

物理基礎 波動分野の授業

～探究活動を念頭に置いた授業設計～

東京学芸大学附属高等学校 西村塁太
※授業は昨年度、附属国際中等教育学校で

<科目の概要>

科目名：SS 物理基礎 (SSH 研究開発科目)

学年：5年生 (高等学校2年生に相当) 一般プログラム生必履修科目

単位数：2

使用教科書：「実教出版 物理基礎 新訂版」

年間計画：

1学期…力学

2学期…熱学 (教育実習生担当), 波動【本単元】

3学期…力学的エネルギー, 電気回路, 放射線

授業形式：

講義, 実験・観察・シミュレーション (演示・生徒), 議論 (Peer Instruction)

評価：

観点別評価 (ルーブリック使用)

評価に対する重み

規準 A：知識と理解

… 単元テストで評価

50%

規準 B：探究

規準 C：実験観察の技能

規準 D：データ処理

規準 E：評価

規準 F：科学による影響の振り返り

… 提出物等で評価

50%

<波動単元 指導計画> (全11時間)

第1時 波の性質

第2時 波の独立性, 重ね合わせの原理, 定常波, 反射

第3時 弦の固有振動

第4時 音波, 音の三要素 (生徒実験)

第5時 気柱の共鳴 (生徒実験)

第6時 気柱の共鳴の実験分析

第7～11時 音速の測定の探究 (規準 B～E の総括的評価課題)

<東京学芸大学附属国際中等教育学校の理科授業について>

・ 一条校

・ 国際バカロレア (IB) 認定校

1 年生 (中学 1 年生) ~4 年生 (高校 1 年生) 全員が MYP 実施

5 年生 (高校 2 年生) ~6 年生 (高校 3 年生) 希望者 15 名程度が DP 実施

その他の 5~6 年生は一般プログラム (数学, 理科, 家庭科は SS 科目)

・ 観点別評価

MYP→A: 知識と理解, B: 探究とデザイン, C: 手法と評価, D: 科学による影響の振り返り

SS→A: 知識と理解, B: 探究, C: 実験観察の技能, D: データ処理, E: 評価, F: 科学による影響の振り返り

DP (IA) →A: 主体的な取り組み, B: 探究, C: 分析, D: 評価, E: コミュニケーション

・ ルーブリック評価 (例は後述)

・ 生徒独力による探究

<本単元について>

昨年度の SS 物理基礎では, 1 学期に目で見える力学現象を対象に, 「科学の方法」の獲得を目指し, 2 学期に五感で感じる熱や音に関する現象を物理的に定義し, 検証していき, そして, 3 学期には, 目でも見えず, 五感でも感じられない放射線や電気, エネルギーに関する現象を, 新たな物理量やモデルを構築することで検証可能にすることを目指す流れとした。

本単元では, 総括的評価課題として「音速の測定」(参考: 2012 年物理チャレンジ第 1 チャレンジ実験課題)を設定している。2 学期の授業で身に付けた知識や技能を活用し, 科学の方法で空気中の音速を測定する実験を立案し, 実際に実験し, 結果をポスターにまとめる課題である。インターネット上には, 音速測定の具体的な実験方法が数多く紹介されているが, それらと全く同じ (実験器具等を含めて) 環境で実験することができるわけではない。生徒には, 先行研究の調査という位置づけで, どのような実験方法が存在しているのかを知り, それらを本校の環境や自らの知識や技能に応じてアレンジし, 実験デザインに取り組むよう指導している。このように, 本課題では探究の過程における「検証計画の立案」および「観察・実験の実施」に焦点化している。また, 本課題を通して, 新しい考えやプロセスを生み出すために, 既存の知識を応用するという創造的思考スキルを育成していきたいと考えている。

本課題は, 2 学期当初のオリエンテーションで概要を示してあり, 教育実習期間や本単元の 1~6 時の授業を行っている間に, 休み時間や放課後等を活用して, グループごとに実験等を先んじて進めてもよいこととしている。実際, 数グループが実験を数回程度実施しており, 自分たちの実験デザインと実際の結果とのギャップに気付き, 実験計画の修正をするなどしている。物理実験室の PC や実験器具等は, 担当教員の許可を事前にとっていけば, 自由に使用することができる。

第 7~11 時では, 生徒に毎回の授業で実験記録をワークシートへ記入することは求めるものの, 基本的に教師主導による全体指導の時間はなく, グループごとに探究を進めていくことになる。与えられている授業時間は決まっているので, その中でいかに計画的に探究を進めていけるのかといった自己管理のスキルの発達も求められるところではある。

【第1時：波とは何か】

ウェーブマシンで作った波の観察

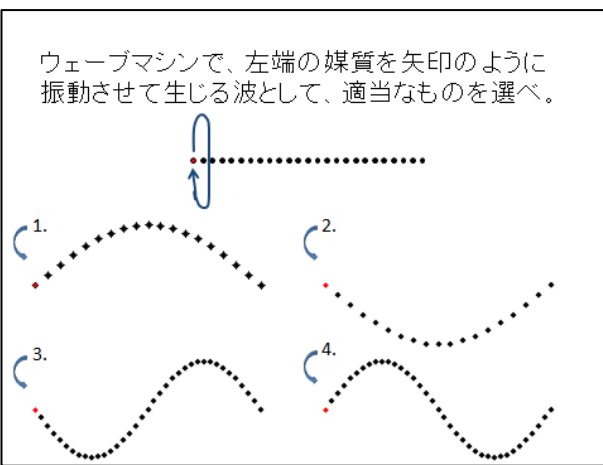
ウェーブマシン全体を見ると、いかにも波の形が平行移動していくように見えるが、1本1本の棒に着目すれば、() ことがわかる。

つまり波とは、() 現象である。ここで、波を発生させるものを()、波を伝えるものを() という。

練習①：次の(1)~(3)における媒質を答えよ。

- (1)地震 (2)糸電話での会話 (3)音波 (人の会話)

練習②

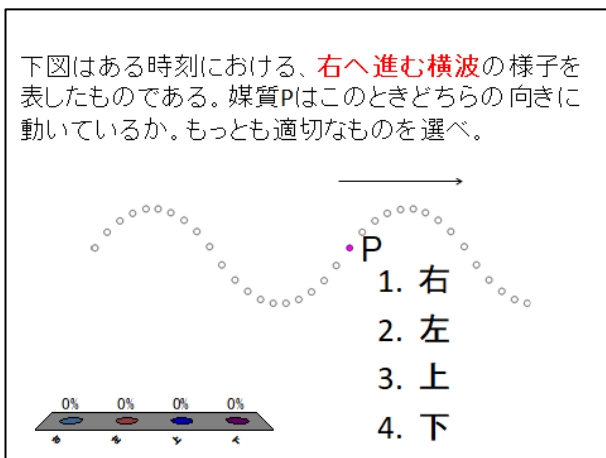


1回目の解答 () とその理由

参考になった友達の意見

2回目の解答 () ・正解 ()

練習③



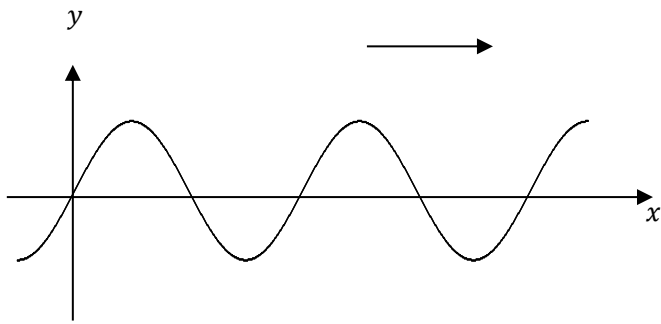
1回目の解答 () とその理由

参考になった友達の意見

2回目の解答 () ・正解 ()

波の要素

波という現象を正しく説明し、表すためには、いくつか決まりごとを作る必要がある。



<波の要素>

- ・ 波形の最も高いところ… ()
- ・ 波形の最も低いところ… ()
- ・ 変位の最大値… ()
- ・ 波1つ分の長さ… ()

<振動の要素>

※振動数と周期の関係

- ・ 媒質が1回振動するのにかかる時間… ()
- ・ 1秒間に媒質が振動する回数… ()

<波の伝わる速さ>

- ① 媒質が1回振動するごとに () 個作られる → 波は () だけ進む : 「 」
 - ② 媒質が1回振動するのにかかる時間は () である : 「 」
- ① ・ ②より、波の伝わる速さ v は

2台のウェーブマシン(A・B)を用意し、それぞれ波源を同じ振動数で振動させたところ、下図のような波が伝わっていった。波の伝わる速さが大きいのはどちらか。

1. A
2. B
3. 同じ
4. これだけではわからない

1回目の解答 () とその理由

参考になった友達の意見

2回目の解答 () ・ 正解 ()

