

音を可視化して音の速さと振動数・波長を測定する教材の開発

An educational tool for visualizing acoustic phenomena and measuring velocity, frequency and wavelength of sound waves

濱崎貢¹⁾・山口光臣²⁾・陳麗¹⁾・小原益己³⁾・三井好古⁴⁾・小山佳一⁴⁾*

Mitsugi HAMASAKI¹⁾, Mitsuomi YAMAGUCHI²⁾, Li CHEN¹⁾, Masumi OBARA³⁾, Yoshifuru MITSUI⁴⁾,
Keiichi KOYAMA⁴⁾*

¹⁾ 鹿児島大学共通教育センター

¹⁾ Education Center, Kagoshima University

²⁾ かがしま企業家交流協会

²⁾ Kagoshima Enterprise Exchange Society

³⁾ 原田学園鹿児島情報高等学校

³⁾ Kagoshima JOHO High School, Harada Academy

⁴⁾ 鹿児島大学大学院理工学研究科

⁴⁾ Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

* koyama@sci.kagoshima-u.ac.jp

Abstract: We have prepared a homemade Kundt's tube using styrofoam beads so that high school students interest in physics of wave phenomena and measure the speed of sound in the air and a stainless-steel tube. When acoustic resonance occurs in the Kundt's tube, the styrofoam beads were distributed at the nodes of the standing wave. The students measured the wavelength from the interval between adjacent nodes and calculated the speed of sound in the air and the speed of the wave of the stainless-steel tube. Our developed material was effective as an educational tool for the students to understand the basic physics of the wave phenomena.

Keywords: Kundt's tube, Air-column resonance, Standing wave, Frequency, Wavelength

1. はじめに

高等学校の次期学習指導要領（2022年度から適用）では、高等学校教育と大学入学者選抜の一体的な改革を規定している [1]。我々はこのような教育改革の流れを踏まえて、鹿児島大学理学部とかがしま企業家交流協会との共催でサイエンス・パートナーシップ・プログラム（SPP）を実施している。本稿は、平成30年度のSPPに取り入れた高等学校「物理基礎」で扱う、音と振動に関する教材の開発とそれをを用いた実験についてまとめたものである [2]。中学校でも発音体の振動や音を伝える物質の存在について学習しているが、生徒にとって波動は理解しにくい現象である [3]。

音の共鳴実験には水管を用いた装置が一般的であるが、この装置では音の可視化が不可能であり、定在波（定常波）の様子（節と腹）を確認することができない。しかし、音の可視化は定在波の理解に有用であることから、我々はクント管を使用した [4]。クント管による気柱の共鳴実験は大学の基礎実験で採り入れられているが、むしろ高等学校で推奨されるべきである [5,6]。

今回の実験には二つの目的を設定した。ひとつは空気中の音速を求めること、もうひとつは金属棒を伝わる縦波の速さを求めることである。したがって、本実験は波の重ね合わせによる定在波のでき方、節の間隔と波長、音の速さなど、波動に関する基本的な学習項目を含んでいる。

本年度のSPPには34名の生徒（高等学校の1・2年生）が参加し、実験をとおして「主体的な学び」、「対話的な学び」、「深い学び」を展開した。これらは、次期学習指導要領が特に指摘する授業法の改

善（アクティブ・ラーニング）に対応するものである [1]。

2. 実験の原理

定在波ができているときの音の強弱は、媒質の変位と圧力に依存する。音が x 方向に進行するとき、時刻 t における媒質の変位 $y(x, t)$ と圧力 $p(x, t)$ は、次の式 (1) と (2) で表される [7,8]。ここで、 B は空気の体積弾性率、 k は波数、 ω は角振動数である。図 1 はこれらの関係を示したものである。

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$p(x, t) = -B \frac{\partial y}{\partial x} = -BkA \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

