

# 気柱の定常波観察実験器の製作

生徒の感性を刺激し豊かにする実験教材の開発と指導法の研究

日本私学教育研究所 馬目 秀夫

## 1 はじめに

管の中に入れた発泡スチロール球が、スピーカーから出た特定の音に反応して踊り出す。音の振動数を変えると静かになる。そして、さらに振動数を変えていくとまた踊り出し、きれいな模様を描き出す。生徒にとって大変感動的で、不思議な現象である。これが気柱の定常波実験装置である。この気柱の定常波を見る装置として、ガラス管やアクリル管内に小さな発泡スチロール球を入れ、スピーカーで振動させる方法がある。内に石松子やコルクの粉末を入れるよりは定常波の様子がわかりやすい。ところが現在この形のものはほとんど市販されていない。その理由として考えられるのは次の点である。

- ① 発泡スチロールは静電気を帯びやすい
- ② スピーカーからの音量をかなり上げないと、発泡スチロール球は振動しない。そのため授業では音が大きく、ジックリ観察できない、また周りに迷惑をかける。
- ③ さらにあげれば、普通、スピーカーを管口に密着しているが、これだと両閉じ管の形になる。すなわち基本振動数の整数倍の振動数で定常波ができる。ところが教科書では片開き管が一般的である。そのためこの実験装置を使うと生徒は混乱する恐れがある。片開き管の形にするためには、スピーカーを管口から離せばよいが、スピーカーを管口から離すと、管内の空気を振動させる効率が悪くなり、その分大きな音を出さなければならなくなる。

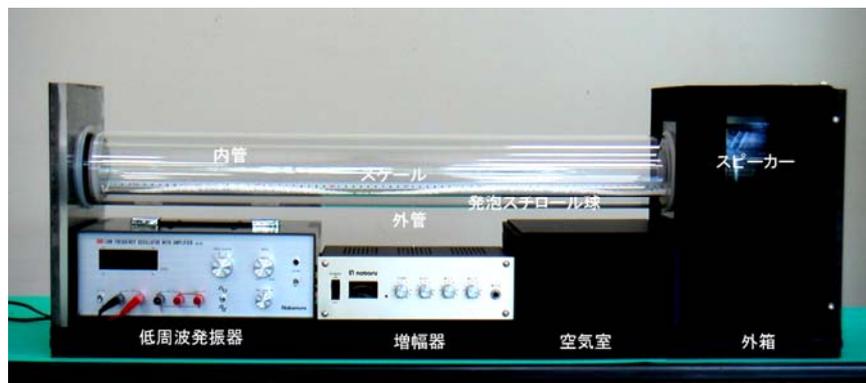
このような問題点を解決するためにこの装置を製作した。

## 2 装置の概要

装置の概要は、図1、図2の通りである。

音ができるだけ装置の外に漏れないように、装置を2重構造にし、密閉性を高めた。また、音が外に出る原因の1つに装置の振動がある。これを抑えるため、アクリルで装置を作り、重量を持たせた。

