

クラリネットを使い、気柱共鳴から 音速を測定する実験演示法の検討

戸谷 義明

理科教育講座 (化学)

Investigation of Experimental and Demonstrating Methods for the Measurement of the Speed of Sound from the Acoustic Resonance of Air Column, by Using the Clarinet

Yoshiaki TOYA

Department of Science Education (Organic Chemistry), Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

Abstract

We have investigated the experimental and demonstrating methods for measuring the speed of sound for students. Many experimental exhibitions to calculate the speed of sound from the acoustic resonance of air column by using the clarinet, a pipe, and water filled in a bucket, were performed at various educational facilities. The estimation of each performance gave us feedback on the next practice. This method would arouse interest of (junior) high-school students and should make them have a deeper understanding in the physics of sound and the theory of wind instruments. The latest improved method demonstrated with PowerPoint presentation, was detailed in the following report.

1. はじめに

小中学生、および高校生を対象にした全国調査^{1, 2)}によると、小中学生では約6-7割、高校生では3-4割の児童・生徒が「理科の勉強が好きだ」と答えているにも拘わらず、小学生の約5割、中学生や高校生では約3-4割の学生しか「理科を勉強すれば、私の普段の生活や社会生活の中で役立つ」と思っていない。さらに、約3割以下の児童・生徒しか「理科の勉強を生かした仕事をしたい」と思っていないようである。このように理科が、あまり役立つ教科とされていない原因の1つとして、学校での学習が身のまわりのことから身近なことから、かけ離れているからではないかと思われる³⁾。

身のまわりのことから、身近なことから結びつけた内容で、五感で感じることができる理科学習は理解を深めやすいと考えられる。著者の専門は有機化学であり、物理は苦手であるが、著者の趣味(クラリネットで音を出す)の関係で気柱共鳴には非常に興味があった。趣味を仕事(研究)に活用し、物理の気柱共鳴の実験を、クラリネットを使ってできたらおもしろいのではないかと考えつき、2007年より、出前化学実

験でクラリネットを使った気柱共鳴実験を試行してきた(初回は6月16日の各務原西高への出前実験、吹奏楽部の高校生も参加)。ところが、式が出てくるためと思われるが、気柱共鳴で音速が求まる原理の説明を理解してもらえなかったようであった。

この頃、京都教育大学の沖花彰教授による、先駆をなす、中学生を対象にしたカリキュラム研究(理科と音楽との融合)³⁾に出会った。身近な音楽を通した音や振動(中学:音の性質、高校物理基礎:音と振動)に関する理科実験教材が開発されれば、理科への興味関心や理解の向上に有効であり、音楽の学習でも理科が役に立つ教科であることが実感できる。研究室のホームページで、実験結果のビデオや音に関する資料(教科書、物理のトリビアなど)が公開されており、大いに共感し、刺激を受けた。

沖花教授は管楽器で音速を測定するという実験を行っておらず、著者は物理が専門ではなく、同様の音速を測定する実験が、どのくらい行われているのか、Web検索で調べてきた限りでは、これまでに行われているという情報が得られていない。

そこで、管楽器、主にクラリネットを使い、気柱共鳴という、それ自身が管楽器の音が出る仕組みであ

り、非常におもしろい現象を観察・利用し、主に高校生が楽しみながら、簡単に音速を測ることができ、音に対する理解が深められる実験法と演示法を検討・開発することを開始した。高校でのSSH（スーパーサイエンスハイスクール）講座、青少年のための科学の祭典2007名古屋でのステージショー、大学の理科研究の授業などの実践を重ねて改良を続けていたが、これがさらに加速されたのには、次のいきさつがあった。

名古屋市科学館で行われた青少年のための科学の祭典2009名古屋における化学マジックのステージショーで、演示者全員一列に並んでショーを開始していたところ、科学館の学芸員に、科学実験ショーの達人は皆、最初に会場を一気に盛り上げて実験を始めるものだと教えられた。そこで2010年度からは、著者の趣味を、ここでも活用し、ショーの最初にクラリネットなどの演奏とともにショーのタイトル（「CMS！不思議！君の！頭の中！ジャンジャン溢れる好奇心～化学マジックショー～♪」¹⁴⁾）の替え歌を歌うようにした。ほとんどの会場で、ご好評（特にAKB48は盛り上がる！）をいただき、これに伴い、手元にクラリネットがあるので、それを使った音速測定の実験を頻繁に行うようになった。そのフィードバックを生かし、今回、高校生が原理を理解しやすいように改良した最新の実験演示法を本論文として報告する。

2. これまでの教材研究

音速の測定法には、1) 音の速さが有限で、ある距離を進むのに時間がかかるという、もっとも基本的な速さの定義：音速＝距離÷時間の関係を利用する方法（距離を置いて時間差を求めると）、2) 音速＝波長×振動数の関係を利用する方法（位相の一致、定常波の共鳴、干渉などを利用して波長を求めると）がある。オシロスコープ（トリガ機能、ストレージ機能付）やコンピュータのマイクの音の取り込みを経時的に表示できるソフトを使用して距離（直接音と反射音）による時間差を視覚化して測定する方法も報告されており、3ケタの精度で音速の測定が可能である⁴⁾。これら音に関する理科教材は、正確な値を得ることにウエイトが置かれ、実験には、特別な装置が必要で、聴覚よりも機械（マイク）や視覚（オシロスコープ画面）に頼るものが多い。

