

北村 俊樹

東京都立青山高等学校

〒150-0001 東京都渋谷区神宮前 2-1-8

Windows パソコンとマイクとスピーカーを使った、手軽で精度の良い音波の実験方法および実験用ソフトを開発した。音波の実験の中でパソコン計測を使うことで、①初めて実験が可能になる ②実験の精度が高くなる ③装置や実験方法が簡単になる ④演示実験の項目を生徒実験でできる、という項目を選び実験化した。さらに授業で実践した。ソフトはデジタルメモリスコープ、周波数カウンター、ファンクションゼネレータの機能を持ち、これと実験方法を工夫することで、開管の自由端反射と音速の測定、正確なうなりの発生、簡単にできる干渉実験、ドップラー効果の振動数測定、弦や管の共鳴での正確な振動数測定など、多くの実験を生徒に理解しやすい形で行えるようになる。キーワード 音波、パソコン計測、ファンクションゼネレータ、周波数カウンター、デジタルメモリスコープ

1. はじめに

高校物理で、音の分野は、生徒の興味を引きつける現象が多く、実験も多く行われている。その反面、準備や装置、進捗の関係などから、実際には実施されない実験も多い。一方、音の分野は、パソコンを使っての音の波形表示やFFTによる倍音への分解・正弦波の重ね合わせによる音声合成など、パソコン計測が効果を上げる分野であり、現在までに多くの実験や授業実践が行われてきた^{1) 2) 3) 4) 5)}。教員にとってパソコン計測は難しいというイメージがあるが、音の実験ではマイクとスピーカーとソフトさえあれば簡単にできる。また、パソコン計測を音の実験に利用すると、従来の実験に比べて簡単にできたり、パソコン計測で初めて可能になる項目が多く、積極的にパソコンを使うべきだと私は考える。

今回、音の実験の中で、パソコンを利用することで、

- 1) 初めて実験が可能になる。
- 2) 実験の精度が高くなる
- 3) 装置や実験方法が簡単になる
- 4) 演示だけでなく生徒自らが取り組める

ような実験を選び、実験法を考案し、授業で利用した。これらを報告する。

2. 計測ソフトの測定の原理と特徴

2.1 測定の原理

測定や音声合成の原理は、Windows のパソコン内蔵のサウンドカード (16bit AD および DA コンバータ) をソフトで制御し、音声信号の入出力を行うことである⁴⁾。マイクから入力した音をADコンバータでサンプリングし、時間の情報とともに波形のデータをメモリに格納する。一方、DAコンバータではメモリ上のデータを電

圧波形にしスピーカーを使って音として出力する。

このように、音のデータを時間とともに変位を表示したり、出力することができるので、コンピュータを計測装置として用いることができる。本報告で利用するソフトは、波形表示および振動数・周期測定用のデジタルメモリスコープソフトと、周波数発生および波形選択用のファンクションゼネレータソフトの2種類である。音の実験は、Windows パソコンとこの2種類のソフトおよびパソコン用のマイク、スピーカーを使って行う。

2.2 デジタルメモリスコープソフト

2.2.1 ソフト「とりコンブ」⁵⁾

マイクから入力した音をAD変換してメモリにデータを格納した後、波形表示を行う。メモリ上に時間の情報と変位の情報を持っているので、2ch のデジタルメモリスコープとして利用でき、現象を後で時間または変位で拡大したり解析することができる。



図1 「とりコンブ」での音速の測定

0.40m 離れて置いた2本のマイクの音の時間差を測定

音のサンプリングは左右 2ch とも 44.1KHz で行うので、音の実験で使う数 KHz 以下の音声では、高価なデジタルメモリスコープの機能を、パソコンで代用できる。また、画面上の 2 点を指示して時間（周期）および振動数の測定が可能で、手動周波数カウンタとして利用できる。例えば、ドップラー効果の音を録音して振動数の変化を直接計測できるし、マイク 2 本で音速も測定できる。

メモリスコープの機能の他、リアルタイムの波形表示、音のファイルへの保存、録音した音を波形や全体での位置を表示しながらスピーカーから再生する機能も持つ。北村のHP⁶⁾に登録しており、自由に利用できる。