図1



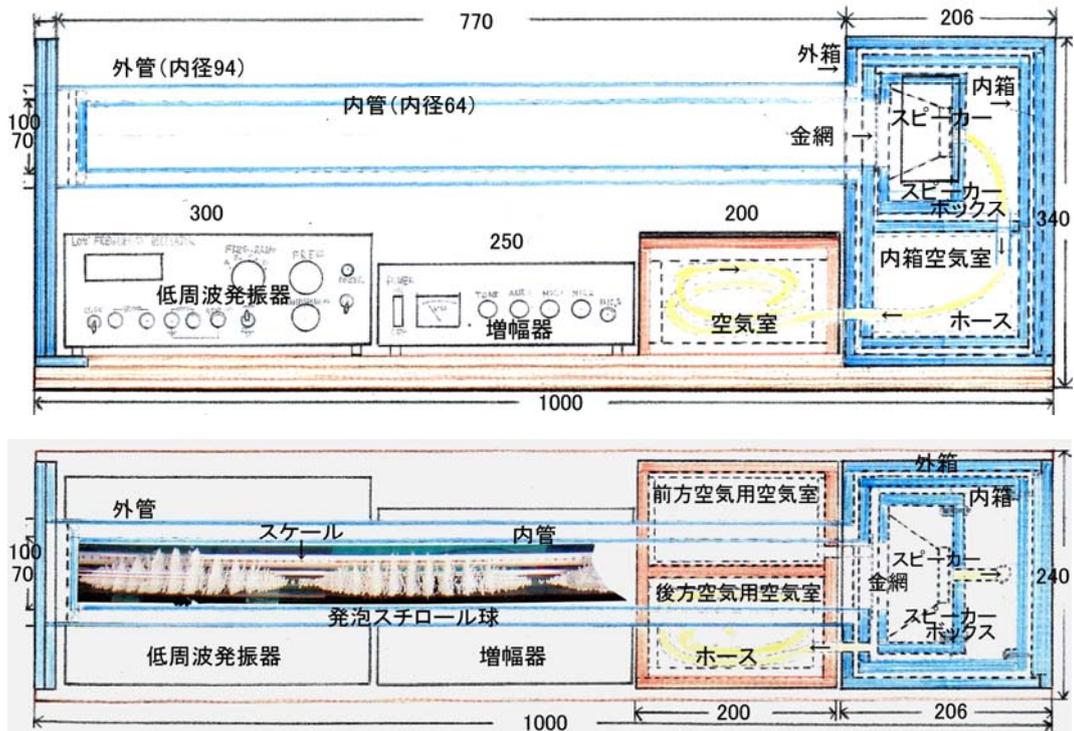


図 2

◎ 工夫した主な点

- ① 使用する発泡スチロール球の大きさをできるだけ揃えた。球の大きさ、質量によりできる縞模様の間隔が多少違うため、大きさを揃えることで発泡スチロール球がスムーズに振動できるようにしたためである。この装置では直径約 2mm の球を使用した。
- ② アクリル管を使用した。アクリル管・発泡スチロールの静電気の問題を解決するため、管内に静電気防止スプレーを噴射し、後を布で拭いて管をコーティングし、球にも帯電防止のコーティングをした。これによって静電気の問題はほぼ解決した。

図 3

- ③ 密閉性を高めたが、スピーカーは外から見えるようにし、ブラックボックスにならないようにした。
- ④ スピーカーが振動しやすいように、スピーカーの前方の空気と後方の空気を完全に分離した。前方の空気の振動と後方の空気の振動は逆位相のため、双方が混ざると空気（スピーカー）が振動しにくくなるからである（図 4、図 5）。

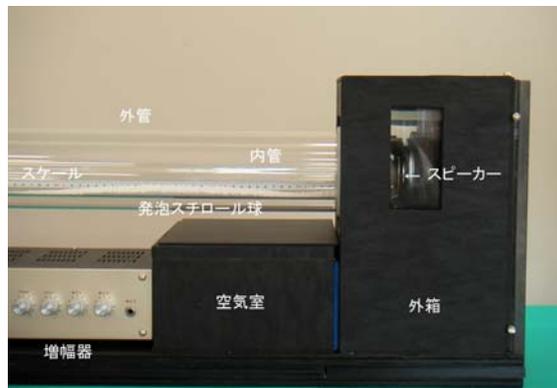




図 4



図 5

- ⑤ 振動する空気の容量をふやすため、スピーカーの前方、後方の空気用に、それぞれ空気室を設けた。(図 6、図 7)
- ⑥ スピーカーの後方の空気のためには、背面からホースを出して、空気室に導き、ホースをとぐろに巻いて、空気の移動範囲を長くして、振動しやすくするとともに、消音効果を高めた。(図 6、図 7)



