

スライド式声道模型のためのリード式簡易音源の比較*

○荒井隆行（上智大・理工）

1 はじめに

数年前から「声」をテーマにした科学教室の一提案として、日本音響学会と共催で国立科学博物館にて「音の科学教室」を行っている。2006年より年1回開催しており、第3回を2008年10月に予定している。音響学に本格的に触れる機会を身近に提供することを目的にしている本科学教室には、主に小学校高学年を中心とした児童10～15名が毎年参加している（詳細については[1,2]を参照）。

「声」は子ども達にとっても身近なテーマの一つであると同時に、母音の生成機構は比較的単純に示すことが可能である。本科学教室の第1回から第3回では、「音のふしぎ・声をつくろう」と題し、「声」をテーマとして取り上げた。

まず身近に存在する様々な音を聞かせ、音の正体が振動であることを説明した後、1つ目の工作としてフィルム容器を使った笛を製作する。その後、楽器の音の高低がどのように変わるかを観察し、2つ目の工作として先ほどの笛を改良してスライドホイッスルを製作する。このスライドホイッスルは、発音部、共鳴管（アクリルの筒）、スライド部から成るが、発音部には先ほど工作した笛を使用する。筒の中で「スライド部」を移動させることで共鳴部の長さを調節し音の高さを変化させる構造になっている。共鳴管には長さ200mm、外径40mm、内径34mmのアクリルの透明な筒を使用。スライド部にはフィルム容器を活用し、操作をしやすいように針金で持ち手をつけた。

参加する子ども達の興味が高まったところで、音声生成のしくみに関して、我々が開発した肺の模型と頭部形状模型[3]、ゲル舌による声道模型[4,5]を使ってデモンストレーションを行いながら説明する。次に、筒型の声道模型[6]でも同じように母音が生成されるのを見せた後、スライド式声道模型[7]（Fig. 1

参照）の工作に挑戦する。アクリル筒と「狭め（スライド部）」はスライドホイッスルと同じものを用い、新たに「リード式音源」を作って組み合わせる。このリード式音源においてその完成度が音質の良し悪しを左右するが、同時に工作のしやすさや充実度もキーとなる。そこで、本稿では3種類のリード式簡易音源を各側面から比較検討する。

2 リード式音源

リード式音源は、いずれの場合も細い竹筒（外径が約10～12mm、長さが約40mm）とプラスチックシート、そしてフィルム容器で実現した（Fig. 1）。竹筒に適当な大きさの形状に切ったプラスチックシートをリードとして固定し、フィルム容器に入れて固定すると完成である。フィルム容器に息を吹き入れると、リードが振動をすることで喉頭原音のような音源となる。

2.1 バージョン1

第1回の「音の科学教室」では、Fig. 1 (a)のように縦方向に半分に割った半円筒形の細い竹筒の先端部の角を丸くし、その上にプラスチックシート（厚みは0.3mm）を乗せて角が丸く削られていない側の端を固定することで、リード式音源を実現した。この場合、カッターナイフを使って大きなRを描くように先端部の角を落とし、さらにやすりを使って滑らかに仕上げる。

2.2 バージョン2

第2回ではバージョン1と同じように縦方向に半分に割った半円筒形の細い竹筒を用いたが、バージョン1と違ってFig. 1 (b)のように手前側の端にちょうど節がくるように竹筒を切って用意した。そして、上に乗せるプラスチックシート（厚みは0.3mm）をカールさせて反り返させた。反り返った側が手前の

* Comparing reed-type sound sources for the sliding vocal-tract model, by ARAI, Takayuki (Sophia University).

