※　今回の実験で、送信機と受信機は故障していたので7番の大谷君に器具を貸してもらって音速の測定の実験を行った。

目的：・発信機を使い、あらかじめ予想のつく交流波をオシロスコープに映すことで、オシロスコープの使い方を学ぶ。

・リサージュ図形を利用して二つの交流波の周波数比、位相差を見る。

* オシロスコープを用いて音波の出始めの波形と受け取った瞬間の波形の位相差より音速を求める。
* 音波の周期と空気中を伝わる時の波長より音速を求める。

原理：　オシロスコープの使用法については考察の欄に同時に述べているので、ここでは構造の中心であるブラウン管の部分を語る。ブラウン管は以下の「図：ブラウン管」の様に、電子銃、偏向電極、蛍光面からなる。電子銃は、陰極から出た電子をある一定速度まで加速し細いビーム状の電子流にする。電子銃は2組の偏向電極の電界を通った後、蛍光面にあたり輝点を生じる。2組の平行電極の向きは直行していて、水平方向（X軸）と鉛直方向（Y軸）をそれぞれ変位させる。

電子はもちろんマイナスの電極を持つ。そのため、電極に電圧をかけると、水平方向と鉛直方向それぞれの対の電極の、プラス側に引き寄せられて変位することになる。また、その変位の度合いは、それぞれの電圧の強さに比例する。

ここで、水平方向（X軸）の電極と垂直方向（Y軸）の電極にそれぞれ情報を持った電圧を加えることでモニターに特定の形の線が生まれる。例えば後に述べるが、Y軸にある周期の波を入れ、X軸に時間的に変化する掃引電圧を加えると、Y軸に入れた波の波長と、一波長の取る波形（例えば最大電圧など）が分かる。また、X軸とY軸の比較によってそれぞれ別の定常波を入れ、さらにそれらの周波数比が簡単な整数比であればモニターにはリサージュ図形が生まれ、その形から周波数比と位相差が分かる。

この様に、オシロスコープはX軸の信号とY軸の信号の比較によってそれぞれの波形が分かるようになっている。そのため、X軸（あるいはY軸）の波形が分かっていれば、もう一方が分かる。そのため、オシロスコープ内で作られる時間掃引の電圧が正しいことは非常に重要である。

方法：「器具」

発信機×２、オシロスコープ、ワニ口クリップコード×6、60cm定規、超音波送信機、超音波受信機、

１．時間掃引

　この実験では、日本の交流電源などは使用しないので、トリガの信号源は「INT」にする。あらかじめ入力結合は「GND」にし、そのときモニターを流れる点がY＝0（X軸上）を通るように上下を変えるつまみを回す。

1. 発信機①より、200Hzの正弦波を設定し、オシロスコープのCH1に入れた。波形を観察し、最大電圧と周期を求め、それより周波数を求めた。（ダイヤルの合わせ方は後の「考察①時間掃引」で述べる。）
2. 入力結合の切り替えスイッチを「AC」、「DC」に切り替え、それぞれについて発信機の直流を加えるダイヤルを回して直流を加えた合成波にし、波形の変化を見た。

以後、入力結合は「AC」とした。

1. PULL SLOPEダイヤルを回し、波形の変化を見た。

２．X－Y動作

左右を変えるつまみとPULL SLOPEダイヤルを回し、CH1の波形の開始地点が、原点0からX軸上のマイナス方向（左方向）に4ますのところになるようにした。発信機①の周波数のダイヤルを回して、4ますで１周期分の波形になるようにした。

もう一台の発信機②をCH2につないだ。

1. オシロスコープの表示を見ながら、発信機②の振幅のダイヤル（Amplitude）と周波数のダイヤルを回して波形をCH1の波形と同じものに近づけた。
2. 完全に一致はしにくいので、徐々に二つの波形がずれていく状態になったら、「結果」の「図：二つの波形①」の様に波形が完全に一致した瞬間にTIME／DIVダイヤルを「X－Y」にあわせてそのリサージュ図形を取った。
3. TIME／DIVダイヤルを戻し、今度は「結果」の「図：二つの波形②」の様にCH2の波形がCH1の波形より位相差π／2進んでいるときの瞬間にTIME／DIVダイヤルを「X－Y」にあわせてそのリサージュ図形を取った。
4. （３）と同様にして、CH2の波形が CH1の波形より位相差π進んでいるときの図形を取った。
5. 発信機②の周波数を2倍にし（オシロスコープの表示で周期が2分の1になるようにし）、（３）と同様にして、CH2の波形が CH1の波形より位相差0及びπ／4進んでいるときのリサージュ図形を取った。

