

高等学校における教科指導の充実

理 科
《 物理領域 》

学ぶ手応えを実感できる授業を目指して
[音 波]

栃木県総合教育センター
平成21年3月

ま え が き

総合教育センターでは、平成17年度より、「高等学校における教科指導の充実に関する調査研究」に取り組んでいます。この調査研究の目的は、基礎・基本の確実な定着を図るための授業改善を目指して、教科指導の在り方について研究し、その成果を普及することにより、生徒の学力の向上に資することにあります。

教育課程実施状況調査や学力に関する国際的な調査では、日本の児童生徒の学力の状況や学習に対する意識などが明らかにされ、文部科学省等からも学力向上のための様々な対策が打ち出されたり提言がなされたりしています。

平成19年12月に公表された、2006年のOECD生徒の学習到達度調査（PISA）では、科学的リテラシーをはじめ、数学的リテラシー、読解力のそれぞれについて問題点が指摘されています。

また、平成20年12月には、国際数学・理科教育動向調査の2007年調査（TIMSS2007）の結果が公表されました。この調査では、学力低下に歯止めがかかったという分析がある一方で、パターン化された指導の弊害とも見られる結果も一部に見られ、思考力の育成に課題があることも指摘されています。

小学校と中学校の新学習指導要領が平成20年3月に公示されたのに続き、21年3月には、高等学校の新学習指導要領が公示される予定です。高等学校においては、数学と理科が24年度から、国語、地理歴史、公民、外国語が25年度から学年進行で実施されます。小・中学校、高等学校とも、今回の改訂の主な改善事項として、「言語活動の充実」、「理数教育の充実」が示されました。これらは、先に挙げた各種調査で、思考力・判断力・表現力等を問う読解力や記述式の問題、知識・技能を活用する問題に課題が見られたことなどに対する改善策でもあります。

本調査研究においては、今年度、国語科、公民科、数学科、理科、外国語科（英語）の各教科で、各種調査の結果から指摘されている課題と教育界の動向を踏まえ、その解決を図るための授業改善について取り組みました。研究の成果をまとめた本冊子を有効に御活用いただければ幸いです。

最後に、調査研究を進めるにあたり、御協力いただきました研究協力委員の方々に深く感謝申し上げます。

平成21年 3 月

栃木県総合教育センター所長

鈴 木 健 一

目 次

研究の概要	1
実験Ⅰ「開管にできる定常波について調べよう」	2
実験Ⅱ「管楽器を作ってみよう」	5
実験Ⅲ「風船を使って音の屈折を調べよう」	8
実験Ⅳ『大人には聞こえない着信音』について調べよう	13
実験Ⅴ「ドップラー効果を利用してF-1カーのスピードを測定しよう」	15
実験Ⅵ「超音波を聴いてみよう」	19

※本資料は、栃木県総合教育センターのホームページ「とちぎ学びの杜」内、「調査研究」と「教材研究のひろば」のコーナーにも掲載しています。

「とちぎ学びの杜」 <http://www.tochigi-edu.ed.jp/center/>

研究の概要

平成17年度高等学校教育課程実施状況調査（物理Ⅰ）の質問紙調査の結果によると、「音と光」の分野については、7割以上の教師が「生徒は興味を持ちやすい」と考えているが、「好きだった」と答えた生徒は3割にも満たない状況であり、教師と生徒の意識に大きな違いがみられた。また、ペーパーテスト調査の結果をみると、「音」の分野からは、ドップラー効果に関する問題と気柱の定常波に関する問題の2問が出題されたが、いずれも通過率が設定通過率を大きく下回った。特に、ドップラー効果に関する問題は、緊急自動車の通過に伴う警笛音の音程の変化を問う基礎的な問題であり、教科書で学習した内容と日常の体験と照らし合わせて理解することが不十分な生徒が多いと考えられる。

これらの状況を改善するには、学習の過程で生徒の興味・関心を高めるような展開の工夫や、学習内容を身の回りの事物・現象などと結びつけて理解を深めるような指導の工夫が望まれる。

新学習指導要領においても、原理や法則の理解を深めるための科学的な体験を充実させることが求められている。

以上のことを踏まえ、本研究では「音」の分野における学ぶ手応えを実感できる授業を目指し、次の六つの授業展開例を作成した。いずれも比較的、手にしやすい素材を用いて実験を行うものであり、生徒の実態に合わせ、これらを適宜組み合わせ活用していただきたい。

実験Ⅰ「開管にできる定常波について調べよう」

スピーカーからの音に共鳴しているアクリルパイプの内部の様子を、小型コンデンサーマイクとオシロスコープで観察する。

実験Ⅱ「管楽器を作ってみよう」

印刷機のマスター芯やゴムホースを用いて簡単な管楽器を作って演奏し、設計通りの音階の音が出せるかどうかを確かめる。

実験Ⅲ「風船を使って音の屈折を調べよう」

ヘリウム、二酸化炭素、HFC-152（エアードスターに用いられる）等のガスを封入したゴム風船が音を屈折させる様子を、騒音計を用いて観察する。

実験Ⅳ『『大人には聞こえない着信音』について調べよう』

振動数が高いため、ある年齢以上の人には聞こえないとされている携帯電話の着信音について、フリーのFFTソフト等を利用して調べる。

実験Ⅴ「ドップラー効果を利用してF-1カーのスピードを測定しよう」

F-1レースの中継に含まれるエンジン音の振動数が、ドップラー効果によって変化することを利用して、F-1カーの速さを概算する。

実験Ⅵ「超音波を聴いてみよう」

超音波を可聴化する装置を用いて、身の回りで発生している超音波について調べるとともに、簡単な干渉の実験を行う。

〈研究協力委員〉

栃木県立足利高等学校 教諭 白井 康 隆

〈研究委員〉

栃木県総合教育センター研修部 副主幹 手塚 貴 志

実験Ⅰ 「開管にできる定常波について調べよう」

1 実験のねらい

アクリルパイプの一端にスピーカからの音を入射させ、共鳴が起こっているときの様子を、他端からパイプ内に入れた小型コンデンサーマイクの出力をオシロスコープで観察することによって調べる。

2 準 備

- (1) アクリルパイプ (長さ 1 m、内径 3 cm)
- (2) コンデンサーマイク (6φ または 10φ)
- (3) 電解コンデンサー ($1.0 \sim 10 \mu\text{F}$)、電気抵抗 ($500 \Omega \sim 1 \text{ k}\Omega$)、直流電源 (1.5 ~ 15 V)
- (4) 木製の棒 (アクリルパイプの内径に対して十分細いもの)
- (5) オシロスコープ
- (6) 低周波発振器、オーディオアンプ、スピーカー
- (7) 温度計

3 実験の手順

- (1) アクリルパイプ内の気温を測定し、その値より音速 V を計算する。
- (2) アクリルパイプの長さ L と (1) で求めた V より、開口端補正を無視したときのアクリルパイプ (開管) の基本振動数、2 倍振動数、3 倍振動数をそれぞれ求める。
- (3) 低周波発振器の信号 (正弦波) をオーディオアンプで増幅し、アクリルパイプの管口に固定したスピーカーから出力する。
- (4) 低周波発振器の振動数を変化させ、共鳴が起こって音が大きく聞こえるときの振動数を周波数カウンターで読むことによって、基本振動数、2 倍振動数、3 倍振動数を測定する。
- (5) (2) と (4) の結果を比較する。また、(4) の結果より開口端補正の値を計算する。
- (6) 低周波発振器の振動数を調節することにより、アクリルパイプを 2 倍振動または 3 倍振動で共鳴させておき、小型コンデンサーマイクをアクリルパイプ内に入れて、その出力をオシロスコープで観察する。マイクをパイプ内で移動させ、オシロスコープに現れた波形の振幅が最大となる位置に付箋をはり、その位置が定常波の節であることを確認する。
- (7) 定常波の節の間隔を測ることによって、波長 λ を求めるとともに、その値を用いてパイプの両端付近の定常波の腹が、開口端からどれだけはみ出しているかを求め、(5) の結果と比較する。

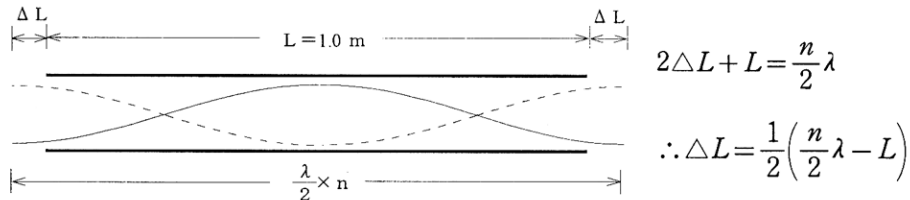
4 実験結果の例

(1) アクリルパイプ内の音速 V

アクリルパイプ内の気温 t は、 18.6°C であった。したがって、パイプ内の音速 V は、

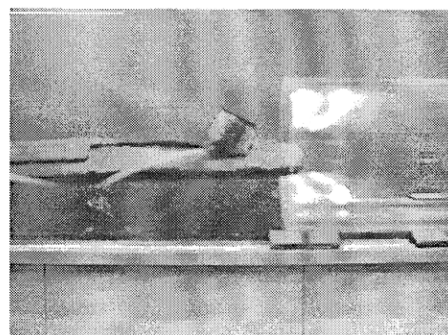
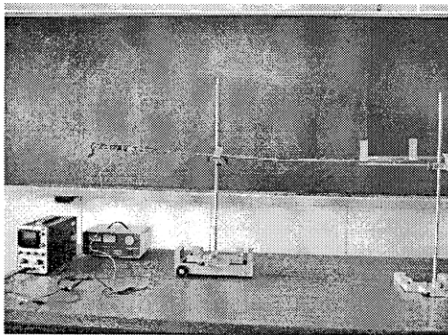
$$V = 331.5 + 0.6t = 331.5 + 0.6 \times 18.6 = 342.7 \text{ m/s}$$

(2) 固有振動数の実測値 f と、波長 λ 及び開口端補正 ΔL

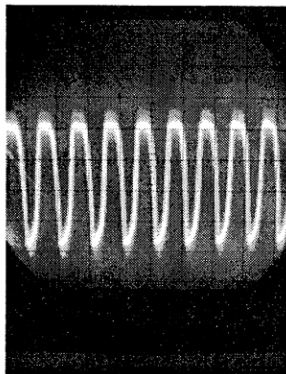


節の数 n	振動数 f [Hz]	$\lambda = \frac{V}{f}$ [m]	$\Delta L = \frac{1}{2}\left(\frac{n}{2}\lambda - L\right)$ [m]
1 (基本振動)	163.8	2.092	0.023
2 (2倍振動)	325.1	1.054	0.027
3 (3倍振動)	490.3	0.6989	0.024

