

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19500758
研究課題名 (和文) 声道模型を用いた「人間の音声生成機構を直感的に学ぶ」音響教育の実践
研究課題名 (英文) Education in Acoustics for Intuitive Learning of Human Speech Production Mechanism using Vocal-tract Models
研究代表者 荒井 隆行 (ARAI TAKAYUKI) 上智大学・理工学部・教授 研究者番号：80266072

研究成果の概要：

「音声科学」という身近なテーマを通して科学への興味を抱いてもらうことを目的とし、シーンに合わせた様々な声道模型教材（普及型、展示型、工作型）の開発・改良を行った。本研究で開発した模型は、自身の講義や学会のセミナー等で活用するだけでなく、広く一般を対象に科学館の「声に関する企画展」に組み込ませていただいたり、小学生対象の「音の科学教室」に工作実習も含めて取り入れるなど、様々な音響教育の現場で実践しその効果を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
平成 20 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：音声科学・音声工学を含む音声コミュニケーション

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学、科学教育

キーワード：科学教育、音響教育、音声生成、声道模型、可視化、母音

1. 研究開始当初の背景

近年、子どもたちの理科離れが叫ばれているが、その一方で学校教育のカリキュラムには含まれていない科学分野も数多く存在している。「音声科学」もその1つである。言語を習得し、生活の中で日々コミュニケーションを行っている我々にとって、「音声」は非常に身近な存在である。柔軟で好奇心旺盛な学齢期にとって「音声科学」のテーマに触れてもらい、子どもたちが科学に興味を抱くきっかけを提供したいと考えた。

我々はすでに、音声科学の分野において子

どもから専門家までが「音声の作られ方（音声生成機構）」を直感的に学べるような教材の開発に取り組んできた。今まで開発した教材は、まず筒型声道模型である。この模型は、日本語5母音に対する人間の声道形状を模倣した「断面積が変化する音響管」であり、一端に適当な音源を入力することで音源フィルタ理論を分かりやすく理解できる。コンピュータ上での教材が多い中、この物理模型を用いることで直感的な理解を助けることが教育現場でも実証されている。その成果が認められ、2004年にオープンした静岡科学館

にはその簡型声道模型が展示の1つとして設置されている。

この声道模型の開発をきっかけに、さらに頭部形状模型や肺の模型などの開発を進め、これらの模型を適宜使い分けて音声生成機構を系統的に説明するような教育の重要性を提言してきた。また、声道形状を少ない自由度で効率的に変えることができるスライド式声道模型を新たに開発した。この模型は構造がきわめて単純なため、講義等にて理論を説明する目的の他、科学館や博物館などの科学教室で工作するのに適している。実際、我々は国立科学博物館にて工作教室を実施し、成功を収めている。

その他、今までの声道模型を中心とした音響教育教材を用いた教育システムに関する論文が2007年に出版された(発表論文リストの文献⑮)。またこの論文はその功績が認められ、2008年3月に日本音響学会の佐藤論文賞を受賞した。また、声道模型に関する動画教材を制作し、2007年春にアメリカ音響学会のGallery of Acousticsというコンテストに応募したところ、最優秀賞をいただいた。今までの音響教育における取り組みについては、発表論文リストの文献①、⑩、⑪、⑫の解説論文においても論じている。

上記を踏まえて、これらの模型を活用した音響教育の実践を進めたいと考えた。

2. 研究の目的

一見すると複雑そうに見える現象にも実はその背後に「法則」があり、理論通りに実践すれば単純な模型でもそれを再現することが可能である。「発声のしくみ」等の身近な原理を模型で直感的に理解する体験を通して、科学の面白さを感じてもらう。そして、それが理科離れを解消する一助ともなり得る。そして延いては、科学的リテラシーや論理的に物事を考える力の育成にもつながっていく。また言葉を大切に、言語や音声に障害を持った方々に対しても、さらなる配慮ができる社会を構築できるのではないかと考えた。

このような理念の下、我々は現在までに開発された「肺の模型」や「声道模型」などを用い、音声の生成機構を直感的に理解できるような工夫を重ね、大学の講義や講演、科学講座などで活用してきた。模型にはそれぞれ一長一短があり、目的や用途によって求められる教材が異なってくる。そこで、本研究では用途別に最適な声道模型を探ることを目的に、模型の改善を進めた。それらは、例えば

