  
y=y0(10:m0-7);  
z=z0(10:m0-7);  
w=w0(10:m0-7);
```

まず測定データを'dat'という変数名で配列に格納し、圧縮効率を'ratio'という変数で入力する。'dat'は $X \equiv \Delta P_S$ 、 $Y \equiv -\Delta P_P$ 、レーザーヘッドの温度、温度制御の設定温度と白金抵抗での測定温度の差のデータからなる、4列のデータである。resample コマンドによって'data'に圧縮した配列を格納する。この時resample コマンドによってデータの最初と最後の数個に誤差が生じるのでそれをカットしてx,y,z,wと名付ける。

```
theta=atan2(y,x);
```

```
%反転防止プログラム
```

```
for k=1:m-1,  
    dtheta(k,1)=theta(k+1,1)-theta(k,1);  
    if dtheta(k,1)>pi*5/3+4*pi  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)-6*pi;  
    elseif dtheta(k,1)>pi*5/3+2*pi  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)-4*pi;  
    elseif dtheta(k,1)>pi*5/3  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)-2*pi;  
    elseif dtheta(k,1)<-pi*5/3-4*pi  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)+6*pi;  
    elseif dtheta(k,1)<-pi*5/3-2*pi  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)+4*pi;  
    elseif dtheta(k,1)<-pi*5/3  
        theta(k+1,1)=theta(k+1,1)+2*pi;  
    end  
end
```

```
d10=1064e-9/4/pi*(theta);
```

```
%d10:ゼロ点補正なしの光路差
```

```
dlmean=mean(d10);
```

```
d1=d10-dlmean;
```

```
%d1:mean にゼロ点を補正した光路差
```

次に φ_0 にあたる位相を x, y から求め 'theta' に格納する。この時位相が 2π より大きくなってしまうと不連続に -2π へと値が変化してしまうため、このような反転を防止するプログラムを作成した。上のプログラムでは初期位相から上下に3周まで回っても問題が起らないようにしてある。さらにこのようにして求めた連続的な 'theta' から、 ΔL にあたる 'd10' を求める。ただし ΔL には基準となるゼロ点が存在しないので、グラフを書く都合上その平均値をゼロ点に取ったものが 'd1' である。

また計算を行う上で補助的な変数を次のように作成した。正確には地球の自転による方向変化の周期は、公転のために12時間ちょうどではないが、今回は12時間のままで結果を出すことにした。

```
%m:全データ数
m=length(x)
%cut:1時間あたりのデータ数→切り出したい時間をかけて使う
cut=rate2*3600/ratio;
%hour12:12時間あたりのデータ数
hour12=60*60*12*rate2/ratio;
%rate2:サンプリングレート
%rate:リサンプリング後のレート
rate=rate2/ratio;
%time…単位は時間
time=[0:m-1]'/rate/3600;
%f:求めたい成分の周波数
f=1/(60*60*12);
omega=2*pi*f;
%factor:フーリエ変換因子
factor=exp(i*omega*(1:m)/rate);
```

また途中経過を観察するため、Fourier成分の絶対値がどのように時間変化しているか調べるプログラムを以下のように作成した。これは全ての12時間連続データの複素 Fourier成分を取り出して、その絶対値を時系列で並べたものである。

この時設定によっては'hour12'が整数値とならないことがあるが、その場合はfixコマンドを用いて整数化した。

```
%フーリエ成分の絶対値の時間変化
for q=1:m-hour12+1
    dZc=(factor(q:q+hour12-1)*dl(q:q+hour12-1))/hour12;
    dZc2=dZc*sqrt(2);
    dZc3(q-1+6*cut,1)=abs(dZc2);
    plot((q-1)/cut+6,dZc3(q-1+6*cut,1),'g. ')
    hold on
end
```

最終的に空間の異方性のパラメータ h を求めるプログラムは以下のようになる。

%全ての12時間連続データの複素フーリエ成分を平均するプログラム