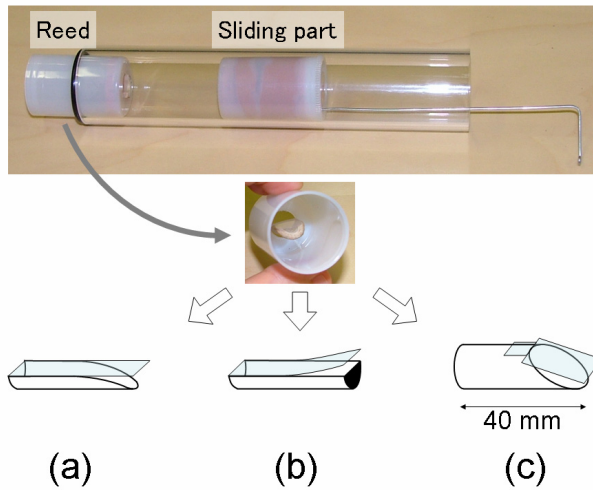


Fig. 1 Sliding vocal-tract model with the three versions of reed-type sound source

節の上に位置するようにプラスチックシートを乗せ、反対側を固定することで、リード式音源を実現した。

2.3 バージョン 3

第3回では Fig. 1 (c)のように細い竹筒を斜めに（例えば45度）にカットし、その上にプラスチックシート（厚みは0.2 mm）を乗せることにした。この場合、プラスチックシートを必要な幅にカットし、筒のカット面を覆うだけの長さを確保したところで折り目を付けて、反対側を竹筒にテープで固定する。斜めにカットされた竹筒の断面を覆うようにシートの振動面が配置されることになるが、息を吹き入れたときにうまく振動するように折り目の両側の幅を細く切るなどの工夫が重要となる。

3 3つの音源の比較

3.1 工作のしやすさと充実度

バージョン1では、半円筒形の細い竹筒の先端部の角を丸くする。竹筒を縦方向に二つに割った状態で子ども達に配布した。参加者は、そこからカッターナイフとやすりを使って片側の先端部の角を丸く削ることになるが、その丸みが振動するプラスチックシートのたわむ曲線と一致しなければならず、加工の難易度は高い。実際、なかなかうまく削ることのできない参加者が多く出ることがあり、

中でもシートがうまく振動しない、あるいは振動しても安定した振動にならないなどの症状が多かった。加工に際しては、人数に見合った多くのスタッフによるサポートが必要であった。しかし、苦勞して「いい音」を出せるようになったときの充実度は格別であり、参加者の満足度も上がるようであった。

バージョン2では半円筒形の細い竹筒の端に片方が反り返ったプラスチックシートを乗せるが、この場合も縦方向に二つに割った竹筒を事前に用意した。参加者は、上に乗せるためのプラスチックシートを切って片端を反り返させることになるが、ここではシートをうまくカールさせられるかどうかは鍵となる。比較的鋭いエッジを持った金属（はさみなど）を使ってシートを反り返させるのだが、思ったよりも子どもには難易度が高かった。特に、シートがきれいな曲線をもって反らせることができず、途中で折り目がついたり急激に折れ曲がってしまったりすることが多かった。

バージョン3では斜めにカットした竹筒を用いるが、カットするところまではやはり事前に準備した。参加者は、上に乗せるプラスチックシートを必要な大きさに切って途中で折り目を付け、折り目をさらに細くする。他の2つのバージョンに比べ工作の難易度は低いものの、シートの折り目の付け方や折り目をどのように細くするか、そしてシートの角度とその固定法などの点でチャレンジできるところも残されている。特に、シートが筒の切り口に最も接したときに少しでも隙間があると高域の伸びが悪くなるなどスペクトル特性が劣化する。他のバージョンと同様、その微妙なさじ加減が振動の良し悪しを決定することから、充実度も確保される。

3.2 音響特性

本節では、3つのバージョンそれぞれの音源のスペクトル特性と、音源をスライド式声道模型に接続した際の母音のサウンドスペクトログラムを示す。録音に際しては、いずれの場合もPCMレコーダ（SONY PCM-D1）とその内蔵マイクロホンを用いた。