(1) 教室等で講義に広く使える「普及型声道模型」、

(2) 博物館等の展示に最適な「展示型声道模型(体験型展示を含む)」、

(3) 科学教室やセミナー等で工作をしながら学べる「工作型声道模型」

である。これらに合わせて電子教材や教育プログラムを開発することで、研究成果を社会に還元することも目的の一部とした。

3. 研究の方法

(1) 教室等での講義用に広く使える「普及型声道模型」の検討と開発

我々が開発した簡型声道模型はNTT-AT社から販売されていて、母音の音質も非常に良いものであった。講義等では、しばしば限られた時間内で効果的なデモが求められるため、瞬時に目的の母音が出る簡型の声道模型が重宝がられることが多い。しかし、NTT-AT社からの販売は2008年3月で打ち切られた。そこで、それに代わる簡型声道模型の開発を行った。その際、今までの音質の良さや扱い易さはそのまま残し、運搬のし易さ、耐久性、リーズナブルな製作費等の問題点を検討・改善した。

(2) 博物館等の展示に最適な「展示用声道模型・教材」の検討と開発

展示用の声道模型についてどのような改良ができるか検討した。博物館や科学館には子どもから大人まで多くの方が訪れる。自分の声のふしぎに興味を持ってもらうため、質問を受ける機会が比較的多い「男性と女性の声の違い」などにもアプローチする展示はできないかと考えた。そこで従来からの男性用模型のみならず、女性用模型の開発を試みた。また、よりヒトの発声のしくみに近い展示をするため、頭部形状模型において舌や声道壁の一部を軟らかい素材を用いて実現することで、その部位を手で操作し声道の断面積を変えることができるような模型も開発した。

また、音声生成の側面からだけでなく、様々な視点から「声」を捉えると不思議さもより実感できる。声道模型に加えて、コンピュータによるスペクトル分析を併用することによってその教育効果が増すと考えた。音をスペクトル分析によって可視化し、さらにまた音へと可聴化する「デジタル・パターン・プレイバック」も、我々の研究室で開発されて以来、その有効性が確認され始めている。今回、ソニー・エクスプローラサイエンスの「声に関する企画展」の監修に携わる機会をいただいたので、「デジタル・パターン・プレイバック」の技術を応用し、体験型展示教材「声紋パズル」を開発した。

(3) 科学教室やセミナー等で工作をしながら学べる「工作用声道模型」の検討と開発

学校では音について学ぶ機会が少なくな

ってきた。実験・観察などに割かれる時間も減ってきている。そのような中、近年科学教室が盛んになってきている。そもそも学齢期の子どもたちは音に関する興味が強く、「声」が科学教室等のテーマとしてもっと取り上げられることは自然だと考えられる。

そこで、「声をつくる」というアクティビティーの可能性を追求し、スライド式声道模型の工作手順を見直した。

4. 研究成果

(1)「普及型声道模型」

従来からの筒型声道模型は、アクリルの円柱の内部を声道形状に従って削ることで作っていた。しかし、それだと外形は円柱であり、内部形状を外から確認するためにはアクリルのような透明素材で実現して視覚的に内部形状を確認するしかできなかった。しかし、内部形状がそのまま外形に反映されるように、肉厚を一定にするような設計に変えることで、透明素材を用いなくても外側から内部形状を確認できるようになる。このように、アクリル素材の他、木やケミカルウッドなど、透明でない素材で声道模型を実現できた（図1はケミカルウッド製）。



図1 肉厚一定の声道模型



図2 円筒管接続式声道模型

また、さらに形状を単純化することで日本語5母音が実現できるかを追求するため、複数の直径が異なる円筒管を適当な長さで接続する声道模型も開発し実現した。こちらも、肉厚が一定であり、外側から内部形状が確認できるようになっている（図2はケミカルウッド製）。

共に、母音生成のデモンストレーションを瞬時に効果的に行うことが可能であり、「異なる母音は、声道形状の違いからもたらされる」ということが直感的にイメージできるという特徴がある。音響学・音声学の講義で、音声生成に関わる音響理論の説明をした後、電気喉頭を音源として声道模型を用いた日本語5母音のデモンストレーションを行った。その結果、以前講義のみによって理論の学習を行った際と比べ、「実際の音声生成に結び付けやすかった」、「直感的・理論的ともに理解が深まった」などの意見が多く聞かれた。

さらに、円筒管接続式声道模型はその形状が単純であるので、共鳴周波数を簡単な近似で容易に推定することも可能である。よって、大学や大学院における専門教育において、講義の中で気柱共鳴の近似式を用いた共鳴周波数の推定等を取り入れながら「声のフォルマント周波数」について具体的な考察も実践できる。