授業の振り返り

授業でわかったこと

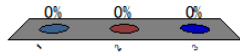
まだよくわからないこと

【第2時：波が出会うとどうなるか】

○波の 性

左右から波を送って、波が出会った後、どうなるか。

1. はねかえる
(自分の波が自分の所へ返る)
2. ほぼ消える(消滅)
3. 波がすりぬける
(相手の波が自分の所へ来る)



予想 … () 【理由】

○実験結果 (同じ大きさの山と山を送る)

<実験結果【動画】>

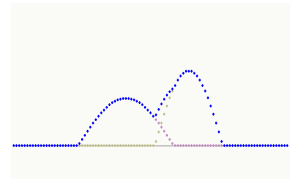
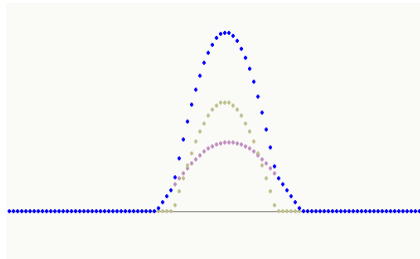
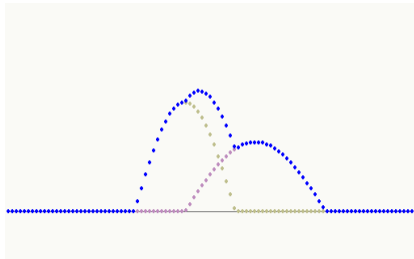
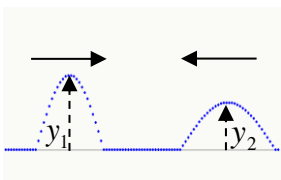
☆波の

○波の

左右から送られた波が出会っている最中には、何が起きているだろう？

- ・山と山
- ・谷と谷
- ・山と谷

☆波の



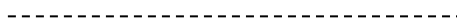
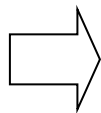
○進まない波

つまきばねの両端から① () ・② () の波を送り続けると、大きく振動している③ () と、あまり振動していない④ () ができて、右にも左にも進まないような波ができる。このような波を⑤ () という。

【第3時：弦楽器の仕組みとは】

「ギター（弦楽器）は、誰が弾いても同じ音を出す（楽器をやっている人からすれば抗議したくなるような発言だと思うが）」。これは弦がいつも決まった振動数で振動しているということである。よくよく観察してみると、指ではじかれた後、ギターの弦には定常波ができていくのである。今日は実験を通して弦にできる定常波の特徴は何かを探っていき、弦楽器の仕組みについて考えていくことにしよう。

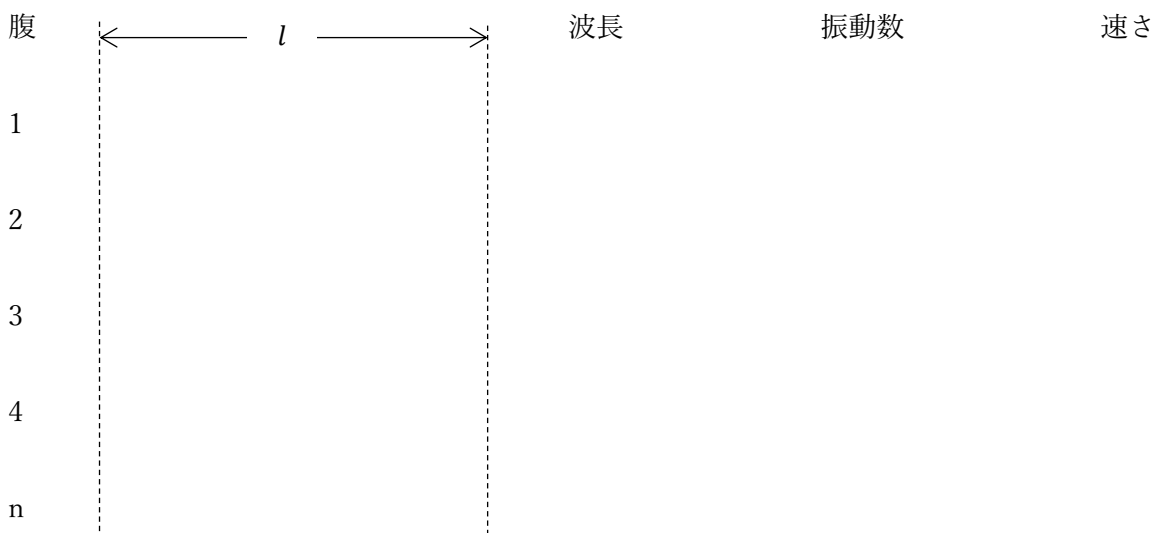
○弦楽器の音の出し方



弦に生じる定常波は、弦に伝わる波が両端で反射を繰り返して、右に進む波と左に進む波が重なり合っている。両端は固定端になっているので、弦楽器に定常波ができる時両端は節になる。弦に定常波ができるのは、それぞれの弦にマッチした振動数のときのみである。この振動数のことを固有振動数と呼ぶ。弦楽器に限らず、音の鳴るあらゆるものに固有振動数がある。

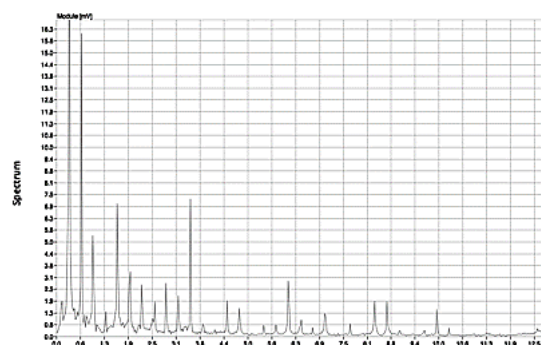
○腹の数と波長・振動数・速さの関係

同じ「ラ」の音でもウクレレとギターでは全く音色は違う。同じ「ラ」なのに、どの楽器で出した「ラ」なのか聞き分けられるのは不思議である。音色の違いは、波形の違いに表れる。そして複雑な波形は、腹が1つの定常波ではつくることができない。どんなときに腹が2個、3個の定常波が生じるのか。



実は、弦を弾いたりこすったりして見えるのは基本振動だが、この2,3,4…倍振動も同時に含まれた振動をしているのである。これらの倍振動による音を倍音という。

右の写真はスペクトルアナライザという装置で、ギターの音に含まれる振動数を調べたものである。縦軸はその振動数が持つエネルギーである。もっとも低い振動数が基本振動数で、これが音階を決めているが、それ以外にも2,3,4…倍の振動数が含まれていることがわかる。つまりこの場合、弦の腹1個の定常波の上に、



腹が 2,3,4,5,6,7,8…個の定常波も同時にできて振動しているのである。それぞれの振動数の音の強さを振幅に置き変えて全てを足し合わせたものが、その楽器の音色となっている。この倍振動の含まれ方は楽器の演奏の仕方に大きく影響されるので、優れた演奏者はこの倍音の含まれ方をコントロールしているのだろう。

○波の伝わる速さ（発展）

弦に伝わる波の速さは、次のように表せることがわかっている。

$$v = \sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad \left\{ \begin{array}{l} S: \text{張力[N]} \\ \rho: \text{線密度[kg/m]} \end{array} \right.$$

上式に基づいて、弦楽器で高さの違う音を出すときに、 $v = f\lambda$ のうち、どの物理量が変化しているのかを考えよう。

(1) 弦の太さ

太い弦は（ ）音、細い弦は（ ）音 → $v = f\lambda$

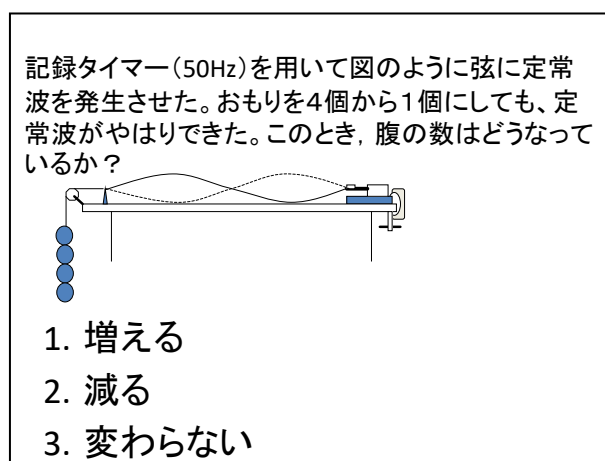
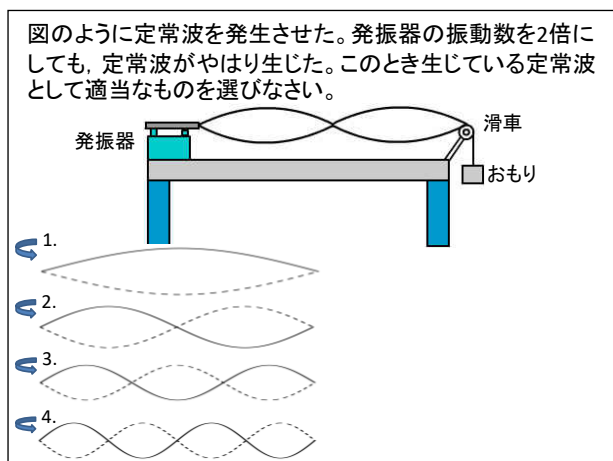
(2) 弦の張力