３．音速の測定

発信機②をオシロスコープからはずした。CH1に発信機①はそのままにして、さらに超音波送信機をつないだ。CH2には超音波受信機をつないだ。送信機及び受信機はものさしの上にはめて、距離はものさしで測った。発信機①の周波数はあらかじめ40kHzにせっていし、そこからCH2の振幅が最も高い位置に周波数を合わせた。そのときの周波数をオシロスコープと周波数カウンターで測定し、その値から空気中での音速を求めた。求め方は「考察」の「⑤音速の測定」で述べた。その方法より、時間掃引を使ったもの（方法1）とX－Y動作のリサージュ図形を用いるもの（方法２）があるが、どちらも位相差0を読み取るもので、読み取る瞬間はまったく同じであるため、結果は同じになる。一応私は方法2を用いた。

その日の室温を計り、

（音速）＝331.45＋0.607×（室温）

より音速の理論値を求めた。

結果：１．時間掃引

1. 発信機で200Hz、5Vに設定した交流波は最大電圧が５Vかつ5.2msであった。よって周波数にすると「ｆ（周波数）＝１／（周期）」より、約190hz

（２）「DC」の時は発信機で直流成分を与えると、それにあわせて波形はそのままに位置が上下した。「AC」のときは一瞬上下するものの、すぐにもとの位置に戻り、大勢として変化は無かった。

1. PULL SLOPE ダイヤルをマイナスに回していくと波形が進み（左に移動）、プラスに回していくと波形が戻った。（右に移動）プラスマイナスどちらも回しすぎると波形が静止しなくなった。

２．X－Y動作

それぞれのCH1とCH2の波形の図とリサージュ図形をのせる。

（Ⅰ）CH１とCH2の波形が重なっているとき

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

図：二つの波形①

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

図：リサージュ図形①

（Ⅲ）CH2の波形が位相差π進んでいるとき

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

図：二つの波形③

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

図：リサージュ図形③

（Ⅳ）CH2の周波数が2倍で位相差0進んでいるとき

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

図：二つの波形④

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

図：リサージュ図形④

（Ⅴ）CH2の周波数が2倍で位相差π／4進んでいるとき

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

図：二つの波形⑤

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

図：リサージュ図形⑤

３．音速の測定

オシロスコープでの周期25.0μsより、周波数は40.0kHz

周波数カウンターの周波数40.0035kHz。

有効数字をあわせるとどちらも40.0kHzである。

　表：１　位相差0のときの超音波送信機と受信機の距離

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 測定回数 | 測定値（mm） | 測定回数 | 測定値（mm） | 差（5λ） | λの値（mm） |
| 1 | 33.4 | 6 | 76.7 | 43.3 | 8.66 |
| 2 | 42.6 | 7 | 85.2 | 42.6 | 8.52 |
| 3 | 50.8 | 8 | 93.8 | 43.0 | 8.60 |
| 4 | 59.1 | 9 | 102.7 | 43.6 | 8.72 |
| 5 | 67.8 | 10 | 111.4 | 43.6 | 8.72 |
|  |  |  |  | 平均 | 8.644 |

※λは「空気中を伝わっている音波の１波長分の距離」

※物理量がある単位量事に変化していく場合の平均の求め方を用いて平均を求めた。

S（音速）＝λ（波長）×ｆ（周波数）

より

S＝346（m/s）

室温21℃より音速の理論値は

（音速の理論値）＝344.147（m/s）

実験値と有効数字をあわせて、

（音速の理論値）＝344（m/s）

考察：①時間掃引

縦軸(振幅)が電圧を表し、横軸が周期を表す。

・縦軸(振幅)

縦軸はVOLTS／DIVダイヤルで調節する。このダイヤルの表す値、その数値とその数値の含まれる単位がモニターの縦１ますの高さが示す電圧となる。例えば以下の図１(Ａ)のように、実験結果の発信機の振動数200Hzの電圧では、ダイヤルの示す数値が2.5、単位がV、モニターの示す振幅が2ます分となっていたから5Vとなる。