また、両者ともに模型に触れることでその形状が確認できることから（触覚認知）、視覚障害者も活用できるユニバーサルデザインの教材になっている。嬉しいことに、新たに数校の大学（日本、アメリカ）でこれらの声道模型を活用していただけることになったが、中には視覚障害者や聴覚障害者を対象とした学校も含まれている。また、従来の筒型声道模型に比べ軽く運搬性にも優れ、軽いがゆえに落としても割れにくく耐久性にも優れたものになり、製作費用等の面でも改善が図れた。これにより、より教育現場に普及することが期待される。

(2)「展示用声道模型・教材」

科学館等の体験型展示を目的として、従来からある男性用の筒型声道模型に加え、女性用の筒型声道模型を開発した。女性用の声道模型は、男性用のものを長さ方向に3/4に縮小したものをを用いた。さらに、音源（喉頭原音）についても、女性用のものを用意した。また、しわがれ声など異なる声質の音源も組み合わせ可能とした。この男性用と女性用の声道模型は、科学館「ソニー・エクスプローラサイエンス」の企画展で展示され、多くの来場者の方々に触れてもらった。



図3 ソニー・エクスプローラサイエンスでの企画展における声道模型の展示

また、音声の可視化としてのスペクトル分析、そしてその結果として得られるスペクトログラム（声紋）から、音声へと再び可聴化する「声紋パズル」も、同じソニー・エクスプローラサイエンスの企画展にて展示した。



図4 声紋パズル

声紋パズルの展示は、日本語の音節に対応するスペクトログラムの素片を組み合わせる任意の言葉を作り、デジタル・パターン・プレイバックの技術を使って再び音声に再合成するものである。図4にその全貌を示す。写真の右下は、音節ごとのスペクトログラムの素片である。それらを組み合わせる並べたのが写真左下の部分であり、それを写真の左上にあるカメラで捉えている。カメラから得た画像情報はそのまま写真中央下にあるモニタディスプレイに映し出され、写真下の赤いボタンを押すと繋がれたPC上で画像情報が音声信号に変換され、直後にスピーカから音声が出てくる。パズル感覚で並べて自分の好きな言葉をしゃべらせることが可

能なことから、特に子どもたちに人気が高かったようである。また、隣にスペクトル分析のコーナーがあり、両者との連携が来場者の理解を助けていたようである。

別の種類の展示用声道模型として、頭部形状模型の舌や声道壁の一部を軟らかいゲル素材で実現した。図5にゲル素材で出来た舌を伴う舌可動式声道模型を示す。この模型では舌の位置をいろいろと変えることによって異なる韻質の母音を作り出すことができる。



図5 舌が軟らかいゲル素材で出来た舌可動式声道模型

(3) 「工作用声道模型」

スライド式声道模型の工作において、その手順について考察した。特に音源部の製作において、作り方を数通り試して比較・検討した。図6に、試した3種類のリード式音源の構造を示す。国立科学博物館での「音の科学教室」において(a)から(c)の構造を試した結果、(c)のものが適度に難易度があり、子どもにも達成感を味わってもらいながら比較的簡単に工作でき、かつ音質も良いスライド式声道模型を実現できることが分かった。スライド部は比較的容易に製作可能であるが、こちらよりも安全でスムーズな手順や素材などを検討した。

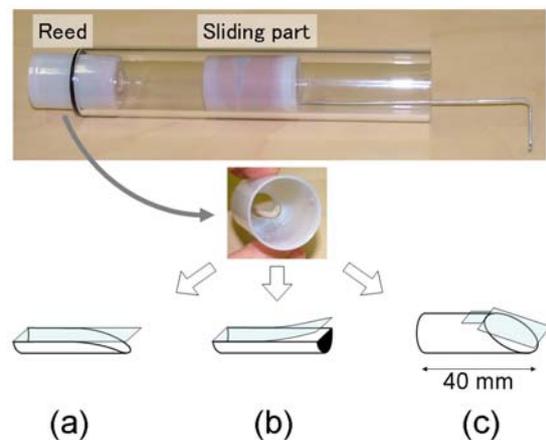


図6 スライド式声道模型のための3種類のリード式音源

(4) 学会や博物館等における声道模型を用いた音響教育活動の一例

①日本音響学会サマーセミナー

毎夏に開催される日本音響学会のサマーセミナー「音響学の基礎と最近のトピックス」に講師として参加した。音声に関わる講義を担当すると同時に、声道模型に関するデモンストレーションを行った。また、ミニアクティビティーとして、アクリルパイプとフィルムケースを使った声道模型の工作を希望者と一緒に行った。