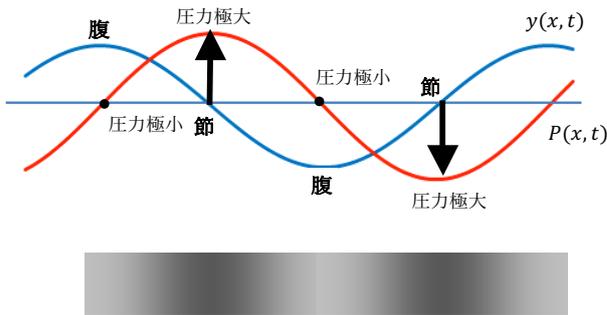


図 1 媒質の変位と圧力

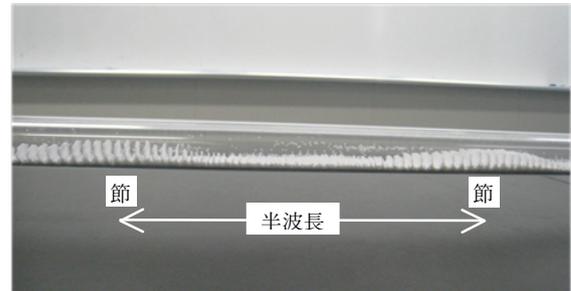


図 2 クント管の気柱の共鳴

音は節の位置で圧力極大になり、腹の位置で圧力極小になる [5,6]。したがって、クント管が共鳴しているとき管内の粉末は圧力極小の腹の位置で激しく振動して、圧力極大の節の位置に集まるから隣り合う節と節の間隔が半波長になる。図 2 はその様子を示したものである。

2. 1. 空気中の音速

図 3 のように、可動栓 C を一定の位置に固定してクント管に発泡スチロールのビーズを均一にまき、スピーカーから音を送り込むとある振動数で定在波が生じビーズは節の位置に集まる。

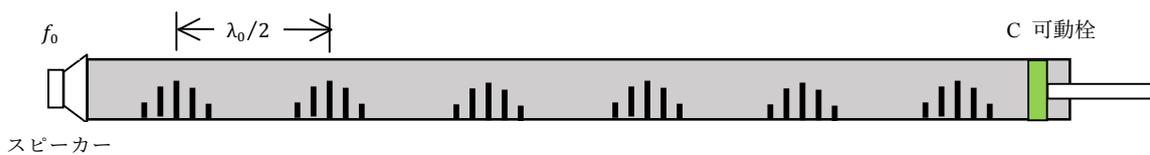


図 3 気柱の定常波（振動数 f_0 音速 v_0 ）

空気中の音速 v_0 は、振動数 f_0 と波長 λ_0 によって式 (3) で与えられる。

$$v_0 = f_0 \lambda_0 \quad (3)$$

振動数 f_0 が既値であれば、ビーズの節の間隔を調べて音速を求めることができる。なお、クント管内の温度が t °C（室温に等しいと考えてよい）のとき、音速の理論値は式 (4) で表される [7]。

$$v_t = 331.56 + 0.61t \text{ m/s} \quad (4)$$

2. 2. 金属棒を伝わる縦波の振動数と速さ

図4のように、クント管の端に可動栓Cを挿入し、他端には円板Bを取り付けた金属棒を差し込んでおく。金属棒は中点Mで固定する。

金属棒のAMの部分に摩擦による音を発生させながら可動栓Cの位置を調節すれば、金属棒の縦波の振動にクント管内の気柱が共鳴して定常波が生じる。

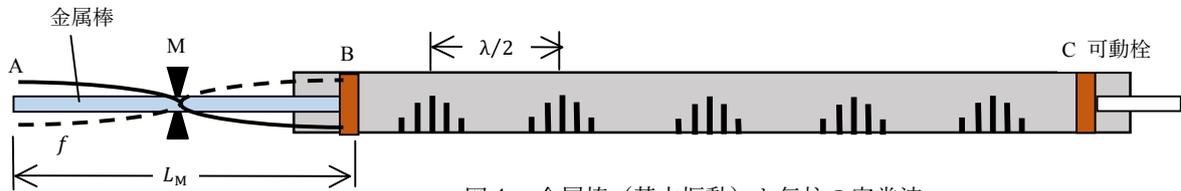


図4 金属棒（基本振動）と気柱の定常波

音速の理論値 v_t は式 (4) によって与えられるから、隣り合う節の長さを測定することにより金属棒の振動数 f は、式 (5) によって求められる。

$$f = \frac{v_t}{\lambda} \quad (5)$$

金属棒に生じる縦波が AB 間に基本振動を生じている場合、金属棒の長さ L_M は半波長である。したがって、波長 λ_M と金属棒を伝わる縦波の速さ V_M は、それぞれ式 (6) と (7) によって求められる。

$$\lambda_M = 2L_M \quad (6)$$

$$V_M = f\lambda_M = 2fL_M \quad (7)$$

3. 実験 I（空気中の音速の測定）

実験に使用する主な器具は、クント管（アクリルパイプ長さ 1 m, 内径 26 mm）、可動栓、発泡スチロールビーズ（粒径 1.0 mm）である。クント管に送り込む音は、低周波発振機、低周波アンプ、スピーカーで発生させる。その他、周波数カウンター、スケールが必要である。