図 6



図 7

- ⑦ 両閉じ管、片開き管両方実験できるようにした。両閉じ管の場合は、スピーカーを管口に密着させればよい。ボルトで固定すればさらに安定する。



図 8

片開き管の場合は、管口付近の空気ができるだけ自由に振動できなければならない。ただ、装置をコンパクトにするため、あまりスピーカーボックス部分を大きくできなかったため、スピーカーを管口から 1.5 cm 程度離し、図 9 のようにスピーカー前面床部にスリットをあけ、空気を空気室に導き、空気が振動しやすくした。



図 9

- ⑧ 外箱・内箱・空気室にはそれぞれ内部に反射防止シートを、外部に防振防音シートを貼った。

### 3 実験結果

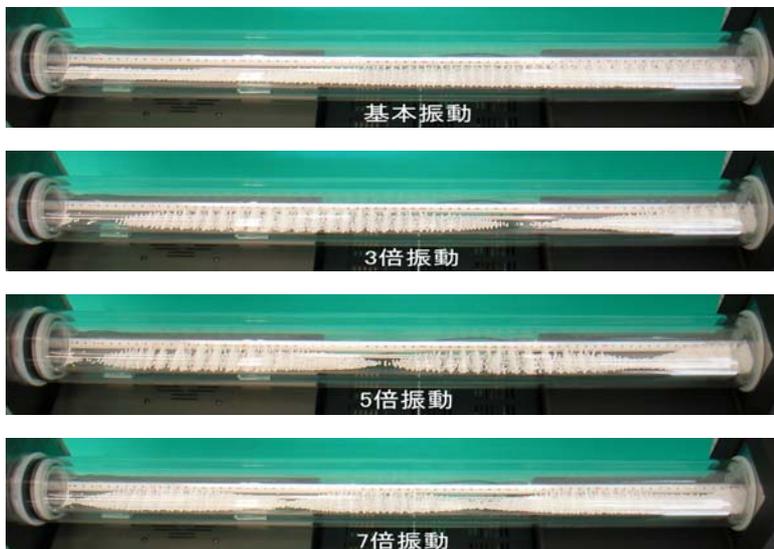
#### ・片開き管とした場合

装置の中央から 50 cm はなれて、騒音計で 50~63 dB 程度で実験できた。

測定日 12月10日 気温 18.8℃ 音速  $v = 331.5 + 0.6 \times 18.8 = 342.78 \div 343$  m/s

定常波ができた周波数	観測された定常波の 1/2 波長	波長から計算した振動数
101 Hz		
303 Hz (3.0 倍)	56 cm	306 Hz
505 Hz (5.0 倍)	34 cm	504 Hz
696 Hz (6.9 倍)	24.5 cm	700 Hz

図 10



・両閉じ管とした場合

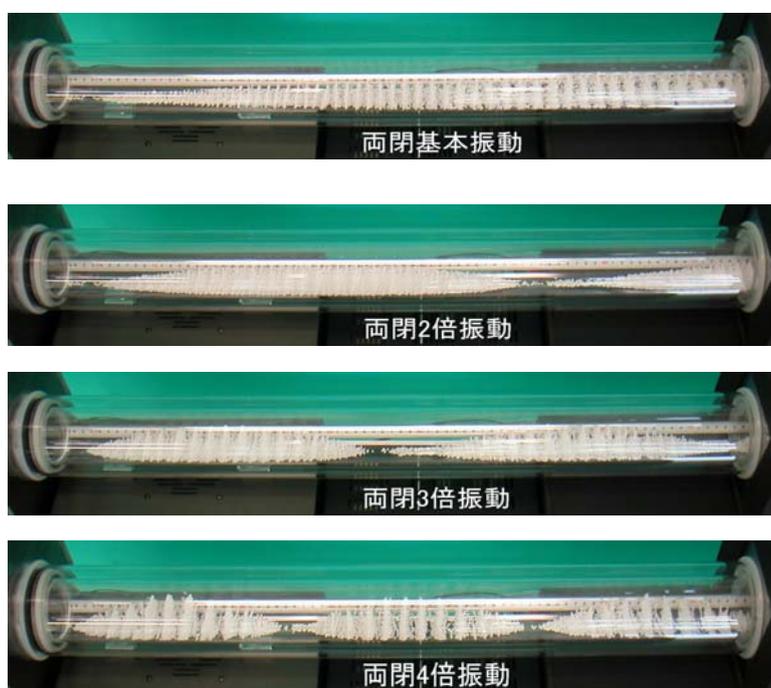
装置の中央から 50 c m はなれて、騒音計で 50~55 d B 程度で実験できた。