1) の方法のうち、スターター・ピストルや拍子木などの音源から一定の距離で、煙や拍子木を打つのが見えたときから音が聞こえるまでの時間をストップウォッチで計測する実験は簡便で、聴覚、視覚を使い、音速＝距離÷時間を実感できる方法である。音が時間をかけて空気を伝わってくるのが実感できる実験としては、旗を持った児童生徒を真っ直ぐ1列に並べ、音が聞こえたときに旗を上げさせる実験が有名

である。ビデオに録画すれば音が波として伝わってくるのが一目瞭然であり、音速の測定も可能であろう。しかし、これらの実験では音源と測定者の距離が十分に取れず、計時の反応動作に個人差があるため、誤差が大きくなりやすい。一定間隔（1-2分）のチャイムや時報などの録音を利用し、最初の特定の音で計測を開始し、一定距離（100 m）を移動して2回目の特定の音が聞こえるまでの時間を複数のストップウォッチで計測する、計時誤差を減らす改良法（2ケタまで計測可）も報告されている⁵⁾。

2) の気柱共鳴を利用して音速を測定する方法は、波長、振動数、振幅・速さが同じで進行方向が逆向きの2つの波（元の波と反射した波）が重なり合うことにより、振幅が増幅されて元の波と同じ振動数で振動し、波形が進行せず、その場に止まっているように見える定在波（定常波）ができることによる共鳴現象を利用する。定在波で全く振動せず、振幅がゼロになる点を節、振幅が元の波の2倍になり、最も振れ動く点を腹という。節、および腹は、それぞれ元の波の波長の半分ごとに交互にできる。特定の長さの気柱が特定の振動数で共鳴することにより、腹から腹、または節から腹までの距離が測定できる。この距離から元の波の波長が分かり、音速＝波長×振動数の関係を使って音速が計算できる。この方法では音波が空気を進行して行くことを実感することはできないが、聴覚を主に使い、気柱共鳴が発声や楽器が音を出すという非常に身近なことに直接関わり、共鳴という音や波に関する非常に重要でおもしろい現象が学習できるので極めて有意義な実験法である。通常は音叉や発信器を音源に、連通管を伴ったガラス製の共鳴管で実験が行われているようである。学校に吹奏楽部があれば管楽器、特にクラリネットやチューナーは必ずある。そこで、特別な装置を一切使わず、閉管の気柱共鳴で音の波長が測定でき、波長に、その音の振動数をかければ音速が求められることを、主に高校生に理解してもらうことを目標に、クラリネットなどの管楽器を使った音速測定の実験法と演示法を検討・開発した。

3. 実験方法

管として以下のものを用意した。

- ・内径44 mm、厚さ2 mm、長さ約70 cmの塩ビ管（VU-40、カーマ¥248、1 mのものを、のこぎりで切断、切り口を、やすりがけ）
- ・内径56 mm、厚さ2 mm、長さ約70 cmの塩ビ管（VU-50、カーマ¥348、1 mのものを、のこぎりで切断、切り口を、やすりがけ）
- ・内径56 mm、厚さ2 mm、長さ70 cmのアルミ管（岩間金属¥5280、両端バリ取り済）
- ・内径56 mm、厚さ2 mm、長さ70 cmの真鍮管（岩間

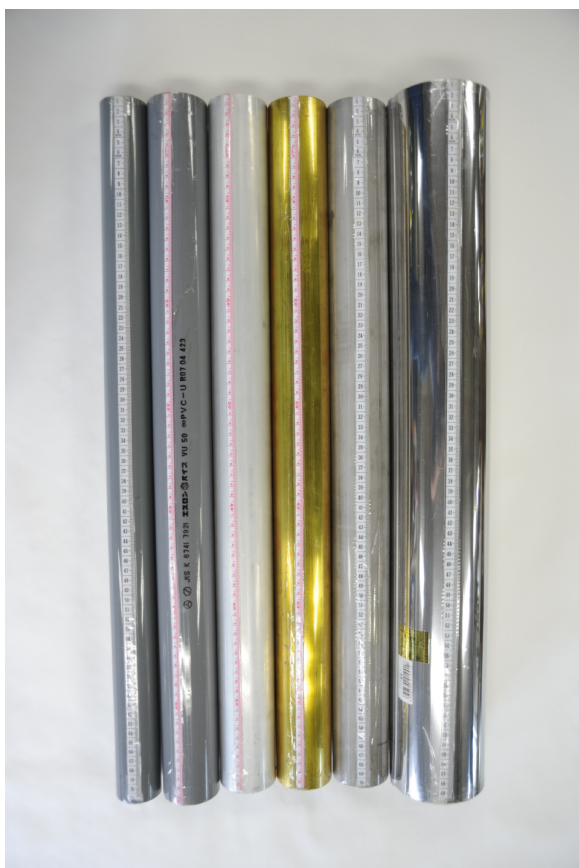


写真1 音速測定装置。左から塩ビ管（内径44 mm）、塩ビ管（内径56 mm）、アルミ管（内径56 mm）、真鍮管（内径56 mm）、ステンレス管（内径56 mm、厚さ2 mm）、ステンレス管（直径100 mm、厚さ0.3 mm）。

金属¥5796、両端バリ取り済)