* 横幅(周期)

横軸はTIME／DIVダイヤルで調節する。このダイヤルの表す値、その数値とその数値の含まれる単位がモニターの横１ますの幅が示す周期となる。例えば以下の図１(Ｂ)のように、実験結果の発信機の最大電圧5V、周波数200Hzの周期では、ダイヤルの示す数値が2、単位がms、モニターの示す振幅が2.6ます分となっていたから5.2msとなる。周波数にすると「ｆ＝１／（周期）」より、約190hzであるから、オシロスコープの値を正確とするなら、電圧が正確で周波数はおよそ5％の誤差があることが分かる。

②AC結合とDC結合

入力結合の表す切り替えスイッチには「AC」、「DC」、「GND」、がある。まず「GND」が入力信号に関係無くゼロ電圧の位置を表示してくれるので、この状態で輝線の高さの位置を変えるつまみを回し、輝線がモニターの中心の高さの桝目に重なるようにする。これで振幅が正しく読み取れるようになる。「DC」にセットすると、直流から約4Hzまでの低い周波数成分も表示できるようになる。たとえば、この状態で発信機の直流成分を足す方向(プラスの直流電流を加える)につまみを回すと、モニターの波は波形(振幅や周期)をそのままに、モニターを上に移動する。「AC」にセットすると、直流成分を無視して、交流成分のみを表示するようになる。例えば、この状態で発信機の直流成分を足す方向(プラスの直流電流を加える)につまみを回しても、モニターの波形は一瞬上下するものの結局はその位置が変化しない。実験では交流成分しか見ないので、「AC」にセットしておく。

③トリガレベルの変更

トリガレベルはPULL SLOPEダイヤルによって変更する。これにより同期を取る。同期を取るとは掃引の周期が信号の周期の整数倍にすることで、単純に言えば、CH１またはCH２にいれた信号の波形がモニターで止まって見えるようにすることである。（ただし、その左の切り替えスイッチがINTになっていること。これでオシロスコープ内部で掃引電圧を作ることになり、この方法で同期をとる方法をinternal triggerという。）掃引電圧は、以下の図２のように時間tとともに変化する掃引電圧で、X軸(横軸)に加えられる。これにより輝点が水平方向に等速運動をする。電圧が最高にいたった後、一瞬で電圧は最小の値に戻る。そして最小のまま少しの時間t２～t３を置き、また電圧が上っていく。Y軸には、信号の振幅（電圧）が加えられるから、そのため図２ではt１～t３の時間が周期の整数倍になれば図２のようにモニターの波形が止まり、同期が取れる。

このとき、人間の手では波長を信号の正確に整数倍にすることは難しい。そのため、オシロスコープが信号の１周期内の決まった電圧の瞬間をそれぞれの周期で同じ位置に重ねるという動作を行ってくれる。図２の点線がそのレベルだが、このレベルがトリガレベルであり、この高さをPULL SLOPEダイヤルは変更する。例えば図２のとき、一周期内にトリガレベルの点線との交点がA、Bと二つあるが、A、Bはその勾配がプラスとマイナスで違っている。そのため、オシロスコープはこれを考慮して、プラスの点A、とマイナスの点Bを選べる。図２の右上の表示がAを選んだ場合で、左下の表示が、Bを選んだときの表示である。

さらに、以下の図３のレベルａようなレベルにトリガレベルを合わせたと考えよう。このとき、信号の一周期内のトリガレベルの点線との交点が3つ以上存在し、さらにプラスならプラスの交点も２つ以上存在してしまうことになる。そうすると結果で鳥がレベルをあげすぎる、または下げすぎたときのように波形が静止せずに動く、つまり同期が取れなくなってしまう。実験では、きれいな単振動の交流波を観測したので、同期の取れなくなったレベル（PULL SLOPEダイヤルの上げ過ぎまたは下げ過ぎによっては計が静止しなくなったときのレベル）とは、図３のレベルｂのように振幅以上または以下の交点のひとつも無いところレベルである。だから、ダイヤルをあげすぎるもしくは下げすぎたときに同期が取れなくなった。実験では、レベルを±0の値にした。これにより、周期の測定がしやすくなる。

