

様々な基本周波数に対応した声道模型のための リード式音源の検討*

○荒井隆行（上智大・理工）

1 はじめに

今まで、著者によって声道模型など物理的な模型や実際のデモンストレーションと電子教材を併用した教材環境など、音響学ならびに音声科学のための教育とそれに伴う教材について提案してきた（例えば[1-4]など）。その中の特に声道模型については、子どもを対象とした科学教室での工作に適したものの開発[5]，母音の質を保ちながらいかにその形状を簡素化するか[6]，ダイナミックに母音を変えられるような模型の開発[7]など，目的や用途に合わせて様々なバリエーションを展開してきた。そのような背景のもと，声道模型に入力する喉頭原音を模擬した音源の工夫については，初期の段階から導入している人工喉頭その他，簡単な機構で良い音が出るリード式音源についても検討・改良を重ねてきた。

リード式音源については，Fig. 1にあるように主に3つのタイプに大別される[8]。Fig. 1(a)は，リードの受けが湾曲している一方，リード自身はまっすぐなタイプで，比較的良い音を出す，受けの曲線的加工の難易度が高い。Fig. 1(b)は，リードの受けはまっすぐである一方，リード自身が反っており，その反り具合によって音質が左右される点，反らせ方が難しい。Fig. 1(c)はリードは途中で折り曲げられているだけで，受け側もリードも加工が比較的簡単であり，音質もそこそこのものを得ている。

以上のように，リード式音源についていくつかのタイプがあるが，声道模型が成人男性のものばかりではなく，成人女性や子どもの母音に対応した模型といったように多様になるのに合わせて，音源も様々な基本周波数に対応できる必要がある。そこで，本稿では様々な基本周波数に対応したリード式音源について考察する。

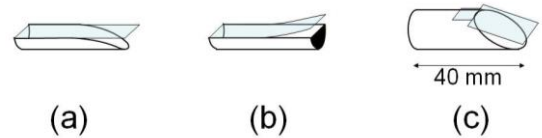


Fig. 1. Three types of reed-type sound source (adapted from [8]).

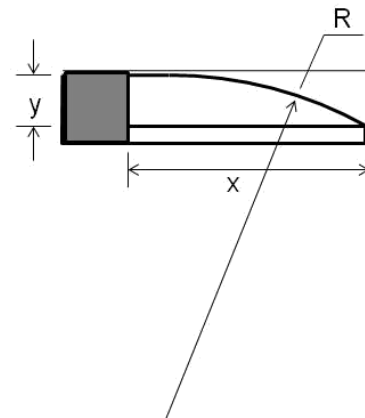


Fig. 2. Side view of reed-type sound source.

2 周波数固定式リード式音源

本節では，特に Fig. 1(a)のタイプについて，異なる基本周波数で振動させるようにサイズを変えた場合の結果について報告する。なお，基本周波数はリードの材質や厚さでも変わるが，本稿では厚さ 0.1 mm の OHP シートのみを使用するものとし，主にその長さを変えることによって周波数の変化を検討した。

2.1 半円筒型

Fig. 2 に，リード式音源を横から見た図を示す。半円筒型の場合，円筒パイプの内径 ϕ ，リードの受けのカーブの曲率半径 R ，リードの長さ x という3つの変数によってサイズが決まる。半円筒型では Fig. 2 の y は $\phi/2$ に対応し，Table 1 のように3つの変数を変化させて組み合わせることによって，9 パターンについて検討した。

* Reed-type sound sources with various fundamental frequencies for physical models of the human vocal tract, by ARAI, Takayuki (Sophia University).

