

# 音声科学における声道模型を用いた音響教育

Acoustics Education in Speech Science Using Physical Models of the Human Vocal Tract

荒井隆行・前田絵理

Takayuki Arai and Eri Maeda

上智大学 理工学部 電気・電子工学科

Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Sophia University

内容梗概：我々はChiba and Kajiyamaによる声道模型を復元し、それを音声科学を中心とした分野における音響教育の教材として用いてきた。そしてこの声道模型は、直感に訴えるとても優れた教材であることが実証されてきている。本稿ではその声道模型についてを改めて紹介し、その利用方法について学習者のレベル別に検討した。声がどのように作られるかを体験するという子供向けのレベルから、声道模型とコンピュータシミュレーション結果を比較することによってより高度な利用までが可能であることが示された。

## 1. はじめに

Chiba and Kajiyama (1941) は声道形状を測定し、その測定結果から声道模型を作りその模型で母音を生成させることによって、声道形状が母音の質を決定することを確かめている[1]。Arai (2001) は、そのChiba and Kajiyama による声道の物理模型を透明なアクリルの素材で復元し、それが音響教育の教材として有効であることを示している[2-9]。Araiのモデルでは、2つのタイプが実現されている。1つは筒型のタイプ (Fig. 1参照) で、もう1つはプレート型のタイプである。筒型のモデルはChiba and Kajiyamaの声道模型と同様に、彼らの線形近似モデルがベースになっている。一方、プレート型のモデルでは、厚さが10mmのアクリルのプレートを何枚も並べる形式をとっており、それぞれのプレートの中央には直径の異なる円状の穴が空けられていることから、隣合った穴が結果的に音響管を形作り、並べ方によって様々な形状の音響管を実現できるように工夫されている。いずれのタイプにおいても、喉頭側から何らかの音源を入力することにより、反対側から音が生成される。

我々は今までに、何種類かの音源を試してきた

が、その中でも電気式人工喉頭が最も手軽で音質がよく、またそれ自身がよい教材であることから、この電気喉頭をしばしば用いている[2]。その他の音源としては、笛式人工喉頭なども有効であることがわかっているが、任意の音源を入力させることを目的とした場合、ホーンスピーカのドライバユニットを活用することが有効であることがわかっている[10]。

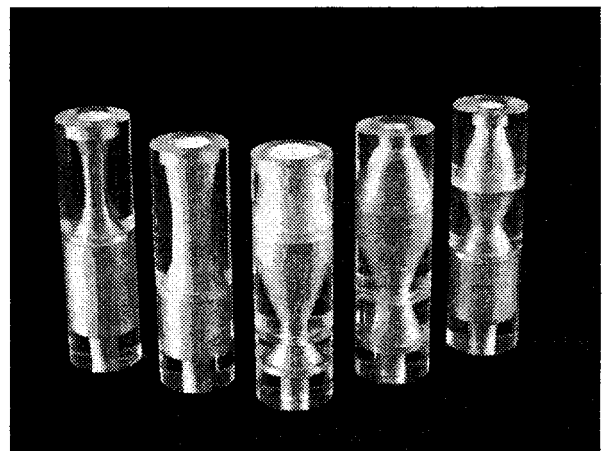


Fig. 1: 筒型の声道模型 (左から/i/, /e/, /a/, /o/, /u/)

声道を模型によって実現するという考え方は新しいものではなく、古くはKratzenstein (1782)や Von Kempelen (1791)などが文献には残っている[11]。Chiba and Kajiyamaが1941年に母音論「The Vowel」を出版した後、多くの研究者がそれぞれの研究目的で声道模型を製作している。例えば梅田・寺西 (1966)は、母音と声質との関係を声道模型によって調べている[12]。また党・本多 (1995) は、喉頭における梨状窩が母音に与える影響をやはり声道模型によって検証している[13]。

声道模型は教育目的で用いられているケースが今までにまったくなかったわけではなく、授業で使われているという話や博物館で展示してある例は存在する[14]。しかし、声道模型自身は手軽なものであり、もっと広く普及されるべきはずなのにそうでない現状に筆者らはかねてから不思議に思ってきた。また、筆者自身の授業でもそのような手軽な教材が欲しいと思ってきたことから、その開発・改良を続けてきている。

次章以降では声道模型について、声がどのように作られるかを体験するという子供向けのレベルから、声道模型とコンピュータシミュレーション結果を比較するといった比較的高度なレベルまで、その利用方法についてレベル別に検討する。

## 2. 声道模型を用いた音響教育

声道模型を用いた音響教育は、音声を専門とする学生のみならず高校生、中学生、場合によっては小学生にまで有効であると考えられる。それは、音自身がとても直感的な要素を持っており、また音声自身が身近な存在であることに裏付けされる[4]。本節では声道模型を用いた音響教育をレベル別に考えてみたい。