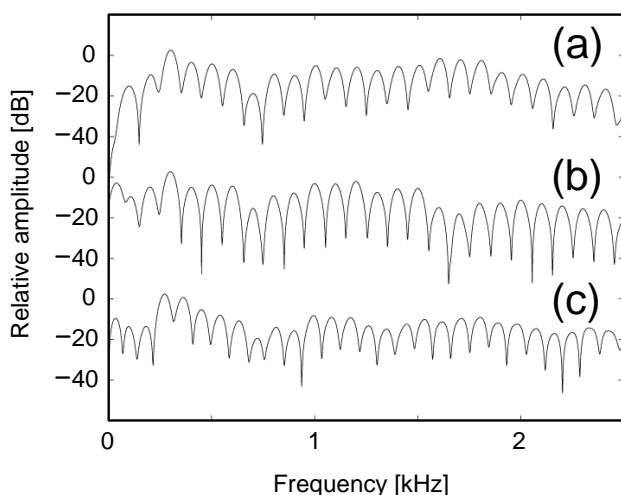


Fig. 2 Logarithmic spectra of the three versions of reed-type sound source

Table 1 Relative amplitude of each harmonic component in Fig. 2 (zero mean)

[unit: dB]

Harmonics	Ver. 1	Ver. 2	Ver. 3
1st	-7.1	-0.7	-2.2
2nd	-1.6	4.0	-2.2
3rd	10.5	11.6	13.7
4th	4.6	3.9	12.1
5th	3.7	5.0	6.1
6th	1.1	4.5	3.4
7th	-10.8	-6.5	0.6
8th	-1.3	-0.3	-8.0
9th	-2.0	1.1	-2.6
10th	2.9	5.7	-4.3
11th	1.8	5.6	3.2
12th	2.2	6.8	2.3
13th	0.5	1.4	2.1
14th	2.6	3.2	-1.9
15th	3.1	3.4	-3.5
16th	6.5	-6.0	-1.1
17th	5.9	-9.1	1.3
18th	5.4	-4.0	0.0
19th	-0.5	-3.9	1.7
20th	-1.4	-2.4	2.3
21st	-3.6	-4.2	-0.5
22nd	-7.5	-5.3	-1.1
23rd	-6.6	-6.7	-3.3
24th	-8.6	-7.2	-5.7
25th			-5.1
26th			-3.0
27th			-4.4

Fig. 2 に、3つのバージョンの音源の対数スペクトル特性を示す。母音のスペクトルは、この音源スペクトルの上に音響管の形状で決定される共鳴特性が重畳することで特徴付けられる。そして、母音の韻質は低周波域の共鳴特性、特に第1、第2フォルマントが重要となる。この Fig. 2 の場合、基本周波数が 100 Hz 前後なので、2.5 kHz 以下の低い周波数範囲にフォルマントが重畳することになる。したがって、2.5 kHz 以下の音源スペクトル特性に極端なピークや谷が存在しないほうが好ましい。

Fig. 2 を見ると分かるように、いずれのバージョンにおいても多少の振幅スペクトル上における凹凸が観測される。2.5 kHz までの周波数範囲に存在する倍音の振幅値（平均値が 0 dB）を求めたのが Table 1 である。これにより、バージョン3が最もゆらぎが少ないことが分かる。最もゆらぎがあるのはバージョン2であった。しかし、いずれもそのゆらぎは ±10 dB 程度の範囲内であった。

また、3つのバージョンで音源スペクトルの傾きを測定した。その結果、バージョン1が最も傾きが小さく高域の伸びが強かった。次いで、バージョン3の傾きが小さかった。

Fig. 3 に、3つのバージョンの音源を用いたスライド式声道模型によって生成した母音のサウンドスペクトログラムを示す。これらの図を比較すると、いずれの場合も母音を特徴付ける第1、第2フォルマントがほぼ実現されていることが分かる。

4 おわりに

スライド式声道模型の工作において用いる音源として、3種類のリード式簡易音源を比較検討した。工作のしやすさという観点からは、筒を斜めにカットした切り口にシートを乗せて固定する簡易音源（バージョン3）が最も加工がしやすい。一方、音質の面では半円筒の端を丸く削って上にシートを乗せて固定する簡易音源（バージョン1）が、最も高域の成分が強くて聴感上も高域の伸びがあった。しかし、生成される母音はいずれのバージョンにおいてそれなりの韻質を実現していた。