図5 実験 I の節の位置の読み取り

以下の実験 I と実験 II の表 1 から表 6 は、あるグループの測定値と分析結果を示したものである。

3. 1. 実験 I の方法

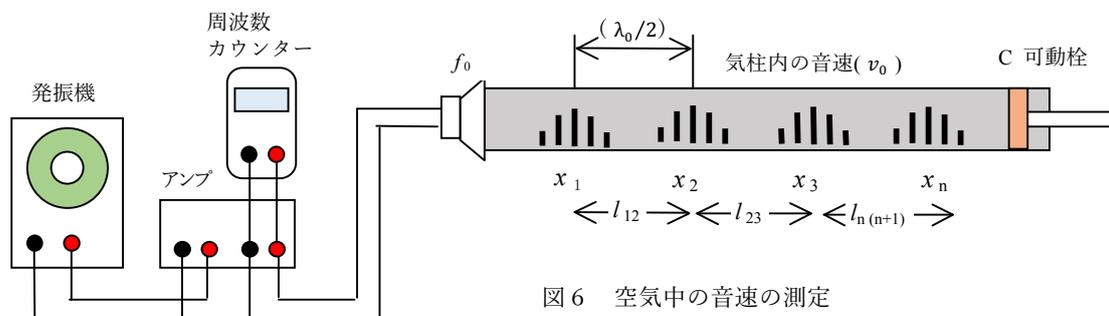


図6 空気中の音速の測定

(1) 図6に従って装置を組み立てる。

※ 可動栓 C はクント管内の適当な位置において、気柱の長さを一定にする。

(2) 発振機のダイヤルを廻すと、ある周波数でクント管内のビーズが等間隔に集まる。

※ このときの音の振動数 f_0 と、節の位置 x_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) を読み取る (図5)。

(3) x_n の位置から、隣り合う節の間隔 $l_{n(n+1)}$ を求める。

(4) 可動栓 C の位置をかえて、手順 (2) と (3) を 2 回繰り返してデータ表に記録する。

表1 実験 I のデータ表 (節の位置と節の間隔)

1 回目 スピーカーの振動数 $f_0 = (638)$ Hz							
節の位置	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
(m)	0.030	0.305	0.570				
節の間隔	**	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}	l_{67}
(m)	**	0.275	0.265				**
2 回目 スピーカーの振動数 $f_0 = (1187)$ Hz							
節の位置	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
(m)	0.085	0.235	0.370	0.530	0.670	0.815	
節の間隔	**	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}	l_{67}
(m)	**	0.150	0.135	0.160	0.140	0.145	**

なお、有効数字は3桁が取れるように計測している。

3. 2. 実験 I の解析

(1) 表1から各回の $l_{n(n+1)}$ の平均値 l_{AVE} を計算し、音の波長 λ_0 を求める。

(2) 各回の振動数 f_0 と波長 λ_0 を用いて、式 (3) から音速 v_0 を求める。

表2 実験 I の解析 (各回の空気中の音速)

1 回目	節の間隔の平均値 l_{AVE}	0.270	m
	音の波長 $\lambda_0 = 2 l_{AVE}$	0.540	m
	空気中の音速 $v_0 = f_0 \lambda_0$	344.520	m/s
2 回目	節の間隔の平均値 l_{AVE}	0.146	m
	音の波長 $\lambda_0 = 2 l_{AVE}$	0.292	m
	空気中の音速 $v_0 = f_0 \lambda_0$	346.604	m/s

(3) 表2の音速 v_0 の平均値 $v_{0,AVE}$ を求める。

(4) 式 (4) から音速の理論値 v_t を計算する。

(5) 音速の理論値 v_t に対する平均値 $v_{0,AVE}$ の相対誤差を求める。

表3 実験 I の結果 (空気中の音速の平均値)

各回の空気中の音速の平均値 $v_{0,AVE}$	346	m/s
クント管内の温度 t	24.5	°C
音速の理論値 v_t	346	m/s
v_t に対する $v_{0,AVE}$ の相対誤差	0.24	%