- ・内径56.5 mm、厚さ2 mm、長さ70 cmのステンレス溶接管(SUS304, 岩間金属¥5280, 両端バリ取り済)
 - ・直径100 mm、厚さ0.3 mm、長さ約70 cmのステンレス管 (SUS420排気筒, カーマ¥1480, 914 mmのものを、金工のこぎりで切断, 切り口を、やすりがけの後, もう一方の端とともにPP製テープで被った)
- クラリネットは後述するように閉管楽器である。クラリネットでパワーがあり、よく飛ぶ音は、穴を全部閉じた管の長さで出る最低音レDの音 (147.3 Hz, 基準振動, 波長の4分の1の長さで共鳴), またはレジスター・キーのみ開いて出るラAの音 (442 Hz, 3倍音, 波長の4分の3の長さで共鳴)である。これらの音, および各々の半音上の音で実験を行った場合, 気柱の長さは0℃で53-56 cm, 40℃で57-60 cmになると予想された。管の取り扱い, バケツの水の深さ (23 cm, 管の長さの可変領域), 床から管の上端までの高さでクラリネットが吹き易いことを考慮し, 管の長さを70 cmとした。

クラリネットは以下の「仕掛け」で使用した。

- ・クラリネット: Buffet Crampon B^b管 Festival, または

- RC (どちらも著者の演奏能力に不相応な, 高級な楽器)
 - ・マウスピース: INAX Resin-Finished Machinax [マシナブル (快削性) セラミック] 製MCC-420 M Nagamatsu
 - ・リガチャー: Wood Stone Solid Silver, またはRovner EVO-5 E-1R
 - ・リード: Zonda Supreme 3.5Mまたは3.5H
チューナーは以下のものを使用した。
 - ・YAMAHA Chromatic (半音階) Tuner TD-30M (楽器に直接取り付けて使用できる超小型軽量タイプ)
- 1) 100均店で購入した樹脂製メジャー6個を, それぞれ70 cmに切ったものを, 各管の外側に, 管の上端にゼロを合わせ, PP製テープで被って貼り付ける (防水のため)。これで音速測定装置の完成である。写真1参照。
 - 2) 10 Lポリバケツ2個に水を3分の2ぐらいずつ入れたものを用意する。一方のバケツに, 別のバケツに入った水を, ホースポンプを使用して移し, 水が上面からわずかに下の位置になる状態にする。写真2参照。

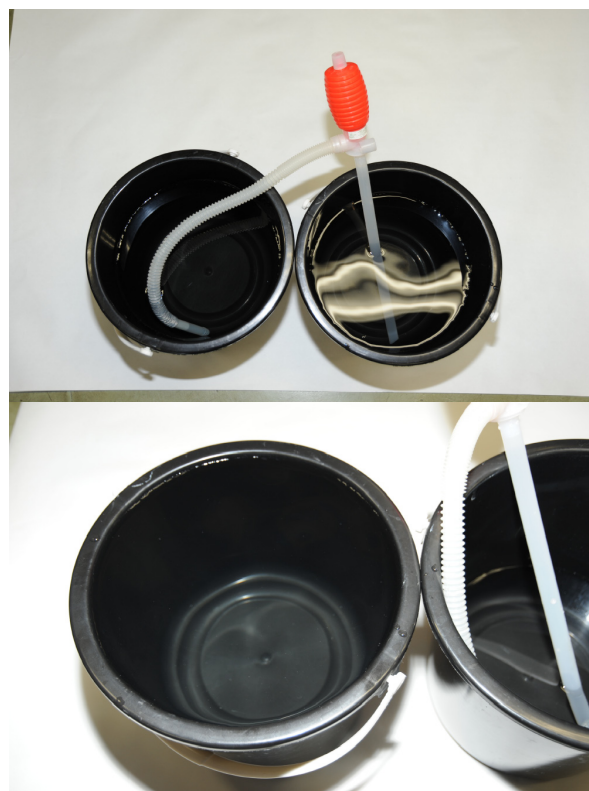


写真2 10 Lポリバケツと水

- 3) 人Aがバケツの水面に, 各管を1本ずつ, 中央付近を手でもってメジャーの目盛のゼロが上になるように垂直に入れて立てる。人Bが上端の管口から約10 cm離れたところにクラリネットのベルを近づけ, チューナーを見ながら各音 (レD, ミ^bE^b, および, それらの3倍音ラA, シ^bB^b)を出し続け

る。人Aは50-60 cm付近で管を上下させ、最も音が大きくなり、管が最も振動（触覚）する、共鳴する位置を探す。ウーンウーンと鳴るのを聞きながら、管を上下させる範囲を狭めていき、共鳴する位置付近では、約2 cmを1秒間ぐらいで、管を上下させる。その後、ゆっくり動かして共鳴する位置を決定し、メジャーの水面の位置のメジャーの目盛を0.5 cmまで読み取る。写真3参照。



写真3 クラリネットによる気柱共鳴実験

- 4) 得られた長さの4倍（最低音レDの音, 147.3 Hz, 半音上のミ^bE^bの音, 156.1 Hz, 波長の4分の1の長さで共鳴）、または3分の4倍（ラAの音, 442 Hz, 半音上のシ^bB^bの音, 468.3 Hz, 波長の4分の3の長さで共鳴）が波長（閉管の気柱共鳴）で、これに振動数（147.3 Hz, 156.1 Hz, または442 Hz, 468.3 Hz）を乗じて音速を計算する。人Aが読み取った値を、人Cがスライドショーを中断した状態のPowerPointのスライドの表に入力すると、音速が自動的に計算される（後述）。
- 5) 気温から計算した音速 [音速 = 331.5 + 0.6 × t, tは気温(°C)] と比較する。気柱からの計算値は気温から計算した値よりも小さくなる（後述）。

