

# 糸電話を伝わる音の変化について

鍛治山 凌\*, 出口 憲

About Change of Sound Through Cup-and-String Telephone

Ryo KAJIYAMA, Ken DEGUCHI

2016年11月14日受理

## 抄 録

理科における「音」に関する単元は、中学校第1分野の「音の性質」、高等学校物理基礎の「音と振動」、同物理「音」がある。現在の小学校理科に音の単元はないが、音は子供にとって身近な現象であり、その意味でも以前のように小学校理科で扱われるべきであると考え。本研究では、かつての小学校理科でも扱われており、子供にとっても身近な「糸電話」を取り上げ、糸電話を通して聞くと音が変化して聞こえる点に着目し、音がどのような原因で変化するかを実験により詳細に調べ、理論的な考察を行った結果、以下のことが明らかとなった。(1)糸の長さや材質は張力を大きくすれば音にほとんど影響しない。(2)コップを長くしていくと膜の共振周波数から管の共振周波数へと移行する。(3)通常のコップであればコップの膜の共振が音の変化の主原因である。

キーワード：糸電話、教材、音の変化、膜、共振

## 1 はじめに

糸電話は誰でも遊んだことのある子供にとって身近なおもちゃである。以前の小学校理科では音の単元で糸電話を取り上げていたが、現在の小学校理科では音の単元はない。中学校の理科第1分野の「音の性質」では、音は物体の振動で生じ空気中などを伝わること、音の高さや大きさが振動と関係することを学習する。一方、高等学校理科では波としての音の理解が重視されており、物理基礎「音と振動」では、気柱の共鳴、弦の振動と音波の性質、及び物理「音」では、干渉と回折、ドップラー効果など詳細な内容が含まれている。音という現象は我々に身近なものであり、中でも糸電話は音が振動であることを理解させるのに有効な教材である。中学生や高校生であっ

---

\*現在、新潟県公立中学校教諭

でも、糸電話を科学的な視点で見つめ直すことには大きな意義があると考えられる。

そこで、糸電話を伝わる音について詳細な研究を行い、音がどのように伝わるか、糸電話を通して聞く音に変化するのとはなぜかといった問題を解明することを目的とする。糸電話を伝わる音については様々な先行研究 [1-3] があるが、音の変化について取り扱ったものは少ないと思われる。そこで、糸電話を通して聞く音がどのようにして変化するかを明らかにすることを本研究の中心に置いた。

## 2 糸電話の構造と音の伝わり方

まず、糸電話の構造と音の伝わる原理について述べておく。糸電話は紙コップなどの容器を糸で結んだ構造をしている。音は空気の圧力変化が伝わっていく現象であるが、糸電話は空気の振動を紙コップなどの容器により糸へ伝え、糸を伝わった振動が反対側の容器を振動させ、再び音に変えるものである。糸は材質にもよるが、一般的に張力をかけておく必要があり、糸がたるんだ状態や他の物体に接触していると音は伝わらない。

このように糸が音の振動を伝えるのは明らかであるが、どのような振動が糸を伝わるのかについては注意が必要である。張力をかけなければならないことから、高校物理で取り扱う弦の振動(横波)のように考えられるが、先行研究によれば糸を伝わる音速は  $900\sim 1000\text{m/s}$  と非常に大きく、また糸を拡大して観察した結果からも縦波であることが明らかとなっている [2, 3]。一方、糸を金属線(針金)に変えたとするんでも音が伝わり、その際エコーがかかって聞こえることも有名である。こちらは縦波ではなく、横波が伝わっていると考えられるほうが妥当と考えられる。

我々の実験結果では、金属線の張力が弱いときはエコーがかかって聞こえるが、張力を強くしていくとエコーはかからなくなり、通常糸電話と同様に音が伝わるということが判明した。よって、糸電話の糸を伝わる音は張力さえ強ければ材質によらず縦波であると結論できる。縦波の伝わる速さ  $v$  は、糸の密度  $\rho$  とヤング率  $E$  によって、 $v = \sqrt{E/\rho}$  で決まり、張力によって変化することはない。