また、TIME／DIVダイヤルの下にある押しボタンは「AUTO」にあわせている。このとき、同期が取れなくなっている(波形がスライドしている)場合にも表示を行う。「NORM」では同期の取れたとき以外の波形を表示してくれない。

④リサージュ図形

今までの掃引の仕方では、X軸にはオシロスコープ内で作られた電圧を表示していた。しかし、TIME／DIVダイヤルを一番反時計回りに回し、「X－Y」の表示のところにすると、それはX－Y掃引といわれるものになり、X軸にCH１の信号、Y軸にCH２の信号を取った表示になる。表示しているのは、同時間毎のCH１とCH２の電圧の値であり、X軸の値がCH１の電圧、Y軸の値がCH2の電圧の値である。よって、図形の最大の振れ幅がそれぞれの交流波の振幅である。また、CH1、2の周期の比が簡単な整数倍になったとき、図形はすっきりした形をとる。この図形をリサージュ図形という。図形の形から、それぞれの交流はの振幅だけ出なく、周期の比(周波数の比)と、位相差が解る。

（１）周期の比（周波数比）

X、Yのそれぞれの軸が示すものはそれぞれCH1、CH2の電圧なのだから、図形上のある点AからX(Ｙ)軸のプラス(マイナス)方向に最大を取った後、マイナス(プラス)方向に最大をとり、再びある点Aと同じ値をとるまでが、CH1(2)の信号の1周期である。

リサージュ図形は一筆で書け、かつある点からその点まで戻ってくる図形をしているため、それを「1周した」というならば、その間に必ずX軸、Y軸ともに、CH1、CH2の1周期の自然数倍していることになる。また、プラスとマイナスのそれぞれの最大値にいく回数はX軸とY軸でそれぞれ等しくなる。

例えば、結果の「図：リサージュ図形④」をみるならば、原点０を点Aと置けば、1周するまでにX軸ではプラスとマイナスの最大の状態がそれぞれ1回で、Y軸では2回である。よって、単位時間内にCH1は周期が１、CH2は周期が２であったから、周期はCH1の方がCH2の方の2倍であり、

（周波数）＝１／（周期）

の式より周波数はCH２がCH１の２倍となる。よって、リサージュ図形では、１周のうちにX軸、Y軸がそれぞれとるプラス(もしくはマイナス)の最大の状態の回数の比がそのままCH1とCH2の周波数の比となる。

（２）位相差

次に位相差を見る。X軸とY軸にはそれぞれの交流波の振幅をいれているので、それを表す式はそれぞれ以下のとおりとなる。ｔは時間。式のａ、ｂはそれぞれX軸とY軸の最大値である。ｎとｍはCH1とCH2の信号の周波数の比ｎ：ｍ（ｎとｍは自然数）であり、CH1とCH2の波の角速度はそれぞれｎωとｍωである。よって、⊿φこそが位相差を示す。

X＝ａsin(ｎωt)

Y=ｂsin(ｍωt＋⊿φ)

例として、「図：リサージュ図形⑤」をみるなら、式は以下のようになる。

X＝５sin(1ωt)

Y=５sin(2ωt＋π)

ωｔ＝0のときＸは０(Ｖ)、Ｙは5(Ｖ)となるが、確かにＸが０のときＹは最大値の5(Ｖ)を示している。ωｔ＝πのときXは5(Ｖ)、Yは－5(Ｖ)となるが、確かにＸが最大値の5(Ｖ)のとき、Ｙは最低値の－5(Ｖ)となっている。

以上のようにして考えてみれば、確かにＣＨ1とＣＨ2に入力した信号の作り出すリサージュ図形はその周波数比と位相差に対応していることが、リサージュ図形の結果よりうかがえる。図の「リサージュ図形1～5」はどれもこの（1）と（２）の考えから導ける周波数比と位相差になっている。