Table 1. Parameters of the semi-cylindrical type.

| ID# | ϕ [mm] | R [mm] | x [mm] |
|-----|-------------|--------|--------|
| SC1 | 8 | 30 | 20 |
| SC2 | 8 | 25 | 20 |
| SC3 | 8 | 20 | 20 |
| SC4 | 6 | 30 | 20 |
| SC5 | 6 | 25 | 20 |
| SC6 | 6 | 20 | 20 |
| SC7 | 6 | 15 | 8 |
| SC8 | 4 | 20 | 8 |
| SC9 | 4 | 15 | 8 |

Table 2. Parameters of the rectangular type.

| ID# | y [mm] | R [mm] | x [mm] |
|-----|--------|--------|--------|
| RA1 | 4 | 30 | 20 |
| RA2 | 4 | 30 | 15 |
| RA3 | 4 | 30 | 10 |
| RA4 | 4 | 30 | 5 |

2.2 角型

円筒パイプを長さ方向に半分に割ったものをベースにするのが半円筒型であるとしたら、角型は角パイプを長さ方向に割って加工するものである。横から見た図はやはり Fig. 2 のようになるが、内側の 1 辺が 6 mm の角パイプをベースに、 $x = 20$ mm, $y = 4$ mm, $R = 30$ mm であるものを 1 つ用意した。そして、振動可能なリードの長さを 20 mm とし、リードをテープで固定した。さらに、5 mm ずつリードを短くテープ止めることによって、Table 2 のように 4 パターンについて検討した。

2.3 既存するリード式音源

既存のものとして、おもちゃ等に埋め込まれた音源部を取り出し、比較対象とした (ID#が TY1 から TY4 の 4 パターン)。

2.4 測定結果

合計 17 パターンの音源に対し、PCM レコーダ (SONY PCM-D1) にてデジタル録音した (標準化周波数 48 kHz, 量子化ビット 16 bit)。リード式音源のリードを振動させるためには空気を送り込む必要があるが、著者が実際に呼吸を吹き入れることで

Table 3. Spectral characteristics.

| ID# | f_0 [Hz] | Max-Min [dB] |
|-----|------------|--------------|
| SC1 | 114 | 11.5 |
| SC2 | 119 | 13.9 |
| SC3 | 119 | 13.1 |
| SC4 | 136 | 11.6 |
| SC5 | 154 | 12.1 |
| SC6 | 160 | 13.7 |
| SC7 | 421 | 14.1 |
| SC8 | 471 | 15.1 |
| SC9 | 533 | 17.9 |
| RA1 | 121 | 9.6 |
| RA2 | 154 | 10.4 |
| RA3 | 211 | 10.4 |
| RA4 | 727 | 25.9 |
| TY1 | 73 | 15.2 |
| TY2 | 131 | 15.6 |
| TY3 | 400 | 28.4 |
| TY4 | 444 | 34.3 |

音源を鳴らした。各音源信号について 8 kHz にダウンサンプリング後、その定常部について Matlab を用いてスペクトル分析を行った結果、Table 3 のようになった。表の f_0 は、ケプストラム分析によって推定された基本周波数である。一方、Max-Min は 12 次の線形予測符号化 (LPC) によって得られた対数スペクトル包絡の最大値と最小値の差を dB 表示したものである。

3 周波数可変式リード式音源

周波数を自由に変えることによって、イントネーションを付加することが可能となる。そして、音源フィルタ理論において、音源の f_0 変化がそのまま母音の f_0 変化として現れる様子を簡単にデモンストレーションできる。さらには、声道模型を使って歌わせることもできるようになる。本節では、今まで試したいくつかの周波数可変式リード式音源を示す。

3.1 反ったリードを用いた場合

Riesz [9] によって提案された人工喉頭は、リード式音源に対して周波数を変えるための機構が備わっており、それを参考に作られた (詳しくは、文献[10]参照のこと)。Fig. 1(b)のように反ったリードに対し、押さえる位置を変えることによって、リード長を制御する仕組みである。

