

A4

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

荒井隆行・雑賀紀子・前田絵理・村原雄二（上智大学理工学部電気・電子工学科）
arai@sophia.ac.jp

1. はじめに

Chiba and Kajiyama(1941)は測定結果を基にして得られた声道形状の近似データからパイプ型の声道模型を作成し、日本語5母音を人工的に作り出すことを実現すると同時に、声道形状が母音の質を支配していることを実証している。Arai(2001)は、その彼らのパイプ型声道模型を透明なアクリルによって復元すると共に、さらにプレート型声道模型をも実現している。このプレート型声道模型では、パイプ型の際に用いた半径データを音響管の長さ方向に10mm間隔で0次近似したデータに基づき、厚さが10mmの板状のアクリルに近似データに基づいた半径の円をそれぞれに空け、それらのプレートを並べることによって声道形状を模擬した音響管を実現している。いずれのタイプにおいても、音源として電気式人工喉頭を音響管の片側に密着させると、母音のような出力が反対の端から放射される。

声道模型の歴史は決して新しいものではなく、古くは18世紀にKratzenstein(1782)やVon Kempelen(1791)といった人たちによって模型が作られていたことが文献に残っている(Gold and Morgan, 2000)。しかし、Chiba and Kajiyama(1941)をきっかけに、それ以降、いくつかの研究において主に研究目的で声道模型が作られ用いられている。例えば、梅田・寺西(1966)は声の韻質と声質を調べるために声道模型を作っており、また堂・本多(1995)らは梨状窩の影響を模型を使って調べている。また、持田ら(1999)は音を出す目的ではないが断面積関数の音響的測定に模型を用いている。

しかし、教育目的で用いられた報告は少なく、博物館などにいくつか展示目的にあるだけで、文献としてはほとんどない。声道模型はもっと身近な教材として講義や実験等に普及されるべきであると考えられる、Arai(2001)では実際に教材としての応用を試みている（その他、薄木ら, 2001; 吉田ら, 2002など）。

その背景には、言語学、特に音声学を志す学生のみならず、言語障害学を学ぶ学生などにも音声生成の基礎を教える機会が広がってきていることがあげられる。そこでは、より直感に訴える音響教育が望まれている（荒井, 2002）。また、大学院生・大学生のみならず、高校生・中学生、さらに小学生をもカバーするような音響教育もまた求められている。そのような背景の中で、より分かりやすい・より直感に訴える音響教育というものが必要とされる。実体験を伴うような教育というのが最も効果的であるが、そのような観点からすると、音声学の分野における音響関連の教材はもっとあってもよいように思われる。確かに、音さの振動や共鳴現象など基本的な音響現象に対する教材はいくつか存在する。しかし、音声に関わる教材は決して多いとは言えない。

Arai(2001)による声道模型は教材として優れた効果を示している(図1)。図

では、左はパイプ型のものであり、右はプレート型のものである。いずれもアクリルで出来ており、中央に同心円の穴が開いており、その穴が作る音響管が共鳴腔となっている。そして片側の端から何らかの音源を入れると反対側から音が出る。

本稿では、新たに作成した模型に対し、それぞれについて音響的な比較を行った結果を示す。また、実際の教育の現場での使用例についても触れる。

2. 声道模型の比較

2.1 Arai (2001) の声道模型の比較

Arai (2001) によるパイプ型ならびにプレート型模型と、ビニール管によるモデルに対する比較を行った。まず、以下にそれぞれの長所と短所を記す：

1) ビニール管モデル

長所：形状を自在に変化させることが可能、音声の遷移を実現できる

短所：形状を記憶させることができない

2) パイプ型モデル（千葉・梶山のオリジナル声道模型）

長所：手軽に音を出すことが可能

短所：声道形状が固定であり、母音の種類だけモデルが必要

3) プレート型モデル（千葉・梶山のモデルの 0 次近似）

長所：プレートの組合せにより様々な母音を実現可能、形状の再現性あり

短所：プレートを並べるのに時間が掛かる、音響エネルギーの損失あり

それぞれのフォルマント周波数を比較したところ、いずれのモデルにおいてもフォルマント周波数は低い周波数において十分に実際の平均的な周波数と類似し、モデル間においてもほぼ一致することが確認されている。

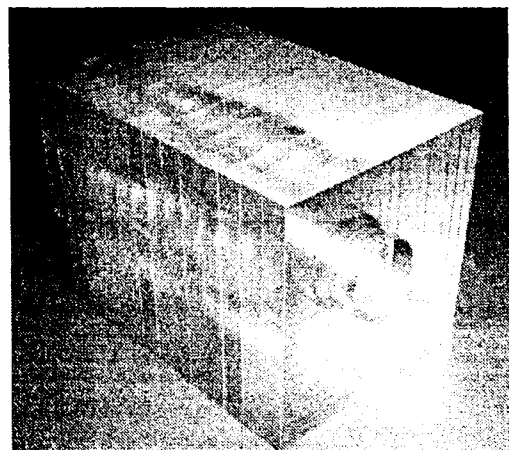
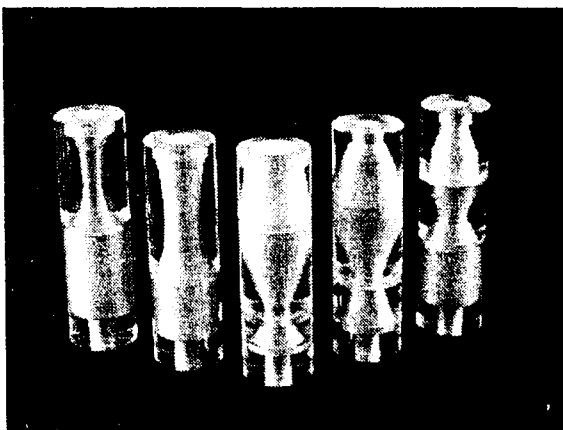