2.2.2 ソフト JST版「振駆郎（しんくろう）」⁷⁾

このソフトは、北村監修の元に、2003 年度に科学技術振興事業団（現独立行政法人科学技術振興機構 JST）と共同で製作したパソコン計測用のソフト⁷⁾の 1 つで、上

のソフト「取りコンプ」および「振駆郎」⁴⁾をバージョンアップしたものである。操作画面は若干異なるが、実験に使う機能は同じである。理科ねっとわーく⁸⁾で「映像と音声分析・合成ソフトで学ぶ『音・波動教育用デジタル教材』」のソフトとして登録・公開されており、登録した教員がダウンロードできる。著作権は JST が持つが、教員が授業で利用することができる。ただし、教員の授業以外への使用には制限がある。

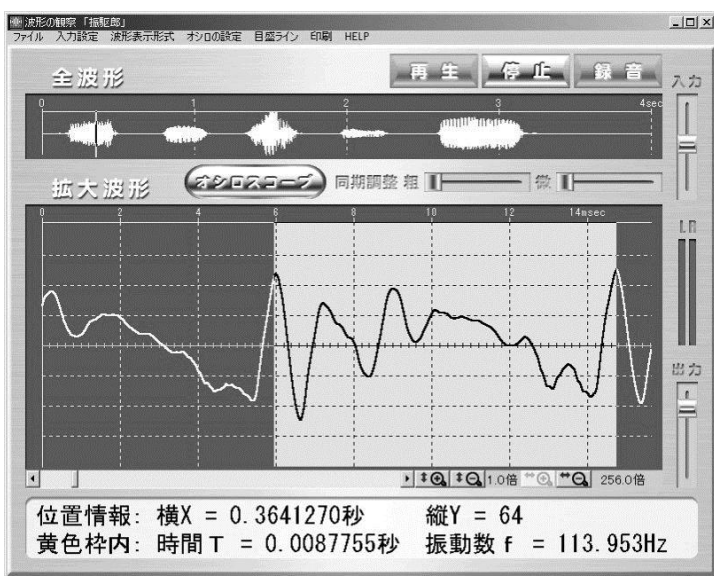


図2 JST版「振駆郎」での波形表示と振動数測定

2.3 ファンクションゼネレータソフト

2.3.1 ソフト「発音（はつね）」⁵⁾

メモリ上で合成した 2ch の波形を出力する。任意の波形と周波数を設定できるので、ソフト版 2ch ファンクシ

ョンゼネレータである。ただし、振動数は上限 20KHz で、実用周波数は 10KHz 以下であるが、音の実験や水波の実験には十分である。0.2Hz の値まで周波数を設定でき、また左右 2ch の位相、振動数を変えられる。

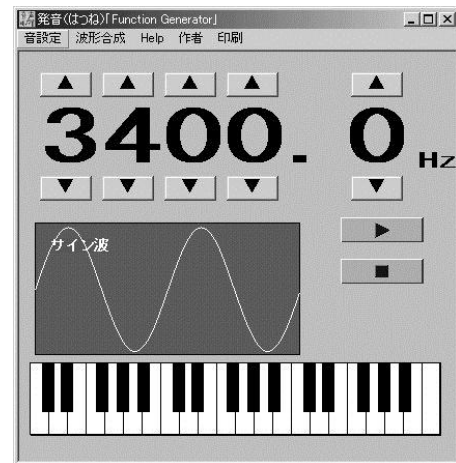


図3 「発音」の操作画面

左右 2ch から同位相の正弦波を出力している

例えば、左右の音をスピーカーから同位相や逆位相で出して音の干渉の様子を調べたり、うなりの実験では左右で異なる周波数を 0.2Hz 単位で正確に設定できる。また、スピーカーと組み合わせて、弦や気柱の共鳴周波数を 0.2Hz の精度で設定・測定することもできるし、水波や弦の振動の波動源としても利用できる。北村のHP⁶⁾に登録しており、自由に利用できる。

2.3.2 ソフト JST版「発音（はつね）」

2.3.1 の同名のソフトをバージョンアップしたものである。2.2.2 のソフト「振駆郎（しんくろう）」と同様に理科ねっとわーく内の同じ場所に登録・公開されている。



