

サイエンスラボ アドバンス物理 実験書



2018年3月

目次

推薦の言葉	p 1
本実験書の使い方	p 2
1. オシロスコープを使って実験しよう	p 3
2. 超音波による音速の測定	p 10
3. 誘電体中を電場が伝わる速さ	p 16
4. 簡易圧力計をつくってみよう	p 23
5. 静電気による現象を説明しよう	p 32

推薦の言葉

Study nature, not books.

動物学者レイ・アガシーによるこの言葉は、アメリカのマサチューセッツ州にあるウッズホール海洋生物学研究所の図書館に掲げられている。

同じことは、物理教育にも言える。

高校で物理の授業が始まる時、科学好きの高校生は、難しそうな理解できるかなというドキドキ感と、それまで持っていた無数の疑問にこれが答えてくれるというワクワク感を覚える。電磁気学、相対性理論、量子力学、原子力、エレクトロニクス、宇宙、素粒子等、期待は膨らむ。それは、私だけだったのか。

授業が始まると、明確な論理体系・美しい数式に感動し、その学問体系に大いなる魅力を感じた。その一方で、抱えていた無数の疑問のどれ一つにも答えが出てくることはなく、その理解は遙か先にあることも思い知らされた。それどころか、授業からは物理学が自然界の仕組みを解きほぐしているのだという実感は全くなく、与えられた問題が美しく解けるだけであった。それは、本を読めばわかることともいえる。それは、予定された正解を探す作業にすぎなかったのではないのか。つまり“Study books, not nature.”なのだ。私たちは物理の授業で、いったい何を学び、何を教えてきたのだろうか。

私は、大学に進学していく生徒たちに「学部の3年生までに、どうしてもわからないことを一つ見つけなさい。それが君たちのメシのタネになる」と言ってきた。メシのタネになる「どうしてもわからないこと」の種は、現実の現象を詳細に理解しようとすればいくらかでも見つかる。“Study nature, not books.”なのだ。このとき、ほとんど何も分かっていない自分に気が付くだろう。そこから本当の勉強が始まる。

世の中は、分からないことだらけ、知りたいことだらけなんだと気づく。

私たちは次世代を担う子供たちをどう育てたいと願って科学教育に携わっているのだろうか。もちろん、これまで積み上げられてきた自然科学体系という文化の継承は大切である。その上にさらに大切なことは、彼らが出会うに違いない未知の世界で生き抜く力を身につける教育である。それは、知らない世界を切り拓いていく科学の知識と科学の方法というツールを与え、使える能力を育てる教育である。運動能力を高めるためには、筋力トレーニング等の弛まない訓練をする。様々な困難を乗り越えて、己の能力を高めていく。知的な創造力や表現能力を高めるにも、訓練が必要である。その訓練を自ら行うことは難しい。

ここに示した実験は、いずれも決して簡単ではない。実験方法もすべてが明確なわけでは無い。そんな実験が“分からないこと”を見つける機会を与える。教育は成長するためのトレーニングの機会を与える。先生も生徒も、ここにある実験や教科書にある実験で、目的だけを読んで実験方法や使用器具を自分で考え、目的を解決するための実験をやってみて欲しい。その結果をとことん分析して論文にする。ねらいとは違った結果が出てきてもその結果を見捨ててはいけない。それこそ大いに考える最大のチャンスである。変な結果には「しめたっ！」と思い、もう一度実験の目的を自分で決め直し、実験・分析をやり直してみる。すると新たな解決したい目的が見えてくる。その目的は、人によって違う。この実験書が期待する正解は無い。あなたが、問題も正解もその検証も行う、そんな機会をここで提供している。

誰も正解を持っていない事象に対し、自分の理解の範囲を認識したうえで、その時点で自分が納得でき、みんなに合理的な説明ができる正解を見出す能力を子供たちに育てたい。それが本当の科学教育である。正解は、権威者により与えられるものではない。自分自身が確信できて、初めて正解となる。そのような学習を継続させたい。そのために、このアドバンス物理実験書はある。

中学・高校生で覚えたあなたのドキドキ感、ワクワク感は、今もあなたの中で健在ですか。物理の授業を、自然科学の授業にしましょう。

【本実験書の使い方】

実験をしていく過程の中で自ら課題を見出し、解決していくトレーニングを目指した実験書です。以下のような流れを意識して実験を行いましょう。

「手を動かし、実験する」→「わからないことは教科書で調べる」→
「不思議に感じたことに気づき課題とする」→「仮説を立てる」→
「検証する方法を考え」→「検証実験を行う」→「考察する」

実験の概要

実験の要約が記述されています。実験の全体像を把握しましょう。

実験で使用するもの

今回の実験に必要な実験機材がまとめられています。

研究

第1回～第3回までは、今回の実験から見出す探究的課題の例を示してあります。第4回についてはレポートのみ、第5回についてはレポートもありません。段階的に自分自身で探究過程を身に付けていくことをねらいとしています。

実験：オシロスコープを使って実験しよう

はじめに

オシロスコープとは電気信号を可視化できるものです。温度センサー、マイクなど電氣的に現象を測定できるものをオシロスコープに接続すると様々な現象を分析することができます。

実験の概要 ※実験の詳細については次のページから指示します。

実験Ⅰ 音声の解析

マイクに入力される音声をオシロスコープで調べます。「あ」と「い」の違いなどを調べます。

実験Ⅱ 電気信号波形を調べよう

ファンクションジェネレーター(信号発信器)から発生する電気信号を、オシロスコープで観測して、オシロスコープの使い方を練習します。

研究 超音波の観測

超音波スピーカー、超音波マイクとファンクションジェネレーターで、実験を次の実験で行います。そのために、超音波スピーカーの特性を調べます。

実験で使用するもの

- ・オシロスコープ
- ・ミノムシクリップ 5 本
- ・アンプつきマイク（秋月電子商会で購入できます）
- ・音さ 2 つ（輪ゴムつき）
- ・ファンクションジェネレーター（信号発信器）
- ・超音波マイク、超音波スピーカー（固定台付き）
- ・ノギス（今回は固定台として使用）
- ・分度器が印刷された紙

実験 I. I 音の解析

- (1) マイクとオシロスコープを接続。マイクの GND から出ている端子にプローブのミノムシを、OUT から出ている端子にプローブのヘッドを接続 (図 1)。
- (2) このまま Autoset ボタンを押してもうまく調整してくれない。信号を入力した状態で Autoset をすると大体あわせてくれる。
- (3) 大体あったら、SCALE ダイアルと CH1 の VOLTS/DIV ダイアルで波形が見やすいサイズに調整する。
- (4) 音の波形を見る (図 2)
- (5) 波形一つ分の波の時間を測り、振動数を計算してみる。
- (6) いろんな声を出して波形を見る。
- (7) 音さを鳴らして波形を観測する。
- (8) 津辰の音さを同時に鳴らして、うなりの観測をする。音さは2つ用意し、片方の音さに輪ゴムをまいて同時に音さをたたくとうなりが生じます。

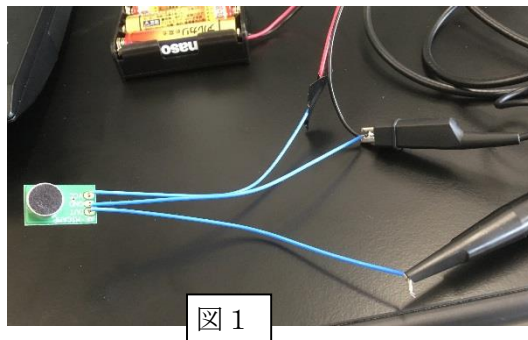


図 1



実験 I. II 音の解析 2 (シングル解析) 変化の瞬間を観測したいとき

- (9) シングル測定ボタンを押す。
 - (10) マイクに音を入力すると音の出始めを測定できる。
- (図 3)
- (11) 「か」の音と「さ」の音の違いを調べる。

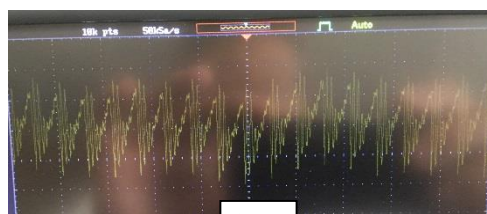


図 2

実験 II 電気信号波形を調べよう

[機器の設置]

- (1) オシロスコーププローブを“CH1”に接続し、電源を入れる。
- (2) ファンクションジェネレーター (信号発信機) “ミノムシ-BNCケーブル”を“MAIN”に接続し、電源を入れる。
- (3) プローブのとがっている方をミノムシ (赤) と接続、クリップの方をミノムシ (黒) と接続 (図 4)