図 1: 声道模型の 2 つのタイプ（左：パイプ型、右：プレート型）。

Arai (2001) より。

2.2 形状が同じパイプ型とプレート型の比較

前節では Arai (2001) に基づく 2 つのモデルについて述べたが、その際、パイプ型は声道形状の 1 次近似 (千葉・梶山による) であったのに対し、プレート型はその 0 次近似を用いている。もし、パイプ型で 0 次近似を実現した場合、両者の形状はまったく同じになるはずであるが、その場合にそれぞれの音響出力に差があるかどうかについても模型を新たに作成して比較した。

そのところ、フォルマントの帯域幅に関して、プレート型のものがやや広がっているのが観測された。これは音響エネルギーの損失によるものと示唆された (Maeda et al., 2002)。

2.3 鼻音化母音のためのモデル

鼻音化母音を実現するために、従来の口腔のみのモデル (母音は /a/) に鼻腔を接続したような模型も作成した (図 2)。鼻腔の形状・大きさについては、Chen (1997) に基づいた。口腔と鼻腔の結合の度合いは、可変にした。また、副鼻腔は着脱式になっている。図 3 に、口腔のみ、鼻腔あり (副鼻腔なし)、鼻腔・副鼻腔ありの 3 つの場合についてのスペクトル包絡の様子を示す。図を見るとわかるように、鼻腔結合がある場合に特に第 1 フォルマント付近の減衰が認められ、副鼻腔がある場合にはその傾向がさらに強まる様子が確認された。実際の音響出力に対しても、鼻音化が知覚された。これにより、鼻音化を説明する際の教材としても有効であると考えられる。

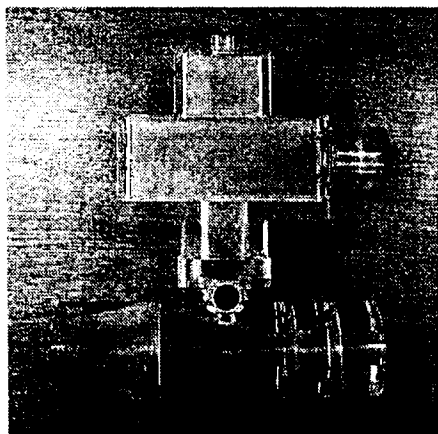


図 2: 母音 /a/ の口腔モデルに鼻腔を結合した模型 (詳細は本文参照)

3. 教材としての声道模型

実際、我々は今までにこの声道模型を教育の現場で活用したところ、教育効果が格段に上がることを実証している (例えば、Arai, 2001)。模型はアクリルで透明であるから、声道形状が目で確認でき、狭めの位置と母音の質との関係付けが容易に可能であった。また、音源フィルタ理論を説明するのにも有効で、ピッチが音源によって支配されているということ、また同じ音源でもモデルによって

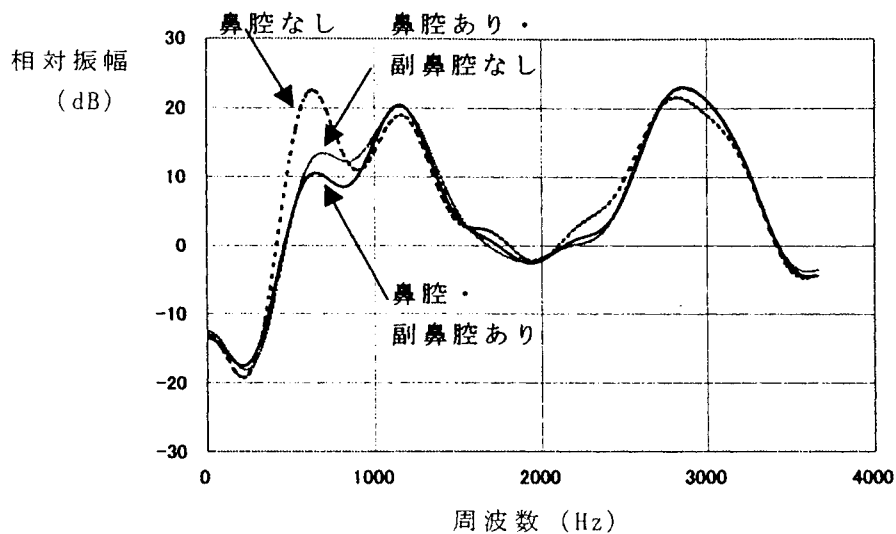


図3：鼻腔結合の有無によるスペクトル包絡の変化（母音/a/）

違う母音が生成される様子が難しい数式などを使わずにも直感的に説明できた。また、ここでは perturbation 理論として、共鳴の節や腹に狭めがあると、それにもよってフォルマント周波数が上がったり下がったりする様子が、特にプレート型の模型を使うことによって確認されることがわかった。このように、パイプ型では形状がすでに出来上がっているのだから常にいつも一定した母音が出るという再現性が保証されているほか、プレート型では直径の異なる穴を持つ複数のプレートを組み合わせていることから、理論モデルとの対応付けが可能となる。