図4 JST版「発音」の操作画面

左右 2ch から逆位相の正弦波を出力している

2.4 実験装置

Windows パソコンでこれらのメモリスコープとファンクションジェネレータの2種類のソフトを使い音の実験を行う。入力装置にマイクロフォン、出力装置にスピーカーを使う。ノートパソコンの場合は、本体内蔵のマイクやスピーカーを使い、パソコン単体で実験が可能である。

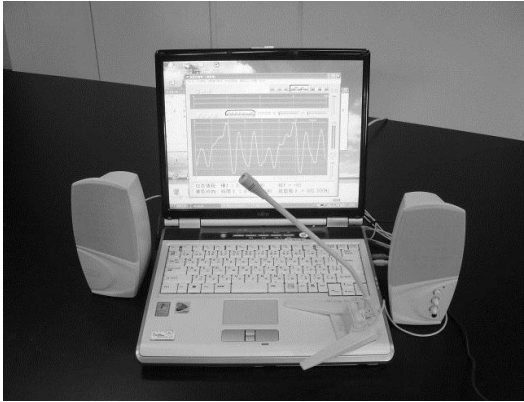


図5 Windows パソコンとマイク、スピーカー

3 計測ソフトを使った実験方法

パソコン利用で、1) 初めて実験が可能になる、2) 実験の精度が高くなる、3) 装置や実験方法が簡単になる、4) 演示だけでなく生徒自らが取り組めるようになるなどという観点から、以下の3.1～3.1.1のパソコン計測の実験方法を開発した。

なお、次の項目のパソコン計測実験については利点が多いが、研究例や実践報告等がすでに多くあるため、授業で行っているが項目名だけにとどめる。

- 1) 音の波形表示
- 2) FFT利用の倍音への分解
- 3) 正弦波の重ね合わせでの音声合成
- 4) マウス描画波形の音声出力
- 5) 2本のマイク時間差での音速測定

3.1 開管の自由端反射および音速測定

ソフト「とりコンプ」や「振駆郎」を使う。数10cm程度の開管の亚克力パイプを用意し、スタンドに水平に固定する。開管の片端のそばにマイクロフォンを置き、荷物梱包用のエアークャップをつぶして破裂音を出す。「振駆郎」でその音を録音すると、ピークが等間隔に

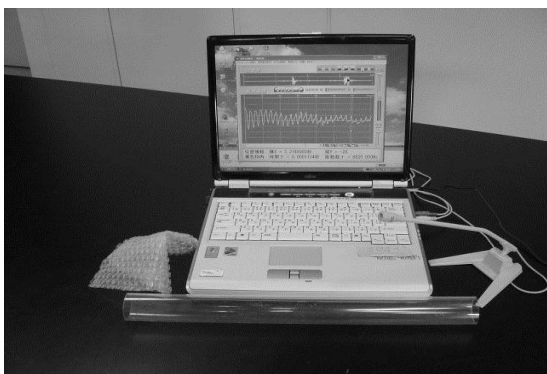


図6 自由端反射の実験装置

開管とマイク、エアークャップ（ぷちぷち）

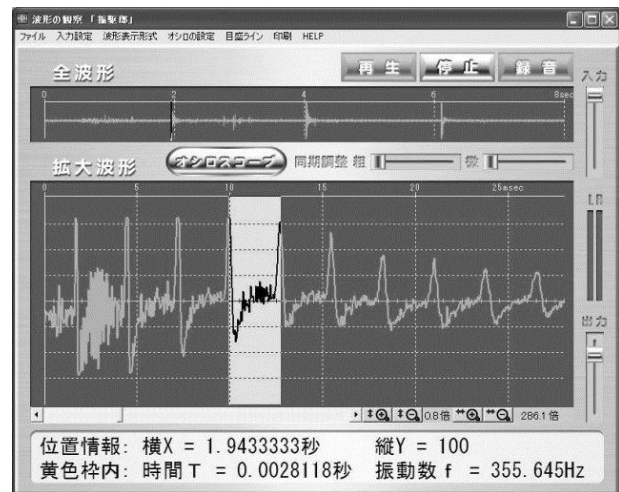


図7 0.50mの開管の自由端反射による音速の測定
エアークャップ破裂の反射音のピークの時間差を測定

並んでいるのが観察できる。これは、破裂音が開口部で自由端反射しながら往復しているため、マイクはマイク側の開口端の反射音をピークとしてとらえている。管長Lの往復距離2Lを、画面から測定したピーク間隔tで割れば音速が測定できる。音速の測定もさることながら、自由端で反射するのがよくわかる。なおこの方法は東京学芸大附属高校の川角先生に教えていただいた。