```
for q=1:m-hour12+1
    dZa=exp(-i*q*2*pi/hour12)*(factor(q:q+hour12-1)*dl(q:q+hour12-1))/hour12;
    dZa2=dZa*sqrt(2);
    plot(dZa2,'c.')
    AXIS([-1e-007 1e-007 -1e-007 1e-007])
    hold on
    dZa3(q,1)=dZa2;
end

dZa4=abs(mean(dZa3));
h=dZa4/0.4
```

基本的に結果である h は上のようにして求めたが、このデータに若干の操作を加えて精度を向上させることができないかを試みた。

具体的には、測定結果からある時間における ΔL とレーザーヘッドの温度と Fourier 成分の絶対値の3つに相関が見られたため、次のような予備プログラムを作成した。

1. データ抽出

Fourier 成分の時系列がほぼ一定に収まっている部分のデータを切り出して、改めてそのデータで上と同じ解析を行う。

2. データ補正

ΔL とレーザーヘッドの温度の相関を取るため、両者が共に一次直線的に動いているデータを抽出して、そのデータから両者の関係式を求め、温度の効果によるものと考えられる ΔL を引き算したデータによって解析を行う。下のプログラムでは両者の相関を X で表してあり、ここに実測値を代入して用いる。補正後の結果は hr である。

%温度の効果をさっぴくプログラム