測定日 1 2 月 1 1 日 1 8 . 1 ° C 音速  $v = 331.5 + 0.6 \times 18.1 = 342.36 \approx 342$  m/s

定常波ができた周波数	観測された定常波の 1/2 波長	波長から計算した振動数
150 Hz		
302 Hz (2.0 倍)	56 c m	305 Hz
452 Hz (3.0 倍)	37 c m	462 Hz
604 Hz (4.0 倍)	28 c m	611 Hz

両閉じ管とした場合には、仮想的な管の長さは 112 c m 程度になっている。

図 1 1



#### 4 製作に必要な主な材料と費用

主な材料とその価格は次の通りである。

スピーカー Technics EAS-10F20 (最低共振周波数 5 5 H z、出力音圧 9 2 d B/W、2 2 6 8 円)、増幅器 (ノボル NAC2021B 2 3 0 0 0 円)、アクリルパイプ (外径 1 0 0 m m、厚さ 3 m m、長さ 1 m 7 9 0 0 円)、アクリルパイプ (外径 7 0 m m、厚さ 3 m m、長さ 1 m 5 4 0 0 円)、アクリル板全体 (厚さ 1 0 m m、2 2 0 0 0 円)、その他防音シート、防振シートなど。全体で 6 0 0 0 0 円程度。

低周波発振器は、大抵学校にあるのでそれを使用すればよい。増幅器もあれば 3 7 0 0 0 円程度で製作できる。

## 5 装置の組み立てと操作上の留意点

### 装置の組み立て

装置を片開き管の状態から両閉じ管の状態に変更したり、逆にする際の装置の組み立て方を説明する。

- ① 図12は、装置の外枠部分である。

図12



- ② 図13は内箱を入れた状態である。内箱引き出し用のベルトがあるが、特別な場合を除いては、内箱を引き出すことはない。内箱には後方空気用ホースが繋がっている。



図13

←



図14

→

- ③ スピーカーを内管に密着させる場合、スピーカーボックスを奥に押し込んでストッパーで止めればよいが、図14の防振シートの裏側にあるナットで固定すると、さらに安定する(図14)。図15は、スピーカーを内管に固定した状態である。



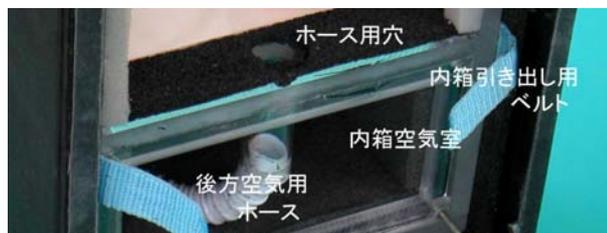
図15

- ④ 図16は、内管・スピーカーボックスを内箱内に入れた状態である。

図 1 6



図 1 7



スピーカーコードプラグを赤は赤、黒は黒のジャックに差し込む。後方空気用のホースをホース用穴に差し込む。

- ⑤ スピーカーボックス・ストッパーをストッパー穴に差し込み、スピーカーボックスを固定する (図 1 8、図 1 9)。

図 1 8



図 1 9



- ⑥ スピーカーボックス上部に防音シートを差し込む。これは固定用にもなる。

逆に、スピーカーボックス・内管を引き出す場合には、防音シート、スピーカーボックス・ストッパーをはずし、スピーカーコード、後方空気用ホースをはずして、ラジオペンチなどで、スピーカーボックスのビスをはさんで引き出せばよい。