3.2 音叉や弦の振動数の測定

ソフト「とりコンプ」や「振駆郎」を使う。振動数未知の音叉の振動数や振動体の振動数を直接求められる。音を録音し、波形表示画面上で1周期分に相当する2点間をドラッグすると、その間の時間tとその逆数から計算した振動数fが数値で表示される。さらに正確に振動数を測定する場合は、10周期分をドラッグし、その値を1/10倍して周期や振動数を求めればよい。

3.3 うなりの振動数の測定

ソフト「とりコンプ」や「振駆郎」を使う。共鳴おんさの一方に輪ゴムを巻きうなりを発生させ、うなりの波形の時間的変化を観察する。

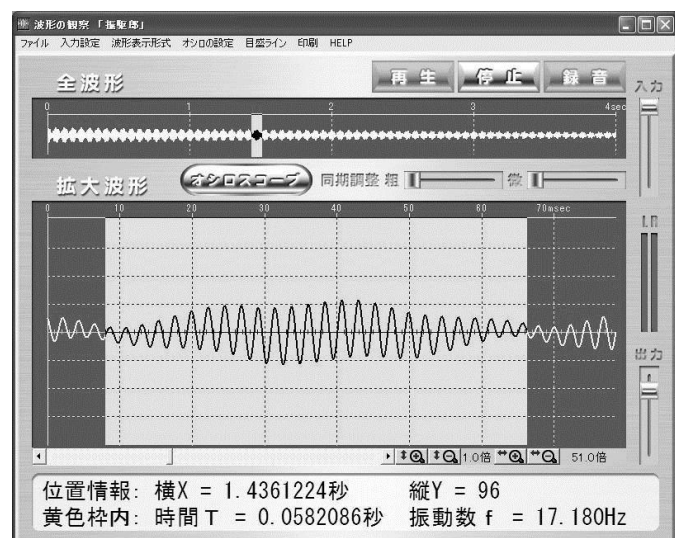


図8 2本の音叉によるうなりの測定

特に正弦波のうなりの0クロスの付近の様子を拡大して示す。また、毎秒あたりのうなりの回数を画面の波形の2点間の時間差から測定する。

3.4 ドップラー効果の振動数の測定

ソフト「とりコンプ」や「振駆郎」を使う。防犯ブザーを長い定規の先にガムテープで固定し音源とする。こうすると、定規を振った場合の先端の移動速度すなわち音源の速度が速くなる。マイクの前で防犯ブザーを静止した状態で1秒おいた後、マイクの前でバットを振るように速く左右に何回か往復させる。この音を録音し、動かしていない場合と動かした場合の振動数を、録音した波形の2点を指定して調べる。このとき、録音した音を再生して、マイクに近づく位置および遠ざかる位置を特定し、その付近での振動数を測定する。なお、波形の2点を指定し周期と振動数を求める場合、10周期分を指定し、振動数を出すと誤差が少なくなる。また、音源は数KHzのものを使うと振動数の変化が大きくて良い。