## 3 音の周波数と伝わり方に関する実験

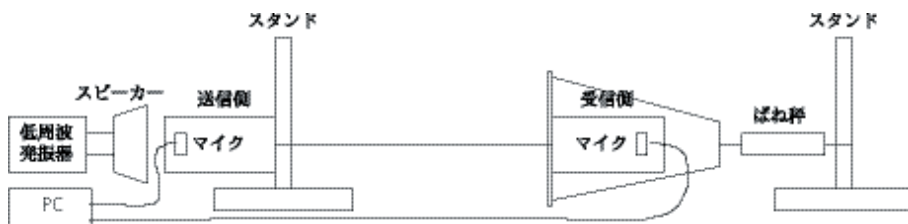


図1 実験装置の概略図。糸の張力は容器に固定された器具を用いてばね秤でかける。容器内にマイクを設置し、パソコンに取り込んだものをFFT解析する。

次の仮説を検証する実験を行った。

糸電話を通して聞く音が変わるのは音色が変化するからである。これは音の周波数によって糸電話の伝わり方に差があるためである。周波数によって音の伝わり方に差が生じるのは何らかの共振によって音が強められる周波数が存在していることによる。

図1のような装置を作成し、ばね秤を用いて糸に一定の張力をかけた状態で、入力側の低周波発振器に繋がれたスピーカーの音量をマイクで拾ったときに一定になるように調整し、出力側の音の変化（音圧レベル）を調べた。マイクで受信した音をパソコンで取り込み、FFT（高速フーリエ変換）解析のできるハンディ・オシロスコープ [4] を用いて音圧レベルの変化を調べた。

周波数は100～1,000Hzの正弦波を100Hzごとに低周波発振器で発信させ入力側と出力側の音圧レベルを比較した。音の変化の原因が何かを調べるため、糸の張力、糸の固定方法、糸の長さ、糸の材質、容器の直径、容器の長さ、容器の底膜の材質を変化させた。

**糸の材質** 木綿糸（線密度 $5.38 \times 10^{-4} \text{ g/cm}$ ）、たこ糸（線密度 $5.08 \times 10^{-3} \text{ g/cm}$ ）、針金（細）（直径0.28mm、線密度 $5.00 \times 10^{-3} \text{ g/cm}$ ）、針金（太）（直径0.70mm、線密度 $3.05 \times 10^{-2} \text{ g/cm}$ ）

**容器の大きさ** 205mLの紙コップ、塩化ビニルパイプ（内径:4.4cm、5.6cm、7.6cm）

**容器の底膜の材質** トーヨー教育折り紙（面密度 $6.00 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ）、ポケットリフィル（面密度 $4.16 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ）

### 3.1 糸の張力の影響

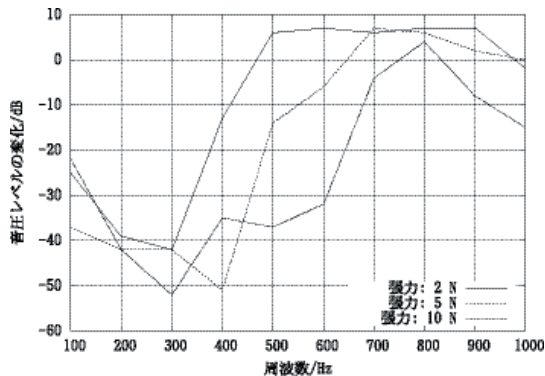


図2 たこ糸を用いて張力のみを変化させたときの音圧レベル。

糸としてたこ糸を用いて、たこ糸の張力を 2 N、5 N、10N と変化させた結果を図に示す。なお、たこ糸の長さは 5 m、糸の固定方法は長さ 2 cm の爪楊枝、容器は紙コップとして統一した。図2からたこ糸の張力を大きくしていくと音のピークが高い周波数へ移行していくことがわかる。よって、糸の張力は音の変化に影響を与えていることがわかる。

### 3.2 糸の固定方法の影響

紙コップとたこ糸との固定方法により音に影響を受ける可能性も考えられるため、直径 4 mm のビーズで糸を紙コップに固定する方法、爪楊枝を 2 cm の長さに切って糸を紙コップに固定する方法を比較した。なお、たこ糸の長さは 5 m、張力は 5 N、容器は紙コップとして統一した。図3を見ると変化がないため、紙コップと糸との固定方法による違いはないことがわかる。