```
th=z/0.01;
thmean=mean(th);
T0=th-thmean;
Tdl=T0*(X);
factor0=factor(6*cut+1:m);
dlr=dl-Tdl;
dlr1=mean(dlr.*factor0');
dlr2=dlr1*sqrt(2);
dlr3=abs(dlr2);
hr=dlr3/0.4
```

第3章 実験の結果と考察

3.1 それぞれの工夫の効果

3.1.1 真空容器の効果

真空容器のふたを使用せず、外部に光学系を剥き出しにしたまま行った測定の結果は $h \sim 10^{-6}$ より小さくなることはなかった。そこで真空容器でふたをすることによって精度は $h \sim 10^{-8}$ まで向上した。

この実験において光学系を真空容器やそれに準ずるもので外部から遮断することは必須であると言える。

3.1.2 ローパスフィルタの効果

ローパスフィルタを付け加えることによる h 自体の精度の向上はあまり見られなかった。しかし、今回のように膨大な量のデータを取得する場合、ノイズの削減と共に無駄なデータ量を減らす必要がある。

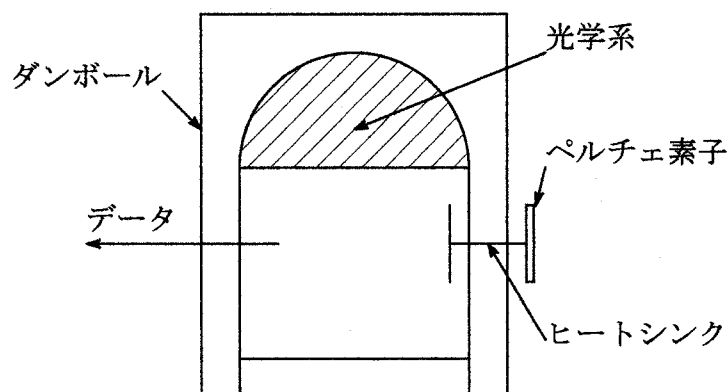
今回用いたデジタルオシロスコープはサンプリングレートの下限が 1HZ であったため、作成したカットオフ周波数 7.2×10^{-2} Hz のローパスフィルタの能力を十分に発揮することはできなかった。だが、実験室で人が歩く振動など速い成分のノイズに関しては十分に排除することができたと考えられる。

3.1.3 ダンボールハウスの効果

ダンボールハウスは実験装置内の温度を受動的に一定に保つために作成した。しかしその保温能力はあまり高くなく、ダンボールハウスとビニール袋を導入した複数のデータを見ると、クーラーの ON/OFF による室内温度の変化がそのまま実験装置内の ± 3 K 程度の温度変化につながってしまっており、効果としてはその変化を少し遅くする程度のものであった。そのためダンボールハウス+ビニール袋の状態でクーラーを一週間つけっぱなしにして、実験室内の温度をあまり変化させないようにして測定するという実験を試してみた。この結果、実験装置内の温度変化は 1K 以内に保たれ、 $h = 6 \times 10^{-10}$ という精度を実現できた。しかし、1回でもクーラーの ON/OFF があると大きな温度変化のノイズを受けてしまい、クーラーの ON/OFF を伴ったそれ以外の測定ではその値より向上することはなかった。

3.1.4 温度制御の効果