張力が弱いと（ ）音、張力が強いと（ ）音 → $v = f\lambda$

(3) 弦の長さ

弦が長いと（ ）音、弦が短いと（ ）音 → $v = f\lambda$

弦楽器では、弦の張力を変化させることでチューニングをしたり、はじく弦の太さや、弦を手で押さえる場所（弦の長さ）を変えることで高低を使い分けたりして、音楽を演奏している。



授業の振り返り

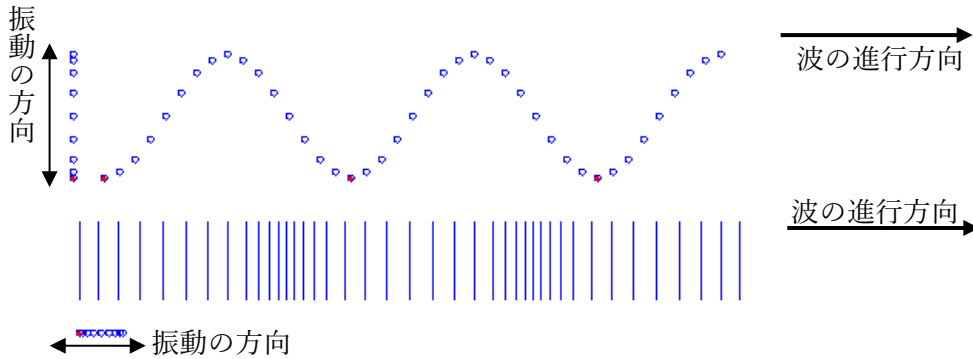
授業でわかったこと

まだよくわからないこと

【第4時：音波とは】

縦波

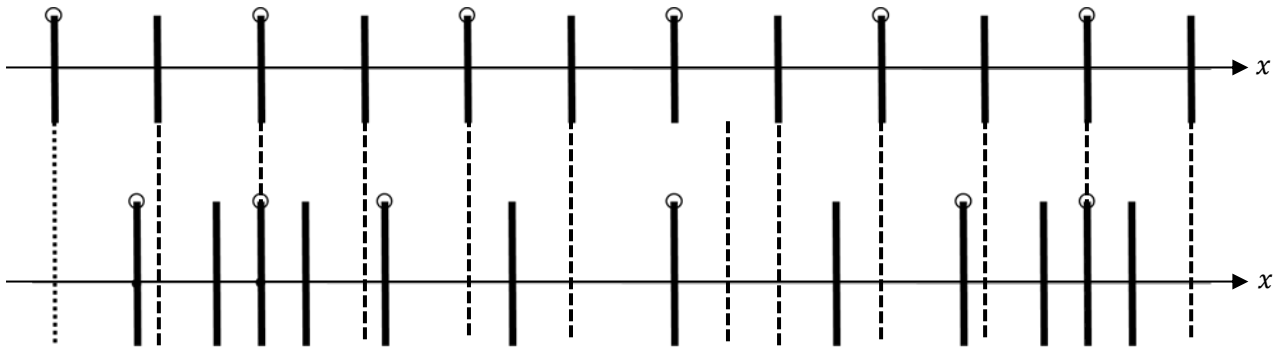
- ・媒質が波の進行方向に対して（ ）に振動するような波を（ ）
- ・媒質が波の進行方向に対して（ ）に振動するような波を（ ）



- 横波の例：
- ・地震波の S 波
 - ・光波
- 縦波の例：
- ・地震波の P 波
 - ・音波

縦波の横波表示

縦波の様子は図に表せないことはないが、表すのに手間がかかるし、読み取りにくい。そこで、縦波を横波のように表記する方法を示す。



- ルール 1：x軸方向の変位は反時計回りに90°回転させる(右向きが正の向きの場合).
 ルール 2：変位が0の場合、その場に点を打つ.

音速

空気中を伝わる音の速さ $V = 331.5 + 0.6t$ (t は温度°C, これは近似式で、覚えなくても良い)

問：稲光から5秒後に雷鳴が轟いた。雷雲までの距離を求めよ。気温 15°C, 光速は 3.0×10^8 m/s とする。

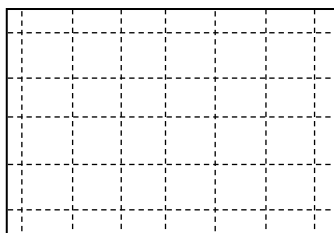
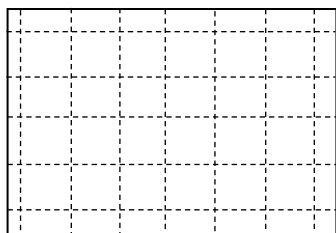
問：人の可聴域は 20Hz~20000Hz とされている (個人差あり)。これを波長で換算すると、何 m から何 m の音が聞こえることになるか、計算せよ。音速は 340m/s とする。

音の三要素

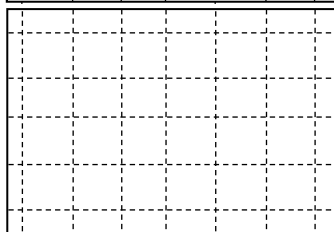
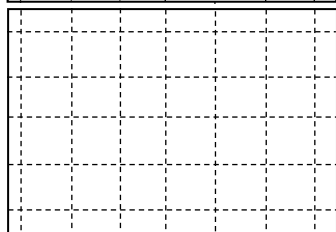
PC のオシロスコープのソフトウェアを使って実験してみよう。

※Desktop→app→Science→Oscillo.exe

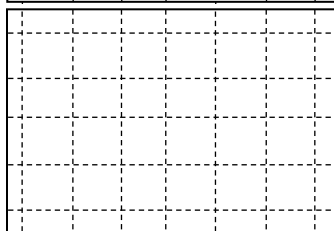
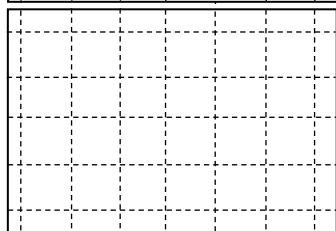
大小、高低、音色のどれか一つだけを変化させて、振動がどのように変化するかを観察しよう。



音の大小は
() で決まる。



音の高さ
() で決まる。



音色
() で決まる。

音は空気以外の気体、液体、固体を媒質として伝わる。

| 媒質 | | 音の速さ (m/s) |
|----|-----------------|------------|
| 気体 | ヘリウム (1 気圧、0°C) | 970 |
| | 空気 (1 気圧、0°C) | 331.5 |
| 液体 | 水 (23~27°C) | 1500 |
| | 海水 (20°C) | 1513 |
| 固体 | 氷 | 3230 |
| | 鉄 | 5950 |

授業の振り返り

授業でわかったこと

まだよくわからないこと

【第 5, 6 時：管楽器の仕組みとは】

○実験：気柱共鳴

試験管の口に息を吹きかけると、決まった高さの音が鳴る。このとき鳴る音は、試験管を叩いたときの音とは違う。おそらく、試験管内の空気が振動することにより鳴っている音と考えられる。

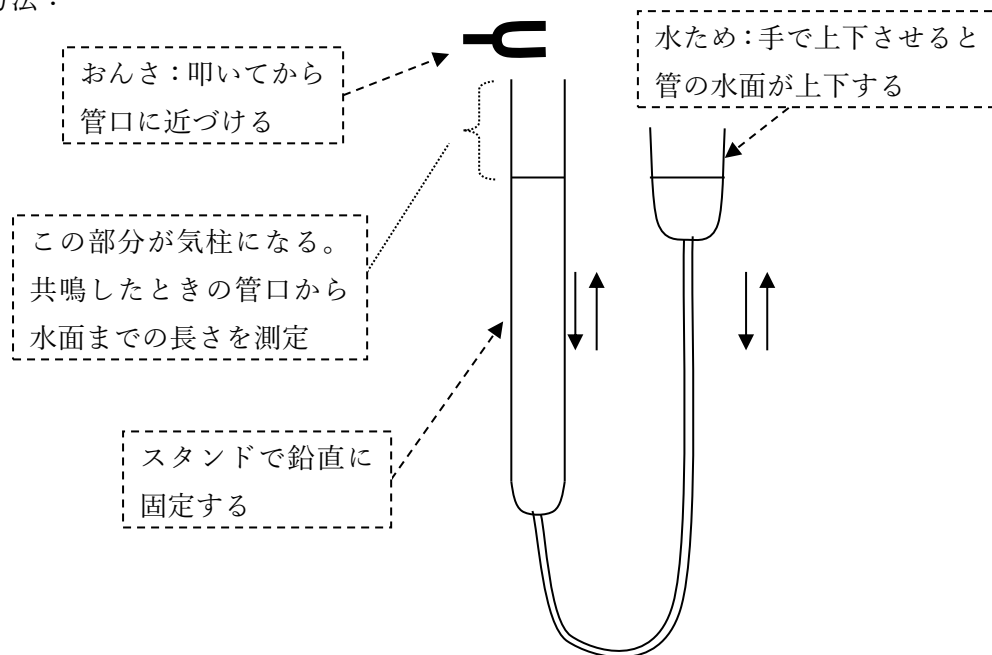
試験管に入れる水の量を変えると、音の高低が変わる。また、音を鳴らすためには、息の吹きかけ方に少しコツがある。これは、まさに管楽器で音を鳴らすことと、同じ現象が起こっていると考えられる。実験を通して、管楽器の仕組みに迫ろう。