### 3.3 糸の長さの影響

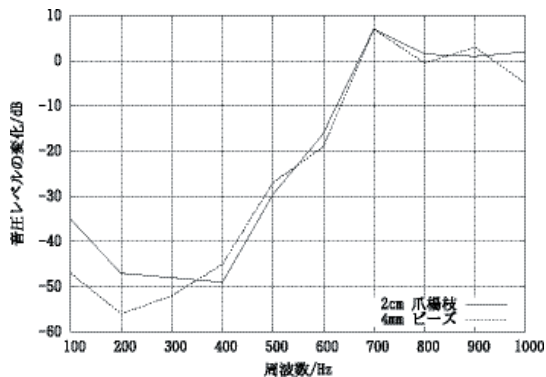


図3 糸の固定方法のみを変化させたときの音圧レベル。

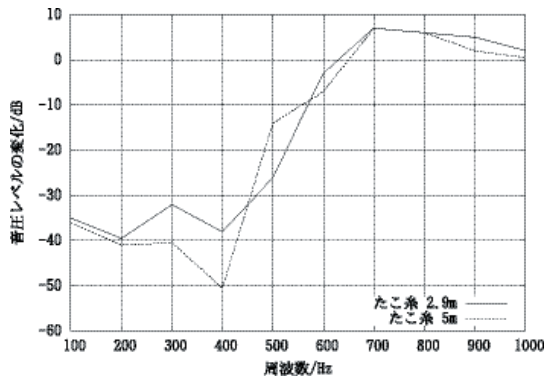


図4 糸の長さのみを変化させたときの音圧レベル。

糸の長さによって共振が生じ、伝わりやすい音の周波数が変化する可能性が考えられる。実験では、2.9m、5mのたこ糸を比較した。ここで、共振の影響を見たいので簡単な整数比にならない長さを比較した。なお、張力は5N、糸の固定方法は爪楊枝とした。先行研究 [2, 3] によると糸を伝わる音速は900~1,000m/s程度である。周波数100Hzだと波長は9~10m、周波数1,000Hzだと波長は0.9~1mであるため、今回の糸の長さで共振が起きる可能性は十分考えられる。糸の長さの違いで共振が起きるのであれば音圧レベルのピーク周波数が変化するはずだが、図4からは糸の長さの影響は見られない。今回の実験結果からは糸の長さによる音の変化はないと考えられる。ただし、もっと長い糸での実験は行っていないので明らかとはいえない。

### 3.4 糸の材質の影響

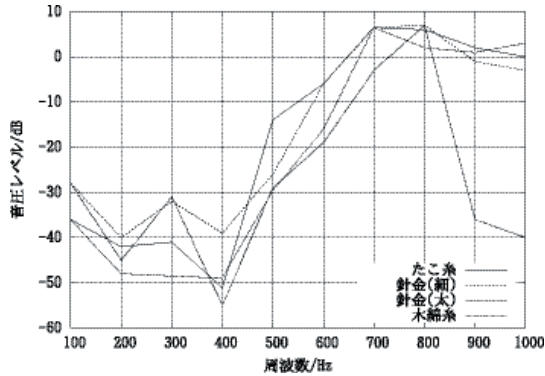


図5 糸の材質のみを変化させたときの音圧レベル。

糸の材質の影響を調べたものを図5に示す。なお、糸の長さは5m、張力は5N、糸との固定方法は爪楊枝とした。針金の太さによる影響はあるように見えるが、それ以外は大きな変化はない。よって、糸の材質が音の変化に影響する可能性は小さいと考えられる。

### 3.5 容器の直径の影響

容器の直径の影響を調べるため、長さ7.5cmに切り揃えた直径の異なる塩ビパイプで音の変化を比較した。糸は長さ5mの木綿糸を用い、張力は5N、2cmの爪楊枝で固定した。底膜は折り紙とリフィルを塩ビパイプに貼って使用した。図6を見ると、折り紙とリフィルのいずれも塩ビパイプの直径が小さくなると高音が伝わりやすいという結果となった。よって、容器の直径が音の変化に関係していることがわかる。