実験装置概念図



温度制御を行った実験装置の概念図は上のようになる。温度制御の直接の対象は、実験装置の外部と内部の両方に面した大きなヒートシンクであり、ヒートシンクの実験装置内部側の部分に白金抵抗温度計を装着した。白金抵抗温度計の測定温度に対するペルチェ素子の設定温度は約 29℃とした。

これによって実験装置内部の温度はその設定温度になることが期待される。しかし、実験装置内部の温度の指標として LM35 温度計をレーザーヘッド部に装着していたが、この温度を一定に保つことはできなかった。レーザーヘッド部の温度、および設定温度と測定温度の差を同時にオシロスコープで観察してみると、レーザーヘッド部の温度変化(周波数は 1Hz ほど)に同期して、それを打ち消す向きにペルチェ素子が働いているように見えた。ただしレーザーヘッド部の温度のゆらぎは 1K 程度、ヒートシンクの温度のゆらぎは数 mK 程度だった。これはヒートシンクの応答が十分に速いため、レーザーヘッド部の温度変化がこれに伝わり瞬時に打ち消しているのだと考えられる。このような速い温度変化がどの程度問題になるのかは完全に外部からの影響がなくなってからでなければわからないが、これを解決する方法としてはさらにレーザーヘッド部にもペルチェ素子を取り付ける方法が考えられる。

今回はこの温度制御系を用いて 30 日間の長期測定を行った。結果として、30 日あまりの測定期間中クーラーの ON/OFF で外部の温度が $\pm 3\text{K}$ 程度以上ゆらいでも、レーザーヘッドの長期的な温度変化をほぼ 1K 以内に抑えることができた。ここでの長期的な温度変化は、温度変化を始めた時間とクーラーの ON/OFF を行った時間の比較から、やはりクーラーの影響を受けているものだと考えられた。このように未だにクーラーの影響を受けてしまった理由としては、実験装置の足が直接金属製の机の上に乗っているため、外部の温度変化が主に机を通して実験装置内部に伝わってしまったためと考えられる。このような影響を遮断するためには、机を断熱性のものに変えるなどの対策が必要である。またレーザーヘッド部が温度変化をしている間も、ペルチェ素子の温度制御によって設定温度と測定温度の差は数 mK に保たれていた。このことからペルチェ素子自体の温度制御性能は mK のオーダーで実現されていることがわかる。しかし結局レーザーヘッド部の温度は長期的に 1K 程度ゆらいでしまい、完全な温度制御とはいかなかった。

3.1.5 データ抽出の効果