4. 実験結果

これまでの実験で、以下の結果が得られている。

- 1) ある程度音が響く場所（部屋、会場、家の中では風呂場など）の方が、耳で聞いて共鳴する位置を判定し易いようであった。
- 2) 管の材質で、共鳴音が大きく、よく響くのは、内径がほぼ同じ56-56.5 mm, 厚さ2 mmの管で比較したところ、真鍮>アルミ, ステンレス>塩ビの順であった。共鳴する位置の測定値は、材質に関係なく同じになった。実験に使用するのは安価な塩ビ管で十分で、よく響く真鍮管に比べ、共鳴する位置がシャープに判定できるようであった。
- 3) 管の太さについて、塩ビ管（厚さ2 mm）の内径44 mmと56 mmとで比較したところ、共鳴音が大きく、よく響くのは56 mm > 44 mmであった。本学の矢崎教授に伺ったことによると、音源のパワーに適した管の太さがあり、パワーが大きければ、太い管（振幅増大係数Q値が大きい）を共鳴させて大きな音を出せるとのことであった。クラリネットの最大出力パワーは、およそ数mWであり、木管楽器の中でダイナミック・レンジが約50 dBと一番広い。吹奏圧は音域にわたって弱奏で約3 kPa, 強奏で4ないし5 kPaである⁶⁾。
- 4) 厚さ0.3 mm, 直径100 mmのステンレス管も共鳴音が大きく、よく分かるが、共鳴音の（響きの）質が厚さ2 mmの管に比べてよくないように思われた。ただし、この管の実験では、厚さ2 mmの管に比べ、共鳴する位置で管が振動していることを、はっきり手で感じる事ができた。
- 5) 計算で求まる音速の値は2ケタぐらいまでの精度であり、147.3 Hz, 442 Hz, または156.1 Hz, 468.3 Hzの実験で、長さ0.5 cmの誤差は、それぞれ音速で2.9 m, 3.1 mになる。管の気柱共鳴では、実際は管の開口端より少し外側に腹ができる。これを開口端補正といい、内径56 mmの管で得られた測定値に、LevineとSchwingerの理論値⁷⁾の管の半径の0.6 (0.6133) 倍の長さ1.7 cm (0.17 m)を足して補正すると、音速の計算値は気温から計算した値に近くなった。
- 6) 開口端補正は振動数、管の半径、管の形状、開口部の面積によって異なることが知られている⁸⁾。管の内径（塩ビ管44 mm, 塩ビ管56 mm, 真鍮管56 mm, ステンレス管100 mm）と振動数（147.3 Hz, 442 Hz）を変えて27 °C（音速の気温からの計算値は348 m/s）で実験を行い、共鳴気柱の長さへの影響を調べた。各測定は2-4回行って平均した。測定結果、音速の計算値、LevineとSchwingerの理論値（1.3 cm, 1.7 cm, 3.1 cm）による開口端補正後の音速の計算値を以下の表に

示す。

27 °Cにおける測定値と音速の計算値

	44 mm 塩ビ	56 mm 塩ビ	56 mm 真鍮	100 mm ステンレス
147.3 Hz 計算値 補正後	57.5 cm 339 m 347 m	56.8 cm 335 m 345 m	56.8 cm 335 m 345 m	55.5 cm 327 m 345 m
442 Hz 計算値 補正後	57.5 cm 339 m 347 m	56.4 cm 332 m 342 m	56.8 cm 335 m 345 m	57.0 cm 336 m 354 m

147.3 Hzでは内径が大きくなるにつれて共鳴気柱の長さが短くなり、補正値が増加していき、理論値による補正で、気温から計算した音速に近い値が得られた。ところが442 Hzでは、44 mmと56 mmの管については、147.3 Hzと、ほぼ同じ結果が得られたが、100 mmの管では、442 Hzと147.3 Hzの共鳴気柱の長さが明らかに異なり、これは補正値が振動数に依存することを示した例であると考えられた。

- 7) 56 mmの塩ビ管で、クラリネット以外の管楽器の442 Hzの音でも共鳴音が観測できるかを調べる予備的な実験を行った。トランペット、アルトサクソは共鳴音が観測できたが、フルートでは全くできず（音のパワーが小さく、管が太すぎか？）、音のパワーが大きいトロンボーンでも、これまで成功していない。今後の検討が必要である。
- 8) バケツを使わないですむ、水のタンクを連通管方式で塩ビ管に接続した測定装置（内径56 mmの塩ビ管の横のメジャーに沿って管の内部の目盛り読み取り用の内径7 mmの亚克力パイプも連通管方式で取り付け）を作成し、実験を試みた。しかし、水のタンクとの配管の内径（T字管4 mm、チューブ7 mm）が細く、塩ビ管内の水面の上下に時間がかかり、音の変化がわかりにくくなってしまい、共鳴する位置を決定できなかった。バケツの水面に垂直に立てた管を上下させる方が簡単で優れていることが分かった。