目的：管楽器の音の鳴る仕組みを探る。

仮説：試験管の中の空気（気柱）に定常波ができていないのではないか。

なぜ「定常波ができていないのではないか」という仮説を立てられるのだろうか？

方法：



- (1) 室内の気温から、 $v = 331.5 + 0.6t$ (t : 気温 $^{\circ}\text{C}$) で音速を計算する。振動数はおんさに書いてあるので確認する (PC のスペクトルアナライザーソフトで調べても良い)。 $v = f\lambda$ から音のおおよその波長を計算しておき、それらを記録し、実験の予想をする。
- (2) 水ためを上下させて、気柱の長さをできるだけ短くし、おんさを軽くたたいて管口に近づける。水ためを下げて気柱の長さを短→長とゆっくり変えていくと、ある位置で急に音が大きくなる。このときの気柱の長さ (管口から水面まで) を 0.1cm 単位まで記録する。
- (3) さらに気柱の長さを変えて (水面を下げていき)、共鳴する点を探す (大体 3、4 か所見つかる)。

<実験操作についての注意>

- ・ おんさはゴム製のつちで叩くこと。金属部分では叩かない。
- ・ おんさを管の上で叩かない。叩く際に勢い余って管にぶつかってしまうと、管が割れることがある。
- ・ おんさを連打するのは無意味
- ・ おんさはゆっくりポーン…ポーン…と鳴らし、音が途切れないようにすると良い。
- ・ おんさをどの向きで気柱にかざすのが良いか、考えながら実験する (おんさはどのように振動している?)

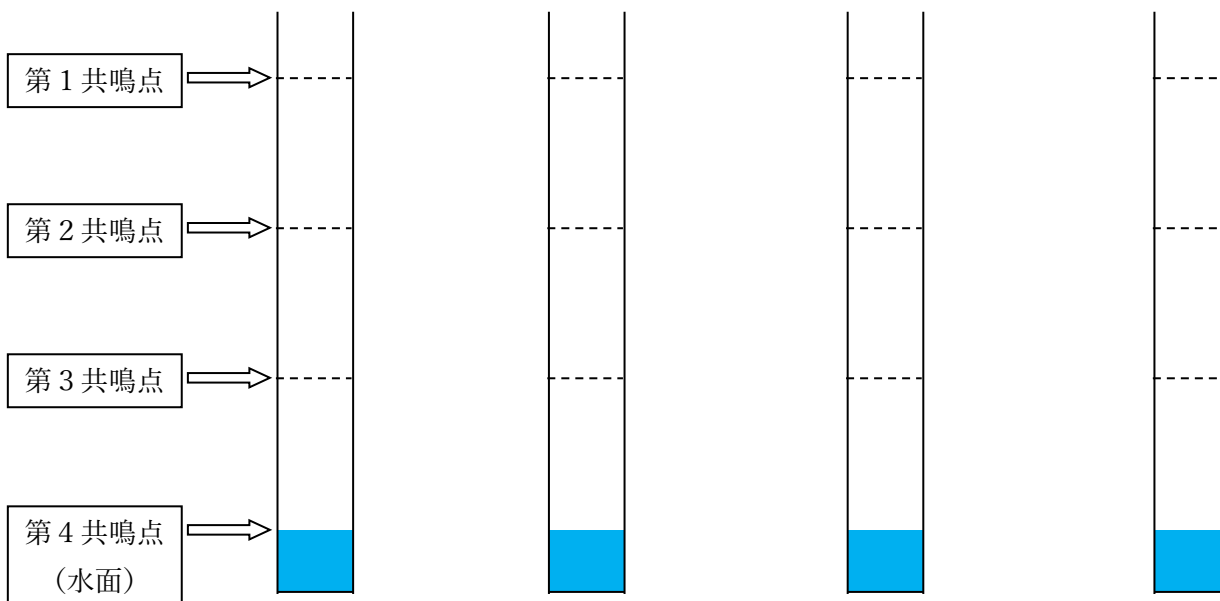
結果：

気温 _____ °C 音速 _____ [m/s] おんさの振動数 _____ [Hz] 音の波長 _____ [m]

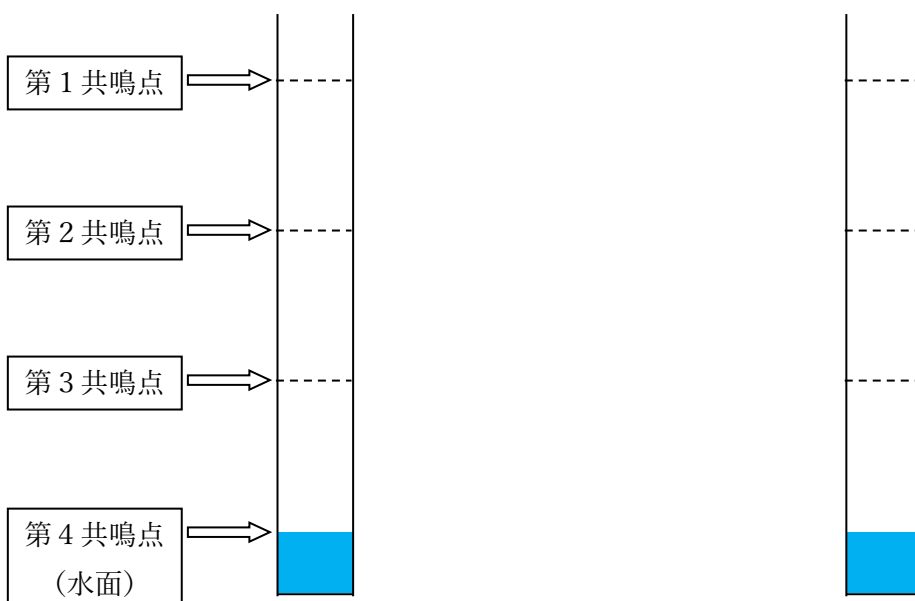
| | 第1共鳴点 | 第2共鳴点 | 第3共鳴点 | 第4共鳴点 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| 管口から水面 までの距離[m] | | | | |

考察：

(1) 実験結果から、定常波のパターンを予想する（縦波の横波的表現で）

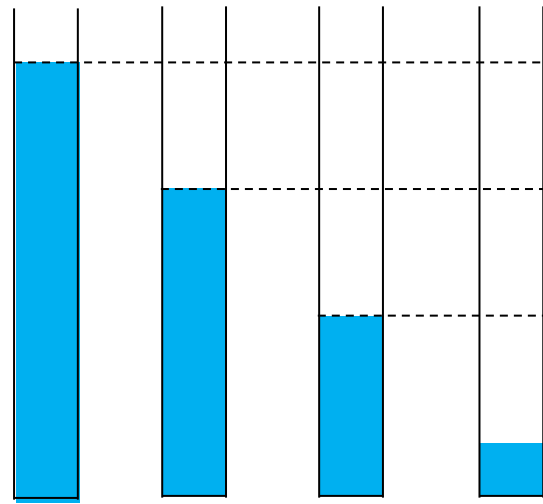


(2) 音波は、水面と管口で反射しているはずだから、4パターンから2パターンに絞られる。



(3) 端の媒質の状態から、反射の仕方を特定する。

- ・ 開口端→媒質（空気）は自由に振動できる
→（自由・固定）端反射
→定常波の（腹・節）
- ・ 閉口端→媒質（空気）はほとんど動けない
→（自由・固定）端反射
→定常波の（腹・節）

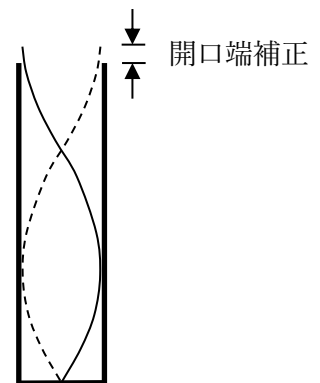


よって気柱に生じている定常波は、右上図のようになっていると思われる。

(4) 開口端補正

実験結果を見てみると、管口から第一共鳴点までの長さが、4分の1波長より少しだけ短いだろう。実は、開口端では腹の位置が少し管の外側にずれている。これを開口端補正という。開口端補正は、管の形や大きさなどで決まる。