今回の実験では、長い測定時間の中に比較的 Fourier 成分の絶対値が変動が小さい部分が見られた。このデータを抽出すれば Fourier 成分は複素平面上で原点から大きく外れることなく、ほぼ一定の円周上を動くことになる。さらに Fourier 成分の複素平面上での動きを観察すると、おおよそ Fourier 成分の絶対値によらず、原点のまわりを回っている様子が見て取れた。このように原点のまわりをちょうど何周か回りきった時のデータを抜き出せば、平均化されて平均の絶対値が小さくなることが予想される。

しかしこのようなデータを正確に抽出することは難しく、思うような効果は得られなかった。これは多少絶対値が動いたり原点のまわりをきちんと回りきって止まらなくとも、長時間の測定を行えばデータ量の増加によって平均の絶対値が小さくなるため、適当に抽出した場合よりも単に全てのデータを使ったほうがよりよい結果が得られることによる。

このようなデータ抽出によって精度の向上を目指すためには、Fourier 成分の絶対値がほぼ一定のまま複素平面上での位相が 2π の整数倍だけ回転しているデータを自動的に抽出できるようなプログラムを作ることが必要である。しかし、今回の実験ではその作成までは至らなかった。

3.1.6 データ補正の効果

この方法は温度変化が ΔL に与える影響を、温度と ΔL のデータから一次関数的な相関を取って見積もり、そこから温度由来と考えられる Fourier 成分を計算して元のデータから引くという方法で行った。

しかし温度変化と ΔL の変化は確かに相関はあると見えるものの、どのような関係式で結びついているのかは全くわからず、一次比例関係を仮定してもその傾きの正負からして定めることはできなかった。そこで一定の相関関数を仮定せずに、その時その時の実測値を用いて温度由来の成分を見積もることにした。

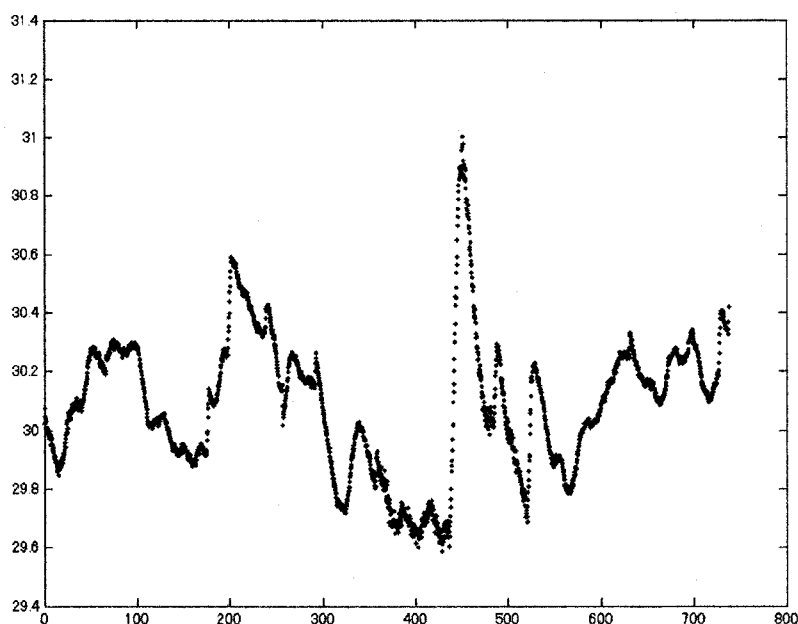
効果としてはおおむね異方性のパラメータの値を 30% ほど小さくすることができたが、オーダーを上げることはできなかった。この方法が考え方として正しく、しかもきちんとできるようになれば温度変化を気にする必要はもはやなくなるが、この実験装置の応答を正確に求めることは至難であり、温度制御をさらに向上させる方が現実的だと考えられる。

3.2 最終結果

今回の実験では3回の長時間測定において $h \sim 10^{-10}$ の結果が得られた。その中から最も良い結果となった30日間(720時間)の測定結果と、温度変化と ΔL およびFourier成分の絶対値によく相関が見られた結果を示す。