5. 実験演示法と併用プレゼンテーション

既述の実験結果を考慮し、通常、内径56 mm（共鳴音の大きさを重視）の真鍮管（共鳴音の大きさと響きを重視）、または塩ビ管（入手の容易さ、価格の安さを重視）を使用して演示実験を行ってきた。

これまでは、以下に示すPowerPointプレゼンテーションを併用し、音波の基礎から気柱共鳴によって音速が測定できることを解説した後、メインの気柱共鳴実験を行うようにしていたが、最近、最初に、クラリ

ネットを使った気柱共鳴の現象を観察する、楽しく興味深い実験（材質の違いによる共鳴音の比較を含む）を行った後に、この現象を利用し、どうやって音速が測定できるかを解説し、最後に測定実験を行った方がよい、というご意見をいただいた。今後、この方法で演示したい。さらに、理解を助けるようなアニメーションを入れられないかというご意見があったので、PowerPointスライド上から物理関係のWebサイトへリンクさせ、ネット環境があれば、ブラウザで動画を見られるように改良した。

波と音波

波を伝える粒が振動する方向と波の進む方向とが同じ波を**縦波**という。粒は揺れているだけで進行はしない！
ばねを伝える縦波が例
<http://www.asahi-net.or.jp/~zn0f-szk/bane10.html>
縦波と横波アニメーション
<http://www.ne.jp/asahi/tokyo/nkgw/gakusyu/hadou/fate-yoko-wave/wave1.html>

空気の粒の散らばり具合が濃い部分（圧力が高い）と薄い部分（圧力）が振動して伝わっていく縦波（粗密波）のうちで、人間に聞こえる振動数（周波数ともいう）20(低音)-20000(高音)Hz のものが**音波**で、**耳で感じた音波を音**という

スライド1 インターネットの動画サイト^{9, 10)}に接続し、縦波と横波を実感し、理解するために有効な動画を見る。波の粒そのものは揺れているだけで進行しないこと、音波が空気の粗密が伝わっていく、人に聞こえる縦波であること、縦波の進行方向の動きを、進行方向に垂直に書くと、横波（正弦波）として表現できることを確実におさえる。

音の3要素

大きさ：波の振れる幅

音色：波の形

純音(正弦波、音叉の音が近い) 楽音 基音 + 上音(倍音など)を含む

音程：波の振動数(1秒間の波の数, Hz)

1 Hz(波長=音速) 2 Hz(波長=音速/2)

低い 1秒間に伝わる距離(長さ) 高い(振動数が大きい、1つの波の長さ(波長)が短い)
 空気中の音は約 340 m

スライド2 音の3要素を紹介する。振動数（周波数）と波長の定義を解説し、音程について、音が高くなると振動数が大きく、波長が短くなることをおさえる。空気中の音速は約340 mであることも紹介する。

音程と音階

音階と振動数(平均律, $\text{ラ}=442\text{ Hz}$ を基準)

各音は前の低音の $^{12}\sqrt[12]{2}$ (1.0595)倍の振動数

ド	ド \sharp	レ	レ \sharp	ミ	ファ
263	278	295	313	331	351
ファ \sharp	ソ	ソ \sharp	ラ	ラ \sharp	シ
372	394	417	442	468	496
					ド
					526 Hz

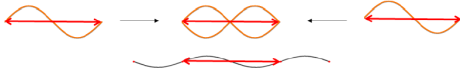
1オクターブ上の音は振動数が2倍、波長が2分の1になる



スライド3 音階と振動数との関係, 1オクターブ上の音は振動数が2倍, 波長が2分の1になることを解説する。

管楽器と定在波(定常波)による共鳴

進む方向が逆の波が重なり合うと、その場で止まって振動しているように見える波(定在波)ができる。
赤い矢印が元の波の波長と同じ長さになる。



定在波のアニメーション

<http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaEd/wave4.html>

管楽器は元の波と管の端で反射した波とが管の中で定在波を作って空気が振動(共鳴)することによって音を出す。

自由端と固定端の反射アニメーション

<http://www.asahi-net.or.jp/~znbt-szk/physics/reflex21.html>

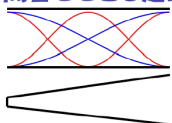
管の長さに対応した振動のみが強く起きる!

スライド4 振動数と振幅が同じで、進む方向が逆の波が重なり合うと定在波ができることを、ネットの動画¹¹⁾とともに説明し、定在波の節(腹)から1つおいた節(腹)までの長さが元の波の波長と同じ長さになることを強調する。音波は管の端(開いた管でも!)で反射し、閉じた管(固定端)と開いた管(自由端)で反射の仕方が異なること、元の波と反射した波とからできる定在波の形をネットの動画¹²⁾で確認する。管楽器は両開管、または片閉管の中で管の長さに対応した定在波ができて共鳴することにより音が出ることを解説する。動画の左が固定端、右が自由端の場合は片閉管楽器の7倍音に相当する定在波になる。

開管、閉管と管楽器

ほとんどの管楽器

開管でできる定常波



基本振動 管の長さが1つの波の長さ(波長)の2分の1倍振動 管の長さが1つの波の長さ(波長)と同じ
開管や、閉じていても管が太くなっていく管楽器はオクターブ・キーでオクターブ上の音(倍音)が出る