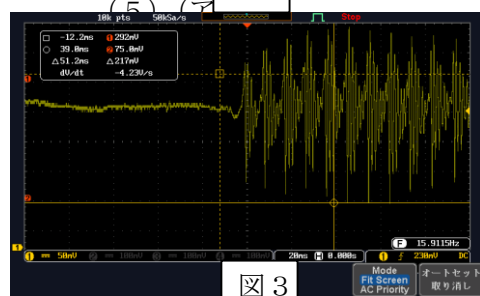


図 3

〔信号波形の観測〕

- (4) 信号発信機とオシロスコープの電源を入れる。
- (5) 信号機のテンキーで周波数 50Hz と入力し、OUTPUT ボタンを押して信号発信
- (6) オシロスコープの AUTOSET ボタンを押すと、自動で見やすいように調整してくれる。

(波形が乱れるようなら TRIGGER の LEVEL ダイアルを左右に回して微調整)

- (7) 信号機のダイヤルを回して周波数 40Hz の信号波形を観測。

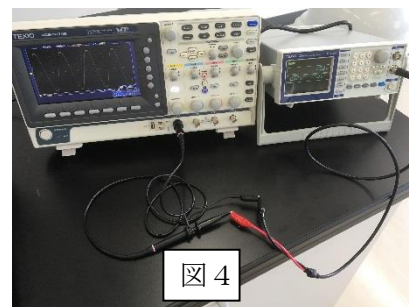


図 4

〔時間の読み取り〕

- (8) 目盛りが表示されていない場合は Display ボタンを押して、目盛りを表示する。
- (9) 1 目盛りの大きさは画面下に表示されている。



テンキーで数字を入力した後
単位を指定

1 μ s	1 マイクロ秒	0.0000001 秒
1 ms	1 ミリ秒	0.0001 秒

Display ボタン
目盛りの表示



〔時間間隔測定〕

- (1 0) **Cursor** ボタンを押して H カーソルの画面にする。(図 5)
- (1 1) **VARIABLE** ダイアルを回すと実線のラインカーソルが移動する。
- (1 2) 2 本の縦線間の時間が画面左上の「△」のついた単位「ms」の数字で、時間間隔が表示されている。
- (1 3) H カーソル下のボタンを押すとダイヤルで移動できる縦線を変更できる。
- (1 4) 1 波分の時間間隔を測定してみよう。



【課題】

周波数と周期の関係はどのような関係にあるだろう。

(解答) _____ の関係

(根拠)

なぜなら 50Hz のとき、波長は 2 目盛り分だった。25Hz にすると波長は 4 目盛り分になったから。

〔電圧測定〕

- (1 5) **Cursor** ボタンをもう一度押すと、画面上に横線も追加され、波の高さ（電圧）を測定できる。時間間隔と同様に測定してみよう (図 6)

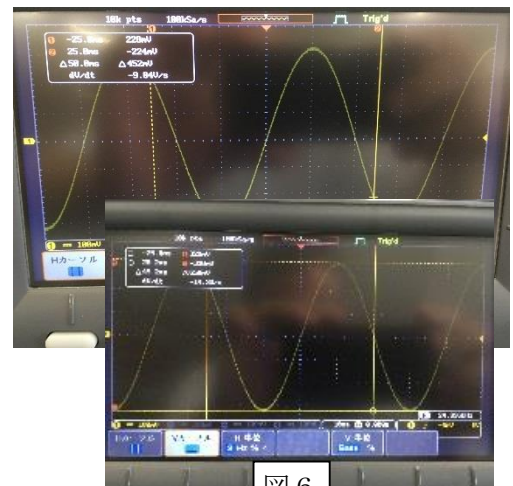


図 6

研究 超音波の観測

- (1) 超音波スピーカーを信号発信機に、超音波マイクをオシロスコープに接続
- (2) 超音波スピーカーをノギスの先端にクリップで固定する。
- (3) 信号発信機を 40kHz にセットして発信、超音波マイクで受信を確認
- (4) 分度器がかかれた紙の上で超音波の広がりを調べる。(図 7) 分度器の中央に、超音波スピーカーを置き、超音波マイクを分度器の外縁に沿わせながら 10 度毎に波形を観測する。
- (5) 波形の山と谷の差を記録しグラフにして、スピーカーの音広がり特性を実験に使用する際の注意事項について考察する。

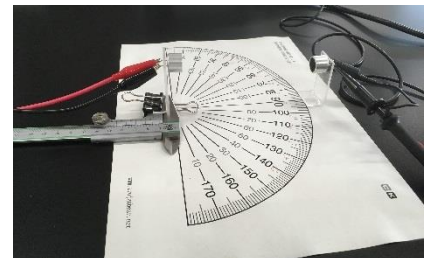


図 7

超音波スピーカーの広がり特性

サイエンスラボ 橋本貴志

実験日 平成 29 年 7 月 14 日

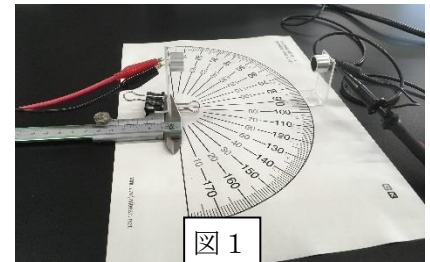
共同実験者 勝木知昭

Introduction

超音波は指向性が高く、波長が短いため、実験機の上で音の実験をする際には大変有用である。しかし、音が聞こえないことから、どこまで指向性が高いのかはわからない。本実験ではスピーカーから発信される超音波の角度と振幅の関係を測定し、特性を確認する。音の強度はスピーカーからの距離が遠ざかるほど弱くなるが、それに加え考慮すべき条件として、広がりが角度にどの程度依存するのか調査した。

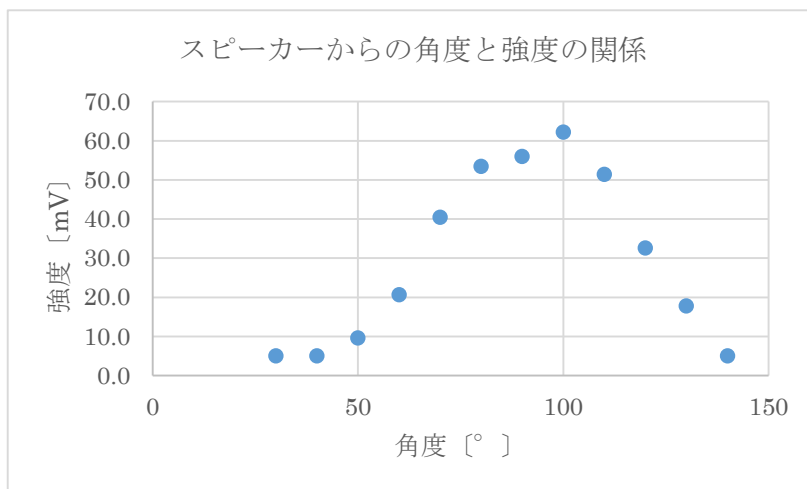
Method

- ① 超音波スピーカーを信号発信機に、超音波マイクをオシロスコープに接続
- ② 超音波スピーカーをノギスの先端にクリップで固定する。
- ③ 信号発信機を 40kHz にセットして発信、超音波マイクで受信を確認
- ④ 分度器がかかれた紙の上で超音波の広がりを調べる。(図 1) 分度器の中央に、超音波スピーカーを置き、分度器の 90° の目盛りが超音波スピーカーの正面に来るように設置する。
- ⑤ 音波マイクを分度器の外縁に沿わせながら 10 度毎に波形を観測する。
- ⑥ 波形の山と谷の差を記録しグラフにして、スピーカーの音広がり特性を実験に使用する際の注意事項について考察する。

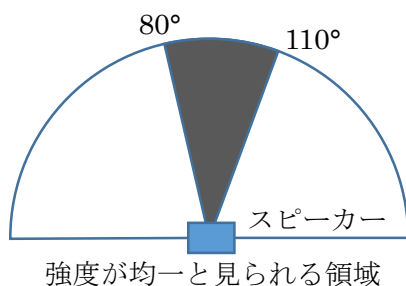


Result

分度器の 目盛り [α°]	強度[mV]
30	5.0
40	5.0
50	9.6
60	20.6
70	40.4
80	53.4
90	56.0
100	62.2
110	51.4
120	32.6
130	17.8
140	5.0



- グラフのピークが 100° にあることから、スピーカーの正面が 90° に向いていないことが予想される。
- $80^\circ \sim 110^\circ$ の強度は $50\text{mV} \sim 63\text{mV}$ で推移しているが、それより外側の角度では強度は急激に強度が減少していく。



Discussion

- スピーカーの正面から $\pm 10^\circ$ は音の強度が均一でありその領域にマイクをおいて実験すべきであることがわかった。
- 本実験の精度を高めるために、今回、分度器の半径が 126mm の外縁に沿って強度測定したが、この距離を変えて角度について検証する必要がある。