### 2.1 小学生を対象とした音響教育

音はとても直感的にもわかりやすい物理現象であり、私たちは常に音に囲まれている。そして人間が何らかの行動を起こす時、そこにはたいていの場合、音声コミュニケーションがともなう。そのことを実感させ、音、場合によっては科学に目覚めさせる1つの教材として声道模型

は有効であろうと考えられる。声道模型に電気喉頭のような音源を入力するだけで、簡単に母音のような音を作り出すことができる。また、プレートをどのように組み合わせたらよいかを予め提示し、パズル感覚で声道模型を組み立てさせ、自分で組み立てた模型がその組み合わせ方によって異なる音を出すことを体験できる。そのような体験を通じて、遊びながら音に触れ合い、「どうして声みたいに聞こえるの?」「なんでいろいろな声になるの?」という疑問を抱かせるよいきっかけを生むであろう。

### 2.2 中学生を対象とした音響教育

中学校に入ると英語を学ぶようになる。そこでは、日本語にはなかった母音・子音に初めて遭遇することになる。英語を母語としない生徒にとっては、英語の母音はどのように発音したらよいかは疑問であろう。そのような疑問への答えを提供しつつ、声道の形状と母音の音質とを関連づけながら、声道模型によって音を確認する。

### 2.3 高校生を対象とした音響教育

「気柱の共鳴」を学ぶことによって、共鳴現象についての理解を手掛かりに、「気柱の共鳴」と「声道の共鳴」の共通点と相違点を示す。特に、一様音響管から産出される音の周波数について考察し、さらに一様でない音響管の場合はどうなるかを体験する[15,16]。共鳴現象を視覚化するクントの実験を併用することも有効である[17]。

### 2.4 文系の大学生を対象とした音響教育

文系の大学生、特に音声学や言語障害学に携わる学生にとって、母音の生成モデルとしての音源フィルタ理論を理解することはとても重要なことである。音源フィルタ理論が母音生成の厳密なモデルでないにせよ、母音の大まかな特性を理解する上では十分である。Fig. 2に示すように、音源フィルタ理論では音源と声道フィルタとが独立であると考え、声道フィルタというシステムに音源が入力されたときの応答が音声出力であるとして、音声生成を線形システムとして捉えている[18]。このことを理解するには声道模型は最適であり、音を実際にその場で出

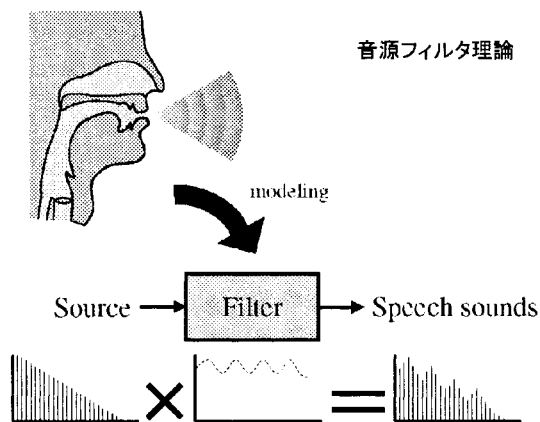


Fig. 2: 音源フィルタ理論を説明する模式図

することができることからとても直感的な理解を促すことが可能となる。実際に音を出しながら「フィルタ(声道模型)を変えるとどのように音の聞こえが変わるか?」、また「音源を変えるとどうか?」などを問うことが出来る。同じ音源を用いながら異なる声道模型で母音を生成させると、作られる母音の質が変化することがわかる。また、同じ声道模型を使いながら音源の基本周波数を変化させることによって、出力音の基本周波数が音源の基本周波数に支配されていることが体験できる。さらに、生成された母音を分析ソフトに掛け、その基本周波数の測定や共鳴特性としてのフォルマントを分析・測定することも可能である。

### 2.5 理系の大学生・大学院生を対象とした音響教育

声道模型は、音響学の理論の裏付けとしても活用できる。音響理論では声道形状によってフォルマントが変わる理由を与えてくれる。その一つの説明に、いわゆるPerturbation理論がある。この理論によると、声道における狭めの位置によって各フォルマントがシフトする様子が予測される。例えば、口唇付近の狭めはすべてのフォルマントを低くする。この様子を確認するために、プレート型のモデルでまず一様音響管を作り、その後、直径の狭いプレートを例えば口唇側から喉頭側へ随時移動させる。その都度、フォルマント周波数を測定し、狭めが声道を移動するにしたがってフォルマントがシフトする