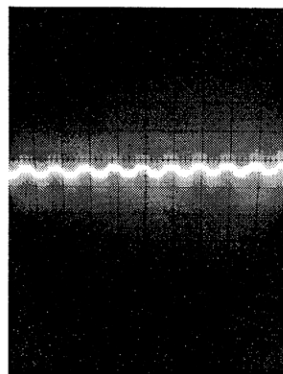
(3) オシロスコープによる観察



定常波の節での波形



定常波の腹での波形



縦波の定常波では、節の部分の密度変化が最大で、マイクは、気圧の変動を電圧の変動に変えるため、節の位置で電圧の振幅は最大となる。

一方、腹の部分は、媒質の振動の振幅は最大であるが、密度変化はなく、オシロスコープの波形の振幅は最小となる。

(4) コンデンサーマイクを用いた、開口端補正の実測値 (2倍振動のとき)

節の位置に貼り付けた付箋の間隔 a は、 $a = 0.520\text{m}$

開口端に最も近い節と開口端との距離 b は、 $b = 0.235\text{m}$

したがって、開口端補正の実測値は、

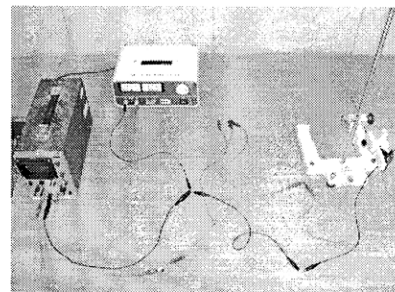
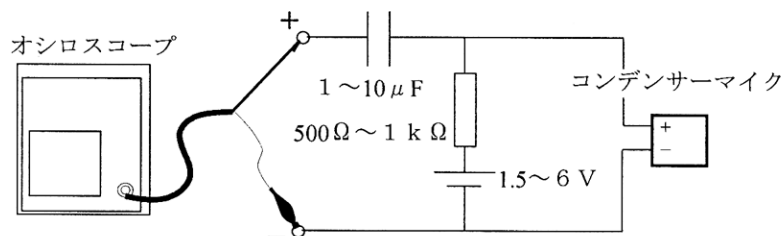
$$\frac{a}{2} - b = \frac{0.520}{2} - 0.235 = 0.025 \text{ m}$$

となり、マイクが大きさをもつことによる誤差や、読み取り誤差があるはずであるが、上記 (2) の ΔL の平均値 $= 0.0247\text{m}$ とほぼ一致している。

5 実験装置について

(1) コンデンサーマイク (正式にはエレクトレット・コンデンサ・マイクロフォン)

コンデンサーマイクの中にはFETが入っており、それを動作させるために電源 (一般的には1.5V～6V) が必要である。また極性があり、裏側の2端子のうち、金属ケースと接触している方がマイナス極になっている。

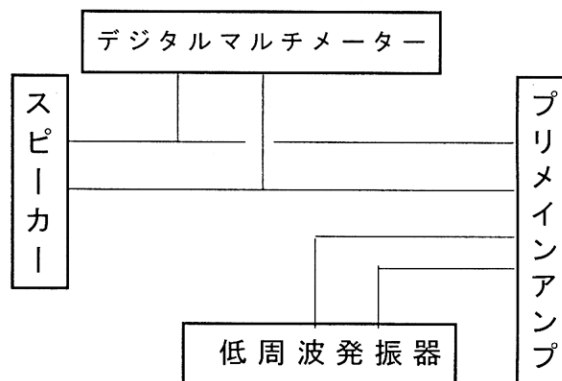
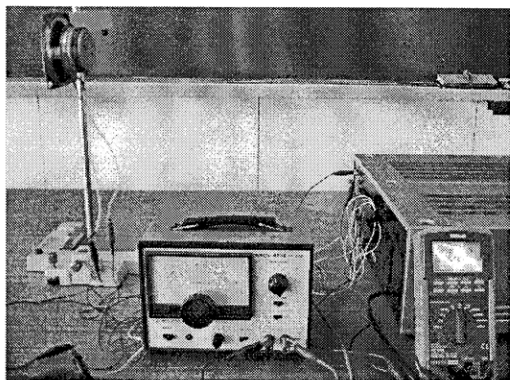


(2) 音源と周波数カウンター

本実験では、低周波発振器の正弦波信号をオーディオ用のプリメインアンプで増幅し、8Wのスピーカーから出力した。

※プリメインアンプはインターネットのオークションで、15000円で手に入れたもの。

※周波数カウンターは学校になかったため、周波数測定のできるデジタルマルチメーターで代用した。



低周波発振器がなくても、独立行政法人科学技術振興機構JSTの「理科ねっとわーく」から、ファンクションジェネレータソフト「発音 (はつね)」をダウンロードすることにより、Windowsパソコンを低周波発振器として用いることができる。「発音」は、任意の波形と振動数の信号を左右2chから出力でき、振動数は0.1Hz単位でch毎に設定できるため、「うなり」や「交流回路」の実験等、幅広く利用することが考えられる。なお、このソフトは、「理科ねっとわーく」に登録した教員であれば無料で利用できる。

理科ねっとわーく <http://rikanet2.jst.go.jp/index.php>

実験Ⅱ 「管楽器を作ってみよう」

1 実験のねらい

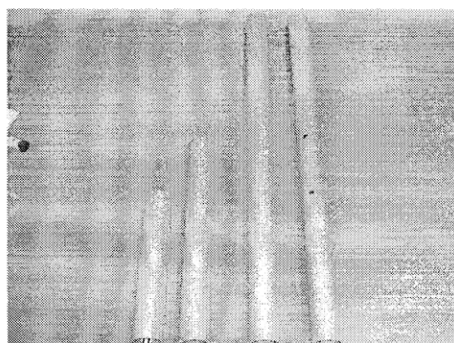
身近な材料を用いて簡単な管楽器を製作することを通し、気柱の共鳴に関する理解を深める。

2 準備

- (1) 印刷機用マスターの空芯（4本）
- (2) 低周波発信器、オーディオアンプ、スピーカー
- (3) 周波数カウンター
- (4) コルクボーラー
- (5) ゴムホース
- (6) プラスチック製の漏斗（100円ショップで購入）
- (7) トランペット練習用マウスピース（楽器店で購入、1個220円程度）

3 実験の手順

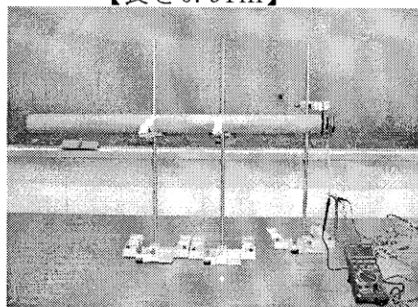
- (1) 印刷機用マスターの空芯を3本用意し、その内1本は長さが2分の1に、別の1本は長さが3分の1になるように切断する。
- (2) 上記(1)の3本の空芯について、低周波発信器の正弦波信号をアンプで増幅して、管口に固定したスピーカーから空芯内部に向かって出力し、低周波発信器の振動数を変化させて共鳴点を探る。振動数を最低の値から徐々に大きくしていき、共鳴が起こって音の大きさが最大になったときの振動数を周波数カウンターで読むことにより、それぞれの基本振動数を測定する。また、その結果から、3本の空芯の基本振動数の比がほぼ1:2:3になっていることを確認する。
- (3) 4本目の空芯を用意し、コルクボーラーを用いて、空芯の中央の位置及び一端からの距離が空芯全体の長さの3分の1の位置に、それぞれ穴を開ける。
- (4) 上記(3)で2つの穴を開けた空芯の、中央でない方の穴に近い方の管口にスピーカーを固定して(2)と同様の実験を行い、以下の①、②、③について、それぞれの基本振動数を測定する。また、それらの比が、(2)と同様に、ほぼ1:2:3になっていることを確認する。
 - ①両方の穴をビニルテープで塞いだとき
 - ②スピーカーに近い方の穴のみをビニルテープで塞いだとき
 - ③どちらの穴も塞がなかったとき
- (5) 2つの穴を開けた空芯の、中央でない方の穴に近い方の管口にトランペット用のマウスピースを、反対側の管口にプラスチック製漏斗をそれぞれ取り付け、マウスピースを口で吹くことによって音を出す。2つの穴を指で閉じたり開いたりして、音程が変わることを確認する。
- (6) ゴムホースの一端にリコーダーの先端部分を、他方にプラスチック製漏斗をそれぞれガムテープ等で取り付ける。リコーダーの歌口からの距離が適当な場所に穴を開けていき、簡易ホルンを作成して、予想通りの音階の音が出ることを確認する。



4 実験結果の例（長さ0.91mの空芯を使用）

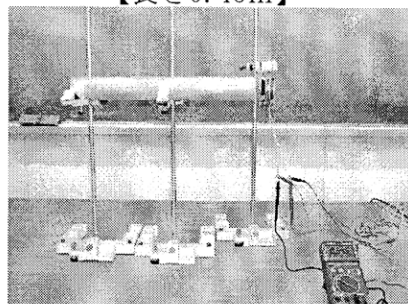
（1）長さの異なる円筒の基本振動数測定

【長さ0.91m】



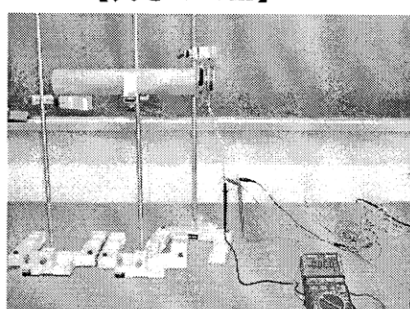
基本振動数 177.5Hz

【長さ0.46m】



基本振動数 344.8Hz

【長さ0.30m】



基本振動数 531.8Hz

開口端補正を無視すれば、開管の基本振動数 f は、円筒の長さ L と音速 V を用いて、

$$f = \frac{V}{2L}$$

であり L に反比例するから、これらの振動数の比は、

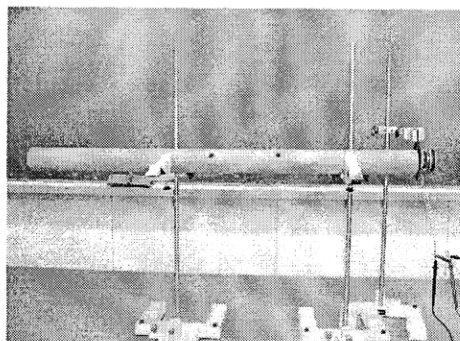
$$\frac{1}{0.91} : \frac{1}{0.46} : \frac{1}{0.30} = 1 : 2.0 : 3.0$$