有効数字3桁で見れば、 $v_{0,AVE}$ と v_t は 346 m/s で良い一致であった。

4. 実験Ⅱ（金属棒の縦波の振動数と速さの測定）

装置は実験Ⅰの他、金属棒（ステンレスパイプ 長さ約 1 m, 外径 9.5 mm）、セーム皮（100 mm×100 mm）、松ヤニの粉末が必要である。

4. 1. 実験Ⅱの方法

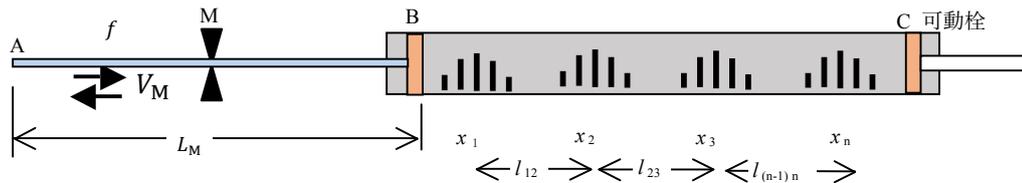


図7 金属棒の振動数と音速の測定

- (1) 図7に従って装置を組み立てる。
※ 金属棒の長さ L_M を正確に測り、中点 M を押さえ金具で固定する。
- (2) AM 部分をセーム皮で M 付近から A 端に向かって、引くように摩擦して音を発生させる。
※ セーム皮にわずかに松ヤニの粉末をつけると、音が発生しやすい。
- (3) (2)を行いながら可動栓 C を静かに移動させると、ビーズが x_n の位置に等間隔に集まる。
- (4) x_n の位置を読み、間隔 $l_{n(n+1)}$ を求める(図8)。
- (5) 可動栓 C の位置をかえて、手順(2)(3)(4)を2回繰り返しデータ表に記録する。



図8 実験Ⅱの節の間隔を調べる

表4 実験Ⅱのデータ表（節の位置と節の間隔）

1回目 金属棒の長さ $L_M = (0.95) m$									
節の位置	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
(m)	0.06	0.13	0.18	0.24	0.31	0.39	0.46		
節の間隔	**	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}	l_{67}	l_{78}	**
(m)	**	0.07	0.05	0.06	0.07	0.08	0.07		**
2回目 金属棒の長さ（1回目に同じ）									
節の位置	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
(m)	0.06	0.12	0.18	0.25	0.31	0.37	0.43	0.49	
節の間隔	**	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}	l_{67}	l_{78}	**
(m)	**	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	**

ここで、 x_3 と x_1 との間隔 l_{13} のように、計測する節の間隔を上手くとると有効数字2桁で計算できる。

4. 2. 実験Ⅱの解析

- (1) データ表から各回の $l_{n(n+1)}$ の平均値 l_{AVE} を計算し、気柱の波長 λ を求める。
- (2) 表3に示した音速の理論値 v_t と λ によって、式(5)から金属棒の音の振動数 f を求める。

表5 実験Ⅱの解析（各回の金属棒の振動数）

1回目	節の間隔の平均値 l_{AVE}	0.0657	m
	気柱の波長 $\lambda = 2 l_{AVE}$	0.1314	m
	金属棒の縦波の振動数 $f = v_t / \lambda$	2636	Hz
2回目	節の間隔の平均値 l_{AVE}	0.062	m
	気柱の波長 $\lambda = 2 l_{AVE}$	0.124	m
	金属棒の縦波の振動数 $f = v_t / \lambda$	2794	Hz

- (3) 表5の振動数 f の平均値 f_{AVE} を求める。
 (4) 式(6)と(7)から金属棒を伝わる縦波の速さ V_M を求める。

表6 実験Ⅱの結果（金属棒の伝わる音の速さ）

金属棒の縦波の振動数の平均値 f_{AVE}	2700	Hz
金属棒を伝わる縦波の速さ $V_M = 2 f_{AVE}$	5100	m/s

結果を有効数字2桁でまとめると表6のようになった。

5. 考察

実験Ⅰと実験Ⅱについて考察する。

5. 1. 実験Ⅰの考察（空気中の音速）

低周波アンプは自作したもので、 8.0Ω スピーカーに対して約1000mWの出力である。この低周波アンプとスピーカーの組み合わせでは、800Hz以上の周波数でビーズの集まりが悪くなった。その原因としては空気の体積弾性率 B が小さいこと、気柱内の空気を構成する分子の変位の復元力の定数 k （バネ定数に対応）が気柱の長さに反比例し、断面積に比例することによると考えられる。このため、長さ1mのクント管の場合、内径はスピーカーの直径（50mm）程度が良い。また、低周波アンプの出力は、3000mWから5000mW程度が必要である。今後、装置の改善を重ねていくことにする。