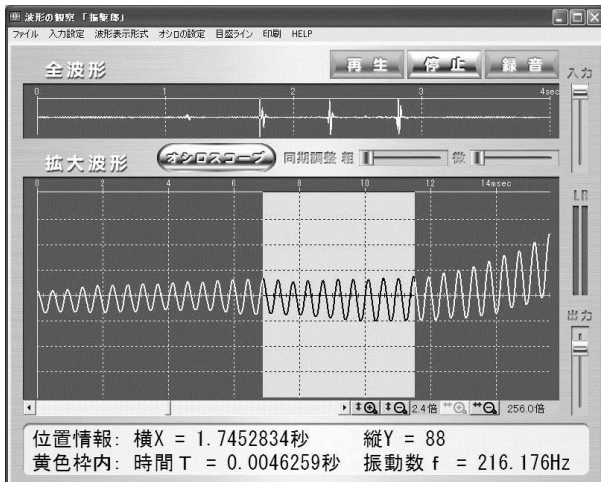


図9 音源が近づく場合の10周期分の振動数の測定
ブザーの振動数=2112Hz 測定振動数=2162Hz

また、ブザーをスタンドに固定し、長い定規の先にマイクを固定し、ブザーの付近で左右に振れば、観測者が移動する場合のドップラー効果の振動数も測定できる。

本方法は、ドップラー効果での振動数の変化を直接求める方法で、コンピュータ利用で初めて可能となる。近づく場合と遠ざかる場合の振動数を測定しその場で生徒に提示するだけでなく、ドップラー効果の音を繰り返し再生し耳で聞きながら、実際の振動数も示せることが大きな利点である。

3.5 音の干渉

ソフト「発音」を使う。数十cm程度離れたパソコンの左右2chのスピーカーから同位相の数KHzの音を出して、音の干渉の様子を耳で聞く。スピーカーと平行に移動するか、片耳をふさいで首をゆっくり振ると、干渉による音の強弱がわかる。例えば3.4KHzの時は波長は

10cm程度なので、よってその半分の $\lambda/2=5\text{cm}$ 程度、動くと、音の強弱がわかる。(図4)

2つのスピーカーからの音は、ソフト上で、同位相と逆位相とを簡単に切り替えられるので、位相の逆転による音の干渉の違いを耳で比較できる。もっと単純には、ノートパソコン内蔵の小型ステレオスピーカーを使っても、高い振動数であれば、音の干渉がわかる。

3.6 うなりの発生と波形の合成

ソフト「発音」を使う。左chを440Hz、右chを442Hzに設定し、左右のスピーカーから音を出す。左chの振動数を変えていき、うなりの振動数の変化を聞く。

うなりの回数を0.2Hz刻みで設定できるので、うなりの回数が右スピーカーの f_1 (Hz)と f_2 (Hz)の差であることが、正確に実演でき、公式を理解することができる。

また、もう一台のパソコンを使い「振駆郎」でうなりの振幅の変化を観察するのも良い。なお、「発音」ではうなりの合成波形(モノラル出力)表示ができるので、うなりの音の変化をパソコンで印刷することもできる。



図10 うなりの実験 左右異なる振動数を出力

3.7 クントの実験と共鳴の倍振動数の測定

ソフト「発音」を使う。透明なパイプ(開管)に数mm程度の発泡スチロールの小球を入れ、ラジカセと小さいスピーカーで共鳴させる。管内の疎密に応じて小球の分布が変わる。振動数を変えていき、倍振動の位置でも共鳴させる。このとき、共鳴の際の、振動数が正確に表示されているので、各共鳴周波数が基本振動数に対し、正確に整数倍になっていることが観察できる。

3.8 気柱共鳴装置の音源として(その1)

「気柱共鳴装置での音叉の置き換え」

ソフト「発音」を使う。教科書で取り上げられている縦型の水だめ付きガラス管の気柱共鳴装置(閉管の共鳴)がある。これは音叉を音源として実験を行うが、これをパソコン発生 of スピーカーの音で置き換える。おんさの

かわりにイヤホンや小型スピーカーから音を出力して、共鳴用音源として使う。単純な置き換えであり、振動数を固定し、水面を変化させて第1, 2共鳴点を探す。共鳴用に使うスピーカーはボックス入りよりも、むき出しの方が共鳴点がよくわかる。音叉の場合と比較して、音量が調節でき、振動数が正確にわかっていること、周波数安定度も良い点が大きな利点である。周波数は各班ごとに異なる値で設定でき、他の班のおんさの音で共鳴点がわかりにくくなることが避けられる。

3.9 気柱共鳴装置の音源として(その2)