となるはずであるが、実測値は、

$$178 : 345 : 532 = 1 : 1.9 : 3.0$$

であった。

（2）2つの穴を開けた空芯（長さ0.91m）の基本振動数測定

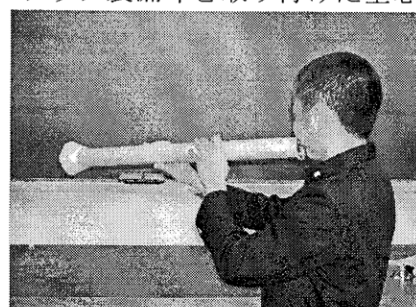
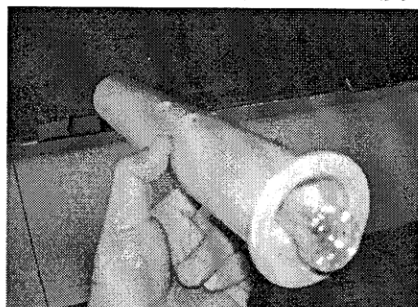


2つの穴の位置は、写真のスピーカー側の管口から測って、0.30m及び0.46mであった。結果は以下の通りである。

全ての穴を塞いだとき	180Hz
右側の穴のみを塞いだとき	359Hz
どちらの穴も塞がなかったとき	561Hz

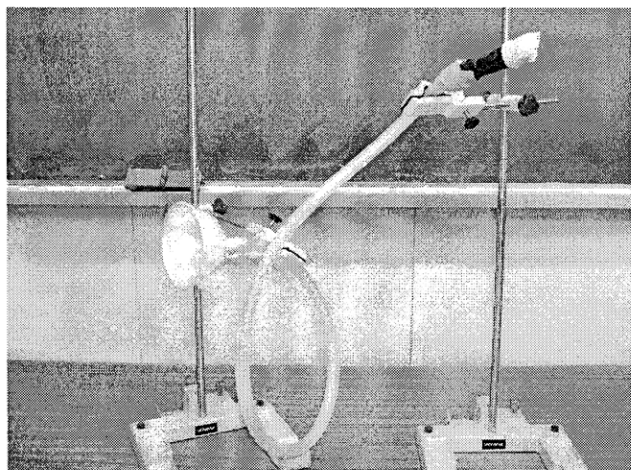
（基本振動数の比 $180 : 359 : 561 = 1 : 2.0 : 3.1$ ）

（3）トランペット用マウスピース及びプラスチック製漏斗を取り付けた空芯



穴を押さえてマウスピースを吹くと、トランペットに似た大きな音が出て、押さえた指には気柱の振動が伝わってくる。唇を調節すれば倍音さえも出せるが、演奏者がマウスピースに慣れていないと音を出すのは難しい。写真の生徒は音楽部に所属し、トランペットを担当しているため、見事な音色で様々な音階の音を出すことができた。

(4) ゴムホースを用いた簡易ホルンの製作



写真のように、リコーダーの先端部分を用いれば、マウスピースに慣れていない生徒でも、容易に音を出すことができる。

また、ゴムホースの他端にプラスチック製の漏斗を取り付けることによって、より大きな音を出すことができる。これは、漏斗を取り付けることによって、音がゴムホース内部から外部の空間に出るときの音響インピーダンスの整合が良くなり、境界部の反射が減るためと考えられる。

【基本振動の音階と穴の位置について】

リコーダーの歌口から任意の穴までの、ホースに沿った距離を L とすると、その途中に穴がないか、あっても閉じられている場合の基本振動数 f は、マスターの空芯を用いた場合と同様に、

$$f = \frac{v}{2L}$$

で表される。

また、様々な音楽で最も一般的に用いられている音階である平均律は、1オクターブの振動数間隔を、12段階の等比数列で分割したものであるため、その公比を r とすると、

$$r^{12} = 2 \quad \therefore r = 2^{\frac{1}{12}} \approx 1.06$$

したがって、音階が半音上がると振動数は約1.06倍となる。

これらを基に、リコーダーの歌口から適切な位置に穴を開けることによって、好きな音階を出せる簡易ホルンを作成できる。

実験Ⅲ 「風船を使って音の屈折を調べよう」

1 実験のねらい

空気と音速の異なるガスを封入した風船が、音を収束させたり発散させたりする様子を調べることにより、音の屈折に関する理解を深める。

2 準備

(1) ゴム風船または紙風船

(2) 二酸化炭素、HFC-152a、ヘリウムが封入されたボンベ

(3) 騒音計（デジタルマルチメータ）

(4) 低周波発信器、オーディオアンプ、スピーカー



(二酸化炭素、ヘリウムのボンベと風船) (騒音計とHFC-152aが成分のエアーダスター)

3 実験の手順

(1) 低周波発振器からの正弦波信号をオーディオアンプで増幅して、スピーカーから出力し、その音を空気の入った風船に入射させる。風船の反対側に騒音計を置き、風船を透過してきた音の大きさを計測できるようにしておく。

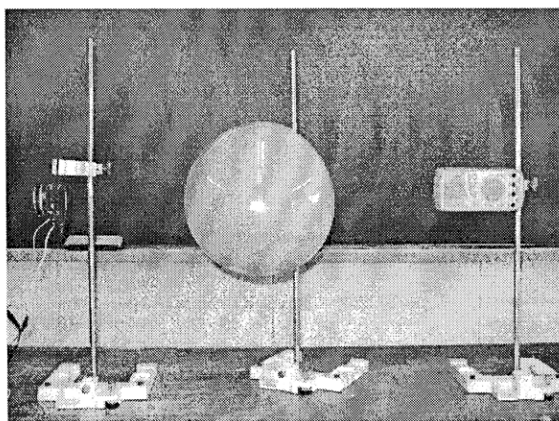
(2) 騒音計の位置を、水平方向、鉛直方向に移動させながら音の大きさを測定し、その結果をグラフに表す。

(3) 風船の中の気体を、次の①、②、③に変え、上記(2)と同様の実験を繰り返す。

①二酸化炭素

②ヘリウム

③HFC-152a (エアーダスター等に用いられているガスで、正式名称は1,1-ジフルオロエタン)



4 原理

図1のように、気体Ⅰと気体Ⅱが均等な厚みのゴム膜で隔てられていて、音波が気体Ⅰからゴム膜に入射角 θ_1 で入射するとき、音波は気体Ⅰとゴム膜の境界面及びゴムと気体Ⅱの境界面で屈折する。この2回の屈折における屈折角を θ' 及び θ_2 とし、気体Ⅰ中の音速を V_1 、ゴム膜中の音速を V' 、気体Ⅱ中の音速を V_2 とすると、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta'} = \frac{V_1}{V'}, \quad \frac{\sin \theta'}{\sin \theta_2} = \frac{V'}{V_2}$$

これらの両辺をかけると、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

したがって、 θ_1 と θ_2 の関係は、ゴム膜の影響を受けず、 V_1 と V_2 の比によって決まることが分かる。

このことから、図2のように、音波が空気からガス風船（球形と見なす）に入射し、再び空気中に出て行くときの振れの角 δ を定めると、

$$\begin{aligned} \delta &= (\theta_1 - \theta_2) + (\theta_1 - \theta_2) \\ &= 2(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned}$$

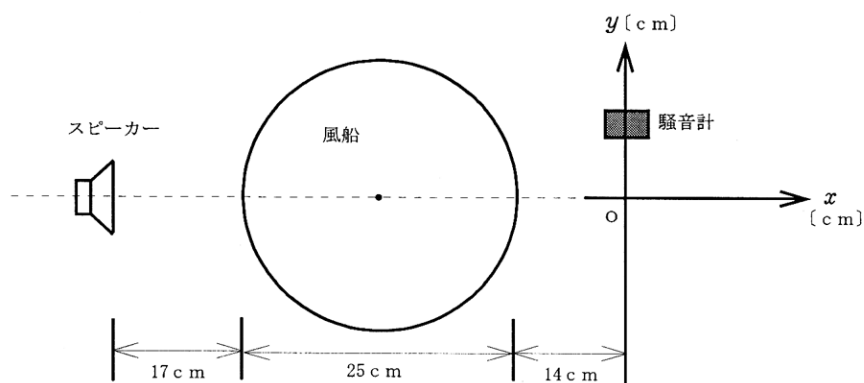
また、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

より、 $V_1 > V_2$ のときは、 $\theta_1 > \theta_2$ であり、 $\delta > 0$

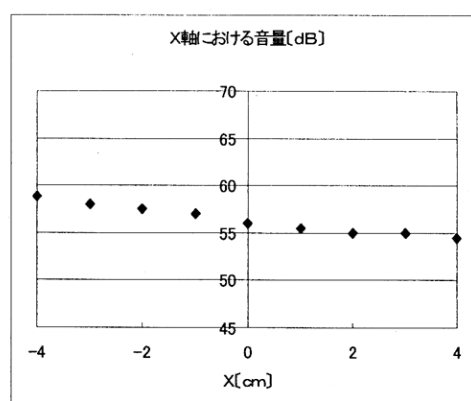
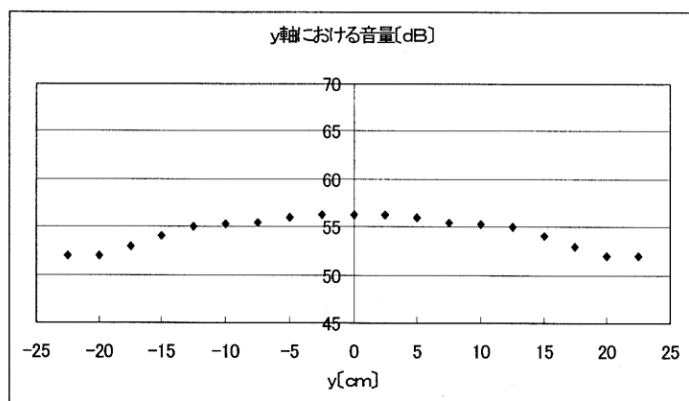
したがって、風船に封入したガス内の音速が、空気中の音速より小さい場合、風船は、光に対する凸レンズのように、音を集める働きがあることが分かる。逆に、風船に封入したガス内の音速が、空気中の音速より大きい場合は、風船は光に対する凹レンズのように、音を発散させるように働く。