### 3.6 容器の底膜の材質の影響

容器の直径を固定し、底膜の材質を変えた場合を図7に示す。図7を見ると、面密度が大きい（折り紙）とピークとなる周波数が高く、面密度が小さい（リフィル）とピークとなる周波数が低くなることがわかる。

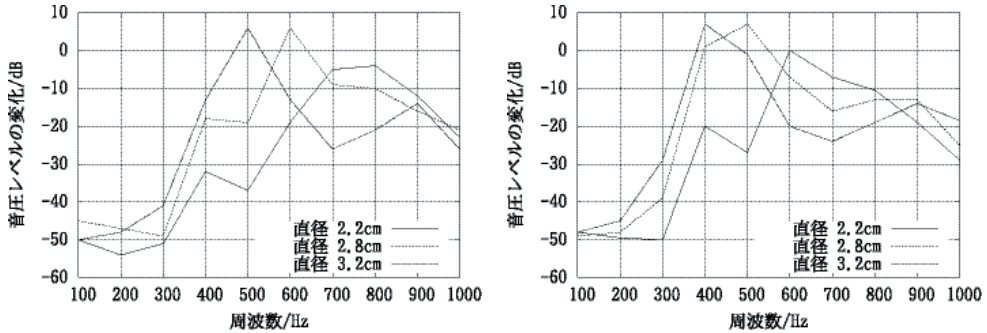


図6 容器の直径を変化させたときの音圧レベル。左図は折り紙、右図はリフィル。いずれも直径が小さくなると音圧レベルのピークは周波数の高い方へ移動している。

### 3.7 容器の長さの影響

容器の長さの影響を調べるため、塩ビパイプの長さを2.5cm～25cmまで変えて実験を行った結果を図8に示す。なお、長さ以外の条件は統一して行った。図8を見ると、長さによって音圧レベルのピークが移動することがわかる。また、長さが16.5cm、25.0cmではピークが2つあることがわかる。これは気柱の共鳴が関係している可能性がある。

### 3.8 実験結果のまとめ

以上の実験結果をまとめると以下のように結論付けられる。

1. 糸の張力は音の周波数ごとの伝わり方を変化させる。
2. 糸の長さ、材質、固定方法は音の周波数ごとの伝わり方に影響しない。
3. 容器の直径、長さは音の周波数ごとの伝わり方を変化させる。
4. 底膜の面密度は音の周波数ごとの伝わり方を変化させる。しかし、今回の実験結果では面密度が大きいとピーク周波数が高く、面密度が小さいとピーク周波数が低いという膜の振動としてはおかしい結果となっている。この原因についてはリフィルが伸びやすい材質であることが関係している可能性が考えられる。