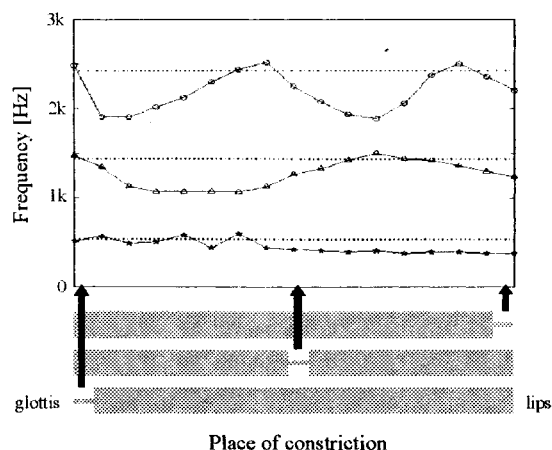


Fig. 3: 母音生成におけるPerturbation理論

様子を観察することが可能となる (Fig. 3参照) [19]。

母音生成の音響理論に基づく母音合成のソフトウェアも世の中に存在している。そのコンピュータモデルでは、声道の形状をあるステップごとの直径あるいは面積として与えることで、出力音をシミュレートできるというものである。次節では、そのようなシミュレータと実際の声道模型の音響出力とを比較した例を示す。

### 3. コンピュータシミュレーションとの比較

Maedaによる生成モデル[20]を実現するシミュレータVtcalcsを用いると、声道形状の断面積関数から母音がシミュレートされる。そのシミュレーション結果と声道模型から得られた生成音を比較することによって、理論特性と測定結果を比べることが可能になる。その様子をFig. 4に示す。

Fig. 4を見るとわかるように、声道断面積関数から音響理論を経て得られる理論特性と、同じ断面積関数から実際に得られる音の特性とが一致することが確認できる。

### 4. まとめ

以上のように、Arai (2001) [2]による声道模型は、音響教育の教材として有効であることが改めて示されると同時に、対象となる学習者は小学生から大学院生に渡るまで幅の広い範囲をカ