→本実験の開口端補正は（ ）cm である。



考察課題①

室温が高くなると、共鳴点から次の共鳴点までの長さは大きくなるか、小さくなるか、説明しなさい。

考察課題②

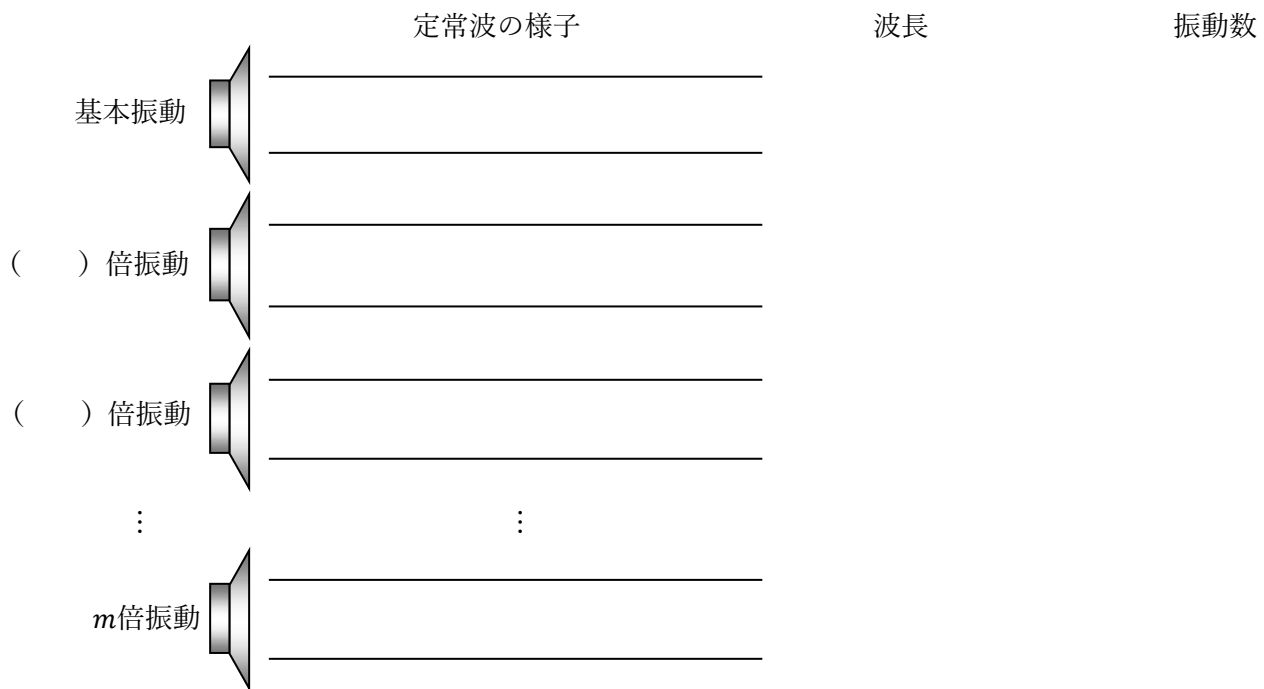
音叉を振動数の高いものに変えてから同じ実験をすると、管口から第1共鳴点までの長さは大きくなるか、小さくなるか、説明しなさい。

考察課題③

底から1/3くらいまで水を入れた試験管の管口付近で、息を吹いて音を鳴らした。もし試験管の半分くらいまで水を増やし、同じことをしたとすると、鳴る音の高さはどうなるか、説明しなさい。

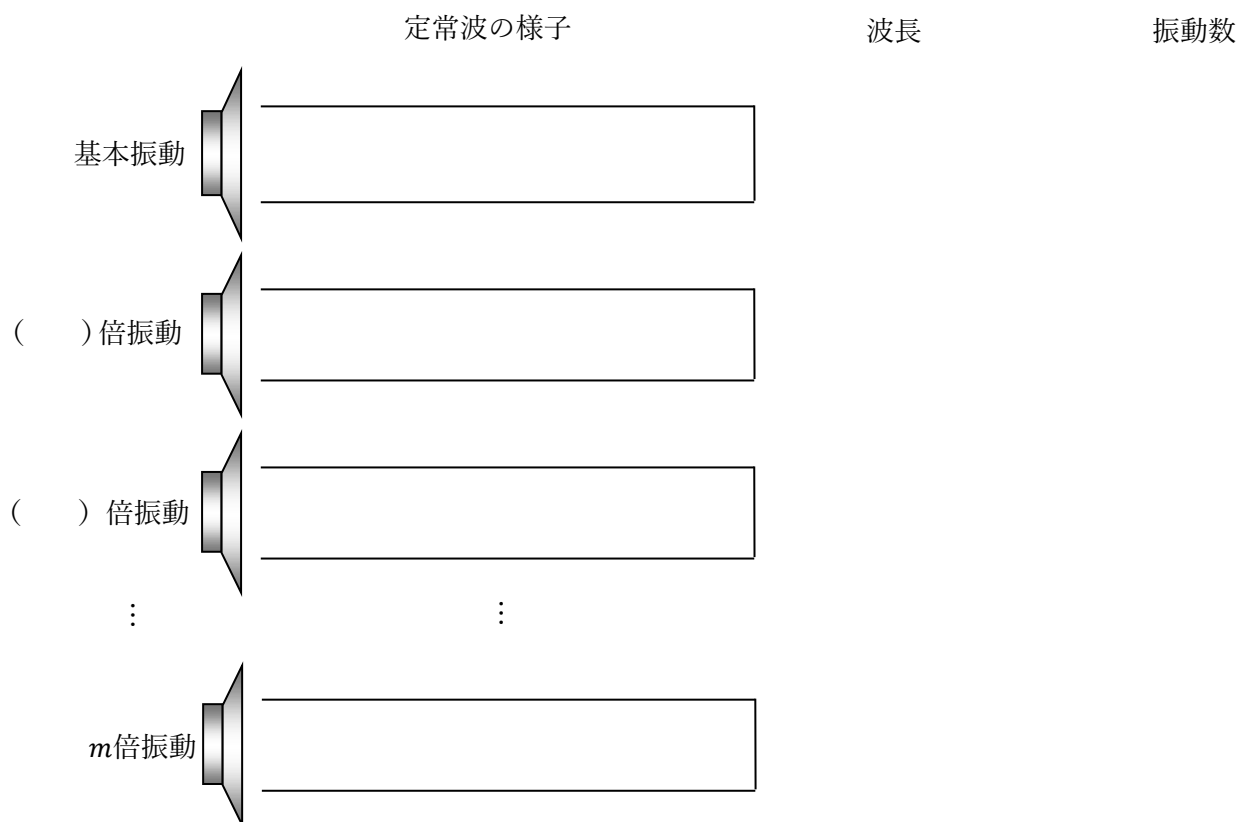
【開管（両方開いている）のまとめ】

管の長さ l を固定し、色々な振動数の音波をスピーカーから送り込み、共鳴させる。さて気柱にはどんな定常波が生じているのだろうか、横波的な表現で描き表わそう。また、音速 V として、波長と振動数を表し、その関係についても考えよう。



【閉管（一方が開いていて、他方は閉じている）のまとめ】

閉管での定常波の様子も考えよう。開管のときと同じように、長さ l 、音速 V で閉管にできている定常波の様子を描いてみよう。また波長と振動数についても同様に表そう。



【第7～11時：音速を測定するにはどうすればよいか】

5年生 SS 物理基礎 2学期

「波」総括的評価課題

探究：音速の測定

○概要

打ち上げ花火を離れた場所で見ていると、花火が見えてから遅れてドーンという音が聞こえる。これは光に比べて音が伝わるのに時間がかかるからである。

2学期に身につけた知識・理解や、観察・実験の技能を活用して、空気中の音速を求めよう。可能であれば、いろいろな方法を考え、測定方法ならびに測定値について比較し考察しよう。そして、本実験についてポスターにまとめよう。(2012年物理チャレンジ第1チャレンジ 実験課題より)

○スケジュール

| 授業内容等 | 1組 | 2組 | 3組 | 4組 |
|------------|---------------|--------|--------|--------|
| グループ決め, 調査 | 9月9日 | 9月9日 | 9月9日 | 9月9日 |
| 熱, 波 | 9月10日～11月19日 | | | |
| 実験, ポスター製作 | 11月25日 | 11月25日 | 11月25日 | 11月20日 |
| 実験, ポスター製作 | 11月26日 | 11月26日 | 11月28日 | 11月25日 |
| 実験, ポスター製作 | 12月2日 | 12月2日 | 12月2日 | 11月27日 |
| 中間報告会 | 12月3日 | 12月3日 | 12月5日 | 12月2日 |
| 実験, ポスター製作 | 12月9日 | 12月9日 | 12月9日 | 12月4日 |
| 期末テスト | 12月10日～12月13日 | | | |

※中間報告会は生徒同士で小グループに分かれて、意見交換するものを想定

○実験器具 (実験デザインの参考まで。この他にも使用可能な器具等あるかもしれません)

音センサー, ストップウォッチ, 各自のスマホ, PC, おんさ, 定規, メジャー, マイク, スピーカー
低周波発振器, オシロスコープ (アナログ・デジタル)

○ポスターの構成

A3 縦向きで一枚にまとめること。実験はグループで行うが、ポスターは一人一枚製作する。ポスターの構成は、たとえば、要約, 目的, 仮説, 方法, 結果, 考察, 結論である。補足資料を A4 一枚だけ添付してもよい (ポスターは評価後, 校内のどこかに掲示する予定である)。

○評価

「規準 B：探究」, 「規準 C：実験観察の技能」, 「規準 D：データ処理」, 「規準 E：評価」の四つの観点について、後述のルーブリックに基づき評価する。そのため、ルーブリックは熟読しておくこと。

○〆切・提出

2020年1月7日(火) …締め切り前に提出してもよい (推奨!!)