実験結果から考えると、いくつかの可能性が考えられる。

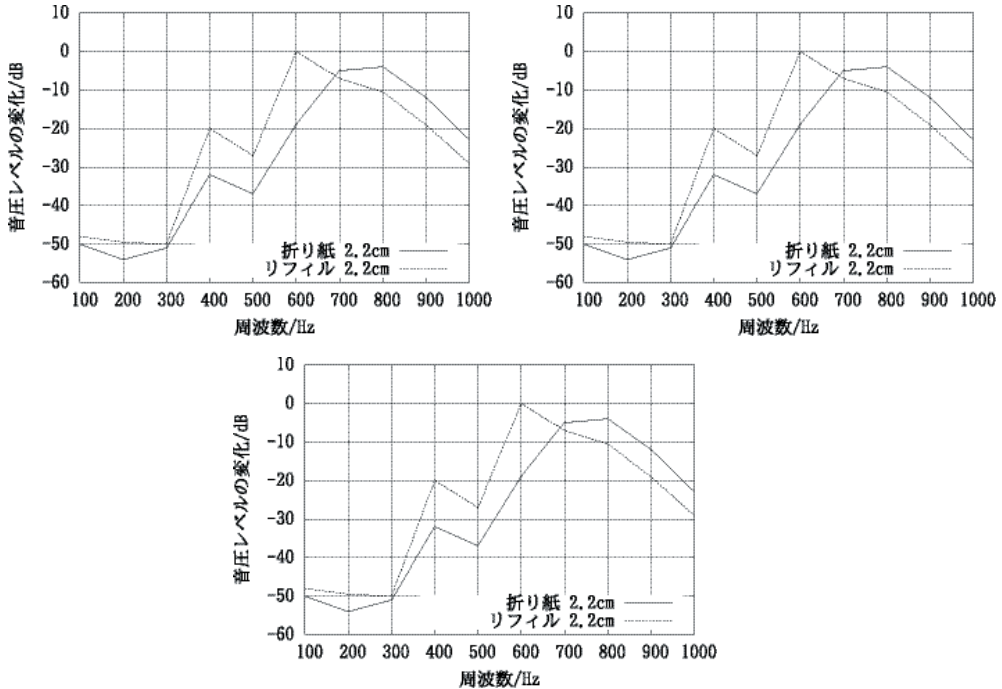


図7 容器の底膜の材質を変化させたときの音圧レベル。膜の面密度が小さいリフィルはピークとなる周波数が低く、面密度が大きい折り紙は周波数が高い。

**容器の気柱の共振** 容器の長さでピークとなる周波数に変化するので気柱の共振が考えられる。特に容器が長い場合はピークが2つ出現しているので、基本振動と3倍振動が関係している可能性が高い。

**容器のヘルムホルツ共振** ヘルムホルツ共振の共振周波数は容器の体積と開口面積で決まる。このため、容器の直径や長さを変えれば音の周波数によって伝わりやすさに違いが生じる。

**底膜の共振** 底膜の共振周波数の影響を受けている。糸の張力は、糸を伝わる縦波の音速を変化させないので底膜の張力を変化させていると考えられる。

この中で、ヘルムホルツ共振は糸の張力によって共振周波数に変化することを説明できない。よって、底膜の振動あるいは気柱の共振が音の変化に影響しているものと推測できる。

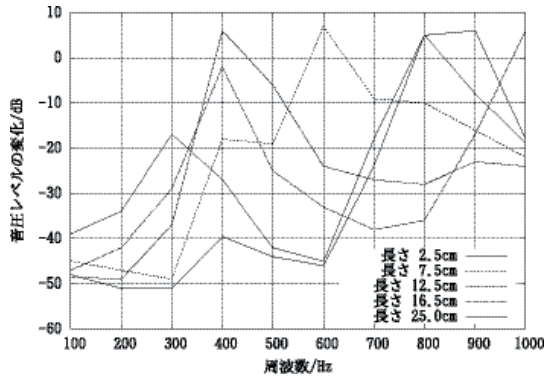


図8 容器の長さを変化させたときの音圧レベル。16.5cmと25.0cmではピークが2つある。

### 3.9 容器の底膜の共振周波数についての考察

円形膜の共振周波数は、波動方程式を円筒座標  $(\rho, \phi, z)$  で表現し、膜の周囲が固定されている境界条件を設定すれば求められる。膜を伝わる音速を  $c$ 、膜の変位を  $f(\rho, \phi, t)$  とすると、

$$\left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) f(\rho, \phi, t) = 0 \quad (1)$$

また、境界条件は膜の半径を  $a$  として、

$$f(a, \phi, t) = 0 \quad (2)$$

(1)式を変数分離法によって求める。 $f(\rho, \phi, t) = R(\rho)\Phi(\phi)e^{-i\omega t}$  と置いて(1)式に代入すると、

$$\rho^2 \left\{ \frac{\left( \frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \right) R(\rho)}{R(\rho)} + \frac{\omega^2}{c^2} \right\} + \frac{d^2 \Phi(\phi)}{d\phi^2 \Phi(\phi)} = 0 \quad (3)$$

となる。(3)式の第1項は  $\rho$  のみ、第2項は  $\phi$  のみを含むので、 $m^2$  を適当な定数として、

$$\frac{d^2}{d\phi^2} \Phi(\phi) = -m^2 \Phi(\phi) \quad (4)$$

$$\left( \frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} + \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{\rho^2} \right) R(\rho) = 0 \quad (5)$$