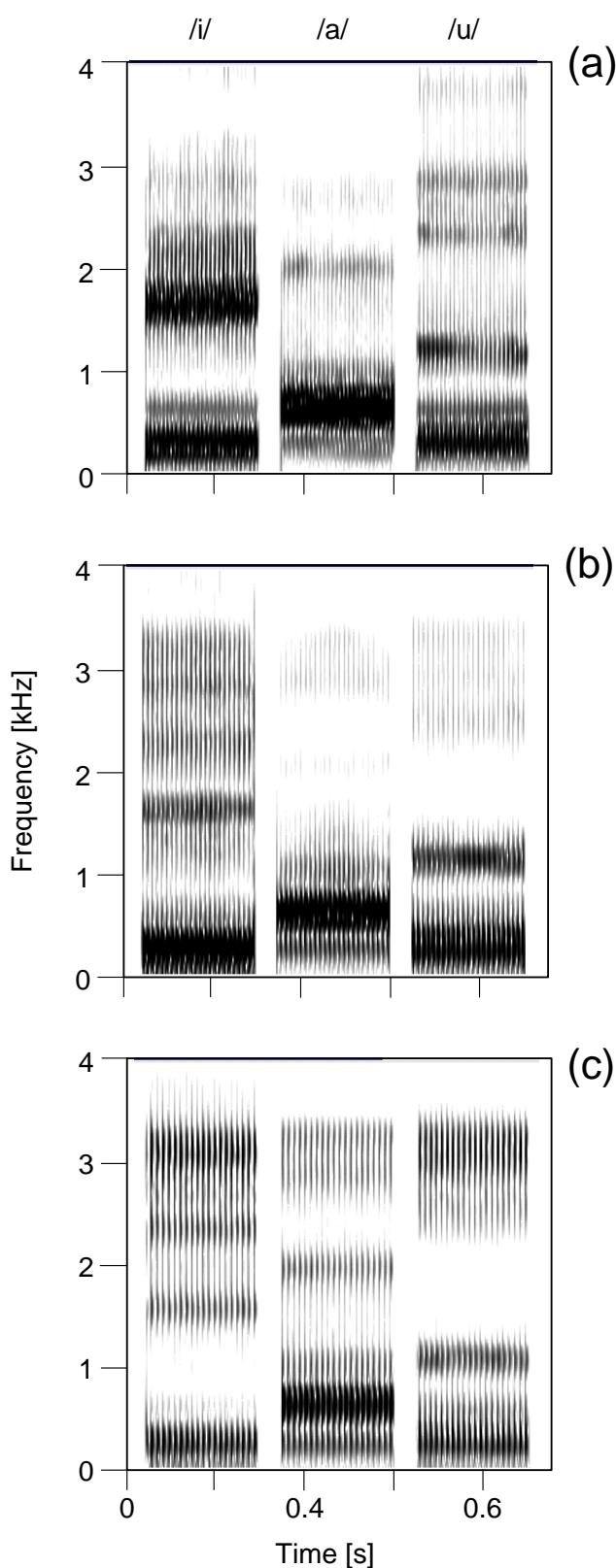


Fig. 3 Sound spectrograms of the three vowels, /i/, /a/ and /u/, generated by the sliding vocal-tract model with the three versions of reed-type sound source

謝辞

科学教室を開催するにあたり、ご協力頂きました国立科学博物館の皆様、特に前島正裕氏に心より感謝申し上げます。また、「音の科学教室」の運営に当たっては、日本音響学会音響教育調査研究委員会有志の協力を得た。当日お手伝いをして下さった皆様に、心より感謝を申し上げます。内容の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金(19500758)、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] 荒井隆行, “音に関する子ども向け科学教室の実例,” 日本音響学会音響教育研究会資料, EDU-2007-04, 2007.
- [2] 荒井隆行, “音の科学教室: 音のふしぎ・声をつくろう,” 音講論 (春), 1483-1486, 2008.
- [3] 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.
- [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] 荒井隆行, “軟らかい舌による声道模型教材,” 音講論 (春), 439-442, 2008.
- [6] Arai, “The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity,” *Journal of the Phonetic Society of Japan*, 5(2), 31-38, 2001.
- [7] Arai, “Sliding three-tube model as a simple educational tool for vowel production,” *Acoust. Sci. Tech.*, 27 (6), 384-388, 2006.