実験：超音波による音速の測定

はじめに

音速はどのように測定できますか？音速を測定する実験はいくつかあります。そのとき問題となるのが音の広がりですね。隣のグループの音が混入します。そして、音波の波長の長さ（数 m）ですね。教室には波長がそんなに多く存在しません。今回の実験はそこを解決するために超音波を用いています。聞こえない音波です。どのように測定するのかよく考えながら実験を進めていきましょう。

実験の概要 ※実験の詳細については次のページから指示します。

超音波送受信機組み立て

超音波マイクと超音波スピーカーとノギスを組み合わせます。正確に距離を測るための装置です。

電気配線

ファンクションジェネレーターから発振される信号を超音波スピーカーに接続します。超音波マイクはオシロスコープへ接続します。

オシロスコープ

ほとんどが自動で設定されていきます。微調整は前回の実験を参考にしましょう。

ファンクションジェネレーターの設定

超音波の周波数を発振します。スピーカーが 40kHz が最もよく性能を発揮するので、それにあわせます。

測定

超音波スピーカーとマイクの距離を少しずつ変えながらマイクに入力される信号をオシロスコープで測定します。その結果から、音速を算出します。

研究

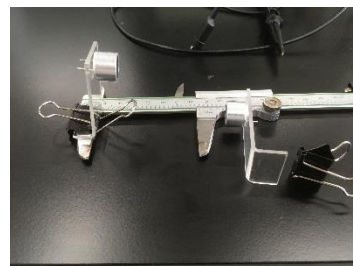
6つの研究例を示します。結果を予想し、実験で検証しましょう。

実験で使用するもの

- ・オシロスコープ
- ・ミノムシクリップ 5 本
- ・ファンクションジェネレーター（信号発信器）
- ・超音波マイク、超音波スピーカー（固定台付き）
- ・ノギス（今回は固定台として使用）

【超音波送受信機組み立て】

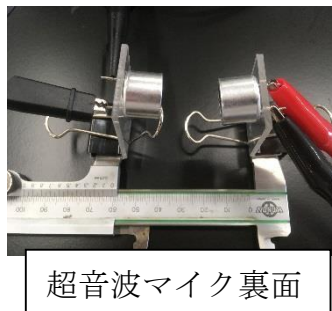
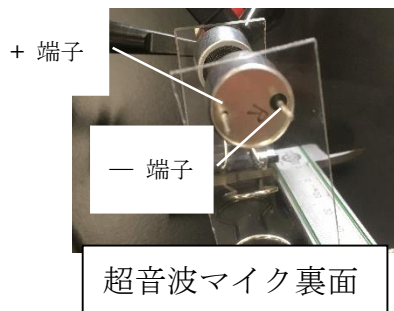
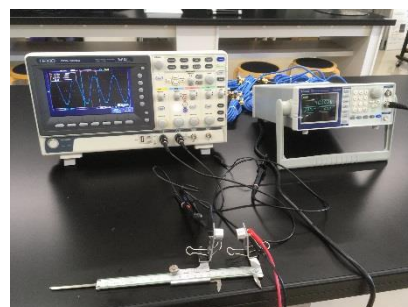
・ノギスにアクリル板に固定された超音波マイク（Receiver）とスピーカー（Transmitter）を、図のようにクリップで両方をノギスに固定する。



【電気配線】

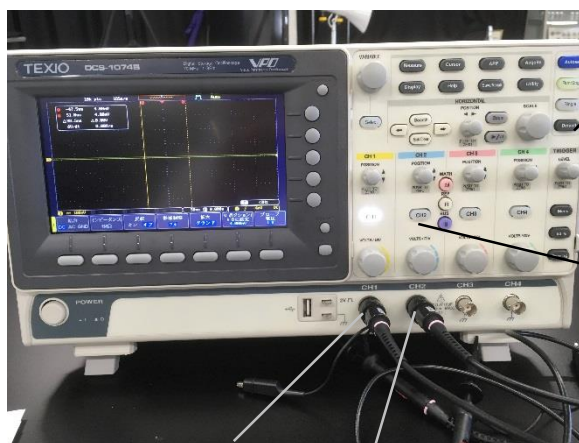
はじめ発信器，オシロスコープともに電源 OFF。

- ・オシロスコープの CH 1，CH 2 にプローブを接続する（共に×1）。
- ・CH 2 のプローブをノギスの可動側のマイク（Receiver）に接続。
- ・CH 1 のプローブをノギスの固定側のスピーカーに接続。
- ・発信器の OUT PUT にミノムシクリップ付のケーブル（赤+、黒-）を接続し，これを写真のノギスの右側のスピーカー（Transmitter）に接続する。



【オシロスコープ】 特に電源入れる前の設定は知らない。電源を入れてよい。

- ① (default)ボタンを押して初期設定に戻す。
- ② (CH2)ボタンを押して CH2 からの入力信号を表示させる。



① default
初期設定に戻す

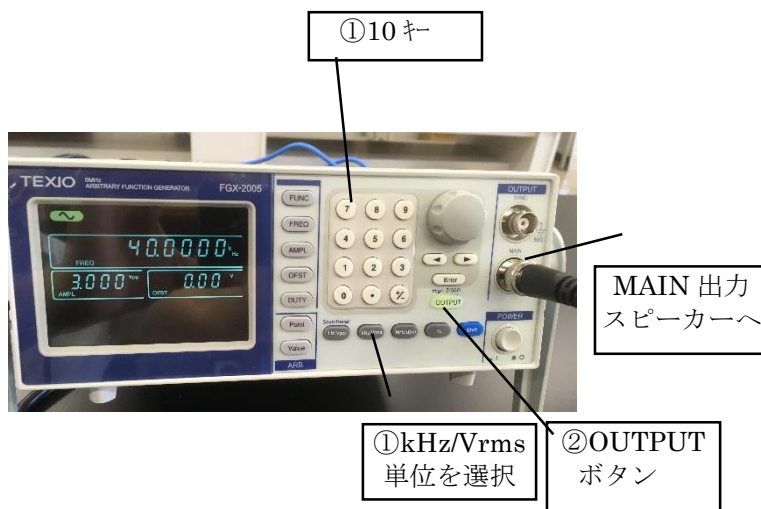
②CH2
点灯していると信号入力中

CH1 からス
ピーカーへ

CH2 からマ
イクへ

【ファンクションジェネレーターの設定】電源を入れる

- ① 超音波スピーカーは 40kHz が一番よく性能を発揮するように設計されています。
- ② 10 キーで「40」入力後、濃い灰色の (kHz/Vrms) で単位を kHz に確定。
- ③ (OUTPUT)ボタンを押して発振、停止を切り替える。



【測定】 ※気温測定を忘れないように！

- ・オシロスコープの AUTO SET UP を押すと、しばらくして自動で設定が終わる。
 - ・ファンクションジェネレーターのダイヤルをゆっくり回して、CH 2 の波形（青のはず）の振幅が最大になるようにする（スピーカー、マイクが最も扱いやすい振動数にした）。
- (1) スピーカーとマイクを十分に近づけ、マイクをゆっくり右に動かしていき、オシロスコープ上の 2 つの波形の山谷が同じ位置に来る(同位相)ところで、ノギスの値を読む。
 - (2) 波が 10 個ずれるまで副尺を動かし、その値を読み、マイクを移動させた距離を求める。
 - ・この距離の間に音波が 10 波長分あるはずだから、上記の移動距離を 10 分の 1 すれば波長が求まる。
 - ・ファンクションジェネレーターの振動数 f が分かっているので、 $v = f\lambda$ から、音速が求められる。
 - (3) 測定誤差を少なくするために、(1), (2) を 5 回繰り返して、平均をとる。

【研究】

- CH1, CH2 の波形を同位相にしておき、以下の問いの答えを考え、班でまとまったら実験してみよう。結果から、更に考え方を検討してみよう。
- (1) ヘアードライヤーの冷風を、スピーカーからマイク側に向けて吹き付けたら、オシロスコープの CH 2 の波形はどうなるだろうか。
 - (2) ヘアードライヤーの冷風を、マイクからスピーカー側に向けて吹き付けたら、オシロスコープの CH 2 の波形はどうなるだろうか。
 - (3) ヘアードライヤーの冷風を、マイクとスピーカーの間に垂直に吹き付けたら、オシロスコープの CH 2 の波形はどうなるだろうか。
 - (4) (3)の状態から、ヘアードライヤーを温風にしたらどうなるだろうか。
 - (5) (1), (2), (3)の結果（画面上のずれなどの情報が必要）から、ヘアードライヤーの冷風の風速を計算してみよう。
 - (6) (4)の結果（画面上のずれなどの情報が必要）から、ヘアードライヤーの温風の温度を計算してみよう。
- 【補足】他にどんな音速測定方法があるだろうか。