5 実験結果の例

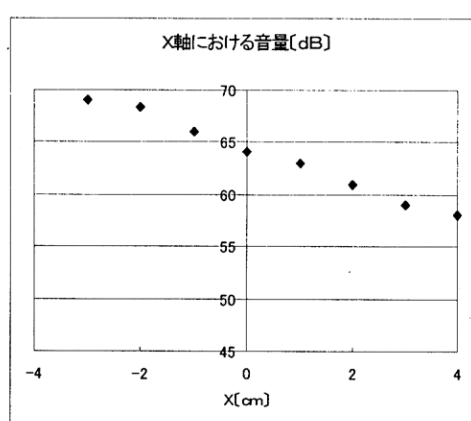
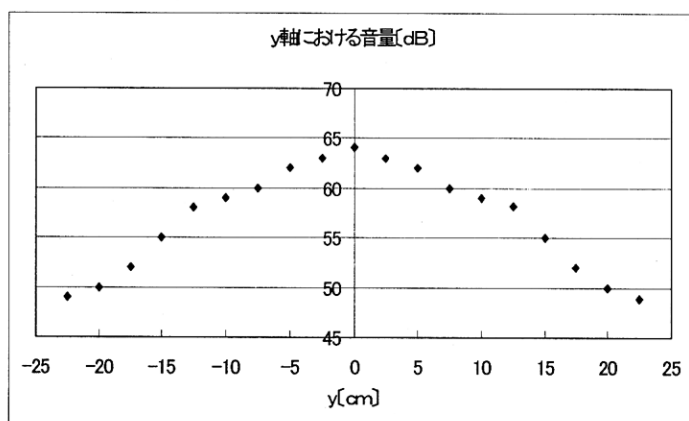


図のように、風船とスピーカーを配置し、騒音計を x 軸、 y 軸に沿って動かしたときの騒音計の読み [dB] を表すグラフを以下に示す。

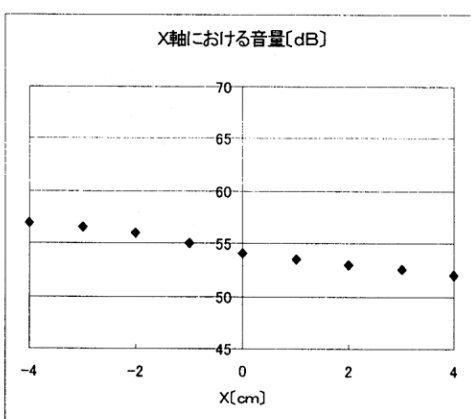
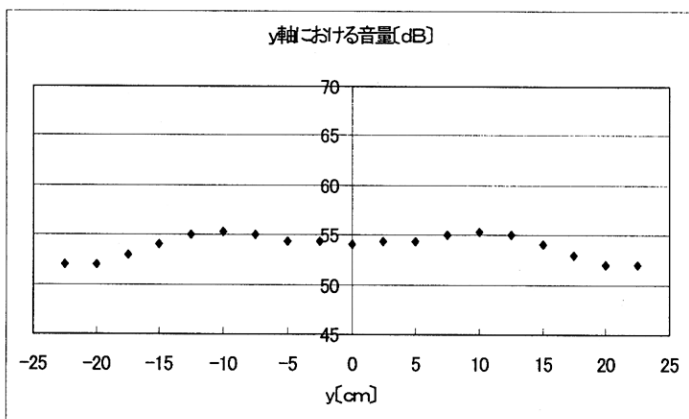
(1) 風船の中身が空気するとき



(2) 風船の中身がHFC-152aのとき



(3) 風船の中身がヘリウムするとき



以上の結果より、空気を封入した風船と比較して、HFC-152aガスを封入した風船は、音を集める働きをもつことが確認できる。このことから、HFC-152aガス中の音速は、空気中の音速より小さいことが分かる。一方、ヘリウムガスを封入した風船は、わずかではあるが、音を発散させる働きをもつことが確認できる。このことから、ヘリウム中の音速は、空気中の音速より大きいと考えられる。

6 音速について（興味・関心の強い生徒への説明）

(1) 音速の理論式

物質を伝わる縦波（疎密波）の速さ v は、その物質の密度 ρ と体積弾性率とよばれる定数 K を用いて、
$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

という式で表されることが分かっている。体積弾性率とは、簡単に言えば物質を圧縮するときの縮みにくさの程度を表すもので、例えば圧力 P のとき、体積が V である気体の圧力を変化させ、 $P + \Delta P$ としたときに、体積が $V + \Delta V$ となったとすると、この気体の体積弾性率 K は次の式で表される。

$$\Delta P = -K \frac{\Delta V}{V} \dots \textcircled{1}$$

このことを用いて、気体を伝わる音の速さを求めてみよう。 n モルの理想気体が、温度 T 、圧力 P 、体積 V の状態から、温度 $T + \Delta T$ 、圧力 $P + \Delta P$ 、体積 $V + \Delta V$ の状態に変化したとする。ただし、この状態変化は音の通過に伴って起こるものとする、外部との熱のやりとりのない断熱変化と考えられる。したがって、定積モル比熱 C_v と定圧モル比熱 C_p の比である $\gamma = C_p / C_v$ を用いて、

$$PV^\gamma = (P + \Delta P)(V + \Delta V)^\gamma \therefore P + \Delta P = P \times \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^\gamma$$

という関係が成り立つ。ここで、通常、音の通過に伴う気体の体積変化は極めて小さいことを考慮すると、

$$P + \Delta P = P \times \left(1 + \frac{\Delta V}{V} \right)^{-\gamma} \doteq P \times \left(1 - \gamma \frac{\Delta V}{V} \right)$$

$$\therefore \Delta P \doteq -P\gamma \frac{\Delta V}{V} \dots \textcircled{2}$$

という近似式が成り立ち、①と②の式を比較すると体積弾性率 K は、 $K = P\gamma$ と表される。

ここで、この気体の質量を m とすると、 $\rho = \frac{m}{V}$ であるから音速 v は、気体の平均分子量を M 、気体定数を R とすると、

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{P\gamma \cdot \frac{V}{m}} = \sqrt{\frac{P\gamma}{m} \cdot \frac{nRT}{P}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m} \cdot \frac{m \times 10^3}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \times 10^3$$

と表される。ここで、気体の温度が $t^\circ\text{C}$ で、室温程度であるものと仮定し、 $|t| \ll 273$ として近似を行うと、

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{\gamma R \times (t + 273)}{M}} \times 10^3 \\ &= \sqrt{\frac{\gamma R \times 273}{M}} \times 10^3 \times \left(1 + \frac{t}{273} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\doteq \sqrt{\frac{\gamma R}{M}} \times 273 \times 10^3 \times \left(1 + \frac{t}{2 \times 273} \right) \end{aligned}$$

という理論式が得られる。

(2) 様々な気体の音速

空気、ヘリウム、二酸化炭素、HFC-152a ガスの中を進行する音の速さ v_A 、 v_H 、 v_C 、 v_D の値を、上の理論式を用いて求めてみよう。

① 空気

窒素（分子量 28.0）と酸素（分子量 32.0）が、体積比 4 : 1 で混合した気体と考えると平均分子量 M は、
$$M = \frac{4 \times 28.0 + 32.0}{4 + 1} = 28.8$$

であり、窒素、酸素を 2 原子分子の理想気体と見なすと、定積モル比熱は、 $C_v = \frac{5}{2}R$ 、定圧モル比熱は、 $C_p = C_v + R = \frac{7}{2}R$ と考えられるので、比熱比 $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5} = 1.4$ を用いて音速 v_A を求めると、

$$v_A = \sqrt{\frac{1.4 \times 8.31 \times 273}{28.8}} \times 10^3 \times \left(1 + \frac{t}{2 \times 273} \right) = 332 + 0.6t \quad [\text{m/s}]$$

と表され、この結果は教科書にある関係式 $v = 331.5 + 0.6t$ と良く一致する。

②ヘリウム

単原子分子から成る理想気体と見なすと、定積モル比熱 C_V 、定圧モル比熱 C_P はそれぞれ、 $C_V = \frac{3}{2}R$ 、 $C_P = C_V + R = \frac{5}{2}R$

であるから、比熱比 γ は、

$$\gamma = \frac{5}{3} = 1.67$$

と考えられる。この γ の値と、分子量 $M=4.0$ を用いて $t^\circ\text{C}$ のときの音速 v_H を求めると、

$$v_H = \sqrt{\frac{1.67 \times 8.31 \times 273}{4.0} \times 10^3 \times \left(1 + \frac{t}{2 \times 273}\right)} = 973 + 1.8t \quad [\text{m/s}]$$

となる。この式を用いると、例えば 0°C のときの音速は、 973 [m/s] であるが、この結果は、理科年表（2005年度版）のデータ、 970 [m/s] と良く一致する。

③二酸化炭素

一般に、3原子以上の分子から成る気体の定積モル比熱については、理論的に求めるのは難しいので、理科年表のデータを用いて計算する。

二酸化炭素の比熱比 γ は、理科年表（1982年度版）のデータによると、

$$\gamma = 1.30 \quad (16^\circ\text{C} \text{ のとき})$$

である。この値と、分子量 $M=44.0$ を用いて音速 v_C を求めると、

$$v_C = \sqrt{\frac{1.30 \times 8.31 \times 273}{44.0} \times 10^3 \times \left(1 + \frac{t}{2 \times 273}\right)} = 259 + 0.5t \quad [\text{m/s}]$$

という式が得られる。この式を用いて 0°C のときの音速を計算すると、 259 [m/s] となるが、この値は理科年表（2005年度版）のデータ、 258 [m/s] と良く一致する。

④ HFC-152a (1,1-ジフルオロエタン)

この気体の比熱比は、理科年表に記載されておらず、知ることができなかった。そこで、以下のように、この気体中の音速の範囲を推定する。

エネルギー等分配の法則によると、※自由度 f の分子 1 個がもつエネルギーは、

$$\frac{RT}{2N_A} \times f \quad (\text{ただし } N_A \text{ は、アボガドロ数})$$

と表されることが分かっている。したがって、1モルの気体の温度を ΔT だけ変化させるときの内部エネルギーの変化 ΔU は、 $\Delta U = \frac{R\Delta T}{2N_A} \times fN_A = \frac{1}{2}fR\Delta T$

であるが、定積変化の場合、熱力学の第一法則より、 $\Delta U = Q + w = C_V \Delta T$ であるから、 $\frac{1}{2}fR\Delta T = C_V \Delta T \therefore C_V = \frac{1}{2}fR$

という関係が得られる。HFC-152aは、構造式で $\text{CHF}_2\text{-CH}_3$ と表される8原子分子であるから自由度は少なくとも6より大きいと考えられ、比熱比 γ の範囲は、

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V} < \frac{4}{3} \therefore 1 < \gamma < 1.33$$