閉管でできる定常波



基本振動 管の長さが1つの波の長さ(波長)の4分の1 3倍振動 管の長さが1つの波の長さ(波長)の4分の3 レジスター・キーで1オクターブ+完全5度の音(3倍音)が出る

これはクラリネットの仲間だけ! 気柱(閉管)の共鳴アニメーション

<http://www.asahi-net.or.jp/~znbt-szk/Kichu1.html>

スライド5 ほとんどの管楽器は開管で、最低音は管の中に波長の2分の1が入り、開口部が腹になった状態(青)、ついで、波長と同じ長さが入り、開口部が腹になった状態(赤)、つまり最低音の1オクターブ上の音(2倍音)で共鳴することを解説する。つぎに、クラリネットだけは閉管楽器で、最低音は管の中に開口部が腹、閉管部が節になり、波長の4分の1が入った状態(緑)、ついで同様に開口部が腹、閉管部が節になり、波長の4分の3が入った状態(マゼンタ)、つまり最低音の1オクターブ+完全5度上の音(3倍音)で共鳴することを解説する。閉管の気柱共鳴アニメーション¹³⁾を見て縦波の定在波を実感する。節の位置の圧力変化が最も大きい。

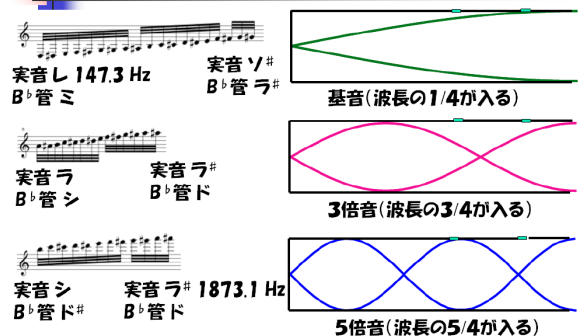
クラリネットの特徴

音の出る範囲(音域)が広い(閉管は同じ長さの開管の1オクターブ下が出せる)。



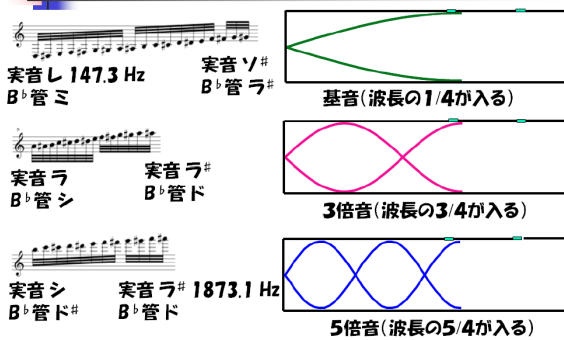
スライド6 クラリネットは閉管(管の長さが波長の4分の1が最低音)なので、同じぐらいの長さの開管(管の長さが波長の2分の1が最低音)に比べて、ほぼ1オクターブ下の音まで出すことができることを解説する。クラリネットで下の楽譜を演奏し、レジスター・キーで3倍音が出ることを演示する。

クラリネットの音の出る範囲(音域)



スライド7 クラリネットで基音の部分の半音階を1段目の楽譜にしたがって演奏する。ついで3倍音の部分(2段目の楽譜)、5倍音の部分(3段目)を演奏する。

クラリネットの音の出る範囲(音域)



スライド7 クラリネットの半音階演奏終了。

音速とチューニング

空気中の音速 (m/秒) : $331.5 + 0.6 \times t$ t は気温 (°C)
平地でも山の上でも温度が同じなら同じ。気圧は影響しない!
吹奏楽のチューニング チューナーでシ^b (B^b) = 468.3 Hz で行う

両矢印は波長(クラリネットの閉管の長さ(音速 340 m/s で 54.5 cm)の4/3倍)。これが音速の中に 468.3 個(Hz)ある
管の中の温度が上がると音速が増加
音速に入る両矢印の数が増加し、音が高くなる→管を伸ばして調整
元と同じ 468.3 個(Hz)になるように管の長さ(波長の3/4)を伸ばすと、音が低くなる→管を縮めて息で温めて調整
管の中の温度が下がると音が低くなる→管を縮めて息で温めて調整
実際は、管の中の温度は吹く息で、ある程度一定に保たれていると思われる
1度発生した音は、伝えるもの(媒体)が変わっても音速が変わると、波長が変わるが振動数は変わらない!

スライド8 音速は気圧には影響されないが、気温によって変わる (1°C上昇する毎に0.6mずつ早くなる)ため、管楽器は気温に応じてチューニング(管の長さを変える)をする必要があることを解説する。実際は、管の中の温度は、吹く息で、ある程度一定に保たれる。一度発生した音の振動数は媒体が変わっても変わらないことは強調すべきである。

計算した音の速さ (m/秒) の結果の比較

気温、クラリネットの実験から

気温(t)から 空気中の音の速さが分かる!