音速の変化

サイエンスラボ 橋本貴志

実験日 平成 29 年 8 月 7 日

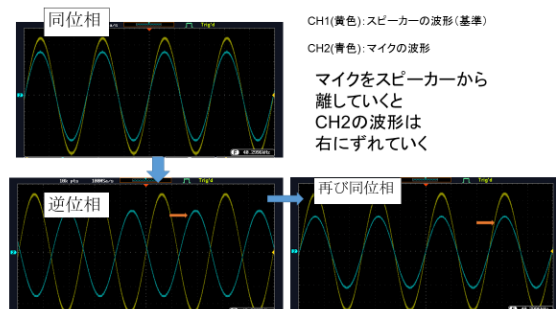
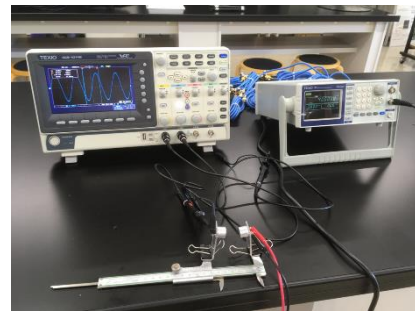
共同実験者 勝木知昭

Introduction

音速を測定する方法は様々あるが、今回実験では教室の実験台の上で測定できる実験で音速測定を行った。可聴音の波長は 300Hz の音でも 1.1m と大きなサイズである。これでは 2m ほどの卓上では精密な実験は困難である。そこで 40MHz 程度の超音波で実験を行うと卓上サイズで実験を行うことができる。

Method

- ① 超音波スピーカーを信号発信機に、超音波マイクをオシロスコープに接続
- ② 超音波スピーカーと超音波マイクをノギスの先端にクリップで固定する。
- ③ 信号発信機を 40kHz にセットして発信、超音波マイクで受信を確認
- ④ スピーカーとマイクを十分に近づけ、マイクをゆっくり右に動かしていき、オシロスコープ上の 2 つの波形の山谷が同じ位置に来る(同位相)ところで、ノギスの値を読む。
- ⑤ 波が 10 個ずれるまで副尺を動かし、その値を読み、マイクを移動させた距離を求める。この距離の間に音波が 10 波長分あるはずだから、上記の移動距離を 10 分の 1 すれば波長が求まる。
- ⑥ 発信器の振動数 f が分かっているので、 $v=f\lambda$ から、音速が求められる。



Result

振動数 f [kHz}	気温 t [℃]	初端位置 x 0 [mm]	終端位置 x 10 [mm]	Δx= x 10- x 0 [mm]	波長 λ ×10 ⁻³ [m]	音速 v [m/s]	計算値 [m/s]
40.30	26.5	57.30	145.10	88.10	8.810	355.0	347.4
40.30	26.5	48.65	136.60	87.95	8.795	354.4	347.4
40.30	26.5	48.80	136.00	87.20	8.720	351.4	347.4
40.30	26.5	56.30	143.20	86.90	8.690	350.2	347.4
40.30	26.5	47.65	134.90	87.25	8.725	351.6	347.4
					平均音速	352.5	347.4

- 気温から算出した計算値と測定した音速は 1.4% の誤差であり、かなり信頼できる値と思われる。

Discussion

- スピーカーとマイクの取り付け固定がそこまで強くないので厳密な測定を期待するならば、取り付け方法を工夫する余地がある。
- 受信信号の振幅が単純に減衰するのではなく、増減しながら減衰していく様子が見られる。これは、スピーカー、マイク間に多少なりとも定常波が発生しており、その影響が考えられる。

実験：誘電体中を電場が伝わる速さ～電波の定常波を調べる～ はじめに

－同軸ケーブルにできる定常波と進行波－

同軸ケーブルに振動する電圧を加えると、電場の振動が伝わっていく。有限の長さの同軸ケーブルの端で反射が起これば、電場の定常波ができる（電場の定常波という言い方をしてもよいだろう）。定常波の波長と振動数が分かれば、電波の速さが分かる。

同軸ケーブルの構造

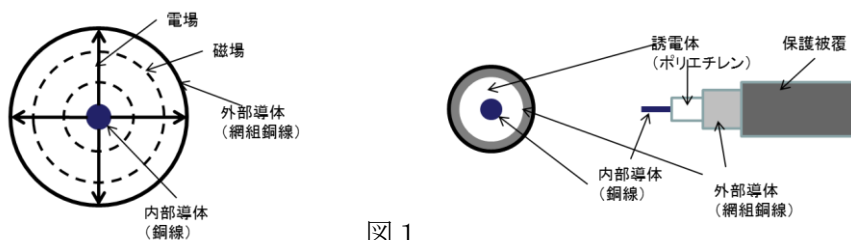


図 1

図1のように、中心軸に銅の単線（内部導体）、その周りに誘電体、網状に組まれた銅線（外部導体；ここが接地側で電位の基準）、保護被膜で囲まれて長いケーブルになっている。内部導体と外部導体の間に電場が生まれ、電位差が現れる。この電場が変動すると、電場に垂直に磁場が現れる。

同軸ケーブルの端に振動する電圧を加えると、内外導体間に振動する電場が現れ、この電場の振動が伝播していく。この振動電場の電波の様子は、同軸ケーブルのところどころで、内外導体間の電圧を測ることで調べることができる。

実験の概要

※実験の詳細については次のページから指示します。

配線

2m の同軸ケーブルと分岐ターミナルを交互に接続し、全長 40m のケーブルにする。

進行波

ケーブルの端にターミネーター（端末処理器）を取り付けて、ケーブル内に電場の進行波が発生するようにする。

自由端反射

ケーブルの端を開放することで（ケーブルの端子そのまま）、ケーブル内に自由端反射による定常波が発生します。この実験から電波の伝播速度と誘電体の比誘電率を測定します。

固定端反射

ケーブルの端を短絡することで、ケーブル内に固定端反射による定常波が発生します。

実験で使用するもの

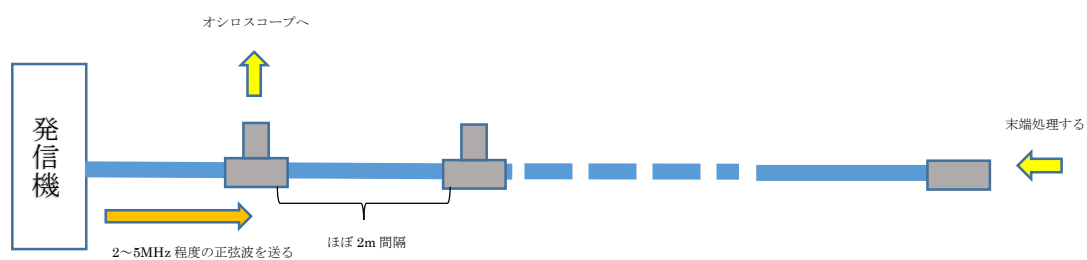
- ・オシロスコープ
- ・ミノムシクリップ 2 本
- ・BNC同軸ケーブル 2 m 20 本
- ・信号測定端子 (BNC分岐コネクタ J-P-J (T分岐)) 20 個
- ・BNCコネクタ (BNC-J 基板取付型横向き) 20 個
- ・ファンクションジェネレーター (信号発信器)
- ・ターミネーター (端末処理器)



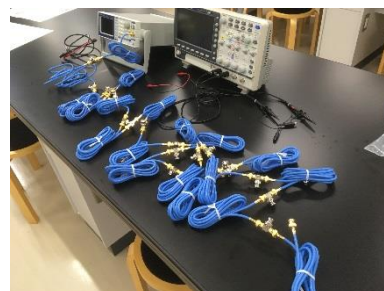
実験

〔配線〕

(1) 図のように配線する。



ほぼ 2m（一番端の 1 本だけ実測し、他は同様としてよい。）の同軸ケーブルが、20 本つないである。接続点には、信号測定端子がある。中央の 1 本が内部導体、まわりの 1 本が外部導体をつながっている。



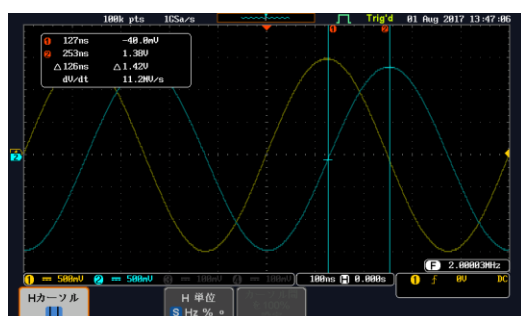
〔進行波〕

(2) 末端に 50Ω のターミネーターを接続する。すると、進行波が伝わる。

オシロスコープのプロブは、発信機から 1 つ目の測定端子につなぎ、発信機は 2MHz 程度の正弦波にし、オシロスコープの「Autoset」ボタンを押す。CURSOR を利用して、振幅が 1.5V 程度となるように発信機の出力を調整する。以降、この出力は変えてはいけない。



