

3-4

## 「紙コップによる人の声に反応する簡易音分離共鳴装置」の作成と分析

菅原 陽 (札幌南陵高校)

063-0002 札幌市西区山の手2条5丁目5の28 TEL 011-591-2102

紙コップで作る「片持はり」の共鳴振動の実験装置を作製し性能分析を試みた。学習教材として、物理の音の合成と分離の実験、あるいはフーリエ変換を瞬時に実行する聴覚器官である蝸牛のモデル実験器として有用である。また、この装置は簡易に作成でき、実際の人間の声に反応し、声の周波数に応じた反応を目で確かめることができる。また、スピーカーでの振動増幅とsinカーブの発信器による振動子の共鳴振動数の測定分析を行った。

キーワード： 共鳴 振動数 周波数分離 フーリエ変換 聴覚 蝸牛管 基底膜 “共鳴”説

### 1 音を分離する装置について

「アイウエオ」などの母音は、基本の振動数の倍音・2倍音・3倍音・・・のそれぞれがある強さの割合で発した音波の重ね合わせである。人の声を周波数成分で分離してとらえるには、コンピュータでフーリエ変換するとグラフ化できる。人間の聴覚器官は蝸牛器官で周波数毎の音圧強度の分離を行っている。今回作成する装置は実際に音の成分の振動を目で確かめることができる。また、プラスチックファイバーと画鋸とストロー及び紙コップで作成でき、生徒一人一人に作成させることができる。マイクとアンプ・スピーカー（ラジカセ）を利用すれば音分離のダイナミックな振動も目にすることができる。

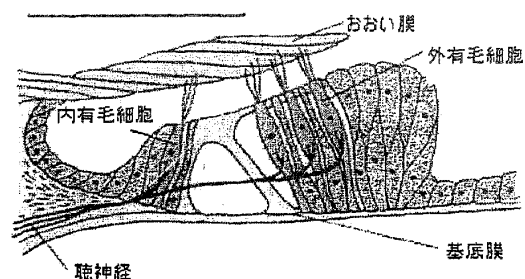
### 2 聴覚の理解に関する歴史的経緯

人が耳で音を認識することは、昔からだいたいわかってきた。記述された最初の本は、1566年オランダのボルヘル・コイテルである。しかし、ここでは蝸牛までの音波の経路をたどっているだけであり、聴覚とは全く別のものであった。

音の高低をどうやって聞き分けるかを説明したのは1605年スイスの解剖学者であるガスバール・ボアンであるが、内耳の構造をよく知らなかったため、耳の中のいろいろな空間で共鳴する音を受け取ると述べている。1683年にはフランスのジョセフ・ギシャール・デュ・ベルネーは「聴覚器官論」で蝸牛の螺旋構造が次第にせまくなっていることから選択共鳴理論をつくりあげた。それによると、螺旋版を鋼のスプリングにたとえて、螺旋の広い部分で低い音を、せまい部分で高い音をとらえているとしている。その後、顕微鏡の発明の後、1851年アルフォンソ・コルチは基底膜上の有毛細胞を見だし、真の聴覚器官を発見したのである。

しかし、聴覚の仕組みを結論づけたのは1862年ヘルマン・ルートウィヒ・フェルディナント・フォン・ヘルムホルツである。ヘルムホルツは「耳に入ってくるそれぞれの音波は、その振動数に応じたある決まった基底膜上の繊維に振動を引き起こし、コルチ器官がその振動を聴覚経に伝える」というものである。このような経緯を経て、現在の理論である「基底膜“共鳴”説」の創始者はゲオルク・フォン・ベグシーである。これにより彼は1961年ノーベル賞を受賞している。彼は通信技師であり物理学者であるが、聴覚の秘密を解明しようと決意しあらゆるほ乳類の耳を詳細に調べた。そして、人間の蝸牛の中にアルミニウムと石炭の粉を混ぜた食塩水を入れ顕微鏡で観察したのである。

現代の技術によって、さらに詳細に聴覚についての理解が進んだ。例えば、図の内毛細胞は内心性神経細胞つまりおい膜の刺激を中枢に伝える神経細胞である。その隣りに3つ並んでいる外毛細胞は中枢からの情報を受け取る外心性神経であり、刺激により細胞が収縮し基底膜を少し変形することが判明している。その時の反応時間は20kHzにも対応している。このことは人は自ら基底膜を変形し音を受信する音域や感度を変化させることができることを予想させる。「耳をすます」「聞き耳を立てる」ことができるのはこのためかもしれない。