と推定できる。また、分子量は $M=66.1$ であり、空気 ($\gamma=1.4$ 、 $M=28.8$) と比較すると、 γ の値は、 $0.71 \sim 0.95$ 倍であり、分子量は2.3倍である。(1)の音速の近似式により、音速は γ の平方根に比例し、 M の平方根に反比例することが分かるが、

$$\sqrt{\frac{0.71}{2.3}} = 0.55, \quad \sqrt{\frac{0.95}{2.3}} = 0.64$$

であるから、常温におけるHFC-152aガス中の音速 v_D は、空気中の約0.6倍と考えられる。

※自由度とは、その分子の配置を決めるのに必要な座標の数で、単原子分子は、その位置を表すのに x 、 y 、 z (デカルト座標の場合) の3つ座標が必要だから、自由度は3である。2原子分子の場合は、その重心の位置を表すのに必要な3つの座標の他、2原子を結ぶ軸の回転角を表すのに、例えば、その軸の $x-y$ 平面への射影と x 軸との角 θ 、その軸と z 軸との角 ϕ が必要であり、したがって、自由度は5である。3原子分子 (直線状の分子でない場合) では、2原子分子の場合の自由度5の他に、2原子を結ぶ軸のまわりの回転角の自由度が加わり、自由度は6となる。

実験Ⅳ 『大人には聞こえない着信音』について調べよう

1 実験のねらい

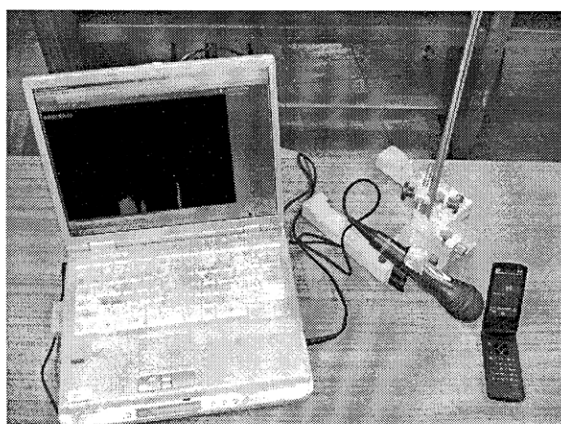
身近な素材である携帯電話の着信音について調べることにより、音の高さと振動数の関係や、人間が音として感じる振動数の領域について、理解を深める。

2 準備

- (1) 携帯電話（高振動数の着信音がダウンロードされているもの）
- (2) ノートパソコン（FFTソフトがインストールされているもの）
- (3) マイク（ノートパソコンに接続できるもの）

3 実験の方法

携帯電話の着信音サイトを探すと、「大人には聞こえない着信音」というものが数多く見つかる。これは、音の振動数が高いため、十代の生徒には聞こえるが、三十代以上の教師には聞こえにくく、授業中に着信音が鳴っても教師に気づかれないとされているものである。その高振動数の着信音について調べるため、着信音を最大音量で鳴らし、マイクでその音をパソコンに録音する。その後、FFT（高速フーリエ変換）ソフトを用いて、スペクトル分析等を行う。



この分析に使用できるソフトとして、以下の4つを挙げる。

- ①「振駆郎」 理科ねっとわーく <http://rikanet2.jst.go.jp/index.php>
- ②「WaveSpectra」 efu's page <http://www.ne.jp/asahi/fa/efu/index.html>
- ③「サウンドモニター」 サウンドモニターソフトFFT Waveのホームページ
<http://www2.tky.3web.ne.jp/~nozu/fftwave/index.html>
- ④「Windows Media Player」

これらのソフトのうち、③は試用3ヶ月までは無料だが、それ以降の使用には1000円を支払うシェアウェアである。それ以外、はフリーソフトないしWindowsパソコンに標準搭載されているものである。

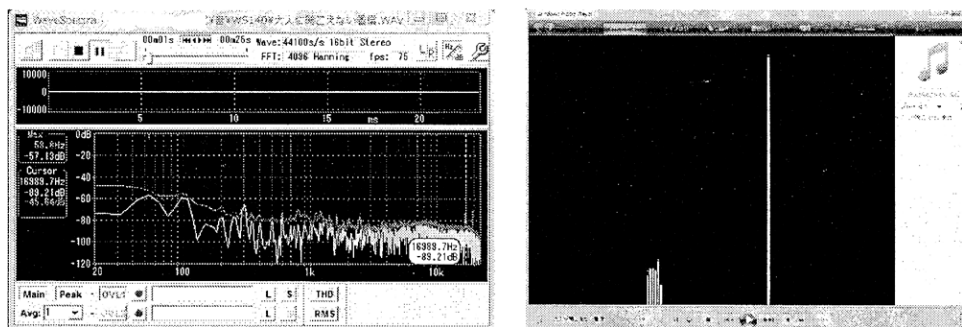
①～③までのソフトは、録音機能があって波形の時間変化も観測でき、振動数を測定することも可能である。

④は振動数を細かく測定することはできないが、エフェクト機能の「バーとウェーブ」のうち、バーを選ぶと、振動数に応じたバーが動くエフェクトを見ることができる。バーは400Hzおきに50本で、20Hz～20000Hzを分割している。

今回は、比較的使い方が簡単な②と、パソコンに搭載されていることが多い④を使用した。高振動数の着信音は、着信音サイトにアクセスすると数多く存在するので、それをダウンロードして利用する。

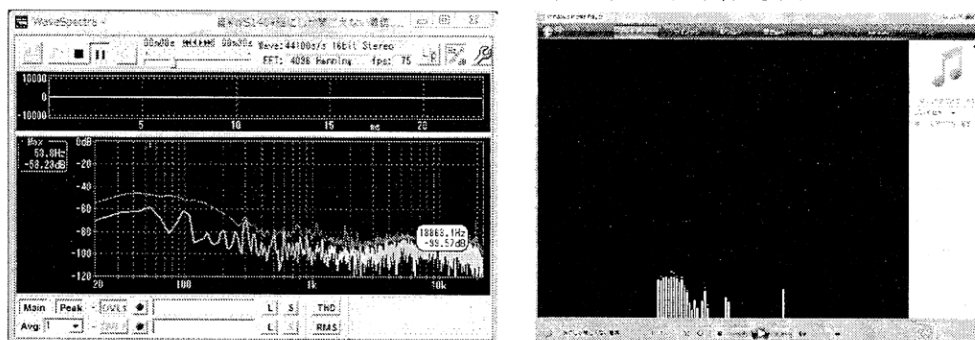
4 実験結果の例

(1)「大人には聞こえない着信音」(この実験では、生徒40名中26名が聞こえた。)



左図がWaveSpectraによるもので、右図がWindows Media Playerによるものである。左図ではやや見づらいが、約17000Hzの振動数が常に大きくなっている。また、右図では、14000 Hz以上の高振動数成分が含まれていることがはっきりと分かる。

(2)「猫にしか聞こえない着信音」(この実験では、生徒40名中誰も聞こえなかった。)

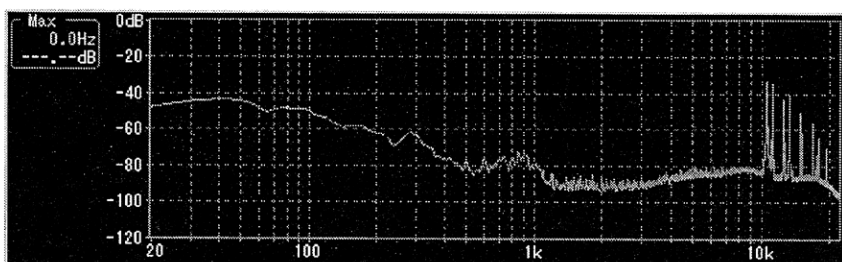


最近出てきたばかりの、「猫にしか聞こえない着信音」である。(「犬にしか聞こえない着信音」もある。) この音を分析すると、約19000Hzの領域に強い反応がある。なお、実際に猫に聞こえるかどうかは不明である。

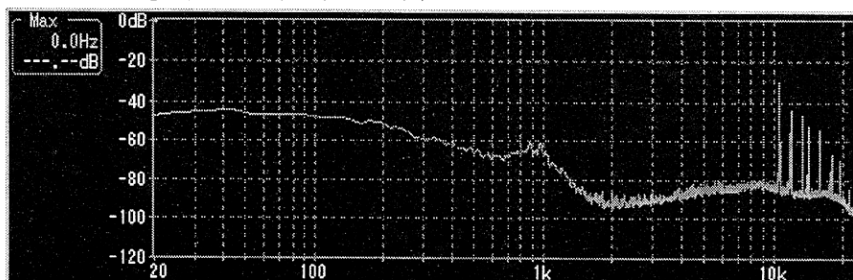
(3)「大人には聞こえにくい着信音」(メロディー)

これも最近出てきたばかりの、「大人には聞こえにくい着信音」である。微かに聞こえるような感覚があるが、ほとんど無音に近い。分析すると、10000Hz以上の領域で音声が出ている。生徒に聞かせたところ、約6割の生徒が、一応何か音が鳴っているのは分かったと答えたが、曲名まで分かる者はいなかった。

①曲名：「羞恥心」(歌手・羞恥心)



②曲名：「ドラえもん」(歌手・山野さと子)



実験Ⅴ 「ドップラー効果」を利用して、F-1カーのスピードを測定しよう

1 実験のねらい

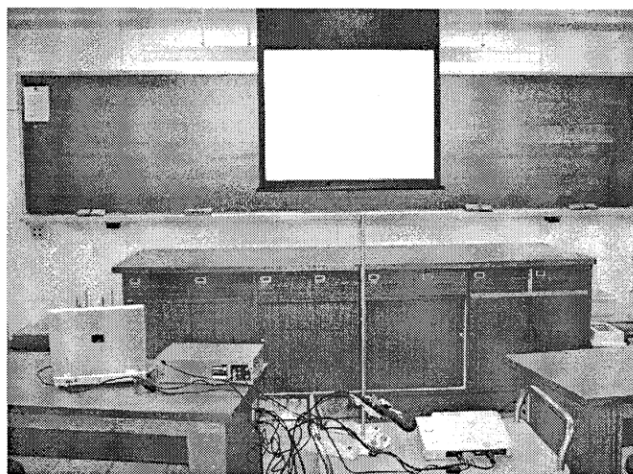
F-1レース中継の音声に含まれるエンジン音の振動数が、ドップラー効果によって変化することを利用して、F-1カーの速さを測定する。

2 準備

- (1) F-1レースが録画されているビデオ、またはDVD
- (2) ビデオ、またはDVDのプレーヤーとプロジェクター
- (3) ノートパソコン (FFTソフトがインストールされているもの)
- (4) マイク (ノートパソコンに接続できるもの)