- ① 1 個目の測定端子から順に、20 番目（実験によって変わることがある）までの電圧振幅を測る。同時にグラフに描いていくとよい。（横軸：距離、縦軸：電圧）。
- ② 任意の 2 つの端子に、それぞれ CH1、CH2 を接続し、同位相にある波の CH 間の時間差を測る。2 端子間の距離と時間差から電磁波の速さが求められる。これについては (3) の③④を参考に分析してみる。

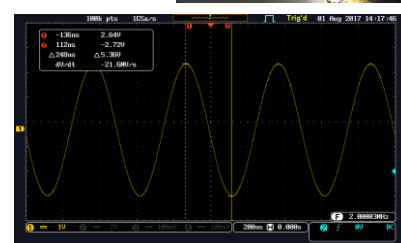


〔自由端反射〕

(3) 末端を開放端にする。ここは自由端反射をするので、ここが腹となる。発信機の OUTPUT は無反射端なので、任意の振動数で定常波ができる。さてどんな定常波ができるべきか。



- ① 末端にプロブをつなげ、発信機の振動数を 1MHz 以上に調整する。
- ② 1～20 番目の振幅電圧を測り、グラフ化する。節らしきところを見つけたら、振動数を再調整して、定常波をしっかり作ってみるのもよい（この場合は、はじめからやり直すことになる）。
- ③ 波長を求め、 $v = f\lambda$ より、速さを求める。



- ④ 光速 c として、比誘電率 $\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2$ より求める。これがポリエチレン

の比誘電率に近いはず。ところで、先の式はいったい何かは、教科書で勉強してみよう。

- ⑤ 別の振動数についても、同様に実験する。

〔固定端反射〕

(4) 末端をショートする。ここは固定端反射となる。さてどんな定常波ができるべきか。(3)

①～⑤を同様に繰り返す。



誘電体中を伝わる電場

サイエンスラボ 橋本貴志

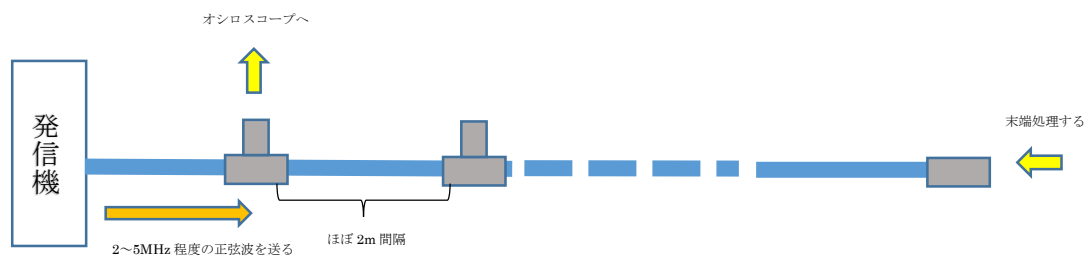
実験日 平成 29 年 8 月 7 日

共同実験者 勝木知昭

Introduction

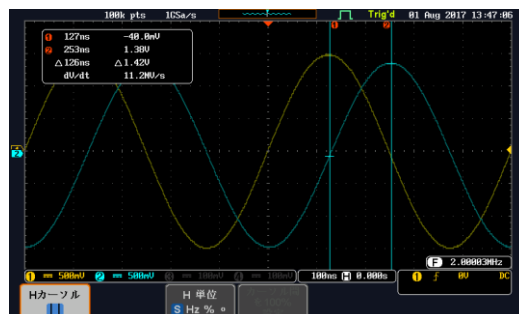
同軸ケーブルに振動する電圧を加えると、電場の振動が伝わっていく。有限の長さの同軸ケーブルの端で反射が起これば、電場の定常波ができる（電場の定常波という言い方をしてもよいだろう）。定常波の波長と振動数が分かれば、電波の速さが分かる。今回はケーブルの信号電波の減衰の様子も同時に測定した。

Method



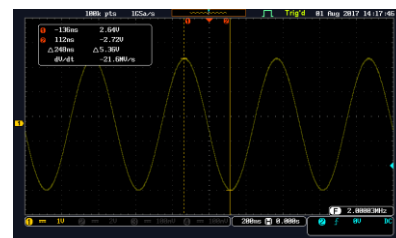
(1) 末端に 50Ω のターミネーターを接続する。すると、進行波が伝わる。

- ① 1 個目の測定端子から順に、20 番目（実験によって変わることがある）までの電圧振幅を測り、グラフ化する。（横軸：距離、縦軸：電圧）。
- ② 任意の 2 つの端子に、それぞれ CH1、CH2 を接続し、同位相にある波の CH 間の時間差を測る。2 端子間の距離と時間差から電磁波の速さが求められる。



(2) 末端を開放端にする。ここは自由端反射をするので、ここが腹となる。

- ① 末端にプローブをつなげ、発信機の振動数を 1MHz 以上に調整する。
- ② 1～20 番目の振幅電圧を測り、グラフ化する。節らしきところを見つけたら、振動数を再調整して、定常波をしっかりと作ってみるのもよい（この場合は、はじめからやり直すことになる）。
- ③ 波長を求め、 $v = f\lambda$ より、速さを求める。



- ④ 光速 c として、比誘電率 $\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2$ より求める。

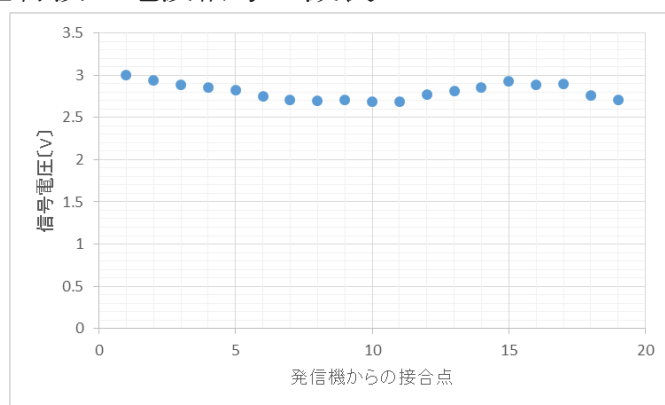
- ⑤ 別の振動数についても、同様に実験する。

(3) 末端をショートする。ここは固定端反射となる。



Result

● 進行波の電波信号の減衰



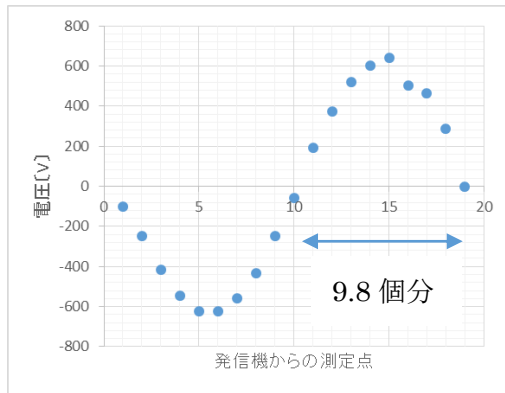
途中で増加している部分も見られるが全体的に緩やかに減衰している。

● 進行波の位相のずれによる電磁波の速さ測定

発振器からの端子 No.	端子間の時間差 [ms]	端子間の距離 [m]	電磁波の速さ [$\times 10^8$ m/s]
1～5	49	8	1.63
1～6	62	10	1.61
2～6	49	8	1.63
2～13	126	22	1.74

● 定常波による電磁波の速さ v の測定

【固定端反射 5MHz】



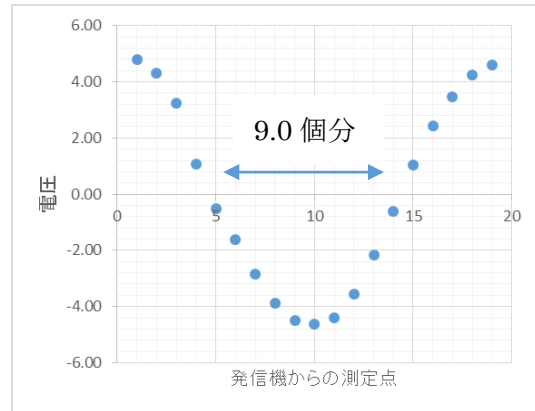
$$\frac{1}{2}\lambda = 9.8 \times 2.03 \text{ [m]}$$

$$\lambda = 39.8 \text{ [m]}$$

$$v = f \lambda$$

$$= 5 \times 10^6 \times 39.8 = 1.99 \times 10^6 \text{ [m/s]}$$

【自由端反射 5MHz】



$$\frac{1}{2}\lambda = 9.0 \times 2.03 \text{ [m]}$$

$$\lambda = 36.5 \text{ [m]}$$

$$v = f \lambda$$

$$= 5 \times 10^6 \times 36.5 = 1.83 \times 10^6 \text{ [m/s]}$$

比誘電率 $\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2$ であることを考えると

$$\epsilon_r = \left(\frac{3.0 \times 10^6}{1.99 \times 10^6}\right)^2 = 2.27$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{3.0 \times 10^6}{1.83 \times 10^6}\right)^2 = 2.69$$