必ず PDF ファイルにして、Office メールで提出すること。送付先は (メールアドレス) へ。

ファイル名は、「学年クラス番号名前_音速の測定」とすること。例えば「5123 西村壘太_音速の測定」

規準 B

| | |
|-----|--|
| 0 | この生徒は以下の説明に記載された基準に達していない。 |
| 1-2 | この生徒は以下のことができる i. 何を探究するのかということが示されている。 ii. 実験デザインが述べられている。 iii. 先行調査から得られた情報が書かれているが、探究との関連が不明確である。 |
| 3-4 | この生徒は以下のことができる i. 何を探究するのかということが示されており、その探究課題に対する仮説が述べられているが、仮説には根拠がない。 ii. 実験デザインが述べられており、取得する一次データが何か述べられている。 iii. 先行調査から得られた情報として、関連性のあるものを示している。 |
| 5-6 | この生徒は以下のことができる i. 何を探究するのかということが示されており、探究課題に対する仮説が述べられている。その仮説は日常感覚や既習事項に基づいたものであるが仮説と根拠が結び付いていない。 ii. 実験デザインが述べられており、取得する一次データが何か、どのようにデータを処理するのか述べられており、その方法は探究課題を解決するために適切である。 iii. 先行調査から得られた情報として、探究と関連のあるものが示されており、その関連を説明している。 |
| 7-8 | この生徒は以下のことができる i. 何を探究するのかということが示されている。また、その探究課題に対する仮説が論理的に述べられており、その仮説は日常感覚や既習事項に基づいたものである。 ii. 実験デザインが詳しく述べられており、取得する一次データが何か、どのように処理するのか、探究課題との関連性が何か（なぜその一次データや処理が必要なのかなど）を詳しく述べており、その方法は探究課題を解決するために適切である。 iii. 先行調査から得られた情報として、探究と関連のあるものが示されている。また自らの実験デザインとの関連を議論し、仮説やデザインした実験方法の妥当性を高めている。 |

規準 C

| | |
|-----|---|
| 0 | この生徒は以下の説明に記載された基準に達していない。 |
| 1-2 | この生徒は以下のことができる。 i. 実験器具、測定機器等の操作に不適切な部分があり、指導が必要である。 ii. 実験操作の過程、結果等、必要な情報をほとんど記録していない。 iii. 実験室の安全規則が順守されておらず、安全性、環境、倫理への配慮が実験記録等に見られない。 |
| 3-4 | この生徒は以下のことができる i. 実験器具、測定機器等の操作に一部不適切な部分がある。 ii. 実験操作の過程、結果等、必要な情報を十分に記録していない。 iii. 実験室の安全規則の一部が順守されておらず、安全性、環境、倫理への配慮が実験記録等に限定的に見られる。 |
| 5-6 | この生徒は以下のことができる i. 実験器具、測定機器等の操作がほぼ正確である。 ii. 実験操作の過程、結果等、必要な情報を正確かつ十分にほぼ記録している。実験方法を図や写真で説明している。 iii. 実験室の安全規則がほとんど順守されており、安全性、環境、倫理への配慮がある程度あることが実験記録等から見られる。 |
| 7-8 | この生徒は以下のことができる i. 実験器具、測定機器等の操作が正確である。 ii. 実験操作の過程、結果等、必要な情報を正確かつ十分に記録している。実験方法を数値データも併記しつつ図や写真で示すことで、再現可能にしている。 iii. 実験室の安全規則を順守しており、安全性、環境、倫理への配慮があることが実験記録やレポート等から見られる。 |

規準 D

| | |
|-----|--|
| 0 | この生徒は以下の説明に記載された基準に達していない。 |
| 1-2 | この生徒は以下のことができる i. 探究課題を解決するための一次データがほとんど示されていない。 ii. 分析に関しての測定の不確かさを考慮していない iii. データの処理を行おうとしたことが見られる。 |
| 3-4 | この生徒は以下のことができる i. 探究課題を解決するための一次データが十分に示されていない。 ii. 分析に関しての測定の不確かさをほとんど考慮していない。 iii. 基本的なデータの処理が行われている。 |
| 5-6 | この生徒は以下のことができる i. 探究課題を解決するための一次データが得られており、それが示されているが限定的である。 ii. 分析に関しての測定の不確かさをある程度考慮していることが伺える。 iii. データの処理は、実験データに基づく結論を導き出すことを可能にする正確さを備えて行われている。 |
| 7-8 | この生徒は以下のことができる i. 探究課題を解決するための十分な一次データが得られており、それが表などに整理され明確に示されている。 ii. 得られたデータの不確かさについて測定回数と合わせて定量的に十分に考慮していることが伺える。 iii. データの処理は、実験データに基づく結論を導き出すことを可能にする正確さを備えて行われており、それは不確かさを考慮したものである。 |

規準 E

| | |
|-----|---|
| 0 | この生徒は以下の説明に記載された基準に達していない。 |
| 1-2 | この生徒は以下のことができる i. 探究で分かったことが述べられているが、得られたデータと関連がない。 ii. 自分が得た結果を1つの文献とのみ比較している。 iii. 自分の探究方法の長所や短所が述べられている。 |
| 3-4 | この生徒は以下のことができる i. 探究で分かったことが何か述べられているが、得られたデータとの間に飛躍や説明不足な点がある。 ii. 自分が得た結果を1つの文献とのみ比較しており、簡単に結論付けている。 iii. 自分の探究方法の長所や短所がいくつかの視点で述べられており、現実的な改善案や発展案が1つ示されている。 |
| 5-6 | この生徒は以下のことができる i. 探究で分かったことが何か、提示されたデータに基づいて述べられている。 ii. 先行研究や教科書、文献、他の手法で得られた結論と自分が得た結論とを比較しており、簡単に結論付けている。 iii. 自分の探究方法の長所や短所がいくつかの視点で述べられており、現実的な改善案や発展案がいくつか示されている。 |
| 7-8 | この生徒は以下のことができる i. 探究で分かったことが何か、提示されたデータに基づいて述べられている。また得られた結論と探究課題との関連について言及している。 ii. 先行研究や教科書、文献、他の手法で得られた結論と自分が得た結論とを比較し、その違いについて詳しく考察し、詳細な結論を述べている。 iii. 自分の探究方法の長所や短所がいくつかの視点で述べられており、現実的な改善案や発展案がいくつか示されており、そのメリット・デメリットについても言及している。 |

年 組 番 氏名

| | |
|--|------------------|
| 探究課題： | |
| 日付： 年 月 日 () | |
| 探究デザインのどこに該当するか ・実験(回目) ・データ処理 ・分析 | |
| 実験中の記録 (実験手順、得られたデータなど)： | 分かったこと |
| | 疑問に思ったこと・気になったこと |

※記述した内容は消しゴムや修正テープ等で消さない事。

実験中に気になったこと、疑問に思ったことを自由に記述すること。

得られたデータをパソコンに保存する場合、フォルダ名やファイル名等を明記すること。

年 組 番 氏名

他の班の発表を聞いて気付いたこと，アドバイスなど

| 発表者 | 気づいたこと，アドバイスなど |
|-----|----------------|
| | |
| | |
| | |
| | |

友達からの意見，アドバイス

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

友達からの意見やアドバイスを受けて，今後，自分の班でやっていきたいこと

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

音速測定実験

目的←

探求の目的

この探求の目的は先行研究の調査や授業内容の応用を通してグループで実験内容をデザインし、実験・計測を行って音速を測定することを目的としており、実験方法を先行研究の調査や授業内容から、自分たちが持つ技術や条件と照らし合わせて最も正確に音速を測定できる方法を決定し、安全に配慮した実験を行って得た値がどれだけ妥当なものであるか理論値との比較を通して明らかにする。