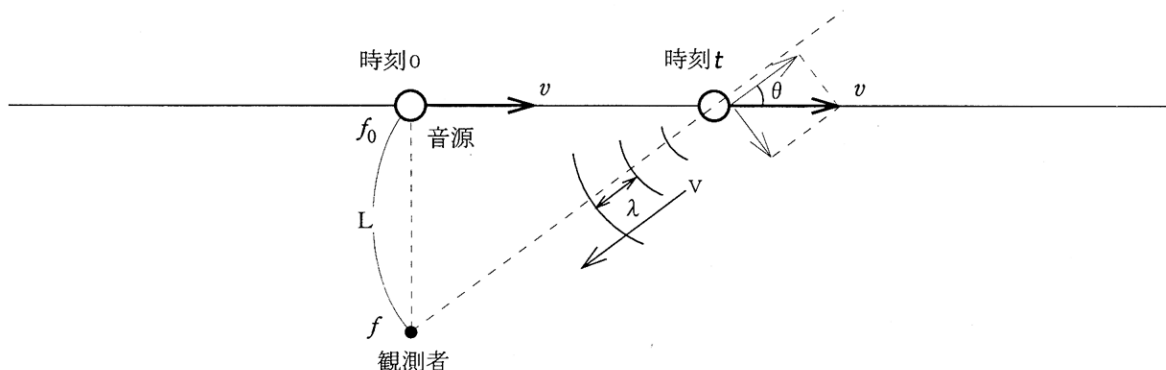
3 実験の手順

- (1) F-1レースのビデオ映像を視聴し、エンジン音の音程がドップラー効果によって変化していることを確認する。
- (2) 直線コースを最高速に近い速度で走行し、収録マイクの横を通り過ぎる場面の映像を再生し、F-1カーが近づいているときは音程が高くなり、遠ざかっているときは低くなっていることを再確認する。
- (3) パソコンに接続したマイクで、上記(2)のときの音を録音する。
- (4) FFTソフトで振動数ごとのスペクトル分析を行い、近づいているときの音の最大振動数と、遠ざかっているときの音の最低振動数を測定する。
- (5) レース時の気温から求めた音速を用いて、F-1カーの速さを計算する。使用したコースでの大体の最高速は調べると分かるので、それと比較してみる。



4 斜め方向のドップラー効果について（生徒への説明）

図のように、観測者から距離 L だけ離れた直線上を振動数 f_0 の音源が速さ v で運動しているとき、観測される音の振動数を f とする。音源は、無限左方から無限右方まで運動するものとし、時刻 0 に観測者の真横を通過するものとして、時刻 t と f の関係を求める。



時刻 t に音源を出発して観測者に向かう音の、音源に対する相対的な速さは $V + v \cos \theta$ であり、音源は周期 $\frac{1}{f_0}$ ごとに等しい位相の波面を放出するから、同位相の波面の間隔である波長 λ は、 $\lambda = (V + v \cos \theta) \times \frac{1}{f_0}$ ただし、 $\cos \theta = \frac{vt}{\sqrt{L^2 + (vt)^2}}$

である。また、観測者が観測する音の周期 $\frac{1}{f}$ は、ある波面が観測者の位置を通過してから、次に先ほどと同位相の波面が通過するまでの時間であるから、 $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{V}$ と表され、以上より時刻 t と f の関係は、

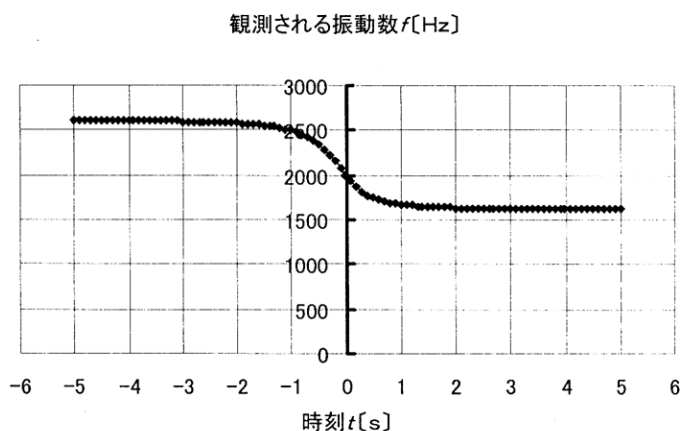
$$f = \frac{V}{V + v \cos \theta} \times f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta = \frac{vt}{\sqrt{L^2 + (vt)^2}}$$

と表される。ここで、 L に比べて v が十分大きいものとする、 $\cos \theta$ は時刻 0 付近で大きく変化するが、その前後では変化が少なく、音源が十分遠方であって近づきつつあるときは、 $\cos \theta = -1$ と見なせ、十分遠方であって遠ざかりつつあるときは $\cos \theta = 1$ と見なせる。

したがって、逆に言えば、観測される音の音程の変化があまり感じられない時間帯では、その音は十分遠方で音源から放出されたものと考えられ、その音の振動数を用いて v を求める際には、 $\cos \theta$ の値は -1 または 1 で近似することができる。つまり、音源が運動する直線上に観測者がいると見なして良いことになる。

以下に、 $f = 2000\text{Hz}$ 、 $v = 80\text{m/s}$ 、 $L = 50\text{m}$ と仮定し、上式を用いて計算した時刻 t と観測される振動数 f の関係を示す。

t [s]	f [Hz]
-5.0	2609
-4.0	2605
-3.0	2599
-1.0	2499
0.0	2000
1.0	1667
2.0	1633
3.0	1626
4.0	1623
5.0	1621



5 実験結果の例

(1) レースに関するデータ

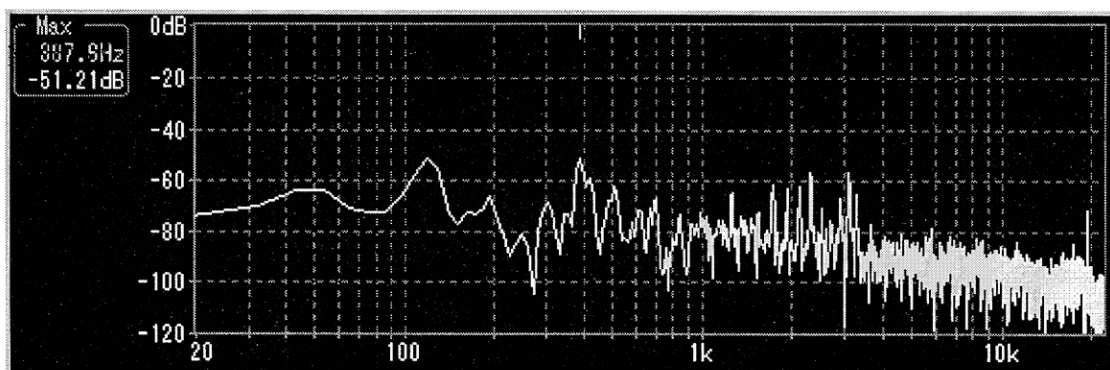
①2008年F-1世界選手権 第16戦 日本グランプリ 2008年10月12日(日)

②気象条件・・・・曇り、レース場の気温16度

レース場の温度から $V=331.5+0.6\times 16$
 $=341.1\text{ m/s}$ を音速とする。

③使用した場面・・・・レース開始から20周ほどした辺り。最終コーナーを曲がって直線コースに入って加速していく場面。

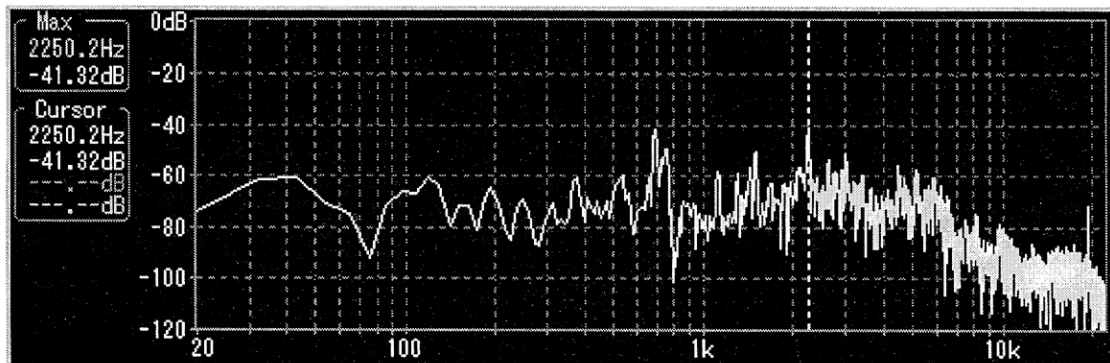
下の図はF-1カーが近づきつつあるときの音のスペクトルである。実況があると、F-1カーのエンジン音より実況の声が勝ってしまい、この図では一番大きな音の振動数は387.6Hzとなってしまう。これはアナウンサーの声の振動数である。この図にはドップラー効果によって音程が変化するF-1カーの音も含まれているが、分かりづらい。



(2) 測定に使用した場面

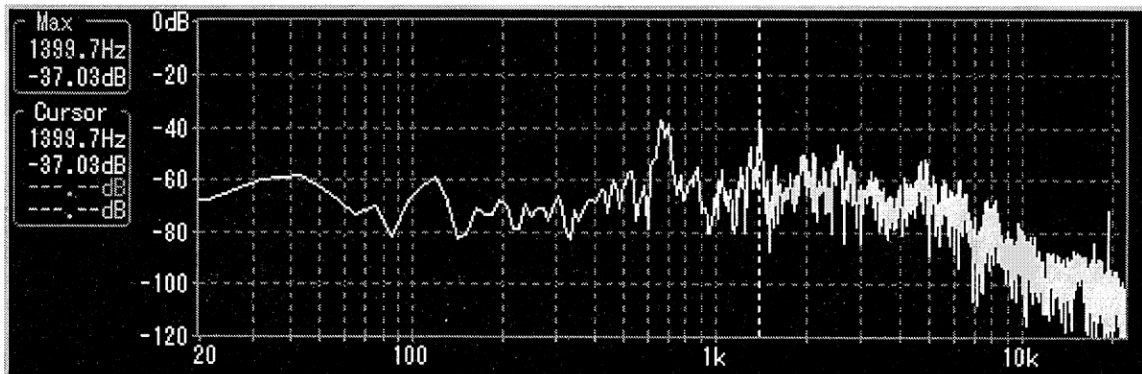
F-1レースの中継では、副音声でレース場の音だけを流している。主音声では、実況のアナウンサーの声が混じっていて分析しづらいので、副音声を録画して分析した。

【近づいているときの最高音】



なお、この実験で使ったソフトは実験4でも使っている、WaveSpectraである。これと同等またはそれ以上の機能をもつソフトは他にもあるが、生徒の目の前で解析するときの使い勝手を考えると、WaveSpectra が優れている。