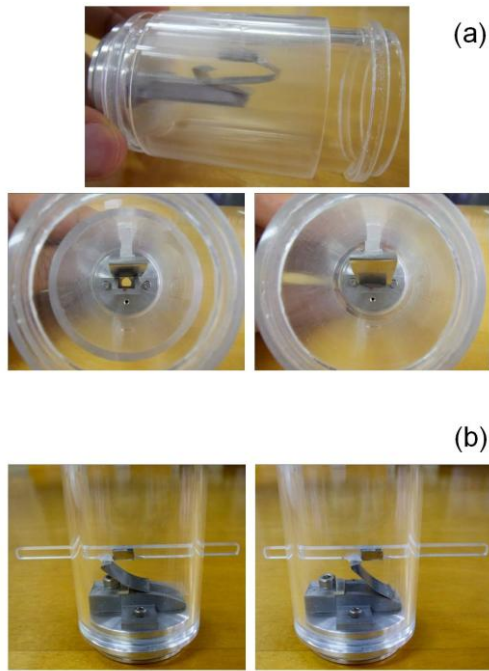


Fig. 3. Frequency-variable reed-type sound sources.

3.2 角型リード式音源の場合

周波数固定式において RA1 から RA4 までリードを止める位置を変えたが、その押さえる位置を連続的に可変できるように設計した。リードの受けがカーブしているため、それに合わせてリードを押さえる機構を実現する必要がある。それを実現するため設計された2つのものを、Fig. 3(a), (b) に示す(その他の例は、文献[10]参照のこと)。これらの図を見ると分かるように、いずれの場合もリードの押さえがカーブに沿って曲がる。

4 考察

まず、周波数固定式について考察する。Table 3 を見ると分かるように、リード長が同じ場合にはほぼ同じような基本周波数 (f_0) を示した。SC1~SC6 では f_0 が低く、成人男性に対応している。一方、SC7~SC9 は f_0 が高く、子どもの母音に適している。RA1~RA4 についても、リード長が短くなるに従って f_0 が増加し、その範囲は成人男性から成人女性、子どもまでと広く、また角型の音質は高く、半円筒型と同程度であった。ところで、RA1 から RA4 に至って

は同じ長さだけリードを短くしていったのにも関わらず、 f_0 周波数の増加は一様ではなかった。すなわち、 f_0 が高くなるとリード長に対して敏感に f_0 が変化した。

SC1~SC3 と SC4~SC6 を比較すると、 f_0 は SC1~SC3 ではほとんど変わらないものの、SC4~SC6 では ϕ が小さくなることで f_0 が少し上昇した。これは、 ϕ が小さくなることによって呼気量が減り、実効的に振動するリードの長さが短くなって、 f_0 が上昇したものと解釈される。なお、呼気量の減少に伴い、SC4~SC6 のほうが SC1~SC3 よりも音量も小さかった。

一方、同じ ϕ であっても R が小さくなるとどのような影響があるかを見た。SC1~SC3 を比較すると、 f_0 はほとんど変化しなかった。しかし、息を吹き入れる際の呼気圧は違った。つまり、R だけが異なる SC1~SC3 を比較すると、SC1 は弱い呼気圧でも励振するのに対し、SC3 は少し強めの呼気圧が必要であった。なお、RA1 は SC1 と同程度であった。SC4~SC6 を比較すると、やはり SC4 よりも SC6 のほうが強めの呼気圧を要した。呼気圧の上昇に伴って音量も増加したが、前述の通り、音量は ϕ にも関係するため、最終的に音量は ϕ と R のバランスで決まることになる。その結果、SC4 が最も音量が小さかった。逆に SC3 は比較的大きかった。SC7~SC9 については、 ϕ は小さいものの R も小さいためにさらに高い呼気圧が必要で、その結果、音量も大きくなった。また呼気圧がすでに高い分、SC7~SC9 についてはそれ以上呼気圧を高めても f_0 の上昇はあまりなかったが、SC1~SC6 では呼気圧を高めると f_0 が上昇した(上昇はしたがリードは励振した)。なお、呼気圧については、子どもはあまり強く吹くことができないので、科学教室などでは SC1 あるいは RA1 を用いることが望ましいと考えられる。一方、科学館での展示などの場合、呼気の代わりにふいごからの空気を利用する場合があるため[11]、SC3 などの利用が考えられる。

声道模型を接続した際により母音らしく聞こえるためには、音源そのもののスペクトルに特徴的なピークや谷がないことが望ましい。そこで、Table 3 の Max-Min 値を