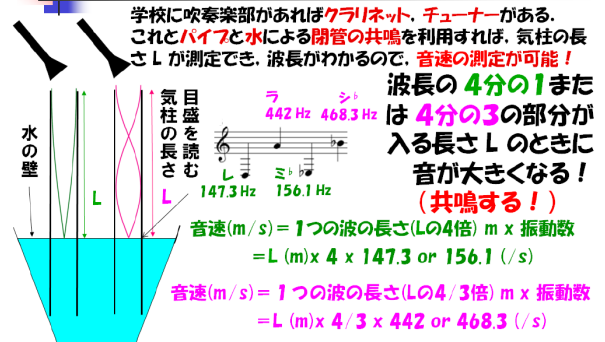
$331.5 + 0.6 \times t$	14.1	340
------------------------	------	-----

音が大きくなる(共鳴する)空気の柱の長さから

クラリネットの音の振動数	気柱の長さ(m)	音速(m/秒)
下のシの音 147.3 Hz	0	0
ラの音 442 Hz	0	0
下のミ ^b の音 156.1 Hz	0	0
シ ^b の音 468.3 Hz	0	0

スライド9 気柱共鳴から音速を計算するための基本である音速と波長、振動数との関係を、ここで実例を挙げて再確認する。

クラリネットによる音速の測定



スライド10 「最新の音速測定マシン」と称して管にメジャーが貼り付けてある測定装置を紹介する。メジャーの目盛のゼロが上になるように管をバケツの水に垂直に立てて入れ、穴に向かってクラリネットで正確な音を出し続け、管を上下させて共鳴する位置を決定することを説明する。緑の音では波長の4分の1が入った緑の状態、マゼンタの音では波長の4分の3が入ったマゼンタの状態、それぞれの波長が求まり、波長に振動数を乗ずれば音速が計算できることを確認し、実験を開始する。

計算した音の速さ (m/秒) の結果の比較

気温、クラリネットの実験から

気温(t)から 空気中の音の速さが分かる!

$331.5 + 0.6 \times t$	14.1	340
------------------------	------	-----

音が大きくなる(共鳴する)空気の柱の長さから

クラリネットの音の振動数	気柱の長さ(m)	音速(m/秒)
下のシの音 147.3 Hz	0	0
ラの音 442 Hz	0	0
下のミ ^b の音 156.1 Hz	0	0
シ ^b の音 468.3 Hz	0	0

スライド11 最初の状態。気温14.1°Cで音速は340 m/sである。スライドショーを中止し、温度計で測定した気温を入力した後、上から順に実験を行い、測定値を入力する。完了したらスライドショーに戻す。

計算した音の速さ (m/秒) の結果の比較

気温、クラリネットの実験から

気温(t)から 空気中の音の速さが分かる!

$331.5 + 0.6 \times t$	27	348
------------------------	----	-----

音が大きくなる(共鳴する)空気の柱の長さから

クラリネットの音の振動数	気柱の長さ(m)	音速(m/秒)
下のシの音 147.3 Hz	0.570	336
ラの音 442 Hz	0.565	333
下のミ ^b の音 156.1 Hz	0.540	337
シ ^b の音 468.3 Hz	0.540	337

スライド11 気温 (27℃), 測定値入力後. 気温からの計算値より小さくなる.

計算した音の速さ (m/秒) の結果の比較

気温, クラリネットの実験から

気温(t)から 空気中の音の速さが分かる!

$331.5 + 0.6 \times t$	27	348
------------------------	----	-----

音が大きくなる(共鳴する)空気柱の長さから

クラリネットの音の振動数	気柱の長さ(m)	音速(m/秒)
下の音 147.3 Hz	0.587	346
ラの音 442 Hz	0.582	343
下のミの音 156.1 Hz	0.557	348
シの音 468.3 Hz	0.557	348

開口端補正 1.7 cm(0.017 m)を加えると気温からの計算値に近い値になる

スライド11 同様に開口端補正を加えて入力した後. 気温からの計算値に近い値になる.

音楽と理科(物理)は とても親しい関係

スライド12 最後のスライド.

6. おわりに

今後, 実際に本論文の方法で実践を行う他, クラリネットで, これまでに行った以外の音(振動数)での実験, 管の太さ(開口端補正に関連), 厚さ(薄いと手に振動を感じやすい), 材質(響きの違い, アクリルパイプやガラス管で内部の水面を観察する)を変える実験, クラリネット以外の管楽器での実験, そして, できればオシロスコープによる管楽器の波形の比較実験などを行っていきたい.

吹奏楽部のクラリネット奏者に協力してもらい, クラリネットの音楽的な魅力や共鳴現象を楽しみながら, 高校などで本論文の実験がプレゼンテーションとともに行われることを期待したい. 閉管の気柱共鳴で音波の波長が測定でき, 波長に, その音波の振動数を乗ずれば音速が求められることを, (中)高校生が理解する助けになると思う. また, 吹奏楽部の(中)高校生が, 管楽器の音が出る原理, チューニングの理論な

どの理解を深め, 音楽に理科が役に立つことを実感してもらえれば幸いである.

当方, 物理や音楽が専門ではない. 読者の方で, 万一, 本論文の内容の誤り, 不備などを見つけた際には, ご指摘いただきたい. ご指摘に感謝し, 訂正に努力したい.

さいごに最近の本実験の実践例について述べる.

