

# 物理研究班通信

第 282 号

令和 7 年度 2 月例会 (R8.2.21)

村尾, 沢田, 小谷, 尾野田, 岡田友, 白幡,  
佐伯, 野田, 石井, 本田

## サーモインクペーストを作ってみた <白幡 泰浩>

サーモインクとは、常温で青色を示し、加熱するとピンク色に変色するインクである。学校現場では、小学校 4 年生の理科「物のあたたまり方」の学習において使用されることがある。近年は、理化学機器メーカーからペースト状のサーモインク（以下、サーモインクペースト）が販売されている。しかし、サーモインクペーストは少量であってもやや高価であることから、発表者はサーモインクペーストの自作を試みた。

材料として、液体のサーモインクと PVA 系の水のりを使用した。サーモインクを水のりで 25 倍（インク：水のり = 1：25）に希釈・混合することでサーモインクペーストを作製した。

研究班では、銅板上に塗布し、ほぼ 1 日乾燥させたサーモインクペーストを観察した（図 1）。また、事前に用意した動画を用いて、サーモインクペーストを塗布した銅板を加熱し、温度上昇に伴う変色の様子を確認した。加熱を停止すると、元の色に近い状態へと戻ることも確認した（図 2）。以上より、自作したサーモインクペーストにおいても、最低限の温度応答性や変色機能は確認できた。一方で、発色の濃淡や粘度の低さなど、市販のサーモインクペーストと比較して改善すべき点も認められた。これらの課題については、今後検討を進めたい。

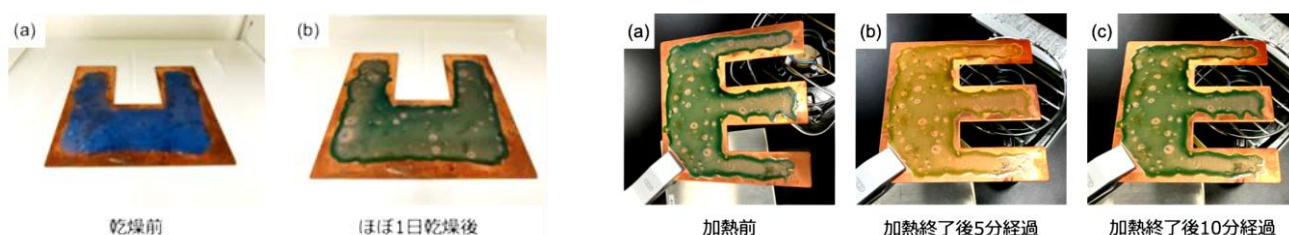


図 1. 銅板上に塗布したサーモインクペースト. 図 2. サーモインクペーストの変色の様子.

## 静止標的への弾性衝突で生じる散乱角と反跳角 <沢田 功>

質量  $m$ 、速度  $\vec{v}_0$  の入射粒子を質量  $M$  の静止標的に弾性散乱させると、標的の中心が入射方向上にあるか否かに応じて、入射粒子は速度  $\vec{v}$  と散乱角  $\theta$  で散乱され、標的は速度  $\vec{V}$  と反跳角  $\varphi$  で弾き飛ばされる。質量比  $a = M/m$  を導入して、散乱の速さ比  $x = v/v_0$  は  $|(1-a)/(1+a)| \leq x \leq 1$ 、反跳の速さ比は  $y = V/v_0$  は  $0 \leq y \leq 2/(1+a)$  となる。  $0 < a \leq 1$  では前方散乱を示す  $0 \leq \theta \leq \theta_{max}$  に最大値  $\theta_{max} = \cos^{-1} \sqrt{1-a^2} = \sin^{-1} a$  が存在し、  $1 < a$  では後方散乱も加わって  $0 \leq \theta \leq \pi$  となる。一方、標的は常に前へ弾かれるため  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$  となる。散乱角  $\theta$  と反跳角  $\varphi$  は次式で書けることが分かった。

$$\theta(x; a) = \cos^{-1} \left( \frac{1-a}{2} \frac{1}{x} + \frac{1+a}{2} x \right), \quad \varphi(y; a) = \cos^{-1} \left( \frac{1+a}{2} y \right)$$