「水位固定で振動数を変化させる」

その1の共鳴装置とパソコン出力のスピーカーの音を使うが、水面の位置は固定し、スピーカーからの音の振動数を変えていき、共鳴点を探す。振動数が正確に設定でき、基本振動数の3倍、5倍の点で共鳴することがわかる。生徒にとっては、この方が水面を上下よりも操作が単純で共鳴点も調べやすい。また、振動数と音速 $V=f\lambda$ の関係から、共鳴するときの管内の振動の様子が実感あるいは類推しやすい。

ただし、つまみ式の発振器に比べ、パソコンの振動数変化は操作がしにくい。もしも、低周波発振器が班の数だけ用意できるならば、ソフト「発音」にこだわる必要はなく、低周波発振器で同じ方法で実験を行う方が操作性の上で簡単である。このとき、低周波発振器の正確な振動数は「とりコンブ」や「振駆郎」で測定する。

3.10 気柱共鳴装置の音源として(その3)

「開管での気柱共鳴実験」

数10cm~1m程度の開管の亚克力パイプ(またはガラス管)を用意し、片端からイヤホンあるいはスピーカーでパソコンからの音を入れ、振動数を変化させて共鳴周波数を測定する。基本振動数の2倍、3倍の点で共鳴することがわかる。3.9(その2)の場合と同様、振動数と音速 $V=f\lambda$ の関係から、共鳴時の管内の振動の様子が実感あるいは類推しやすい。

なお、低周波発振器が班の数だけ用意できる時は、パソコンよりそちらを使った方が簡単である。このときも、低周波発振器の正確な振動数は「とりコンブ」や「振駆郎」で測定する。

3.11 弦の固有振動数

ソフト「発音」を使う。スピーカにフィルムケースの底を両面テープではりつけ、ふた部分に①直径数mmのプラスチック棒を付けて、弦用の振動源とする。

パソコンからの音声出力をパソコン用アンプ付きスピーカーやラジカセ等で増幅し、振動源付きスピーカを駆動する。弦に張力を加え、振動源で一端を振動させる。



図11 ラジカセ(増幅器)と弦用振動源

腹が一つの定常波ができる時の発振周波数を求める。続いて振動数を変化させていき、腹が2個、3個の倍振動を作り、そのときの振動数を調べ、基本振動数との比を求める。この場合も、気柱共鳴実験の場合と同様、低周波発振器があるならば、振動源はそちらにし、周波数の正確な測定を、「とりコンブ」や「振駆郎」で行う。

4. 授業での生徒の反応や理解

パソコンの台数の関係から実験は演示実験で行った。

4.1 開管の自由端反射および音速測定

エアーキャップの破裂音での反射音のピークとピークの時間差と管の長さから、音速 $V=3.5\times 10^2\text{m/s}$ とでた。2番目以降のピーク間の時間差がほぼ等しく、速度がほぼ音速であることが実験より得られた。これより、開管の両端で反射していることが確認できた。

生徒は開管の両端で自由端反射するという授業の事前の説明を不思議がっていたが、実際に自由端反射をしている様子を観察し、しぶしぶ納得し考えを修正した。これは、ウェーブマシンで自由端反射が生ずるのを見て納得するのと同じ反応である。

4.2 音叉や弦の振動数の測定

授業では、簡単な周波数測定法として理解している。また、周期の測定の場合の開始点と終点は変位0の点のみならず、変位最大や特徴的な点にすることも理解した。

4.3 うなりの振動数の測定

生徒は、うなりの振幅の変化(包絡線の変化)の時間表示が周期的に変化していることと、包絡線内部にもとの振動数の波形があるということに興味を持ったり、教科書の説明と同じ波形が見られて不思議がっていた。なぜ、このように波形が変化するかは、別のシミュレーションソフトを使って説明を行った。

4.4 ドップラー効果の振動数の測定

演示実験を生徒の目の前で行って振動数の変化を調べ

た。振り回しているの、音源／観測者が、近づく／遠ざかる速度が一定ではないので、測定点によりドップラー効果による振動数が一定値とはならない。しかし、振動数が確かに変化していること、音の変化が音の強弱の変化でないことを理解できた。また、ブザーの振動数を低くすることで、ドップラー効果による振動数の変化が小さくなることも確認できた。