ポリエチレンの誘電率は 2.2～2.4 なのでとてもよい結果が得られている。

Discussion

- 信号周波数を 5MHz で実験したが、3MHz など他の振動数で行った場合に実験精度にどのような影響が出るのか、検討する必要がある。おそらく、波長が長くなるので、現象として捕らえることが難しくなるのではないかと考えられる。
- 進行波の実験は大変精度が低いと感じられた、結果には表していないがばらつきの大きい値を無視している。原因を探る必要がある。
- 信号の減衰は 40m 程度ではほとんど見られない。それくらいの性能でなければ信号ケーブルとして役割をなさないであろう。

実験：簡易圧力計をつくってみよう

はじめに

圧力の測定機器は現在多く作成されています。そして、身近なところで使われ始めています。例えばスマートフォンには圧力センサーが組み込まれていて、自分のいる位置の気圧を測定することが可能です。電子的なセンサーの他にも、液体の重力を利用したものや金属の圧力変化を利用した圧力計があります。いずれも、圧力にかかわる法則性を利用していることには変わりありません。

今回の講座では、気体の圧力と体積変化の法則を利用して小型の圧力計を製作し、それを用いて身近な製品の特性を解明していきます。

実験の概要 ※実験の詳細については次のページから指示します。

実験Ⅰ 簡易真空容器内の残存空気量と圧力の関係

簡易真空容器内を手動ポンプで減圧します。減圧した簡易真空容器を水を張った水槽に沈め、簡易真空容器から排出された空気を水に置き換えて確認します。置き換えた水の量から減圧していた時の空気圧を算出します。

実験Ⅰ 簡易圧力計を製作しよう

製作手順にしたがって、簡易圧力計を製作します。

実験Ⅱ 気圧と沸点の関係を検証せよ

食料品の保管に使われる簡易真空容器は付属のピストンを引くと空気が抜ける仕組みです。ピストンを引くたびに容器内の圧力は低下します。

その特徴を利用して、水の沸点と圧力の関係を検証してください。

実験で使用するもの

実験Ⅰ

- ☐ 簡易真空容器
- ☐ 台ばかり

実験Ⅱ

- ☐ 簡易真空容器
- ☐ 毛細管（細いガラス管）
- ☐ 毛細管固定用テープ
- ☐ 水性インク
- ☐ ターボライター
- ☐ 定規
- ☐ グラフ用紙
- ☐ はさみ

実験Ⅲ

- ☐ 製作した簡易圧力計
- ☐ 簡易真空容器
- ☐ 小型温度計
- ☐ 50mL ビーカー
- ☐ 沸騰石
- ☐ 小型温度計
- ☐ 電熱器（教室で1台：ブレーカーが落ちるので）
- ☐ 電気湯沸かし器（教室で1台：ブレーカーが落ちるので）

実験Ⅰ 簡易真空容器内の残存空気量と圧力の関係

(1) 減圧した状態のまま、簡易真空容器を水槽に沈める。
沈めた状態で簡易真空容器の底に貼り付けてあるビニールテープをはがすと(図1)、水が容器内に流入する。容器内の圧力が大気圧と等しくなり、水の流入が止まるまで待つ。

(2) 簡易真空容器内に流入した水が漏れないように、簡易真空容器を水から引き上げ、台ばかりで簡易真空容器内の水の質量を測定し、水の密度を $1.00 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ として簡易真空容器内に流入した水の体積 $V_1 \text{ [mL]}$ を質量から算出する。

(3) あらかじめ簡易真空容器の全容量 $V_0 \text{ [mL]}$ を(2)の手法と同様に水の質量から測定しておき、容器内に流入した水の体積と差し引きすることで減圧した容器内に残されていた大気圧における残存空気の体積 $V_2 \text{ [mL]}$ を算出する。

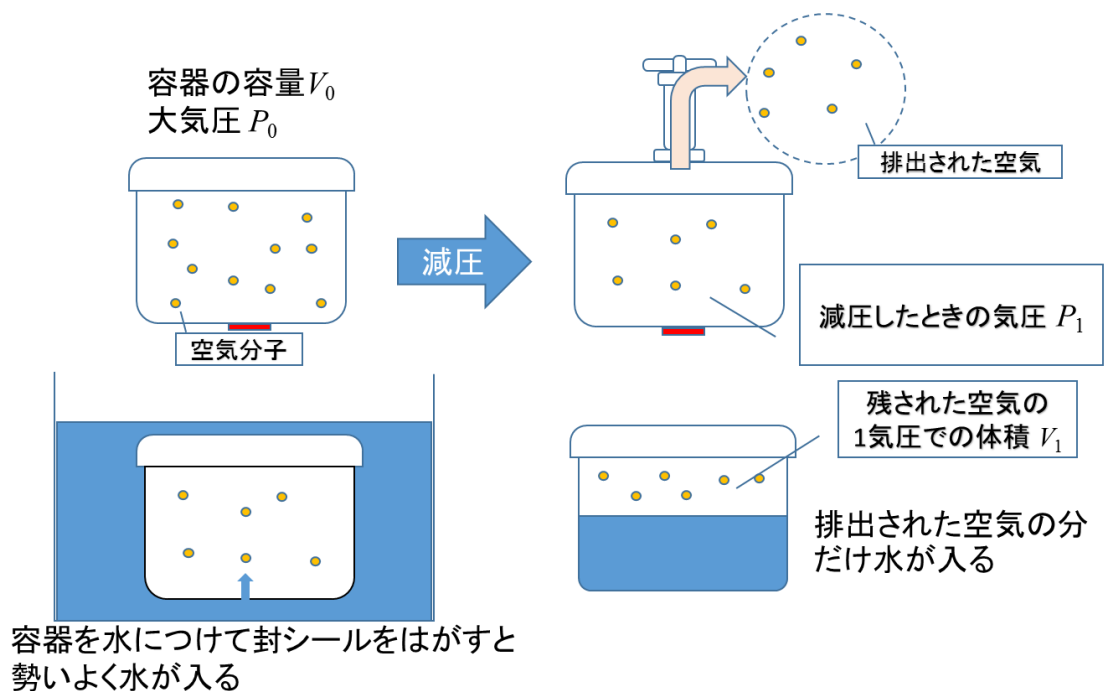
(4) 減圧時の空気圧 P_1 の算出

全容量 $V_0 \text{ [mL]}$ と残存空気の体積 $V_2 \text{ [mL]}$ の比が大気圧 P_0 と減圧時の空気圧 P_1 の比と同じとなることを利用して

$$P_1 = P_0 \times V_1 / V_0$$



図1 簡易真空容器内に水が流入している



実験Ⅱ 簡易圧力計を製作しよう

実験Ⅱ

次の製作手順にしたがって、簡易圧力計を製作します。

< 製作手順 >

- (5) クロマトグラフィに用いられる内径約 0.5 mm、長さ 100 mm の毛細管（図 1）の片側に色水を 3～4 mm 程度注入する。（図 2）※注入した色水を毛細管の半分くらいの位置まで一度移動させておくといよい。
- (6) 色水が毛細管の端より 10 mm 程度離れた状態で管の端をターボライターで閉じ、気体を 10 mm 程度封入する。（図 3）
- (7) 気体を封入した毛細管に、100 mm 程度に切断した定規を張り付けて簡易真空容器内で気体の膨張量を読み取れるようににする。これで簡易圧力計の完成である。（図 4）