### 3 作成した装置の意義

聴覚についての一般的知識は次のようである。

- ① 蝸牛の構造とコルチ器官については生物で学習し、音の合成と分離、たとえば人の声は基本振動が重なり合ったものであることは、高校の物理で学習する。
- ② 耳の構造と音の性質からトータルに聴覚を説明がなされているものはあまり見あたらない。ベケシーの「基底膜共鳴説」のような液体の中で膜の振動について理解することはかなり難しく、そのため生物や物理を履修した人も正確な知識を持つ人は少ない。

### 4 この装置の有用性

- ① 現在の高校で物理と生物を両方履修する生徒は少ない。よって、両分野の知識がある聴覚の理解について興味を持つ機会も少ない中で、この装置はトータルな理解のための実験として利用できる。
- ② 割り箸やストローと画鋸でも作成が可能で容易であり、短時間の生徒の作成実験も可能である。

### 5 装置の説明と性能

写真1は作成したいくつかの装置である。写真2は共鳴振動する針金部分を拡大したものである。

写真2は生徒の声を紙コップ（プラスチック）にいれた。声は「イー」の声である。針金が振動している。よく見ると2カ所が振動しているのがわかる。

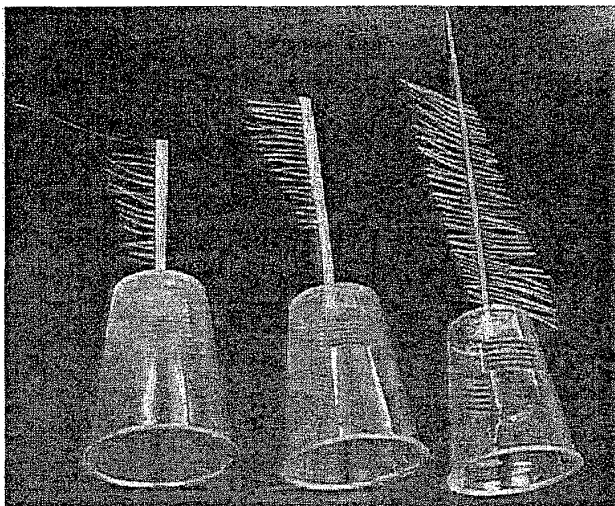


写真1 作製した装置

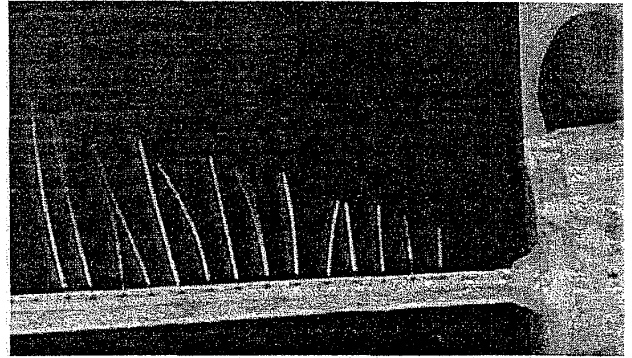


写真2 振動共鳴する様子

写真2の装置に発信器からの信号を増幅して与え、各振動子が共鳴する振動を周波数カウンタで測定し、針金の1本1本が何ヘルツに反応するかを調べた。

次のデータを得た。

1本目	086Hz
2本目	182Hz
3本目	196Hz
4本目	236Hz
5本目	248Hz
6本目	258Hz
7本目	315Hz
8本目	362Hz
9本目	409Hz

表1

186 Hzの倍音は372Hzであるが、振動子の感度は86Hzでは2Hz程度前後にずれても共鳴振動が見える。186Hzでは5Hz程度、362Hzでは10Hzすれても共鳴している。さて「イー」の声をコンピュータに取り入れて、フーリエ解析を行ない比較したところ、2本目と8本目が倍音であることがわかる。振幅強度も強く出ている。実際の音の共鳴でも、声が分離されて振動するのが見える。それぞれ針金分離共鳴していると理解できる。

倍音	振動数	振幅	位相
1	183	4603	192
2	366	3116	239
3	549	510	5
4	732	276	74
5	915	111	240
6	1098	101	349
7	1281	51	74
8	1464	40	284
9	1647	102	356
10	1830	54	47

写真3 フーリエ変換の結果の写真

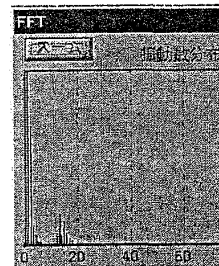


写真4 男子生徒の声の周波数の強度分析のグラフ

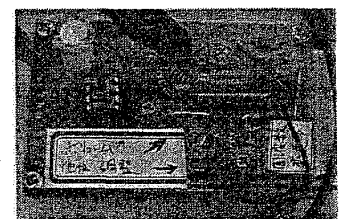


写真5 自作発信器の基板