でなければ、一般に(3)式を満たせない。すると、(4)式から、 $A_m, B_m$  を適当な定数として、

$$\Phi(\phi) = A_m \sin(m\phi) + B_m \cos(m\phi) \quad (6)$$



となることがわかる。 $0 \leq \phi < 2\pi$  であり一周したら元に戻る必要があるので、 $m$  は整数でなければならない。また、膜の半径方向の(5)式はベッセルの微分方程式であるから、

$$R(\rho) = C_m J_m(k\rho) + D_m N_m(k\rho) \quad (7)$$

が一般解である。ここで、 $C_m, D_m$  は適当な定数、 $J_m, N_m$  はそれぞれ、第一種、第二種のベッセル関数である。また、 $k = \omega/c$  とおいた。

膜の振動が原点で特異的であってはならないから第二種ベッセル関数は不適であり、 $D_m = 0$  となる。また、境界条件の(2)式から  $\rho = a$  で、 $R(a) = 0$  なので、 $J_m(ka) = 0$  となるように  $k$  を決める必要がある。次数  $m (m = 0, 1, 2, \dots)$  の第一種ベッセル関数の  $n (n = 1, 2, 3, \dots)$  番目の零点を  $\alpha_{mn}$  (大きさの小さいものから順に番号  $n$  をつける) とすると、

$$\alpha_{mn} = k_{mn}a = \frac{\omega_{mn}}{c}a \quad (8)$$

となり、膜に生じる振動の角周波数  $\omega_{mn}$  は、

$$\omega_{mn} = \alpha_{mn} \frac{c}{a} \quad (9)$$

という値のみが許されることになる。また、膜を伝わる音速  $c$  は、単位長さあたりの膜の張力  $T$ 、面密度  $\sigma$  として、

$$c = \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (10)$$

と与えられる。膜の基本振動は  $m = 0, n = 1$  なので、 $\alpha_{01}$  であるから、膜の張力と面密度が同じであれば、基本振動の周波数は膜の半径  $a$  の逆数で決まることになる。

「3.6 容器の底膜の材質の影響」の図7を解析してみると、表1、2のようになる。ここで、最も半径が小さいものを基準として比を計算した。

表1 折り紙を用いたとき

半径/cm	半径の逆数比	ピーク時の周波数/Hz	周波数の比
2.2	1	800	1
2.8	0.79	600	0.75
3.8	0.69	500	0.63

表2 リフィルを用いたとき

半径/cm	半径の逆数比	ピーク時の周波数/Hz	周波数の比
2.2	1	600	1
2.8	0.79	500	0.83
3.8	0.69	400	0.67

表1、2を見ると、実験値が100Hz単位の測定であること、実際の張力が膜のどこでも等しいという仮定に無理がある可能性などを考えても底膜の基本振動数でほぼ説明できるといえる。よって、糸電話の音の変化に影響する要因は容器の底膜であると考えられる。しかし、膜の面密度については、面密度が大きいとピーク周波数が高いという、よく知られている膜の振動と逆の実験結果となっているため、より慎重に考える必要があるだろう。

#### 4 容器の長さの影響に対する考察

底膜が糸電話の音の変化に関係することがわかったが、実験結果を見ると容器の長さによっても共振周波数が変化していることがわかる。容器の長さが長くなると共振周波数が低くなるので、気柱の共振と考えられるが、一方で底膜の影響があることとどのような関係なのか不明であるため、さらに実験と理論的な考察を行った。

##### 4.1 容器の共振に関する実験

容器の底膜が大きく影響しているという推測ができたので、容器の共振周波数を調べる実験を行った。実験方法としては、底膜に張力をかけた状態で底膜を叩いた音をマイクで拾って、ピークとなる周波数を調べることにした。容器は塩ビパイプを用い、長さ50cmから2.5cmずつ切っていく、容器の共振周波数がどのように変化するかを調べた。底膜には折り紙、塩ビパイプの直径は2.8cm、木綿糸に張力5Nをかけ、糸と底膜の接続は爪楊枝を用いて行った。その結果、図9のような結果を得た。

また、比較のため閉管の共振周波数（実験日の気温20°Cから音速を344m/sとして開口端補正を考えずに基本振動を計算）の変化も示した。図9からわかることは、容器が長い場合は閉管の共振周波数とよく一致しているが、容器が短くなるに従って閉管の共振周波数から外れていき、底膜の共振周波数に近づいていくように見える。このように実際の容器では、底膜の振動と閉管の振動が結合していると推測される。