図 1 毛細管



キャピラリー管の片側をガスバーナーで加熱して封じる

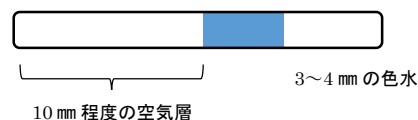


図 2 色水とキャピラリー管



図 3 ターボライターで毛細管の片側を閉じている様子



定規の目盛り 0 と空気層の底を合わせる

セロテープで固定

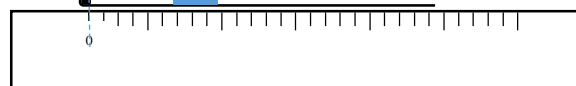


図 4 定規とキャピラリー管を用いた簡易圧力計

実験Ⅱは次ページへ続く

減圧時の圧力 P_2 [Pa] はボイルの法則に従うので、閉じ込められた気体の体積膨張の逆比となる。

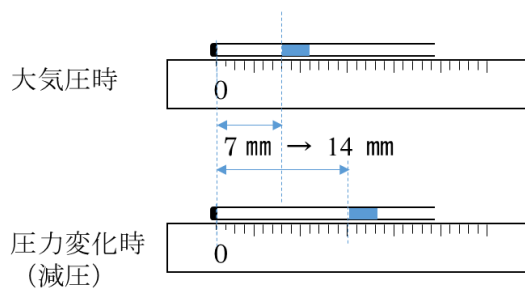
下の図の例では

大気圧を 1.0×10^5 [Pa] とすると

閉じ込められた気体の体積膨張は 7 [mm] から 14 [mm] となったので、以下のように減圧時の圧力 P_2 [Pa] を算出する。

$$\begin{aligned} P_2 &= (1.0 \times 10^5) \times \frac{7}{14} \\ &= 0.5 \times 10^5 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

・簡易圧力計による測定



ボイルの法則を適用すると
閉じ込められた気体の体積2倍
⇒ 変化後の圧力は大気圧の 1/2 倍

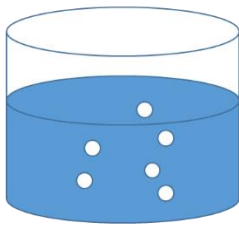
実験Ⅲ 気圧と沸点の関係を検証せよ

食料品の保管に使われる簡易真空容器は付属のピストンを引くと空気が抜ける仕組みです。ピストンを引くたびに容器内の圧力は低下します。

その特徴を利用して、下のグラフのように、もうすでに分かっている水の沸点と圧力の関係を検証してください。

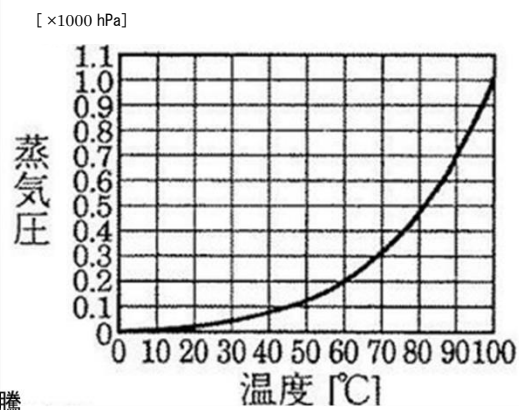
気圧の低いときの現象

- 沸点が低下する



60°Cの水が $0.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ で沸騰

沸点と気圧の関係



キャピラリー管を用いた簡易気圧計の精度分析

サイエンスラボ 橋本貴志

実験日 平成 29 年 11 月 10 日

共同実験者 勝木知昭

Introduction

安価で圧力センサーなどブラックボックス化した機器を用いず、科学的原理が見える圧力測定装置の製作をすることを目的とした。原理的には、ピストン型の密閉容器に封入した気体の体積膨張率から、ピストン外部の気圧を測定する。本実験ではガラス管と油でピストンを製作した気圧計はどの程度の精度を持つのか検証を試みた。

Method

クロマトグラフィに用いられる内径 0.5mm、長さ 100mm のキャピラリー管（図 1）の片側に油を 10mm 程度注入する。（図 7）



図 1 キャピラリー管



図 2 バーナーで片側を閉じている様子

- (1) 油が端よりさらに 10mm 程度離れた状態で端をガスバーナーで閉じ、気体を封入する。（図 2）

- (2) 気体を封入したキャピラリー管に 100mm 程度の定規を張り付けて簡易真空容器内で気体の膨張を読み取れるようにする。（図 3）



図 3 気体を封入した状態

- (3) 定規を張り付けたキャピラリー管を簡易真空装置に入れて（図 4）減圧し、封入した気体の膨張率を読み取る。
- (4) 減圧した状態のまま、簡易真空装置を水に沈めた状態で簡易真空装置のコックを開くと（図 5）、水が容器内に流入する。容器内が大気圧と等しくなり、水の流入が止まったからコックを閉める。



図 4



図 5

- (5) 容器内に流入した水が漏れないように蓋を押さえながら簡易真空容器を水から引き上げ、容器内の水の量を 1L メスシリンダーで測定する。
- (6) あらかじめ容器容量を測定しておき、容器内に流入したの水の量と差し引きすることで減圧した容器内に残されていた残存空気量を算出、空気残存率を算出し、気体膨張率と比較する。



図 6 簡易真空装置



図 7 油とキャピラリー管

Result

1 回目 6/30

キャピラリー管内 気体の幅	l_0 [cm]	1.35
簡易真空容器の 全容量	V_0 [mL]	1170

減圧後の 気体の幅	l [cm]	2.10	2.8	4.2	5.2	
簡易真空容器に 流入した水の量	V [mL]	410	610	780	845	
減圧後の容器に 残っていた残存空気	ΔV [mL]	760	560	390	325	
キャピラリー管内の 気体膨脹率 a	$\frac{l}{l_0}$	1.56	2.07	3.11	3.85	
容器内の 空気残存率 b	$\frac{V_0}{\Delta V}$	1.54	2.09	3.00	3.60	平均
一致率	$\frac{a}{b}$	101.0%	99.3%	103.7%	107.0%	102.8%

2 回目 7/2

キャピラリー管内 気体の幅	l_0 [cm]	0.70
簡易真空容器の 全容量	V_0 [mL]	1170

減圧後の 気体の幅	l [cm]	1.40	1.05	1.75	2.1	
簡易真空容器に 流入した水の量	V [mL]	610	395	720	790	
減圧後の容器に 残っていた残存空気	ΔV [mL]	560	775	450	380	
キャピラリー管内の 気体膨脹率 a	$\frac{l}{l_0}$	2.00	1.50	2.50	3.00	
容器内の 空気残存率 b	$\frac{V_0}{\Delta V}$	2.09	1.51	2.60	3.08	平均
一致率	$\frac{a}{b}$	95.7%	99.4%	96.2%	97.4%	97.2%

- ・ 気体膨脹率と空気残存率は±3%で一致しており、高い精度の測定である。

Discussion

1. キャピラリー管内の油の分離、図4に見られるように減圧操作を行う過程で油部分が分裂した。しかし、実験結果に影響はないと思われる。キャピラリー管に油を注入する際は、5mm程度で十分と思われる。



図8 油部分が分裂した様子

2. 減圧した容器内へ水の流入を行う際に、大気圧になるまで流入を行うわけだが、実際は水圧によって大気圧以上に水が流入すると思われる。よって残存空気量は常に少なめに出る。なので、容器内空気の膨張率は常に実際より多くなるとされる。
3. キャピラリー管をバーナーで熱して閉じる際に閉じた閉じ口の空気層が紡錘形になることがある。こうなると管内の空気量が読みにくくなり、大きな誤差を生み出す。



図9 閉じ口の紡錘形

実験：静電気による現象を説明しよう

はじめに

静電気は身近な自然現象の一つですが、静電気による自然現象は目に見えにくいものでその性質を現象から理解し、説明することはとても難しいものです。例えば、乾燥した冬の晴れた日に乗用車から降りたとき、ドアノブに触れると静電気によりビリッときます。なぜ静電気が起きるのでしょうか。どうしたら静電気を発生させないようにできるのでしょうか。今回はそのような自然の不思議を研究していく実験です。

今回の実験はいくつかの静電気の性質を確認しながら、ある現象が起こる理由を説明してもらいます。現象の理由を考えることで静電気の理解が深まることでしょう。さあ、始めましょう。

実験の概要 ※実験の詳細については次のページから指示します。

実験Ⅰ 箔検電器内の静電気の様子を調べよう

静電気を帯びた物を箔検電器に近づけて、箔の変化を調べます。

実験Ⅱ 箔検電器を電池で帯電させてみよう

電池を使った500V程度の直流電源で、箔検電器に電気を与えます。このように物体が電気を持つことを帯電といいます。始めは箔検電器1つですが、途中から箔検電器を2つ使い、箔の様子を調べていきます。

実験Ⅲ 箔検電器を帯電体で帯電させてみよう

帯電体を箔検電器に近づけて、箔を開閉させる操作を行います。どのような電荷の移動によって箔の開閉が起こるのかを考えます。

実験Ⅳ 導体棒と箔検電器の実験1

導体棒と箔検電器1つを用いて、帯電体を近づけたときの箔の様子を観察して、どのような電荷の移動によって箔の開閉が起こるのかを考えます。

実験Ⅴ 導体棒と箔検電器の実験2

導体棒と箔検電器2つを用いて、帯電体を近づけたときの箔の様子を観察して、どのような電荷の移動によって箔の開閉が起こるのかを考えます。

研究

5つの現象の中から選んで現象を検証してください。

〔検証内容〕

- ・ 実験を提案(条件制御も含めて)してください
- ・ 期待される結果を示してください
- ・ 実験結果はどうなりましたか
- ・ 仮説は検証されたと言えますか
- ・ まだ不十分な点があれば、示してください