【遠ざかっているときの最低音】



実況の声が無いと、一番大きい音はF-1カーの音になるので、最大になっているところがエンジン音の主成分で、その部分の振動数が、収録用マイクの横を通過する前後で大きく変化することが分かる。近づきつつあるとき及び遠ざかりつつあるときの観測される音の振動数について、いずれも音程の変化がほとんど感じられない区間での、最大振動数及び最低振動数をそれぞれ、 f_H 、 f_L とすると、

$$f_H = \frac{V}{V + v \cos \theta_1} f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta_1 \approx -1 \quad f_L = \frac{V}{V + v \cos \theta_2} f_0 \quad \text{ただし、} \cos \theta_2 \approx 1$$

これら2式より、 v 及び f_0 を求めると、

$$v \approx \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \cdot V \quad , \quad f_0 \approx \frac{2f_H \cdot f_L}{f_H + f_L}$$

となる。FFTソフトを用いた振動数の測定値は、

最大振動数 $f_H = 2250 \text{ Hz}$ 、最低振動数 $f_L = 1400 \text{ Hz}$

であったため、これらと、先に求めた $V = 341.1$ を上の2式に代入して、

F-1カーの速さ $v = 79.4 \text{ m/s}$ ($= 286 \text{ km/h}$)

音源の振動数 $f_0 = 1726 \text{ Hz}$

という結果が得られた。F-1カーが真横に来たときの振動数をFFTソフトで測定すると、1700Hz前後であり、計算結果とほぼ一致している。また、F-1カーの速さ v の計算結果も、解析に用いた場面が、最終コーナーを曲がり終わった後の直線コースあることから判断して、妥当な値と考えられる。

(3) 実験に最適なF-1のコース

直線コースで最高速を維持しながら、収録マイクの横を通り過ぎるときのドップラー効果を観測するためには、直線コースがある程度長くなければならない。本年(2009年)開催予定のF-1グランプリで、十分長い直線コースがあるところを挙げる。

開催国	サーキット名
オーストラリア	メルボルン
マレーシア	セパン
バーレーン	サヒール
スペイン	バルセロナ
イギリス	シルバーストーン
ハンガリー	ハンガロリンク
日本	鈴鹿
アブダビ	ヤスマリーナ
ブラジル	インタラゴス

ほとんどのサーキットでは直線コースにチェッカーフラッグがあり、そこでカメラが回っている。したがって、実験で使える映像を見つけるポイントとして、チェッカーフラッグと直線コースとの距離が、直線コースの長さに対して十分小さいものを探すとよい。なお、録画できない環境の時は、インターネット上に短いながらもレースの動画があるので、それを利用することが考えられる。

実験Ⅵ 「超音波を聴いてみよう」

1 実験のねらい

超音波を可聴化して聴かせることにより、音波に関する興味・関心を高めるとともに、波長の長さを利用し、黒板上で干渉の実験を行って振動数を求める等、定量的な実験も行う。

2 準備

- (1) 低周波発振器
- (2) 圧電式超音波スピーカー (2個)
- (3) 超音波受信機 (超音波を可聴音に変換するもの)
- (4) 周波数カウンター
- (5) 物差し

3 実験の手順

- (1) 超音波受信機を用いて、超音波を可聴帯域の音に変換して聴いてみる。以下は、超音波が観測できる状況の例。
 - ・コウモリが飛んでいるとき
 - ・紙やビニル袋などがこすれ合っているとき
 - ・鍵束等、金属製の物体がぶつかり合っているとき
 - ・水滴が、流しのシンクにぶつかって砕けるとき
- (2) 低周波発振器の出力を、並列に接続した2個の圧電式超音波スピーカーに入力し、超音波を発生させる。低周波発振器の周波数は、超音波スピーカーの共振周波数である40kHz程度に設定する。
- (3) 低周波発振器の出力を受信機が反応するぎりぎりまで下げてから、発振器の周波数を調節し、受信機からの音の大きさが最大になる周波数を捜す。
- (4) 上記(3)の振動数を、周波数カウンターで読む。
- (5) 受信機の位置を様々な場所に移動させ、2つのスピーカーからの超音波が干渉することにより、場所によって強め合ったり弱め合ったりしている様子を調べる。
- (6) 2つのスピーカーからの超音波が弱め合う位置のいくつかについて、経路差を物差し等で測定することにより、超音波の波長を求める。
- (7) 上記(6)で求めた波長 λ_1 が、気温から求めた音速 V 及び超音波の振動数 f を用いて計算した波長 $\lambda_2 = V/f$ と一致することを確認する。

4 超音波受信機の製作

(1) 材料

① IC

- ・ナショナルセミコンダクター LM386N 3個
- ・東芝 TC4024BP 1個

② ICソケット

- ・8ピン用 3個
- ・14ピン用 1個

③ コンデンサー・ $10\mu\text{F}$ (電解)

- ・ $10\mu\text{F}$ (電解) 3個
- ・ $100\mu\text{F}$ (電解) 1個
- ・ $220\mu\text{F}$ (電解) 2個
- ・ $0.047\mu\text{F}$ (マイラ) 1個

④ 超音波センサ

- ・R-40 (日本セラミック社)

⑤ スピーカー

- ・1～4W程度 1個

⑥ 抵抗

- ・ 200Ω 1個
- ・ 150Ω 1個
- ・半固定 $10\text{k}\Omega \times 2$ 個

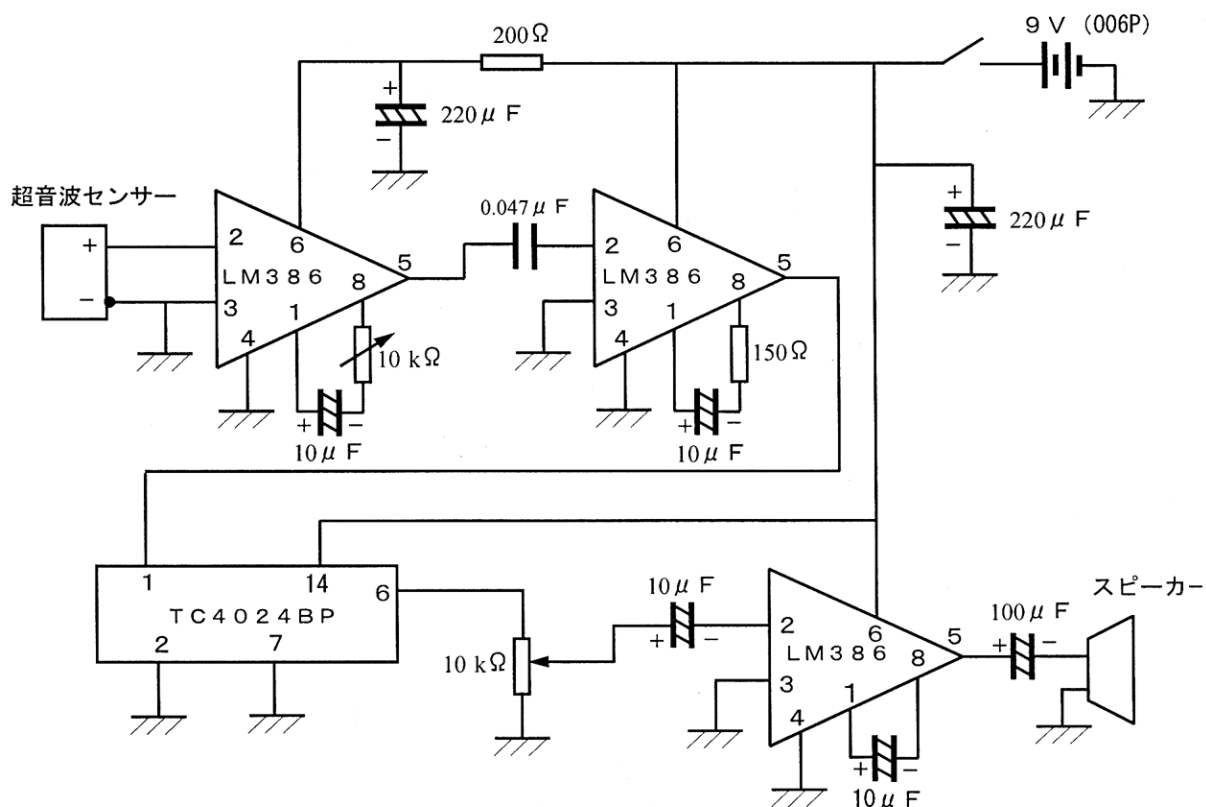
⑦ 基板

- ・ $50 \times 72\text{ mm}$ (穴のピッチ 2.54 mm) 1枚

⑧ 電池

- ・006P型 (9V) 1個

(2) 回路図



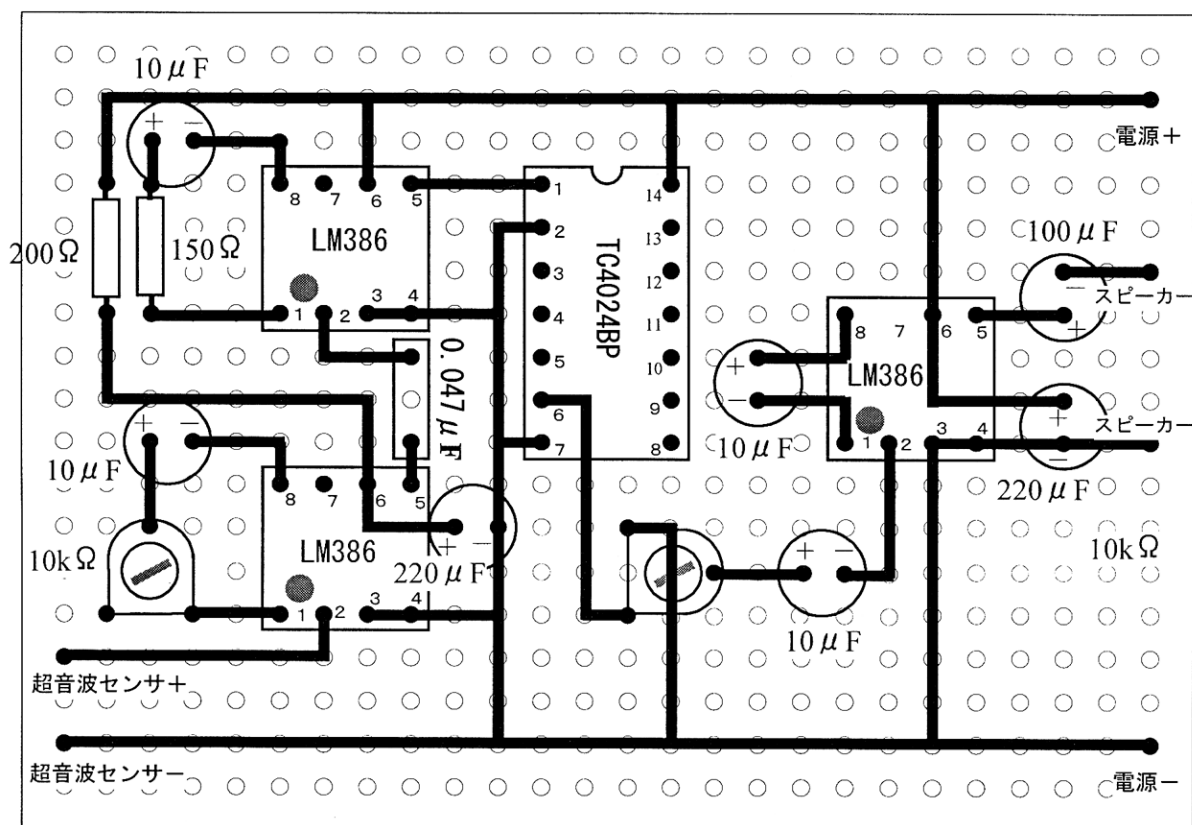
(3) 動作原理

- ① 超音波センサから取り込んだ 40 kHz 付近の超音波信号を2個のオーディオアンプIC (LM386) によって増幅する。
- ② その信号を、周波数を分周するIC (TC4024BP) に入力し、周波数を16分の1に落とすことにより、可聴領域の音声信号とする。
- ③ その信号をさらにもう一度オーディオアンプIC (LM386) で増幅し、スピーカーから出力する。