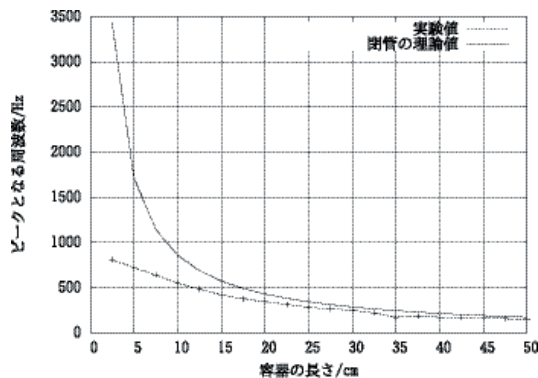


図9 底膜を叩いたときのピークとなる周波数と閉管の共振周波数の理論値との比較。

容器の長さが短いときは閉管の共振周波数とは一致していないが、長いときはほとんど一致する。

#### 4.2 底膜の振動と閉管の振動の結合モデル

この実験結果を説明するため力学的なモデルを考えて考察する。図10のように、ばねが3つとおもりが2つ接続されていて、両端は固定されているものとする。ばね定数をそれぞれ  $k, \kappa, k$ 、ばねとばねの間のおもりの質量はそれぞれ  $m_1, m_2$  とする。ここで、 $k, m_1$  が底膜、 $k, m_2$  が閉管を表すと考え、その間に  $\kappa$  の結合があると考えて対応させる。

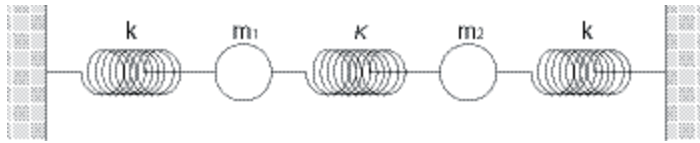


図10 底膜と閉管の振動の結合を表す力学的なモデル。

運動方程式は、おもりのつり合いからのずれをそれぞれ、 $x_1, x_2$  とすると、

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -kx_1 + \kappa(x_2 - x_1) \quad (11)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -kx_2 - \kappa(x_2 - x_1) \quad (12)$$

式を簡単にするために、

$$\omega_1^2 = \frac{k}{m_1}, \omega_2^2 = \frac{k}{m_2}, \mu_1^2 = \frac{\kappa}{m_1}, \mu_2^2 = \frac{\kappa}{m_2} = \left( \frac{\mu_1}{\omega_1} \omega_2 \right)^2 \quad (13)$$

と置き換えて整理する。 $\omega_1$  が底膜の共振周波数、 $\omega_2$  が閉管の共振周波数を表し、 $\mu_1, \mu_2$  が両者の結合を決める定数となる。このモデルでは、 $\mu_2$  が  $\omega_2$  に比例することにも注意が必要である。

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -\omega_1^2 x_1 + \mu_1^2 (x_2 - x_1) \quad (14)$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = -\omega_2^2 x_2 + \mu_2^2 (x_2 - x_1) \quad (15)$$

さらに、 $x_1 = Ae^{-i\Omega t}$ ,  $x_2 = Be^{-i\Omega t}$  として代入し、物理的に意味のある解の条件として  $A, B \neq 0$  を与えると、固有振動数である  $\Omega$  を求める特性方程式を得る。

$$\begin{vmatrix} \Omega^2 - \omega_1^2 - \mu_1^2 & \mu_1^2 \\ \mu_2^2 & \Omega^2 - \omega_2^2 - \mu_2^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (16)$$

これを解くと、

$$\Omega_{\pm}^2 = \frac{1}{2} \left\{ \omega_1^2 + \mu_1^2 + \omega_2^2 + \mu_2^2 \pm \sqrt{(\omega_1^2 + \mu_1^2 - \omega_2^2 - \mu_2^2)^2 + 4\mu_1^2\mu_2^2} \right\} \quad (17)$$

を得るが、基本振動となるのは  $\Omega_-$  である。

閉管の長さ  $l$  を変化させたとすると、 $\omega_2, \mu_2$  は共に  $1/l$  に比例して変化することになる。また、 $l=1$  のとき、 $\omega_1 = \omega_2 = 1$  となるように規格化し、実験結果と対応する図11を作成した。