その他、佐伯太朗先生が、文部科学省資料「教育課程企画特別部会の論点整理（令和 7 年 9 月 25 日）」を元に、次期学習指導要領について話題にされた。

## 1. はじめに

気柱共鳴の実験でよく行われているのは、水入りガラス管の管口付近（圧力波の節）で音叉を鳴らし、水面を上下して共鳴点を探し音波の波長と振動数を求めるものである。ここでは短い紙筒を用いて開管と閉管で気柱共鳴の実験を行った。ともに紙筒の筒端内部にイヤホン A を入れ音源とする。音速と筒長から共鳴振動数を求めその振動数でイヤホンを鳴らす。共鳴音が聞こえたら紙筒内に別のイヤホン B（マイクロホンとして用いる）を入れ、拾った音がどの位置で大きくなるかを調べて共鳴を確認する。また、紙筒内にゴム管の一端を挿入していき、ゴム管の他端を耳に入れて直接耳でも聞いて共鳴を確認する。

## 2. イヤホンの振動数特性

### 2-1. イヤホンマイクの振動数特性

イヤホン B をマイクロホンとして用いた場合どの程度音を拾うのかを調べてみた。

イヤホン B をスピーカーの前 5 cm に置き、イヤホンの出力電圧を 100 倍増幅して PC のマイク入力に入れて波形表示<sup>1)</sup> (自作ソフト) で表示波形の振幅を読み取った。その結果が図 1 である。1000 Hz から 2600 Hz までほぼ一定の感度であるが低音では感度大になっている。スピーカーの音は全振動数でほぼ同じ大きさに聞こえていた。スピーカーの音源は音作成<sup>1)</sup> (自作ソフト) で作成した音を増幅して用いた。

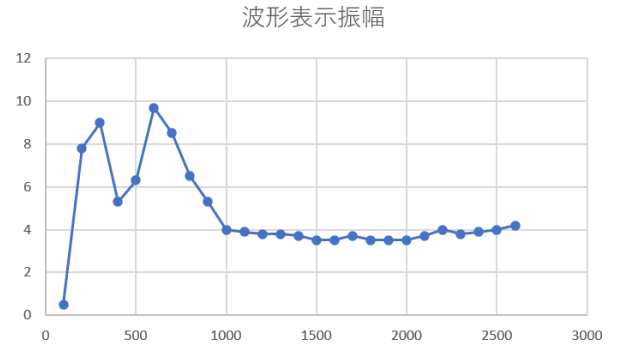


図 1 イヤホン B の振動数特性 (Hz)

### 2-2. イヤホンスピーカーの振動数特性

イヤホン A の出力を上げてスピーカーとして用いた場合、振動数により音の出方がどの程度変わるのか調べてみた。

音作成<sup>1)</sup> で作成した音を増幅してイヤホン A から出す。その 2 cm 前にコンデンサーマイクを置いて拾った音を PC のマイク入力に入れて波形表示<sup>1)</sup> で表示された波形の振幅を読み取った。その結果が図 2 である。コンデンサーマイクの感度は振動数によらないものとしたが定かではない。

200 Hz から 1800 Hz くらいまではほぼ同じ大きさの音であるがそれより高音では直線的に音が大きくなっている。

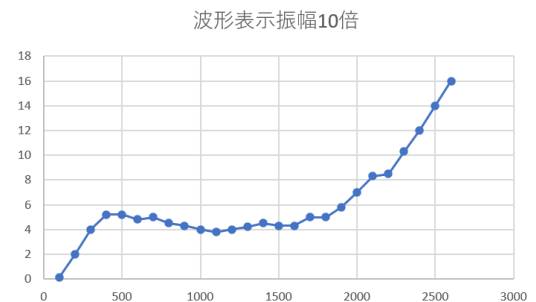


図 2 イヤホン A の振動数特性 (Hz)