先行研究

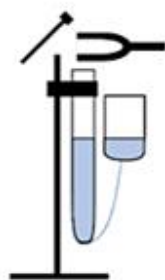
物理基礎(教科書)より、 $v = \lambda f$ が成り立つので、音速 v を算出するためには波長、振動数を明らかにするという方針と、速さ×時間=距離を用いて音速を測定するという2種類の方針がある。滋賀県総合教育センターによると、これらの方針を用いた音速測定実験は「音の伝播時間を測定する方法」と「気柱共鳴(閉管、閉管)による方法」がある。「音の伝播時間を測定する方法」は雷の雷光と雷鳴に時間差があるという日常的な現象にも表れている。この方法の欠点は正確な値を算出する器具がないこと、伝播時間は小さいため誤差が出やすいこと、距離を測らず反射により正確な値が算出できないことであるため、正確な値を算出できないと考えた。「気柱共鳴による方法」は決まった周波数の音において共鳴点となる定常波の節(閉管の場合)を計測し、波長を明らかにするという方法で水の入ったコップに息を吹き込むとコップ内の水位に応じて特定の音が鳴るという日常的な現象から観察することのできる現象である。この実験の欠点はこの実験は音の強弱を耳で判断するため曖昧になってしまうことだが、グループで実験することによって複数人で共鳴点を判断できるため精度を上げられると判断した。閉管は授業でも実験を行ったため、全員が実験方法や計測方法を理解しており、計測に慣れていることから閉管ではなく閉管で実験を行うことにした。

先行研究←

実験方法

実験者

実験日時 2019/11/28, 12/24 実験場所 物理実験室前の廊下,W203



(図1)実験装置

使用した器具

温度計、音叉440Hz、パソコン(発音はつね)、スピーカー、気柱共鳴装置(ガラス管、水位調節管、ゴムチューブ)、スタンド

実験の手順

- ①室温を小数第一位まで計測する。
- ②水面の目盛りが100mm以下になるように気柱共鳴装置に水を満たす
- ③一人ガラス管の口のところで音叉(440Hz)や発音(はつね)(500Hz)で音を再生し、もう一人は水位調節管を下に下げ水位を下げる。
- ④音が大きくなる共鳴点付近で水位を一定にし、スマートフォンを用いて動画を撮影して記録する。
- ⑤第二、第三共鳴点も同様に探す。

得られるデータ

共鳴点の距離(mm)、気温(°C)、音叉や再生した音の周波数

音速の算出

共鳴点はmm単位で計測し、mに変換後、第一共鳴点 $\lambda/4$ (第二、第三共鳴点 $3\lambda/4$)に値を代入し λ を算出する。これと音叉の周波数を $v = \lambda f$ に代入し音速を算出する。気温と算出した値は散布図を用いて表す。また、音速理論値 v を $331.5 + 0.6 \times \text{気温}(^{\circ}\text{C})$ として λv を算出し、収率(実験値)÷(理論値)×100に代入して考察を行う。

処理←

仮説

この実験を行うことで音速を算出することができる。物理基礎より、この実験によって定常波の節が分かり、 λ が求まること明らかにしているの共鳴点が明らかになることで λ が算出できる。また、 $v = \lambda f$ という式から、同じ条件下においては周波数が大きくなると λ が小さくなると考えられる。また、音速は水中や気体の種類などで変化するため媒質によって変化する。分子の密度に影響を受けると考えられるため、同体積の空気において、温度が低いほど密度が高くなるため、分子量の多い低温のほうが音速が同距離を伝わる時間がかかると考えられるため気温が高くなるほど音速も速くなるのではないかと考えられる。

結果

周波数はHz。(表1)は共鳴点の単位はmm、 λ は単位はm、小数点第4位以下を四捨五入。音速 v は単位は m/s で小数点以下第3位を

| 実験日 | 気温 | 音速 | 第一共鳴点 | 第二共鳴点 | 第三共鳴点 | 計算した λ | 計算した v |
|--------------|--------|-----|-------|-------|-------|----------------|----------|
| 1 2019/11/28 | 14.8°C | 344 | 38 | 112 | 188 | 0.77m | 304.28 |
| 2 2019/11/28 | 14.8°C | 344 | 38 | 112 | 188 | 0.77m | 304.28 |
| 3 2019/12/24 | 12.2°C | 338 | 34 | 102 | 170 | 0.70m | 296.60 |
| 4 2019/12/24 | 12.2°C | 338 | 34 | 102 | 170 | 0.70m | 296.60 |
| 5 2019/12/24 | 12.2°C | 338 | 34 | 102 | 170 | 0.70m | 296.60 |

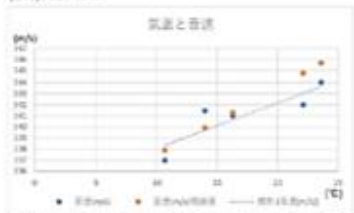
(表1)実験結果

| 気温 | 音速 | 1.1倍 | 1.2倍 | 1.3倍 | 理論値 |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 14.8°C | 344 | 378.4 | 412.8 | 447.2 | 371.5 |
| 12.2°C | 338 | 371.8 | 406.2 | 440.6 | 364.9 |
| 12.2°C | 338 | 371.8 | 406.2 | 440.6 | 364.9 |
| 12.2°C | 338 | 371.8 | 406.2 | 440.6 | 364.9 |

(表2)同定数

| 気温 | 音速 | 理論値 | 収率 |
|--------|-----|-------|-------|
| 14.8°C | 344 | 371.5 | 92.6% |
| 12.2°C | 338 | 364.9 | 92.6% |
| 12.2°C | 338 | 364.9 | 92.6% |
| 12.2°C | 338 | 364.9 | 92.6% |

(表3)収率



(グラフ1)音速と気温 相関係数 理論値1 実験値 0.875
※物理基礎p.156より2以外は第一共鳴点のデータを除く

考察

(グラフ1)より、実験によって算出した音速の値は気温と音速の散布図において、相関係数が0.875と強い正の相関を示すことが明らかになったため、音速は気温によって変化する事が分かる。気温が高くなると音速が速くなるという結果は理論値においても同じ傾向がみられる。第一共鳴点によって算出した λ は総じて理論値よりも低い値を示したが、これは開口端補正(物理基礎p.156)によるものである。結果に多少のばらつきはあるが、収率(添付資料参照)は第二共鳴点以降のデータは100との差の絶対値が1未満であるということから算出した音速は十分妥当であると判断することができる。よって、気柱共鳴実験によって算出した音速は相関係数、収率より妥当であるといえるため、気柱共鳴実験は音速が測定できる実験であると見え、音速は気温と強い正の相関があるといえる。

結論

気柱共鳴実験を行うことで、定常波の節である共鳴点が計測できたため、波長、音速を算出することができた。それらの値は理論値と比較を行った結果十分妥当なデータであると考察できるため、気柱共鳴実験は音速を測定する方法として妥当であることが本探求の結果明らかになった。音速は気温と強い正の相関があり、気温が上昇すると音速も速くなるということが音速の測定の結果明らかにすることができた。

【ケース1の評価】総合評価：8

B-i：7-8<理由>音速を測定するという目的が明確に示され、温度と音速の関係に関する仮説も、既習事項に基づき述べられている。

B-ii：7-8<理由>実験方法、1次データとして何を測定するのか、そして、得られたデータをどのように処理して音速を算出するのかまで、詳細に記述されている。

B-iii：7-8<理由>複数の先行研究を取り上げ、メリット・デメリットをまとめている。改善のための方策を提案するとともに、自らの実験デザインの参考にしたことが伺える。

音速の測定

メトロノームを用いた実験やオシロスコープとパイプを用いた実験で距離と時間から音速を求める方法と気柱共鳴の実験で波長と振動数から音速を求める方法で音速を求める。全ての実験は条件を変えながら複数のデータを取得し、空気中の音速を調べる。

目的

この探究では空気中の音速を求めることを目的とする。今まで身につけた知識・理解や、観察・実験の技能を活用し、複数の実験を通して音速を測定する。そして測定方法ならびに測定値について比較し、空気中の音速についての考察を行う。

仮説

空気中の音速は必ず3315m/sより大きくなると考えた。音速を求めるには一般的に $v=3315+0.6t$ という式を用い、 t は気温を代入する。つまり気温が7°C以下にならない限り音速は3315を下回ることがないということだ。今回実験を行う環境で7°C以下になる場所はないので、音速は3315以下にはならないと推測した。

実験①メトロノームを使った実験

使用した実験器具: スマホ(メトロノーム)、スピーカー、メジャー
 実験手順2人(AさんとBさん)がそれぞれメトロノームを持ち、同じテンポでメトロノームを鳴らす。Aさんは静止し、Bさんはメトロノームを鳴らしながらAさんから徐々に離れていき、AさんとBさんのメトロノームの音が半音ズレるような場所を探す。何m地点のところで音がズレるかを測り、音速を計算する。実験は8bpmを変えて何回か行う。