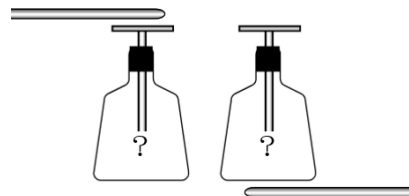
実験で使用するもの

- ・ 箔検電器 2 個 、 導体球 2 個
- ・ 絶縁取手付金属棒 、 アルミホイル
- ・ アクリルパイプ、塩ビパイプ、布、糸 、 ティッシュ
- ・ 空缶 2 個、発泡スチロール板 2 枚、画鋸
- ・ ネオン管、セロハンテープ
- ・ （実験スタンド：必要に応じて）
- ・ ホワイトボード・マーカー・イレーサー

実験Ⅰ.Ⅰ 箔検電器内の静電気の様子を調べよう

『なぜ、箔は開くのだろう。説明してみよう』

- (1) 塩ビパイプと布をこすり合わせて、塩ビパイプと布に静電気を発生させる。静電気をもった物を帯電体と呼ぶ。
- (2) 帯電した塩ビパイプや布を箔検電器に近づけると両方もしくは片方に対して箔検電器の箔が開く。
- (3) 同じ帯電体を箔検電器の下から近づけてみよう。
- (4) 帯電体が箔検電器に近づくにしたがって、箔の開きはどうか注目してみよう。



実験Ⅰ.Ⅱ 箔検電器内の静電気の様子を調べよう

- (5) ティッシュやストローなど、様々な材質の組み合わせで**実験Ⅰ.Ⅰ**と同様の実験を行う。

実験Ⅱ 箔検電器を電池で帯電させてみよう

『以下の実験結果を記録して、どのように電荷の移動や分布が起こっていると考えたら合理的に現象を説明できるのか、考えてみよう』

乾電池を直列に 300 個接続して、500V 程度の直流の電源を用意する。

- (6) 箔検電器 1 つ

(ア) 電源のプラス端子やマイナス端子を箔検電器の上部の金属円盤部に接触させて離す。このとき、箔検電器の下にアルミ箔など金属を敷き、逆の端子を接続すると変化が顕著になる。

- (7) 箔検電器 2 つ

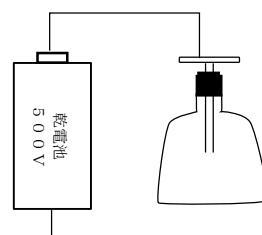
(ア) 同種電極

2 つの箔検電器両方ともに電源のプラス端子を金属円盤部に接触させて離れたのち、金属棒で金属円盤同士を接続する。マイナス電極でも同様な実験を行う。

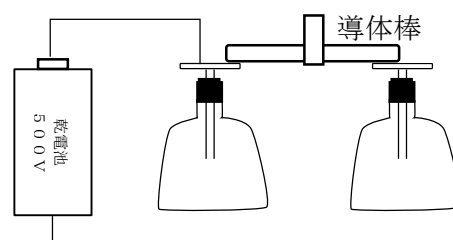
(イ) 異種電極

2 つの箔検電器片方に電源のプラス端子を金属円盤部に接触させて離れたのち、もう片方にマイナス端子を接触させ、金属棒で金属円盤同士を接続する。

- (5) (ア)



- (6)

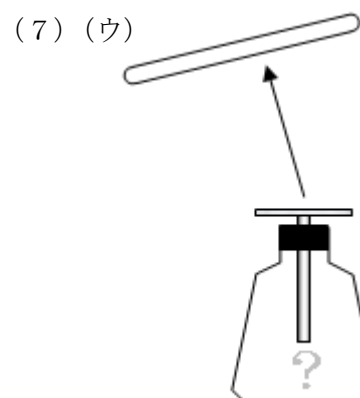
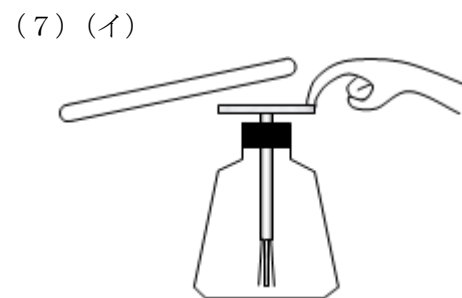
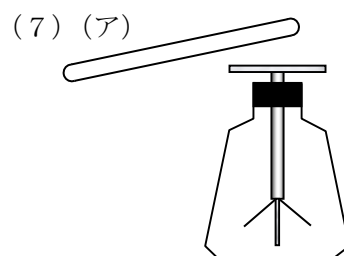


実験Ⅲ 箔検電器を帯電体で帯電させてみよう

『以下の実験結果を記録して、どのように電荷の移動や分布が起こっていると考えると合理的に現象を説明できるのか、考えてみよう』

(8) 箔検電器一つと帯電体

- (ア) 帯電させたエボナイト棒を箔の閉じた箔検電器に近づけ、箔が開いた状態にしておく。
- (イ) 天板を指で触れ、すぐ指を離す。
- (ウ) エボナイト棒を遠ざける。
- (エ) エボナイト棒をもう一度近づけてエボナイト棒の距離と箔の開きを注意深く観察する。

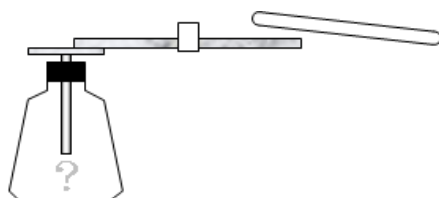


実験Ⅳ 導体棒と箔検電器の実験 1

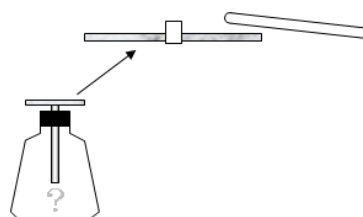
『以下の実験結果を記録して、どのように電荷の移動や分布が起こっていると考えると合理的に現象を説明できるのか、考えてみよう』

(9) 導体棒と箔検電器 1 つ

- (ア) 不導体部分のつまみを持って（以下、全て不導体部分を持つ）金属棒を天板に触れさせ、帯電したエボナイト棒を図のように近づける。



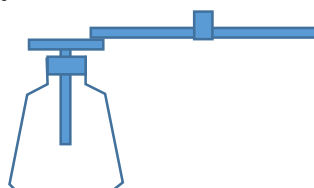
- (イ) 金属棒とエボナイト棒をいっしょに遠ざける。



- (ウ) 天板に指で触れ、すぐ手を離す。



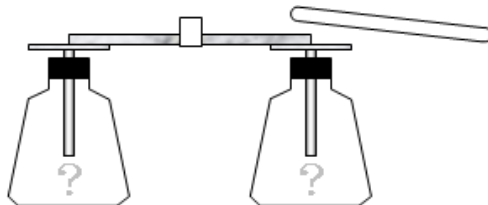
- (エ) 金属棒をもう一度天板に触れさせる。



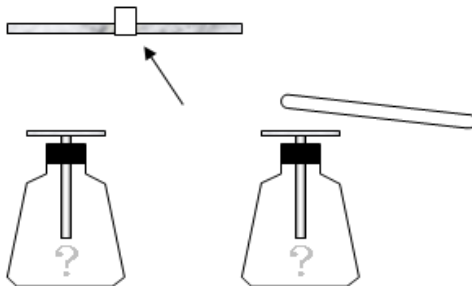
実験Ⅴ 導体棒と箔検電器の実験 2

(10) 導体棒と箔検電器 2 つ

(ア) 2 つの箔検電器に、橋渡しをするように金属棒を乗せ、帯電したエボナイト棒を片方の箔検電器に近づける



(イ) エボナイト棒の位置はそのまま、金属棒を遠ざける（そのあとも金属部分に触れないようにする）。



(ウ) エボナイト棒も遠ざける。

研究

①～⑤の中から選んで現象を検証してください。

〔検証内容〕

- ・ 実験を提案(条件制御も含めて)してください
- ・ 期待される結果を示してください
- ・ 実験結果はどうになりましたか
- ・ 仮説は検証されたと言えますか
- ・ まだ不十分な点があれば、示してください

① ストローを引き抜いた紙袋と ストローの電荷の符号はどうなっているのだろう

② 静電気は 2 種類ある

③ 同種電荷には斥力、異種電荷には引力がはたらくことを示せ

④ 帯電していないものの正負電荷は等量ある

⑤ 考えるカラス「実験 14 缶と画鋲」の説明を考え、それが正しいかどうかを、箔検電器などで検証する。