⑤音速の測定

まず、配線の仕方により、CH１には発信機の周期と振幅の波の波形が映し出されることとなる。また、送信側の超音波送信機の出す超音波の波はこれに影響を受け、発信機の作る波と同じ周期と、超音波送信機の効率の度合いによりそれよりも小さくなってしまった振幅の超音波を出すこととなる。CH2には、超音波送信機によって放たれ、空気中を伝い受信機にとどいた音波の波形が映る。このとき、空気中を伝った波はその振幅が弱まることはあっても、周期は変わらない。（また、振幅も実験のような距離ではあまり弱まらない。）よって、必然的にCH2の波形は、CH1と同波長で振幅がCH2のほうが小さいものになる。このとき、発信機の周期を微妙に調節してCH2の波形の振幅のもっとも大きい部分にあわせたのは、使用する超音波送信機には最も効率の良い（最も振幅の大きく強い音波を出せる）周波数が存在するためで、その位置にあわせることで、CH2の波形を見やすいものとするためだ。そのときの発信機の周波数は周波数カウンターで40.0035ｋHzであったから、本当に40ｋHz付近の超音波がこのとき使用した超音波発信機の最も効率の良いものであることが証明される。

送信機と受信機の距離と波長

送信機から放たれた超音波（周期s、周波数ｆ）は、音速の速さSで空気中を伝わっていく。そのため、空気中を伝わっている音波の１波長分の距離λは、

　　λ＝s×S

という式で表せる。よって、音速を求めるならば、

　　S＝λ／s

ここで、１／s＝ｆであるから、

　　S＝λ×ｆ　　　　　…　①

という式によって音速は求まる。

方法1：送信側と受信側の撮る波形と音速

以下の図４（A）を見てみる。超音波の空気中における１波長分の距離はλとおいたので、図の送信機と受信機の距離は（4λ＋ｐ）である。そのため、

送信側の取る波形を、振幅の最大をｂ（オシロスコープに映る振幅ではなく、送信側が放つものである。）、角速度ωとおくとその振幅Y1は

　Y1＝ｂsin（ωｔ）

と表せるが、これに対応させて受信側の取る波形の振幅Y2は

　Y2＝ｂsin（ωｔ＋（2πｐ／λ））

となる。そのため、送信機と受信機の距離が（4λ＋ｐ）ならばオシロスコープにはCH1とCH2の波形は同波長で（2πｐ／λ）の位相差が生まれているものになる。

位相差（2πｐ／λ）＝0のとき波形が重なる。つまりp＝0のときであり、例えば上の図３（B）のように受信側と送信側の距離が（4λ）のようにλの整数倍ｎになったときである。（マイナスの整数は取らない。）

よって、波形が重なった距離ｎλから、受信側を送信側に近づけて（遠ざけて）いき、再び波形が重なった距離（ｎ－1）λ（（ｎ＋１）λ）の差はもちろん「超音波の空気中における１波長分の距離λ」ということになる。よってこの値λと超音波の周波数ｆが解れば式①より音速Sが求められる。

方法2：送信側の波形と受信側の取る波形のリサージュ図形と音速

基本的にCH1とCH2のとるリサージュ図形は、先の超音波の波長の考えより、波長が同じなため、周波数の１：１の図形である楕円もしくは直線の図形をとる。「方法1」の図4（A）ように、送信側と受信側の距離（4λ＋ｐ）のときは、「④リサージュ図形」の式より、Ｘ軸の値はCH1の振幅でり、Y軸はCH2の振幅であるからそれぞれの振幅の最大値をａ、ｂとおき（超音波発信機の効率より、ａ＞ｂ）また角速度をωとおくと

　X＝ａsin（ωｔ）

　Y＝ｂsin（ωｔ＋（2πｐ／λ））

となる。また、図4（B）のようにｐ＝0のときリサージュ図形は位相差（2πｐ／λ）＝０のため右上がりの直線の図形を取る。「方法１」と同様、受信側と送信側の距離がλの整数倍ｎになったとき（マイナスの整数は取らない。）p＝0となる。

よって、波形が重なった距離ｎλから、受信側を送信側に近づけて（遠ざけて）いき、再びリサージュ図形が右上がりの直線の図形を取る距離（ｎ－1）λ（（ｎ＋１）λ）の差はもちろん「超音波の空気中における１波長分の距離λ」ということになる。よってこの値λと超音波の周波数ｆが解れば式①より音速Sが求められる。

基本的には方法1と方法2はやり方に違いは無い。そのため、二つとも位相差0を基準として考えたので結果の値は方法1で行っても方法2で行っても変わらない。さらに、方法1、方法2共に位相差0を基準として考えたが、ある位相差の波形（もしくはリサージュ図形）を基準として、それと同じ波形（もしくはリサージュ図形）を取る距離の差を測ってもλは求められる。