図 2 0



図 2 1

- ⑦ 内ふたをする。ネジをしっかりと締める (図 2 0)。

- ⑧ 外ふたをする。バナナチップを差し込む (図 2 1)。

- ⑨ 低周波発振器、増幅器の裏面のコードを図 2 2 のように接続する。

図 2 2



## 装置の操作

- ① 低周波発振器・増幅器のスイッチ、つまみ類を図23のように設定する。  
内部スピーカースイッチをオフに、波形スイッチを正弦波に、増幅器AUX1つまみを3に固定する。

図23



- ② 最初、レンジ切り替えスイッチをAレンジにし、音量調整つまみを適当に上げて、振動数調整つまみを回して、一番スムーズに発砲スチロール球が振動している振動数を探す。これが基本振動数である。
- ③ さらに振動数を上げていき、再び発砲スチロール球がスムーズに振動するところ（定常波ができる場所）を探す。できなければBレンジに切り替えて探す。
- ④ スピーカーの振動数が気柱の固有振動数と一致したときに、発砲スチロール球は徐々にいわゆる定常波の形（横波）に分布していく。変化が遅いときには、少し音量を上げると早く変化する。生徒には、なぜ発砲スチロール球がこのように分布するのか考えさせる。また、スチロール球の動きに注目させ、音は縦波であることも確認させる。
- ⑤ このときの節と節の間隔を測定し、波長をだし、そのときの気温から音速を求め、波長 $\lambda$ 、音速 $V$ から振動数を計算し、実際の振動数と比較する。ただし、測定に当たっては、音量を上げすぎると発砲スチロール球が移動しすぎ、節の部分が分からなくなる。また、音量が小さいと節の部分ははっきりしないことがある。その場合は一番振動していない発砲スチロール球の位置を節とするとよい。
- ⑥ さらに振動数を上げ、定常波ができる振動数を探し、⑤の作業を繰り返す。
- ⑦ また、定常波ができたときの振動数が基本振動数の何倍になっているかを調べてみる。

## 6 管口補正（開口端補正）・その他について

この装置の内管の長さはいち箱の厚さも入れて、78 cmである。参考文献7によると「・・・波長にくらべて直径の小さい円形断面の音響管の内半径を  $a$  [m] とするときフランジのない場合の開口端補正の量は  $0.62a$ 、波長に比べ十分大きなフランジのある場合のそれは  $0.82a$  となる。」とある。 $0.62a$  として開口端補正値を計算すると、内管の内半径は3.2 cmなので、 $0.62 \times 3.2 = 1.984 \approx 2.0$  cmとなる。また、 $0.82a$  として計算すると、 $0.82 \times 3.2 = 2.624 \approx 2.6$  cmである。従って、開口端補正をした管の長さは、80 cmあるいは80.6 cmである。

実際に観測された定常波から計算した気柱の長さは85 cm程度である。かなり管口補正値が大きくなってしまいが、これは節の位置の特定誤差や内箱の影響があると思われる。なお、内管の閉端からスピーカーのコーンを中心までの距離は83 cmである。

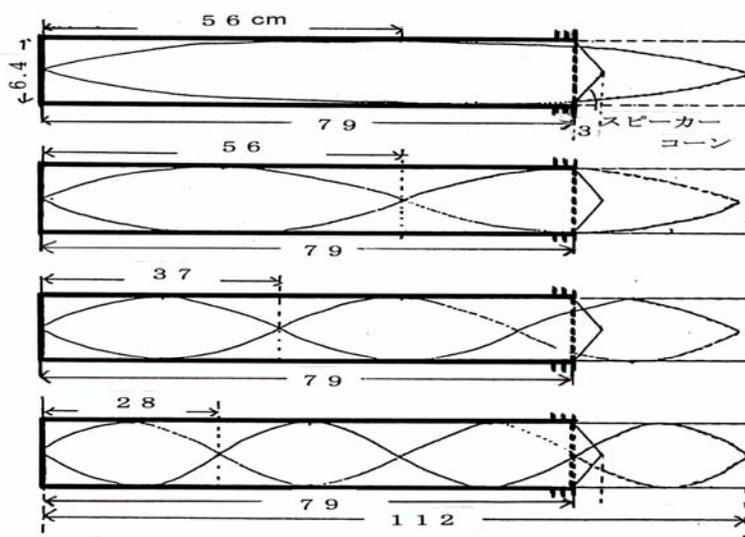
また、参考文献8には「・・・開口端補正  $\Delta l$  は、半径  $a$  と周波数  $f$  の上昇に伴って減少する。上記の値は非常に低い周波数あるいは小さな半径における漸近値である」とある。周波数が大きくなる（波長が小さくなる）と開口端補正値は小さくなり、従って実質的な管の長さが小さくなる。そのため共振周波数が大きくなると考えられる。しかし、この実験ではこの影響はあまりないようである。