まず9月5日に取得した720時間の測定におけるデータを示す。この元データは $N \sim 3 \times 10^6$ 以上あるため、解析の都合上1000分の1に圧縮してある。

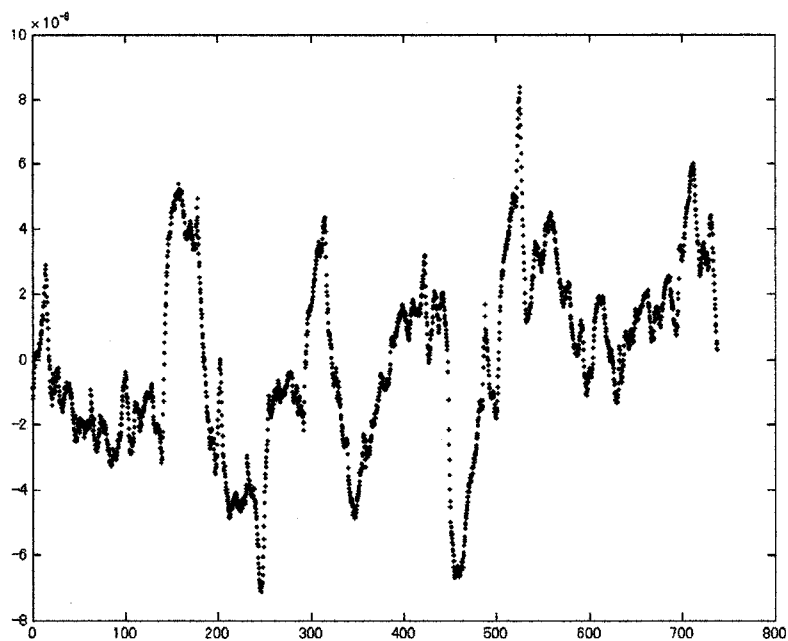
9月5日取得データ：温度変化の時系列



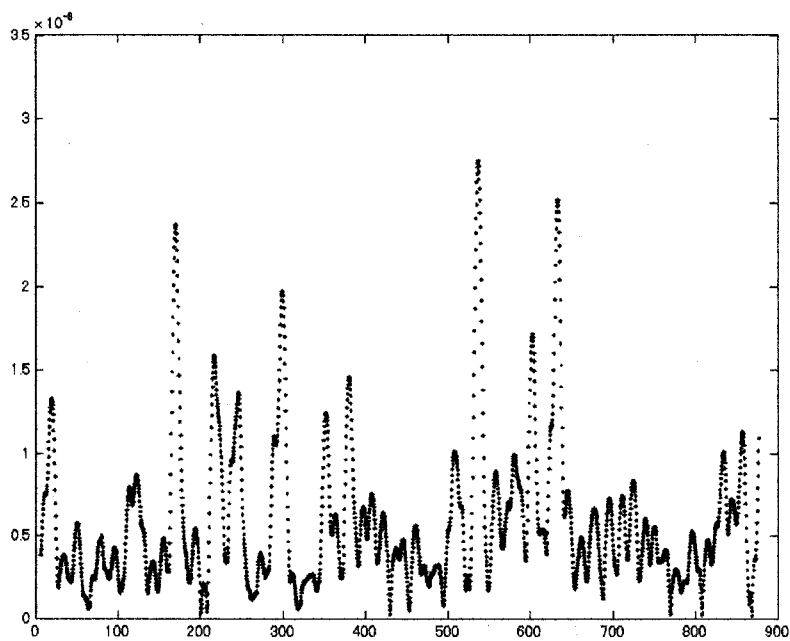
このデータからペルチェ素子による温度制御とダンボールハウスなどによる断熱補助の結果、720時間での温度変動幅は1.4Kに抑えられていることがわかる。しかし、本来なら今回作成したペルチェ素子の性能は温度変動をより小さくできるものと考えられるが、実験装置の底が金属製の机と断熱されていない状態になっていたため、クーラーのON/OFFの影響を受け温度変動をしてしまったものと考えられる。この外部との断熱の改良には精度改善の余地がある。

次のグラフは同じデータの ΔL と Fourier 成分の絶対値の時系列データである。 ΔL は温度変化とほぼ同時に変動が起こり、Fourier 成分の絶対値は ΔL が大きく変動した時刻に値が大きくなっていることがわかる。

9月5日取得データ： ΔL の時系列

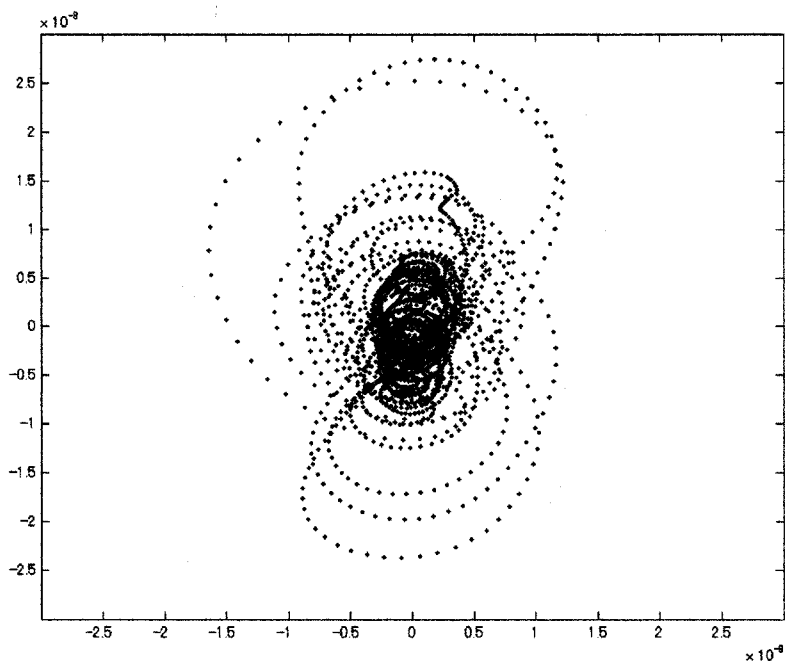


9月5日取得データ：Fourier 成分の絶対値の時系列

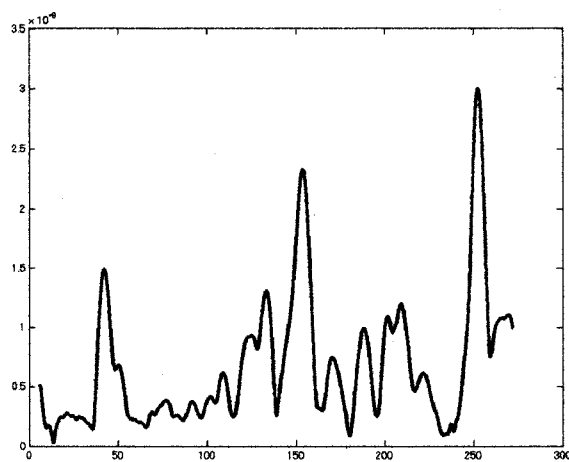
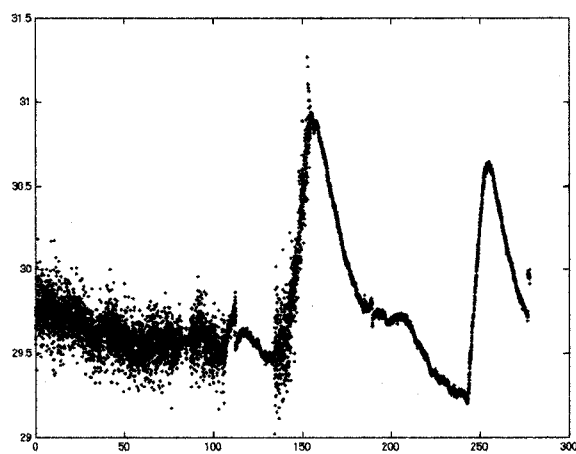
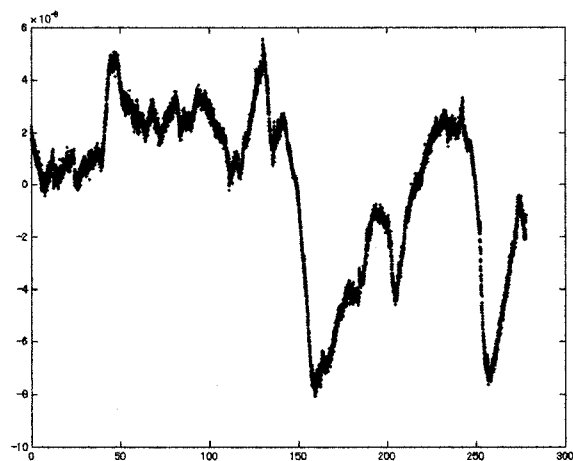


そして次の図が Fourier 成分の複素平面上でのプロットで、この平均の絶対値から求めた異方性のパラメータは $h = 3 \times 10^{-10}$ であった。先の ΔL や Fourier 成分の絶対値は 10^{-8} のオーダーであったが、これが複素平面上で原点のまわりを回ったことによって 10^{-10} のオーダーに達していることがわかる。このことから、Fourier 成分が上手く原点のまわりを回った時のデータを抽出することができれば、よりよい精度の結果が得られると考えられる。

9月5日取得データ：Fourier 成分の複素平面プロット



以下の3つのグラフは8月5日に取得したデータによるもので、上から ΔL 、温度変化、Fourier成分の絶対値の順に並べてある。