8グループの音速の測定値の相対誤差は、2～7%程度であった。データを提供したグループの相対誤差（表3）は極めて小さい。

5. 2. 実験Ⅱの考察（金属棒の縦波の振動数と速さ）

実験に使用した金属棒（ステンレスパイプ）を伝わる縦波の速さの各グループの結果は、4900m/sから5300m/sであり測定値に幅があった。この原因として、クント管内の節の間隔と金属棒の長さの測定誤差が考えられる。しかし、最も大きな原因は音速に理論値 v_t でなく、実験で得た空気中の音速の平均値 $v_{0,AVE}$ を採用していることによる。解析時に v_t を用いるように指導する必要があった。

ステンレスはクロムやニッケル等を含む合金鋼であり、金属組織によっていくつかの種類がある。したがって、それを伝わる音速も幅があるため、測定結果の相対誤差は求めないことにした。

6. まとめ

講座の最終日には各グループによる結果の発表会を行った（図9、図10）。生徒たちは結果の分析を行った後、プレゼンテーション資料を作成した。発表では生徒の大多数が、次のような感想を述べた。

- ・他の学校の生徒と協力して実験ができた。楽しい体験になった。
- ・実験は難しかったが、先生やTAに教えてもらって理解できた。
- ・ビーズが等間隔に集まるのに驚いた。振動数によって集まる位置が変化することに感動した。
- ・なぜビーズに線状の突起が沢山できるのか不思議に思った。
- ・空気と金属棒で音の伝わり方が違うのはなぜだろうか。勉強してみたい。

理解が不十分な生徒に対しては、担当教員とTAの学生で支援をした。これらの生徒の中には、次のような感想を述べた。

- ・内容が難しかった。(1年生で物理を勉強していないから・・・)
- ・実験にはコツが必要で、金属棒に音を発生させることが難しかった。
- ・節の部分にビーズが集まる理由が分かりにくかった。

本実験が果たした教育的成果には、次のようなものが挙げられる[1]。

(1) 実験への興味・関心が得られた。

低周波発振機の周波数を変えてクント管の可動栓を移動させるなど、条件を変えて実験していた。金属棒に効率よく音を発生させる方法について、積極的な意見交換が行われた。

(2) 可視化によって音(波)の性質が理解できた。

共鳴は進行波と反射波の重ね合わせであることが理解できた。その結果、定在波に腹と節ができることを理解した。

(3) 音に関する基本的な量(振動数、波長、速さ)の関係が理解できた。

振動数と波長を用いて音の速さを求めることができた。音を伝える物質が同じであれば、振動数と波長は反比例の関係にあることを理解した。

(4) 見通しをもって実験を行い、事象を理解しようとする意欲と態度が見られた。

ビーズの集まる位置は、振動数と可動栓の位置に依存することに気付いた。音を伝える物質(空気、金属棒)によって、音の速さが異なることに興味を示した。



図9 実験結果のデータ分析

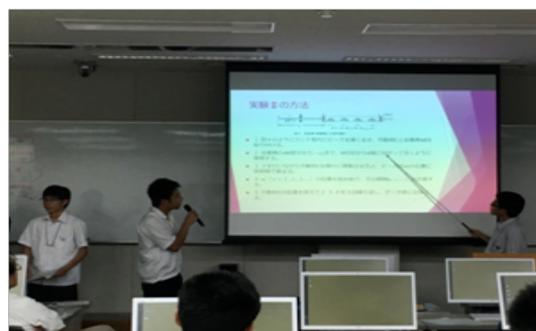


図10 実験結果のプレゼンテーション

謝辞

本SPPは、鹿児島大学理学部とかがしま企業家交流協会との共催で実施したものである。当協会には実験に関わる全ての経費を負担していただいた。さらに、講座の広報や実施要項の作成など、当協会の事務局に全面的に支援していただいた。講座の終了に当たり、厚くお礼を申し述べます。なお、参加した生徒と高等学校の引率の先生方、TAとして実験の補助指導をしていただいた鹿児島大学大学院理工学研究科の学生にも謝意を表します。

参考文献

- [1] 文部科学省「高等学校学習指導要領解説（理科編）」（平成30年7月）20-22
- [2] 啓林館「物理基礎」高等学校教科書（平成23年）172-176
- [3] 数研出版「物理」高等学校教科書（平成28年）130-140
- [4] 上野佳奈子，「クントの実験による定在波の可視化」日本音響学会誌 63 卷 2 号(2007) 116
- [5] 景山誠三郎，沢田正三，「基礎物理学実験（朝倉書店）」（昭和43年）71-75
- [6] 佐藤瑞穂，「物理学2（培風館）」（昭和43年）82-83
- [7] 共通教育物理学実験担当者，「物理学実験」鹿児島大学物理科学科（2013）38-40.
- [8] 狩野覚，「音と光」講義資料 音波 08-11