後述する日本理科教育学会の発表の予行演習も兼ね, 2011年7月末の青少年のための科学の祭典2011全国大会のステージに化学(科学)演示実験ショーを出展した際に, 実験の1つとして音速測定実験を演示した. 事前チェックがあった実験解説集に実験内容を記述してあったにも拘わらず, 研修会での演示終了後, 安全上などの理由でなく, クラリネットによる音速測定は化学ではなく, 物理なので一般公開では演示中止という指示を頂戴し, 学会で発表することに, 若干不安を抱いた. しかし2011年8月中旬の日本理科教育学会全国大会で行った実験演示を伴った発表「2F-01 クラリネットを使った音速測定の実験演示法の検討」(プレゼンテーションは改善前のものを使用)では, 質疑応答もあり, まったく問題なく終了した. 残念ながら, 入手を期待していた, 楽器を使った同様の実験が, どのような内容で, どのぐらい行われているかという情報は得られなかった. 読者の方で, 楽器を使った同様の実験に関する情報をお持ちの方がいましたら, ご提供を, よろしく願いたい.

謝辞

本研究は2009, 2010, 2011年度科学研究費補助金基盤C一般(課題番号21500870)により, 財政的にご支援いただきました.

京都教育大学の沖花 彰教授には, 理科と音楽の融合の研究に関する情報をご提供いただいたのみならず, 物理が専門でない当方からの質問に親切に回答していただきました. 深く感謝いたします.

愛知教育大学の矢崎 太一教授には, 楽器の物理学に関する貴重な本をお貸しいただき, 音に関する物理の理論と実験の情報, および本実験に関するご助言をいただきました. また, 愛知教育大学の新山王 政和教授, 愛知学泉大学の小川 和人先生, 小田 紀夫先生からは音速測定の演示実験を実際にご覧いただき, 音楽の専門家としての立場からの貴重なご助言を頂戴いたしました. 感謝いたします.

吹奏楽部に所属した経験のない著者がクラリネットを購入した際の楽器の選定, およびレッスンでは小松孝文先生, 浅井 崇子先生にお世話になりました. 2003年から所属し, いつも足を引っ張ってしまっている, アマチュア吹奏楽団アンサンブル・ヴィヴァーチェの皆様にも, この場を借りて謝意を表します.

実験、および演示法の改善のための予備実験や実践で、お手伝いしてくれた、多くの学生諸君に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平成15年度小・中学校教育課程実施状況調査質問紙調査集計結果(理科), 国立教育政策研究所教育課程研究センター.
- 2) 平成17年度高等学校教育課程実施状況調査質問紙調査集計結果(物理I, 化学I, 生物I, 地学I), 国立教育政策研究所教育課程研究センター.
- 3) 沖花 彰, 他, 「中学校における理科と音楽を融合した新しいカリキュラム開発の研究」研究報告集 2007-2008年度科学研究費補助金基盤研究C(一般)報告書. 2009, および沖花 彰, 他, 「中学校理科実践教育「音楽を理科しよう」の開発, 2005年度京都教育大学教育研究改革・改善プロジェクト経費成果報告書”, 2006.
- 4) 大久保政俊(2001), 北海道立教育研究所附属理科教育センター研究紀要, **13**, pp 10-13.
- 5) 大阪府教育センター, 「ストップウォッチを使った音速測定 of 工夫」, “大阪府研究報告集録第121-02号小・中学校「理科教育」研究—物質とエネルギー領域の観察実験事例集—”, 2006, pp 19-20.
- 6) N. H. Fletcher, T. D. Rossing, 岸, 他訳, “楽器の物理学”, Springer-Verlag Tokyo, 2002, p 490. (式がいっぱい、著者には難解)
- 7) H. Levine, J. Schwinger, Phys. Rev. **73**(4), 1948, pp 383-406.
- 8) 松永捷一, 高校物理講義ノートとつれづれの記/波動(弦振動気柱振動)
http://www15.wind.ne.jp/~Glauben_leben/Buturi/Hadou/Hadoubase5.htm
- 9) Tetsuo Suzuki, VIRTUAL PHYSICS/JAVA VIRTUAL LAB/ばねを伝わる縦波
<http://www.asahi-net.or.jp/~zn6t-szk/bane10.html>
- 10) 中川のビジュアル物理教室/ビジュアル物理のコーナー/横波と縦波
<http://www.ne.jp/asahi/tokyo/nkgw/gakusyu/hadou/tate-yokowave/wave1.html>
- 11) 加藤徳善, のりさんのパソコン物理/物理の授業用電子黒板で使えるJAVA アプレット/定常波
<http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaEd/wave4.html>
- 12) Tetsuo Suzuki, 動画「自由端反射と固定端反射」(縦波を含む)
<http://www.asahi-net.or.jp/~zn6t-szk/physics/reflex21.html>
- 13) Tetsuo Suzuki, VIRTUAL PHYSICS/JAVA VIRTUAL LAB/気柱(閉管)の共鳴
<http://www.asahi-net.or.jp/~zn6t-szk/kichu1.html>
- 14) 本歌はAKB48の「ヘビーローテーション」, CMSはChemical Magic Showの略でダイハツのCM, TNPのパロディー.

(2011年9月16日受理)

p. 45 スライド 9

スライド 9 は次のものに差し替え

(正)

音の速さと波長, 振動数との関係

音の速さ(音速) = 1つの波の長さ(波長) × 振動数

例えば音速が **340 m/秒** のとき, **442 Hz** の音の**1つの波の長さ(波長)**は **$340 \div 442$** で **0.77 m(77 cm)**である。

逆に, **振動数**と**波長**が分かれば, **音速**が計算できる。

442 Hz の音の**波長**が **0.77 m** のとき, **音速**は **340 m/秒**である。

したがって, ある**振動数**の音の, そのときの**波長**が測定できれば, **音速**が計算できる!