図11を見ると実験結果と同じように、管が長いときの基本振動数  $\Omega_-$  は閉管の共振周波数に近い値だが、管が短くなると基本振動数  $\Omega_-$  は底膜の共振周波数に近づく。一般的な糸電話は図11の管が短い場合に対応し、図11の横軸が1未満に相当すると考えられる。よって、容器の共振周波数は底膜の共振周波数が支配的であるとわかる。

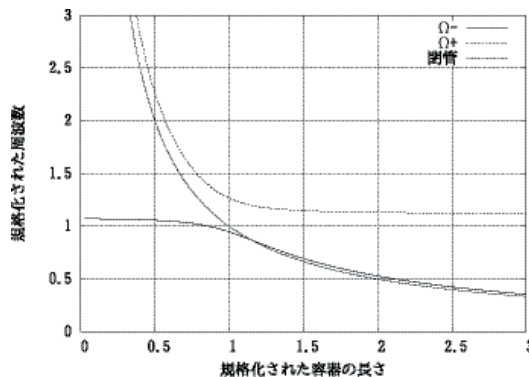


図11 底膜と閉管の振動が結合したと考えた場合の  $\Omega_{\pm}$  と閉管の共振周波数を計算した結果。基本振動は  $\Omega_-$  である。ここで、 $\omega_1 = 1, \mu_1 = 0.5$  とし、容器の長さ  $l$  を変化させた。

## 5 まとめと今後の課題

今回の研究をまとめると以下ようになる。

1. 糸電話の音は周波数によって伝わり方に違いがある。
2. 糸の材質、長さは、ある程度の張力をかけてあれば、音を変化させる要因とはならない。
3. 糸の張力は容器の底膜の張力を変化させるため、音の伝わり方を変化させる。
4. 容器の直径は、底膜の直径を変えることになるため、音の伝わり方を変化さ

せる。

5. 容器の長さは、閉管の共振周波数と底膜の共振周波数の結合を変えるため、音の伝わり方を変化させる。

結論としては、

通常の糸電話では、紙コップなどの容器の底膜の共振周波数が支配的であり、この共振周波数周辺の音が強められるために音が変わる。糸の材質、長さは音に大きな影響を与えないが、糸の張力、容器の形状は底膜の共振周波数に影響を与えるので、音の変化に関係する。

今回の実験では、糸が最大でも5mの長さまでしか試していないため、もっと長い場合にどうなるかは不明である。よって、今後は糸の長さをもっと長くした場合でも音に影響があるかを調べるのが課題となる。また、膜の面密度が大きいとピーク周波数が低くなるはずであるが、実験結果は逆となっているので、さらに底膜の材質を変えて実験を行う必要がある。

糸電話は極めて単純な構造であるが、その物理的な内容は複雑で、非常に面白い教材であるといえる。小学校段階での音に関する導入に用いることはもちろんであるが、中学校、高等学校での音の学習を深める教材として十分なものである。また、大学生レベルの物理学でも、膜の振動や振動モードの結合などの例として扱える。今回の研究から、糸電話の教材としての可能性を感じる事ができた。

なお、本研究は2015年度の鍛冶山の卒業研究 [5] として行われたものを基に、指導教員である出口が理論的な考察を加えてまとめたものである。

## 参考文献

- [1] 第28回山崎賞「糸電話を伝わる音の研究」、静岡県立科学技術高等学校、2011年、  
<http://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/ronnbunshu/113106.pdf>
- [2] 「糸電話の伝搬速度など」、吉澤 純夫、2006年、  
<http://www.hi-ho.ne.jp/touchme/Ch11/Itodenwa/APEJ-PDF-2.pdf>
- [3] 「糸電話における音の伝わり方」、愛知物理サークル、2012年、  
[http://www2.hamajima.co.jp/ikiikiwakuwaku/record/r\\_2012\\_02\\_18/newpage2.htm](http://www2.hamajima.co.jp/ikiikiwakuwaku/record/r_2012_02_18/newpage2.htm)
- [4] 「ハンディ・オシロスコープ」、鳥谷 隆、  
<http://www.vector.co.jp/soft/win95/art/se376225.html>
- [5] 「糸電話通過前後の音の変化の要因について」、鍛冶山 凌、2016年