8月5日のデータからは温度変化、 ΔL 、Fourier成分の絶対値に相関があると言うことは読み取れるが、どのような応答関数でつながっているのかは明確には判断できない。仮に比例関係(線形応答)だと仮定した場合、温度変化と ΔL が共に一次直線となっている時間帯を切り出して比例関係を求め、データを補正するという方法が考えられる。しかし、今回の測定の中からは適切だと考えられる応答関数は一意に求められず、この方法によるデータ補正の完成には至らなかった。

3.3 さらに改善するために

以上のような結果で今回の測定は終了した。この結果からこの方法を引き続き行う場合に改善する余地のある部分をまとめる。

・温度制御の向上

実験装置、特に今回偶然に測定したレーザーヘッド部の温度変化は精度に大きな影響を与えていた。この温度をより高精度に一定にするためには、レーザーヘッド部にもペルチェ素子を取り付け、外部との熱交換を二段構えにすることが必要となる。また今回のダンボールハウスにあたるような、実験装置自体を完全に包み込み外部から断熱する機構の改良も必要となる。

・レーザーの安定性

レーザーヘッド部は常に数Kの温度変動をしていることがオシロスコープでの観察からわかっている。これはレーザーの安定性があまりよくないためと考えられる。このためにはレーザーを高安定なものに取り替えるか、レーザーが十分に安定するまで測定を控えることが必要となる。

・真空に引く+光学系の場所移動

今回は真空に引かないまま測定を行ったが、光学系でレーザーの光路にある大気は大きなノイズとなりうる。この影響を減らすためには真空に引くことが必要となるが、現在のセットアップでは光学系は真空容器の底面に直接取り付けられているため、真空容器を真空に引いた場合には光学系が大きく歪んでしまう上に調整しなおすことができない。

さらに現在の状況では外部から真空容器に力が加わった場合、その歪みの影響が光学系に伝わってしまう。そのため大気圧の変化もノイズになっていたと思われる。このような状況から考えて、光学系は真空容器の底から外し、別の台に取り付けて真空容器の中に入れるべきである。また防振の効果と傾き制御を兼ねて、光学系を乗せた台は真空容器の中で上から防振装置を取り付けて吊り下げるのがよいと思われる。また、この台の材質は真空にした時に変形の小さいものでなければならない。

・データ抽出・補正

これらについては最終結果で述べた通り、Fourier成分が原点のまわりをちょうど回るデータを取り出すプログラム、温度と ΔL の関係から温度由来のFourier成分を差し引く補正プログラムを開発することが考えられる。また今回求める周期を12時間としたが、地球の公転を考える場合には恒星座標系への変換プログラムも必要である。