## 3. 開管の気柱の共鳴の実験

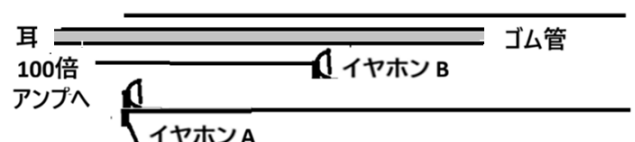
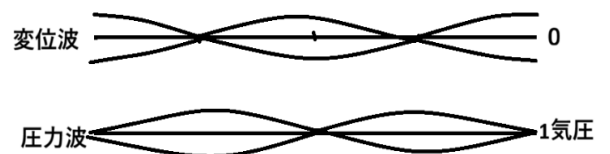
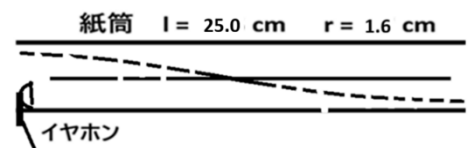
右図のような両端が開いた紙筒（長さ 25.0 cm, 半径 1.6 cm）の左端内側にイヤホン A を置き、アンプにつなぐ。アンプ入力は音作成<sup>1)</sup> で作成した音を用いた。

$l + 0.6r + 0.6r = 25.2 \text{ cm}$  なのでこの 2 倍が共鳴した時の波長で  $\lambda = 50.4 \text{ cm}$  になる。管内の温度は  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  だったので音速は  $v = 331.5 + 0.6t = 347.5 \text{ m/s}$  と考えられる。従って共鳴した時の基本振動数は  $f_1 = v/\lambda = 689 \text{ Hz}$  となる。2 倍振動は  $f_2 = 2f_1 = 1378 \text{ Hz}$ , 3 倍振動は  $f_3 = 3f_1 = 2067 \text{ Hz}$  である。図 1, 2 のイヤホンの振動数特性より 2 倍振動と 3 倍振動を取り上げる。

右図は 2 倍振動の場合の筒内の空気の変位と圧力の大きさを図示したものである。

これを確認するために右下図のように、一つ目はゴム管の一端を耳に入れ、他端をを筒の入口から奥へ挿入してい

く。音の大きさが大きくなってから小さくなり再び大きくなり筒の端に近づくとき小さくなる。このことから人の耳は圧力波を感じていることが分かる。二つ目はイヤホン B を筒内に挿入していき、イヤホンマイクが拾う音の大きさを調べる方法である。イヤホンの出力は 100 倍増幅して PC のマイク入力に入れ波形表示<sup>1)</sup> で波形の振幅を読み取った。結果はゴム管と同じく、波形が小、大、小、大、小と変化した。すなわちイヤホンも圧力波を感じていた。



3倍振動でも2倍振動と同様に共鳴点を確認できた。

#### 4. 閉管の気柱の共鳴の実験

筒の右端を厚紙で閉じ、左端筒内部にイヤホン A を置き音を出す。

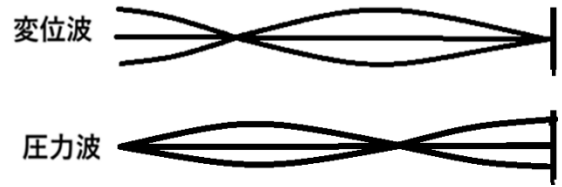
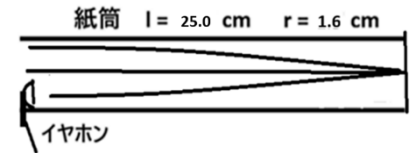
$l+0.6r = 26.0 \text{ cm}$  なのでこの4倍が共鳴した時の波長  $\lambda = 1.04 \text{ m}$  になる (右図)。温度  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  で音速  $v = 347.5 \text{ m/s}$  なので基本振動数は