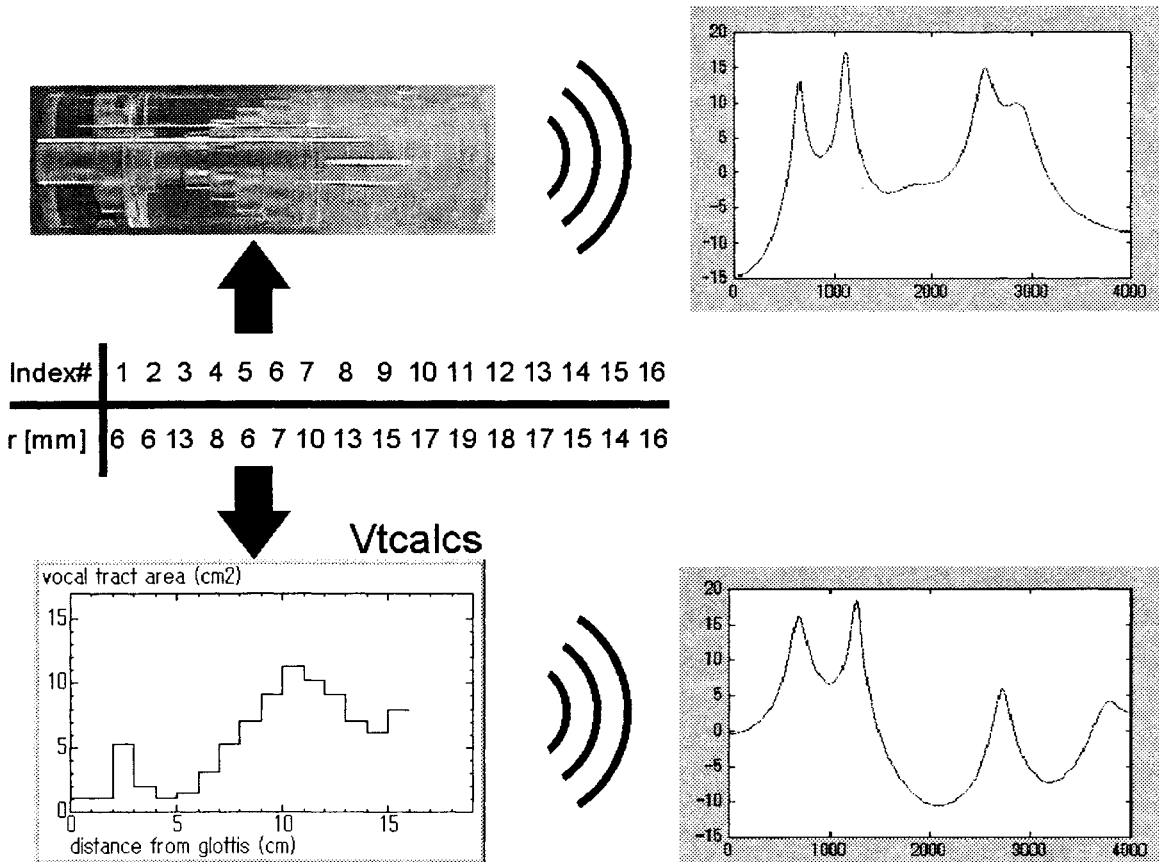


Fig. 4: 声道模型による生成音とコンピュータシミュレーションとの比較

バーできることが改めて示された。今後は、実際に小学生を対象にした教育の試みや科学博物館などへの働きかけを行っていきたい。また、我々はすでに鼻音化母音のための模型をいくつか作ってその有効性も確認しているが[6, 7]、さらなる声道模型の開発も同時に進めていきたい。

#### 謝辞

声道模型の普及に関し、NTTアドバンステクノロジー(株)の佐藤大和さん、石井直樹さんには多大なご協力をいただきました。

#### 参考文献

- [1] T. Chiba and M. Kajiyama (1941) *The Vowel: Its Nature and Structure*, Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd., Tokyo.
- [2] T. Arai (2001) "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.
- [3] T. Arai, N. Usuki and Y. Murahara (2001) "Prototype of a vocal-tract model for vowel production designed for education in speech science," *Proc. of Eurospeech*, 4:2791-2794, Aalborg.

- [4] 荒井隆行 (2002) “「より直感に訴える音響教育」を音声科学に取り入れるには,” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2:1219-1220.
- [5] T. Arai (2002) “An effective method for education in acoustics and speech science: Integrating textbooks, computer simulation and physical models,” *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*.
- [6] N. Saika, E. Maeda, N. Usuki, T. Arai and Y. Murahara (2002) “Developing mechanical models of the human vocal tract for education in speech science,” *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*.
- [7] 荒井隆行, 雑賀紀子, 前田絵理, 村原雄二 (2002) “千葉・梶山による声道模型の復元とその教材としての応用,” 日本音声学会全国大会予稿集, 23-28.
- [8] E. Maeda, N. Usuki, T. Arai and Y. Murahara (2002) “The importance of physical models of the human vocal tract for education in acoustics in the digital era,” *Proc. of China-Japan Joint Conference on Acoustics*, 163-166, Nanjing.
- [9] T. Arai, E. Maeda, N. Saika and Y. Murahara (2002), “Physical models of the human vocal tract as tools for education in acoustics,” *Proc. of the First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics*, Cancun.
- [10] 前田絵理, 荒井隆行, 雑賀紀子, 村原雄二 (2003) “声道模型の音源に関する検討: ホーンスピーカのドライバユニットの応用,” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集.
- [11] B. Gold and N. Morgan (2000) *Speech and Audio Signal Processing*, John Wiley & Sons.
- [12] 梅田規子, 寺西立年 (1966) “声の韻質と声質: 音響的声道模型による音声の合成,” 日本音響学会誌, 22(4):195-203.
- [13] 党建武, 本多清志 (1995) “母音発声時の音声スペクトルに対する梨状窩の影響,” 信学技報, SP95-10:1-6.
- [14] [http://www.exploratorium.edu/exhibits/vocal\\_vowels/](http://www.exploratorium.edu/exhibits/vocal_vowels/)
- [15] 前田絵理, 荒井隆行, 雑賀紀子, 村原雄二 (2002) “声道模型を用いた高等学校での音響教育,” 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 1:299-300.
- [16] E. Maeda, T. Arai, N. Saika and Y. Murahara (2002) “Lab experiment using physical models of the human vocal tract for high-school students,” *Proc. of the First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics*, Cancun.
- [17] 吉田道子, 薄木信幸, 荒井隆行, 村原雄二, 菅原勉 (2002) “声道の共鳴現象の可視化への試み: 音声科学における音響教育の充実を図る,” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1:399-400.
- [18] G. Fant (1960) *Acoustic Theory of Speech Production*, Mouton, The Hague.
- [19] 薄木信幸, 吉田道子, Hasan A. Alwi, 荒井隆行, 村原雄二 (2001) “音声科学の教育における声道模型の有効性に関する検討: 母音生成の Perturbation理論について,” 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 1:403-404.
- [20] S. Maeda (1982) “A digital simulation method of the vocal-tract system,” *Speech Communication*, 1:199-229.