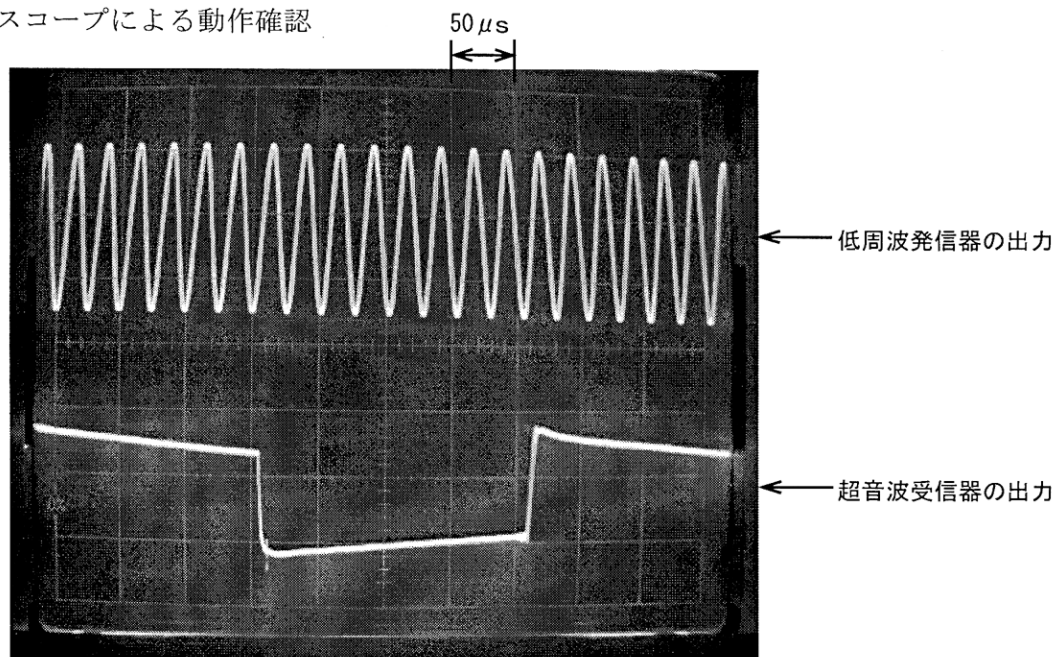
(4) 回路設計の際、参考にしたホームページ

- ① コウモリ の 声 を 聞 い て み よ う ! <http://www.geocities.co.jp/AnimalPark-Pochi/4516/>
- ② Build a Simple Bat Detector <http://pwl.netcom.com/~t-rex/BatDetector.html>

(5) 実体配線図 (基板の表側から見た図)



(6) オシロスコープによる動作確認

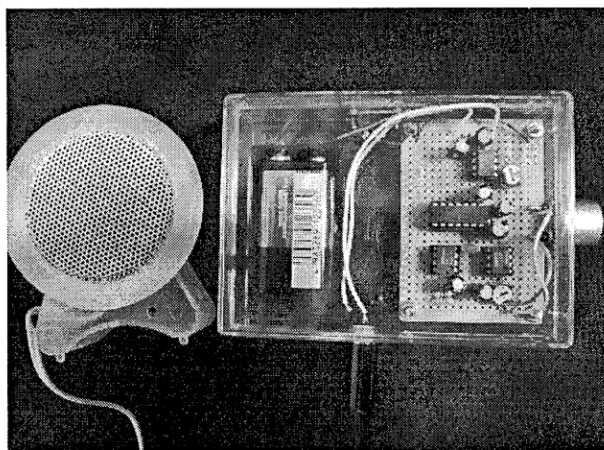


写真は、低周波発振器による正弦波信号 (40kHz) を超音波スピーカーに入力し、発生した超音波を超音波受信器で可聴音に変換しているときの、低周波発振器の出力 (上) と、超音波受信器の出力 (下) をオシロスコープで観察したものである。上下の信号を比較すると、超音波受信器が、周期 $25\mu\text{s}$ 程度の信号を周期 $400\mu\text{s}$ 程度の信号に変換し、振動数を16分の1に落としていることが分かる。ただし、分周にデジタルICを用いているため波形、強弱の情報は失われ、超音波受信器の出力波形は、受け取る超音波の波形によらず常に矩形波状になってしまう。

(7) 製作・使用上の注意

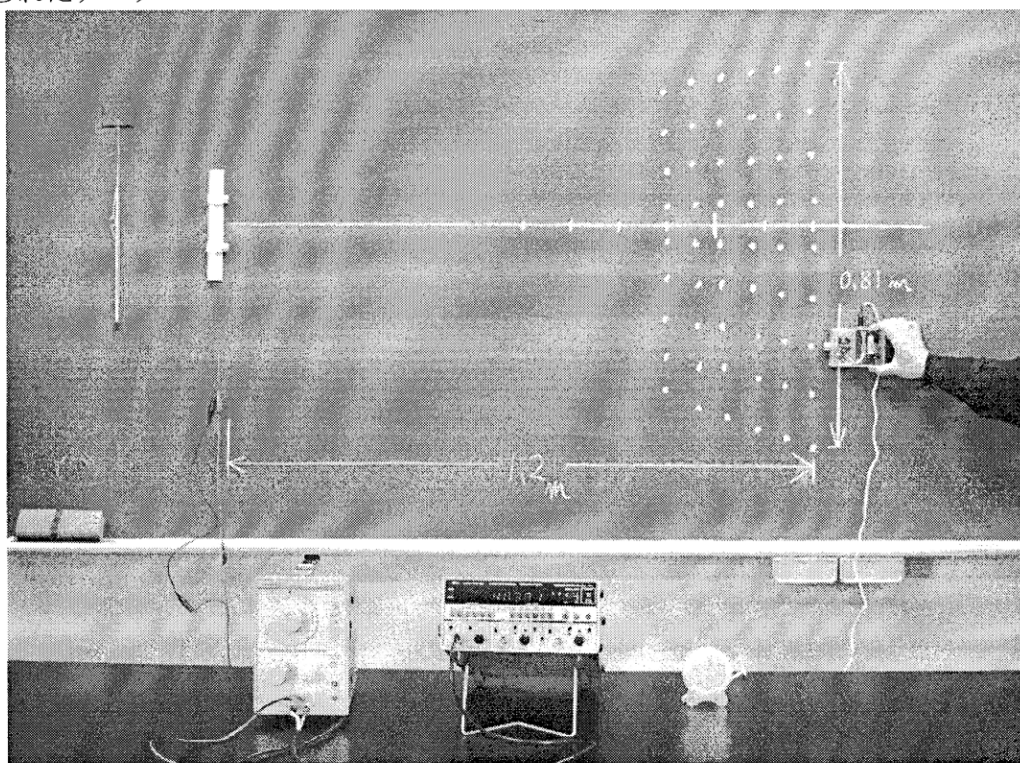
- ①スピーカーと超音波センサーを1つのケースに収めると、発振が起ってしまうので、別にしておく。
- ②2つの半固定抵抗を回転させると、増幅率が変化する。これらを交互に少しずつ調整することにより、発振が起こらない範囲で、適切な増幅率となるようにする。
- ③TC4024BPは、静電気で破損してしまうことがあるので、ICを帯電体に近づけたり、体が帯電しているときICに触れたりしないよう注意する。

【ケースに収めた装置とスピーカー】



5 実験結果の例

(1) 得られたデータ



- ①写真のように、並列接続された2個の超音波スピーカーを0.10[m]間隔で黒板にはり付け、低周波発振器による40.4kHz(周波数カウンターで測定)の正弦波信号を印加した。
- ②黒板上で、2個のスピーカーからの超音波が干渉して弱めあう位置を超音波受信器で探し、チョークで印をつけていったところ、9本の節線が確認できた。
- ③超音波スピーカーから1.2[m]離れた場所の節線の間隔は、 $0.81/8$ [m]であった。
- ④このときの気温22℃を用いて音速を求めると、 $331.5 + 0.6 \times 22 = 345$ [m/s]となった。

(2) 波長の計算

2個の超音波スピーカーの間隔、及び1.2[m]離れた場所の節線の間隔を用いて超音波の波長 λ_1 を求めると、 $\lambda_1 = \frac{0.10}{1.2} \times \frac{0.81}{8} = 8.4 \times 10^{-3}$ [m]であった。

一方、周波数カウンターで測定した振動数と、気温から計算した音速を用いて超音波の波長 λ_2 を求めると、 $\lambda_2 = \frac{345}{40.4 \times 10^3} = 8.54 \times 10^{-3}$ [m]

となり、 λ_2 に対する λ_1 の誤差は1.1%であった。この値は、2個の超音波スピーカーの間隔を約1mmだけ読み誤ったときの誤差に相当する。

高等学校における教科指導の充実
理 科 《 物理領域 》
学ぶ手応えを実感できる授業を目指して
[音 波]

発 行 平成21年3月
栃木県総合教育センター 研究調査部
〒320-0002 栃木県宇都宮市瓦谷町1070
TEL 028-665-7204 FAX 028-665-7303
URL <http://www.tochigi-edu.ed.jp/center/>