$f_1 = v/\lambda = 334 \text{ Hz}$  となる。同様にして3倍振動は  $f_3 = 1002 \text{ Hz}$ 、5倍振動は  $f_5 = 1670 \text{ Hz}$ 、7倍振動は  $f_7 = 2338 \text{ Hz}$  となる。

図1, 2から実験に適している振動数は3倍振動と5倍振動である。右図は3倍振動時の変位波と圧力波の大きさを図示したものである。

開管の場合と同様にゴム管を筒内に入れていくと音が小から大、小、大と変化していく。イヤホン B を筒に入れた時も波形の大きさの変化が同様になる。

5倍振動でも同様に筒内の圧力変化の様子を確認できる。



#### 5. 終わりに

共鳴音の幅は広く、共鳴点がどこか分かりにくい。また、振動数を変えていくと紙筒から出る音はいろいろな振動数で大きくなっている。何故だろうか？ 耳で聞いただけでは共鳴振動数を特定しにくい。

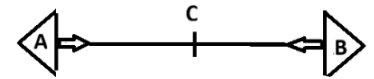
自作シミュレーションの<気柱の共鳴<sup>1)</sup>>で振動数を変えて共鳴音を聞いてみると、共鳴する振動数からずれてもかなり大きな音が聞こえていた。

文献1) PC計測とシミュレーション (<http://www.pikara.ne.jp/murao>) 内の

- ① 波形表示 ② 音作成 ④ 気柱の共鳴 をダウンロードして使用できる。

○ 例会で話題になったことの説明を追加します。変位波と圧力波の間に混乱があったようです。

1) 電氣的に同位相で、振幅  $A$  で振動しているスピーカー A, B を向かい合わせた時、中点 C での変位と音の大きさはどうなるか？

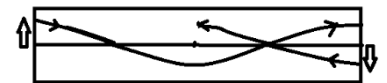


- ・圧力波で考えると  $A + A = 2A$  (人の耳は圧力変化を感じるので音大)
- ・変位波で考えると  $A + (-A) = 0$

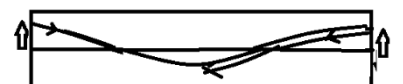
A の振動板が右へ変位しているとき、B の振動板は左へ変位しており、中央 C で逆向きの変位が重なる。空気が右へ変位すると正、左へ変位すると負としているので  $(-A)$  の波が左へ進んでいる。連続波が重なっても変位 0 なので定常波の節になる。粗密変化 (圧力変化) 大で、中央で音は大きく聞こえる。

2) 開放端の2倍振動 (筒の長さが1波長  $\lambda$ ) で共鳴しているとき、筒の中点での変位と音の大きさは？

・圧力波で考えると、左端で振幅  $A$  の山で出た波が右端に到達するのは1周期  $T$  後で、開放端なので、反射して谷が帰ってくる。この時左端では1周期経っているので再び山になっている。その後、左右端から出た山と谷の波は重なって中央では振幅 0 となる。中央で音が小さくなっているのはゴム管を入れて耳で聞くと分かる。



・変位波で考えると、左端から変位  $A$  で出た波は、右端では開放端なので自由端反射をして変位  $A$  の山が帰ってくる。この時左端では1周期経っているので再び山になっている。その後、左右端から出た波は重なって中央では振幅  $2A$  になる。その後、左右端で数十回反射をして重なるので、中央で振幅は  $mA$  ( $m$  は2以上の数値) の腹となる。粗密変化は小 (圧力波の節) で音の大きさは小となる。



・開放端の場合の基本振動では筒の長さが  $\lambda/2$  になっている。左端の山が右端に達するのは  $T/2$  である。この時、左端は谷になっている。圧力波で考えると筒の右端で山 (密で圧力大) は谷 (疎で圧力小) になって反射する。両端からの谷は重なって中央では大きな谷 (音大) となる。⇒ 人の耳は圧力波を感じるので、圧力波の方が分かりやすいのではなかろうか。圧力波の干渉は水面波と同様に扱える。