比較した。その結果、同程度の f_0 を持つ SC1 と RA1, TY2 を比較すると、TY2 ではやや値が大きいのにに対し、SC1 や RA1 ではその差が 10 dB 前後と相対的に小さかった。高い f_0 についても、RA2 や RA3 では低い Max-Min 値を保っていた。一方、TY1~TY4 は全般的に値が大きく、既存のものは音質が確保されにくいことが確認された。

次に、周波数可変式についてであるが、Fig. 1(a)に示す半円筒型や、Fig. 1(c)に示す円筒管を斜めにカットするタイプでは実現が難しかったため、反ったリード式と角型で実現した。反ったリード式の場合、リードを反らせておいてそれを押さえるため、リードの反りが変ってしまったり、リード長が短くなった際にうまく励振しない場合などもあった。一方、角型の場合、比較的音質は良好であったが、受けに沿ってカーブ状に押さえる力にムラが生じることがしばしばあった。また、連続的にリード長を変化させても f_0 周波数が不連続になることもあった。

5 おわりに

教材としての声道模型を開発するにあたり、必ずしも人間の声道と同じ詳細な形状を模型で実現することが教材として優れているわけではないことを実感している。つまり、なるべく本質だけを残しその他を簡素化することによって、その本質を強調しながら教えることが重要と考える。さらに、シンプルであればあるほど物理現象を定式化し易くなり近似計算がし易くなる。また、自分たちで工作することが出来るようになる。声道模型の場合は、母音の質を保ったまま本質的な形状を維持する一方、細かい形状は取り除いた。音源の開発についても、同様にことが言える。つまり、人間と同じように空気力学的な働きによって振動し、かつ人間の喉頭原音と同じような音質を保ちつつ、なるべくシンプルな機構でそれを実現することを追求している。

その結果として、リード式音源について検討を行った。特に、異なる基本周波数に対応したリード式音源について試作と評価を行った。リードの受けが湾曲した半円筒型のものが音質も良く音源としても最も適

していると判断されてきた。しかし、角型のものも音質はまったく変わらず、さらに加工や工作のし易さや、周波数の調整のし易さなどもあり、角型のもののほうがむしろ利点が多いことが分かった。

謝辞

内容の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金 (21500841)、及び文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業上智大学オープン・リサーチ・センター「人間情報科学研究プロジェクト」の助成を得た。

参考文献

- [1] Arai, T., "Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract," *Acoust. Sci. Tech.*, 28(3), 190-201, 2007.
- [2] Arai, T., "Sliding three-tube model as a simple educational tool for vowel production," *Acoust. Sci. Tech.*, 27(6), 384-388, 2006.
- [3] Arai, T., Yasu, K. and Goto, T., "Digital pattern playback: Converting spectrograms to sound for educational purposes," *Acoust. Sci. Tech.*, 27(6), 393-395, 2006.
- [4] Arai, T., "Gel-type tongue for a physical model of the human vocal tract as an educational tool in acoustics of speech production," *Acoust. Sci. Tech.*, 29(2), 188-190, 2008.
- [5] Arai, T., "Science workshop with sliding vocal-tract model," *Proc. Interspeech*, 2827-2830, 2008.
- [6] Arai, T., "Simple physical models of the vocal tract for education in speech science," *Proc. Interspeech*, 756-759, 2009.
- [7] Arai, T., "Mechanical vocal-tract models for speech dynamics," *Proc. Interspeech*, 1025-1028, 2010.
- [8] 荒井隆行, "スライド式声道模型のためのリード式簡易音源の比較," 音講論, 1563-1566, 2008.9.
- [9] Riesz, R. R., "Description and demonstration of an artificial larynx," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1(2A), 273-279, 1930.
- [10] Arai, T., "Physical models producing vowels with pitch variation," *Proc. Interspeech*, 2011.
- [11] 荒井隆行, "日立シビックセンター科学館における声道模型の展示," 音講論, 1587-1590, 2011.3.