音速の誤差

まず、本来用いるべきではないが、表１の5つのλの値より、平均値の平均二乗誤差を用いてλの誤差を求める。残差をδとおくと、

表2：　λの平均値の平均二乗誤差

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | λ（mm） | δ（mm） | δ2（mm2） |
|  | 8.66 | 0.016 | 0.000 |
|  | 8.52 | -0.124 | 0.015 |
|  | 8.6 | -0.044 | 0.002 |
|  | 8.72 | 0.076 | 0.006 |
|  | 8.72 | 0.076 | 0.006 |
| 合計 | 43.22 | 0 | 0.029 |
| 平均 | 8.644 |  |  |

平均値の平均二乗誤差の式σ={Σδ2/n(n-1)}1/2より、

誤差σは0.039（mm）。よって、λの値は、8.664±0.039（mm）となる。

また、周波数40.0kHzは周波数カウンターの値を理論値の値とするとオシロスコープの値はそれと等しかったので、誤差は無いものとする。

よって、音速Sの誤差は式

　S=λ×ｆ

と、誤差伝播法則より

　｜⊿Ｓ｜＝（｜⊿λ／λ｜＋｜⊿ｆ／ｆ｜）×Ｓ

　　　 ≒1.6（ｍ/s）

よって、実験値で求めた音速は345.8±1.6（m/s）となる。理論地もこれに有効数字を合わせると、344.2（m/s）となる。

理論値が誤差範囲内にあり、かつ誤差自身が、0.5％と小さいものなので、実際結果はかなり良いものであったといえるだろう。周波数カウンターの周波数とオシロスコープの周波数が一致したことは、本実験で使用したオシロスコープがかなり正確であることを予想している。それは、実験による音速の値が理論値に近い値であることからもいえよう。超音波送信機と受信機も、CH1とCH2の波形の周期が一致すること、最も効率が良い周波数が40.0kHzであること、音速の値が理論値に近いことからかなり正確なものであったことが予想される。よって、もっとも誤差が出るであろうと予想されるものは、物差しの値を読むときの目分量による誤差である。

そこで、音速の実験値と理論値の差ｄSが、すべて波長λの誤差であったとすると、その値は

ｄS＝345.8－344.2

　 ＝1.6（m/s）

ｄλ＝1.6／40000

＝0.04（mm）

となる。これは目分量の誤差0.1mmより小さく、実際の物差しでは見ないような長さである。それに、先に求めた音速の誤差自体が物差しで計った波長のみの誤差であり、それだけの範囲に理論値が入ることから、器具が正確であるという予想はここからも正しいといえそうだ。それにしても、dλの値は今回の測定が奇跡的にうまく言っていることを示している。

誤差を減らす。

誤差を減少させるためには、特に今回のように器具自体が正確なものの場合、人間の目や手を使い測定する部分の測定回数を増やすことが大事である。今回の場合、送信機と受信機の距離（ｎλ）を測定した個数を増やしてやることである。これは平均値の平均自乗誤差の式σ={Σδ2/n(n-1)}1/2から見てもそれがいえる。器具に誤差がある場合は、他の正確な器具を用いて、その理論値とどれだけずれるかをあらかじめ知っている必要がある。一定してその決まった値の誤差があるならば、それを0点補正のようにすることで、正確な器具のようにして使用することもできる。

感想： 今回の実験は、自分の手で測定するものがとても少ないものでした。それが誤差の非常に小さくなったことの要因であったとおもいます。特にオシロスコープは精密な物質であり、周波数カウンターとの値がほぼ一致していたのには、その正確さに驚きました。また、その値は40.0kHzであり、超音波送信機、受信機の正確さも示すものだったのは感動です。ですが、逆に誤差の原因を見つけるのが難しくなってしまう結果になってしまいました。

また、今回原理の部分、方法の部分、考察の部分が重複してしまい、仕方なく、例として結果の値や図を使ったことから考察に入れることにしたのですが、そのためレポートが見にくくなってしまっている部分があるのが残念です。

最後に、実験器具を貸してくれた7番の大谷君に感謝します。