実際に、高等学校の授業で使用し教材としての有効性を見た。教材の使い方によっては、理系の物理学の延長としても利用できるほか、小学校・中学校における「音」の学習の一環として扱うことにより文系・理系問わず学習の理解を助けると共に学習意欲を沸かせる効果があるものと考えられる。今回は、理系の物理学の授業において、「音」の講義の直後に声道模型を使った授業を行うことができた。その結果、共鳴現象の延長として母音生成を関係づけることができ、また同時に気柱の共鳴との違いについても触れることができた。そして、声道模型がその理解の助けに大きく貢献することが確認できた。

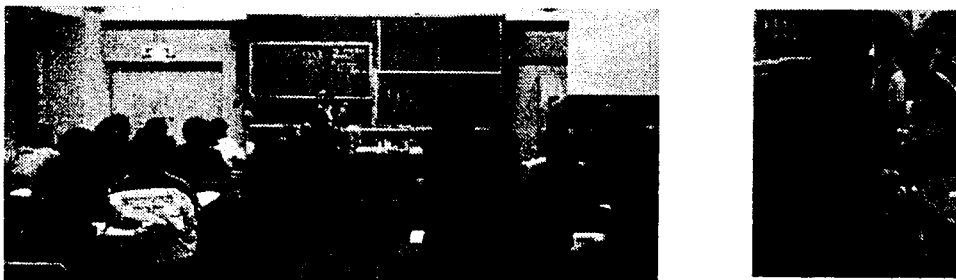


図4：声道模型を用いた高等学校での授業の様子

4. おわりに

以上のように、千葉・梶山による声道模型を復元し、さらにそれを発展させたモデルについて述べた。まず、それぞれの模型のタイプによる長所・短所を示すとともに、それぞれを比較した。さらに、実際の講義などの教育現場で使用した結果、声道模型は直感に訴える教育という観点からも重要であり、有効な教材であることが確認された。

これからは、「より直感に訴える音響教育」を取り入れるための取り組みとして、背景を分かり易く示した「教科書」、実物の模型による実験と並行して用いるための「コンピュータ教材」、そしてこの「声道模型」の3つが、お互いが有機的に融合した教育環境を実現するようにと発展していくさせていくべきだと考える。

5. 謝辞

日頃から共に議論し、また考える機会を与えて下さっている方々、特に上智大学音声研の菅原勉先生、吉田道子さん、今富摂子さん、同大学言語障害研究センターの飯高京子先生、進藤美津子先生、平井沢子先生、同大学荒井研卒業生の薄木信幸君、玉川学園高等部の川端百平先生はじめ諸先生方、NTTアドバンステクノロジーの佐藤大和さん、石井直樹さん他多くの方々に感謝致します。

参考文献

- Arai, T. (2001) "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *J. Phonetic Soc. Japan*, 5(2):31-38
- Arai, T., Usuki, N. and Murahara, Y. (2001) "Prototype of a vocal-tract model for vowel production designed for education in speech science," *Proc. of Eurospeech*, 4:2791-2794
- 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
- Chen, M. Y. (1997) "Acoustic correlates of English and French nasalized vowels,"
J. Acoust. Soc. Am., 102(4): 2360-2370
- Chiba, T. and Kajiyama, M. (1941) *The Vowel: Its Nature and Structure*,
Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd., Tokyo
- 堂建武・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,"
電子情報通信学会技術報告, SP95-10:1-6
- Gold, B. and Morgan, N. (2000) *Speech and Audio Signal Processing*,
John Wiley & Sons
- 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

- Maeda, E., Usuki, N., Arai, T., Saika, N. and Murahara, Y. (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*
- Maeda, E., Arai, T., Saika, N. and Murahara, Y. (2002) "Lab experiment using physical models of the human vocal tract for high-school students," *J. Acoust. Soc. Am.*
- 持田岳美・蒼田雅彰 他 (1999) "口腔復元模型を用いた声道断面積関数の音響的計測," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 1:307-308
- Saika, N., Maeda, E., Usuki, N., Arai, T. and Murahara, Y. (2002) "Developing mechanical models of the human vocal tract for education in speech science," In *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*
- 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
- 薄木信幸・荒井隆行・村原雄二 (2001) "母音生成に対する音響教育を目的とした声道模型の作成," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1:399-400
- 薄木信幸・吉田道子・Alwi, H.A.・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
- 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