ただ、一般に、高校で管口補正を教える場合、「管内の波長が管の直径に比べて充分長いとき」という前提条件が抜けて、ただ「管口補正は、管の内半径の0.6倍である」としている。この点注意して指導する必要がある。

スピーカーを管口に密着した場合、観測された定常波から計算すると、気柱の長さは112 cm程度である。スピーカーの位置は節の位置とも腹の位置ともいえない（図24）。これは参考文献1においても同様であった。

なお、管の長さとして、内管の長さ77 cm + 内箱の厚さ1 cm + スピーカーボックスの厚さ1 cm = 79 cmとしている。

図24



## 7 おわりに

気柱の定常波実験装置に興味を持ち始めたのは、1989年に科学技術館で行われた「エキスプロラティウム展」に展示されていた液体を吹き上げる装置を見てからである。それに刺激されて、直径10cm、長さ1mの亚克力管に発泡スチロール球を入れて、スピーカーで振動させる装置を作った。授業で使っていたが生徒たちに大変好評であった。そこで1991年の「中学・高校生のための科学実験講座（於工学院大学新宿校舎、現在の青少年のための科学の祭典の第1回目に当たる）」にも出品した。しかし、スピーカーからの音が大きく、まわりに大変迷惑をかけてしまった。また授業でも音が大きく、じっくり観察できないという問題点があった。そこで参考文献1にあるように、1998年にこの装置の減音化に取り組み、成功した。しかし実験してみると、基本振動数の整数倍の振動数で気柱が振動することがわかり、なんとか片開き管の形で実験できる装置が欲しいと思ってきた。これが今回この装置を製作するに至った経緯である。

まだ開口端補正の問題や精度の面で多少問題があるが、片開き管の場合にも、ある程度音を小さくすることができ、約100Hz、300Hz、500Hz、・・・と、基本振動の奇数倍で定常波をつくることができた。これによって、生徒に「気柱の定常波」を実感的に理解させることができるのではないかと思う。

なお、発泡スチロール球のつくる細かい縞模様についてはまだよくわかっていなが、参考文献2が参考になった。

さらに改善できる点を改善して、よりよいものを製作していきたい。皆様からのご指導ご教授いただけたら幸いである。

なお、この作品は、今年度（平成16年度）、財団法人発明協会・毎日新聞社主催 第53回全日本教職員発明展で**奨励賞**を受賞した。

### 参考文献

- 1 気柱の定常波演示実験器の減音化 馬目 秀夫  
研究発表集録第38巻（1999）PP14～15 東京都高等学校理科教育研究会
- 2 気柱振動に伴う物質の運動 北海道札幌旭丘高等学校物理部  
「第33回日本学生科学賞全集」 サンシャイン医学教育研究所編集、日本家庭教師センター学院発行（1991）、21
- 3 松田和久 物理教育 46（1998）168
- 4 謎解き音響学 山下 充康 著 丸善株式会社（2004）
- 5 トコトンやさしい音の本 戸井 武司 著 日刊工業新聞社（2004）
- 6 唐沢 誠 音の科学不思議辞典 日本実業出版社（1997）94
- 7 新版音響用語辞典 日本音響学会編 コロナ社（2003）p62
- 8 基礎音響学 振動・波動・音波 吉川 茂・藤田 肇 著  
講談社サイエンティク（2002）p178

<http://www6.plala.or.jp/maamu/>