4.5 音の干渉

授業では高い振動数を使ったので、生徒が着席位置その場で、音の干渉による強弱の変化を耳で確認することができた。振動数をさらに上げると、強弱の位置の間隔が狭くなること、逆位相にするとその場で強弱が変化することも確認できた。水波の干渉同様に、目に見えない音でも自分の耳で聞いて確認できたことで、音も干渉することが理解できた。また、ノートパソコン内蔵のスピーカーを使ったので、何人かの生徒が同じ実験を家でもできるということで興味を示した。

4.6 うなりの発生と波形の合成

実際に左スピーカーから 440Hz、右スピーカーから 441Hz と画面に出して、音を出力すると、耳で 1 秒間に 1 回のうなりが生ずることより、うなりが異なる近い振動数の時に発生すること、振動数の差がうなりの回数になるということを確認できた。画面表示の振動数の差が、耳でもうなりの回数として確認できるのが特徴である。

4.7 クントの実験と共鳴の倍振動数の測定

気柱の固有振動が基本振動の確かに整数倍になっていることを、振動数の比から確認できた。

4.8 気柱共鳴装置での音叉の置き換え

音叉の場合と異なり、音量を自由に換えられるので、共鳴点の位置が探しやすい。また、共鳴位置で音量を上げることで、大きな共鳴音を聞くことができる。音叉を用いた気柱共鳴の生徒実験後に、前に見せたスピーカーによる音叉の置き換え実験について聞くと、スピーカーの法が共鳴点がわかりやすいと答えている。

4.9 水位固定で振動数を変化させる気柱共鳴

口径の小さいスピーカーを使って水位を 20cm に固定し共鳴振動数を調べた。共鳴振動数が、基本振動数の奇数倍になっていることが確認できた。

4.10 開管での気柱共鳴実験

長さ 40cm のアクリルパイプを用い、口径の小さいスピーカーを使って共鳴振動数を調べた。共鳴振動数が、基本振動数の整数倍になっていることが確認できた。

4.11 弦の固有振動数

未実施

5. おわりに

本実験法を使えば、従来は大変だった音の実験が、マイクとスピーカとソフトで簡単かつ精度良くできるようになる。また、開管で確かに自由端反射がおこることを確認したり、弦や気柱の共鳴振動数が正確に基本振動の整数倍になっていることが明示できるなど、多くの音の実験を生徒に理解しやすい形で行えるようになる。

何でもパソコン計測すればよいとは全く思わないが、従来の実験に比べ簡単にできたり、パソコン計測ではじめて可能になる、また生徒の理解しやすい実験ができる項目では、積極的にパソコンを使うべきだと考える。

一方、今回は授業の進捗の関係やパソコンの台数確保ができなかったため、生徒実験までは行かなかったが、生徒実験にもぜひ取り組みたいと考えている。

なお、本報告で取り上げたソフトは、生徒も、著者の HP や理科ねっとわーく「一般公開版」⁹⁾ でダウンロードでき、生徒の自宅のパソコンでも実験が可能である。

引用文献

- 1) 平田邦男「パソコンによる物理計測入門」(1985) 共立出版
- 2) 天良和男・矢野越夫「はじめてのパソコン計測・制御」(1987) 東京電機大学出版局
- 3) 北村俊樹「授業に使える音波の演示実験システムの開発」物理教育 37-3 (1989) 204-207.
- 4) 北村俊樹「Windows で知る音声と運動の実験室」(1995) 森北出版
- 5) 北村俊樹「コンピュータとマイク・スピーカを用いた音の実験」日本理化学協会研究発表論文集 (2000) 36-39
- 6) 北村俊樹 HP : たまきち's HomePage
<http://www.bekkoame.ne.jp/~kitamura/>
- 7) 北村俊樹「映像と音声分析・合成ソフトで学ぶ『音・波動教育用デジタル教材』」日本理化学協会研究発表論文集 (2003) 66-69
- 8) 理科ねっとわーく (<http://www.rikanet.jst.go.jp>)
教員用ネットで独立行政法人科学技術振興機構 JST が運営。「振駆郎」「発音」は「映像と音声分析・合成ソフトで学ぶ『音・波動教育用デジタル教材』」の中にある。
- 9) 理科ねっとわーく一般公開版 (<http://rikanet2.jst.go.jp/>)
8) と異なり一般の人や生徒が利用できる。