例えばメトロノームが「カンコンカン」と鳴るとし、片方で「カン」と鳴ったときもう片方で「コン」と鳴れば、半音ズレているということになる。

仮説

気温:8°C
 ☆150bpm(0.4秒間隔で音が鳴る)の場合
 122.5m地点で半音ズレた=音が0.4秒ズレた
 →122.5m地点に音がたどり着くまで0.4秒かかる
 ☆200bpm(0.3秒間隔で音が鳴る)の場合
 87m地点で半音ズレた=0.3秒でズレた
 →87m地点に音がたどり着くまで0.3秒かかる
 これらのデータから $V=m/s$ で音速を求める

実験②気柱共鳴

使用した実験器具: スマホ(おんさ)、気柱共鳴装置
 実験手順: ガラス管内に水を入れ、水面の位置をガラス管の法は管口近く、水ための方は底の近くになるようにする。スマホで音を鳴らし管口に近づけ、水ためをゆっくり下げてガラス管内の水を下げる。気柱が共鳴して音が大きく聞こえる第一共鳴点(L)、第二共鳴点(L)、あれば第三共鳴点(L)を見つけ出し、ガラス管口から水面の距離を測る。そこから波長 $\lambda(m)$ ($2(L_1-L_2)$) を求め、振動数 $f(Hz)$ を用いて音速を計算する。実験は振動数 $f(Hz)$ を変えて何回か行う。

仮説

気温:10°C

| 振動数 | 400Hz | 500Hz | 600Hz |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| 第一共鳴点 | 195cm(0.195m) | 155cm(0.155m) | 125cm(0.125m) |
| 第二共鳴点 | 620cm(0.62m) | 495cm(0.495m) | 405cm(0.405m) |
| 第三共鳴点 | なし | なし | 690cm(0.69m) |

これらのデータから波長を計算し、 $V=f\lambda$ で音速を求める

実験③オシロスコープとパイプを使った実験

使用した実験器具: パソコン、オシロスコープ、気泡緩衝材、マイク
 実験手順: パイプの一端にマイクを近づけ、マイクの近くで気泡緩衝材を使って破裂音を発生させる。マイクでとらえた直接音と気泡緩衝材の破裂音と他端で反射した音の波形をオシロスコープで表示させ、パイプを往復するのに要した時間と距離(往路+復路)を用いて音速を計算する。時間はオシロスコープのデータから得る。実験は往復距離を変えて何回か行う。

仮説

左の矢印...直接音
 右の矢印...跳ね返ってきた音
 赤枠内...パイプを往復するのに要した時間
 ☆往復距離100cmの場合
 0.0029478秒
 ☆往復距離120cmの場合
 0.0035374秒
 これらのデータから $V=m/s$ で音速を求める

結果

| | |
|----------------------|--------------|
| 実験①メ | |
| 150bpm | 音速 290m/s |
| 200bpm | 音速 290m/s |
| 実験②気柱共鳴 | |
| 400Hz | 音速 340m/s |
| 500Hz | 音速 340m/s |
| 600Hz | 音速 339m/s |
| 実験③オシロスコープとパイプを使った実験 | |
| 80cm | 音速 342.52m/s |
| 100cm | 音速 339.24m/s |
| 120cm | 音速 339.23m/s |

考察

実験①では条件を変えて実験すると、大きな誤差が生じた。静止している方のメトロノームから離れば離れるほど音が聞こえにくくなり、半音ズレているかどうかの判断が難しくなる。人間の耳で音がズレる地点を判断したため、誤差が他の実験より大きいと考えた。実験②は得た結果が全て約340m/sになったことから、行ってきた実験の中で一番誤差が少なかったため、正確なデータを得ることができたと考えた。実験③では、音が鳴ったところから、反射して帰ってきたところまでの時間をオシロスコープの拡大波形を見て判断したため、多少の誤差が生じていると考えられる。しかし得たデータは実験②と同様に340m/sに全て近づいているため、メトロノームの実験よりは正確だと考えられる。

結論

空気中の音速はだいたい340m/sになる。
 気温によって多少変動はするが、音速は全て340m/sに近づいたということが3種類の実験を通して分かった。行に一つ目のメトロノームの実験のように、人の判断を必要とする実験は大きい誤差が生じやすく、正確に音速を測定するのは難しい。例えばメトロノームの実験であれば、より大きい音の出るスピーカーを使用して音がズレているかどうかの判断をしやすくする工夫をするなど、誤差を出来る限り小さく抑えれば音速は340m/sに限りなく近づいていくのではないかと考えた。

【ケース 2 の評価】 総合評価 : 4

B-i : 5-6 <理由> 探究の目的が明確に述べられている。既習事項の音速の式に基づき、音速のおおよその大きさを仮説として設定している。音速の式の妥当性についての検討はない。

B-ii : 5-6 <理由> メトロノームの実験では、半テンポすれているか否かをどのように判断するかの説明が不十分。気柱共鳴実験では振動数の正確な測定がなされていない。パイプの実験では一次データとその処理について詳しく書かれている。総合的に判断し、5-6 とした。

B-iii : 0 <理由> 先行調査から得られた情報が掲載されていない。

授業者振り返り

生徒たちの発想は非常に豊かである。筆者はほとんどの生徒が、第6時で実施した気柱の共鳴を利用して音速を測定するのではないかと予想していたが、メトロノームを使用した方法⁴⁾や、スマートフォンの音響ストップウォッチを使用した方法⁵⁾など、生徒たちは様々な実験を実施していた。ほとんどのグループが、異なる複数の実験を行い、得られたデータを比較、分析することで、妥当性について評価しようとしていた点も良かった。

上述したメトロノームを使用した実験や、大科学実験「音の速さを見てみよう」を参考にしてデザインした実験では、生徒はあまり精度の良い値は得られていなかった。本来、約340 m/sのところ、生徒の実験結果では100～500 m/s程度ばらついてしまっていた。小グループでの中間報告会の後には、このようなスケールの大きな実験を行った生徒の多くが、気柱共鳴のようなスケールが小さく、より正確に音速を測定することのできる実験へと移行していった。上述したケース1のポスターを書いた生徒も、最初は気柱共鳴ではない実験も実施していた。

気柱共鳴実験で音速を求めると、非常に正確に音速を測定することができる。より精度を上げるために、共鳴している管の中の音を聴診器で聴き、共鳴点の位置（定常波の節）で本当に音が大きくなるのかどうかを確認している生徒もいた。また、音叉やスマートフォンといった音源から出ている音波の振動数を、オシロスコープで正確に測定してから使用するなど、非常に注意深く実験を進めている生徒もいた。多くの生徒が相対誤差で大きくても数%程度まで精度を高めていた。

音響ストップウォッチでは、330～370 m/s程度の値を得ることができていた。アプリのプリセットを調整することで、より正確に測定することもできるだろうが、なぜこの精度なのか、より正確に測定するためにはどうすればよいか、といった理由まで突き詰めて探究している生徒はおらず、デジタル機器を無批判に受け入れてしまっている様子も伺えた。

音速の測定の探究に入る直前に、空気中の音速が $V = 331.5 + 0.6t$ （ t : 気温 $^{\circ}\text{C}$ ）という近似式で表されることを学んでいたため、これを拠り所として探究のサイクルを何度も繰り返す様子が印象的であった。

ある生徒は、開管の端からパルス波（気泡緩衝材をつぶしたときの音）を送り、その往復する音波をマイクで拾い、往復時間をオシロスコープで測定し、音速を求める実験を行っていたが、教科書に開口端は自由端反射すると書かれているが、オシロスコープの波形では固定端反射していることに気づき、本探究とは別に、自ら追究していた（オシロスコープに表示されるのは音波の圧力変化であり、開口端での反射波は固定端反射と同じく位相が反転する）。提出されたポスターには、この探究の成果も載せられていた。教師主体の講義を基本とした授業だけでは、このような生徒の主体的で深い学びを生み出す探究を実現することは、難しいのではないかと思う。

単元の総括的評価課題として「音速の測定」を行うことを、単元の最初の授業で提示したことで、1～6時の波動に関する授業を、生徒それぞれが目的意識を持ちながら学んでいた。インターネットで見つけた先行研究の方法で、なぜ音速が測定できるのかといったことを、授業での学習内容と結びつけ、自らの実験デザインに生かしている姿が印象的であった。また、先行研究の追試から探究を始めたグループは、彼らなりに全く同じ実験を行ったつもりであるにもかかわらず、全く異なる実験結果となってしまったことに混乱しているグループもあった。教師が手順書を用意し、その指示通りに作業を進める形式の実験では、あまり起こらないことである。実験デザイン、そして、実験の難しさ、自然の複雑さ、内容の深い理解の必要性などを、痛感していたようであった。