②日本音響学会ビギナーズセミナー

日本音響学会のビギナーズセミナー「見て・聞いて・触れて分かる音響現象の基礎」に講師として参加した(2009年3月)。「声道模型を作ったり触れながら音声の仕組みを理解する」というテーマで、様々な形の声道模型に異なる音源を入力させ、実際に音声を作られるしくみについて体験、スライド式声道模型の工作、音声をスペクトル分析したり、逆にその分析結果を音声に復元したりする実験(デジタル・パターン・プレイバック)も行った。

③国立科学博物館(日本音響学会音響教育調査研究委員会共催)

「音の科学教室：音のふしぎ・声をつくる」は、小学生を対象に、音の性質や正体を色々な実験を通して確かめ、「楽器(笛)」や「アイウエオ(人の声)」を作ることに挑戦するという内容。模型を用いたデモンストレーションや工作実習をふんだんに取り入れた、ハンズオンのアクティビティーとなっている。「音声生成のしくみ」の解説に、例えば以下のように模型を活用することができる。

<音声生成のしくみ>

1. 模型も声を出すのかな?

→実際の人間の機構に近い「肺の模型」や「頭部形状模型」を用いてデモ

2. 原音(声帯振動)は?

→肺の模型に用いた音源：笛式人工喉頭

3. 話すときに動くところは?

→軟らかいゲル素材を用いた舌可動式声道模型を用いてデモ

4. 口の形によって音が変わる?

→筒型声道模型、スライド式声道模型等

5. 作って実験!

→スライド式声道模型の工作演習

「声をつくる模型」を見るのはもちろん初めて、しかも自分で製作もするとあって、我々が想像する以上に子どもたちにとってはエキサイティングな体験のようである。製作した模型はもちろん家庭に持ち帰ることができるし、家庭でも身の回りにある材料で応用して製作することも可能である。音源か

ら手作りすることで「音とは何か」に触れ、微かな加減で良い音が鳴ったり鳴らなかったりするので上手く出来上がったときの達成感もある。作業には個人差があるためスタッフのきめ細かい気配りが欠かせないが、早く出来上がった子どもは、楽器や声道模型で思い思いに音を生成していた。楽器ならどのように音階を鳴らすか、声道模型ならどの位置で何の母音が出るのか、工夫しながら楽しげに実演していた。

INTERSPEECH 2008 の国際会議でこの「音の科学教室」の取り組みを紹介したところ、大きな反響があった。「音声生成のエッセンスを残すことでシンプルに表現し、何が本質かを教えてくれた。素晴らしい!」と共感していただいたり、中には、私の論文等を参考に実際に小学生に工作教室を行ったという先生もいらした。スライド式声道模型で生成しやすい /a/ /i/ /u/ の音は、多くの言語に存在するため、日本国内に限らず世界中で展開することの出来る教育活動であるということを改めて実感する一場面であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16件)

① 荒井隆行, "人にやさしい音声の話題," 音響技術, 146巻, 2009年, 印刷中(査読無)

② 荒井隆行, "科学館における「声」に関する企画展," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 1387-1390, 2009. (査読無)

③ 荒井隆行, "声道形状を単純化した模型による音声の音響教育," 電子情報通信学会技術報告, SP2009-2, pp. 7-12, 2009. (査読無)

④ T. Arai, "Science Workshop with sliding vocal-tract model," Prof. of Interspeech, pp. 2827-2830, 2008. (査読有)

⑤ T. Arai, "Physical models of the human vocal tract with gel-type material," Prof. of Interspeech, pp. 2651-2654, 2008. (査読有)

⑥ 荒井隆行, "トーキングヘッドを用いた障がい者のための音声の教育," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1579-1582, 2008. (査読無)

⑦ 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," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1563-1566, 2008. (査読無)

⑧ 荒井隆行, "軟らかい素材による軟口唇を伴う声道の物理模型," 電子情報通信学会技術報告, SP2008-103, pp. 143-148, 2008. (査読無)

- ⑨ T. Arai, "Gel-type tongue for a physical model of the human vocal tract as an educational tool in acoustics of speech production," *Acoustical Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 88-190, 2008. (査読有)
- ⑩ 荒井隆行, "小特集「現代のニーズに即した魅力ある音響教育」にあたって," *日本音響学会誌*, Vol. 64, No. 1, pp. 27-28, 2008. (査読無)
- ⑪ 荒井隆行, "小中学生に対する音響教育," *日本音響学会誌*, Vol. 64, No. 1, pp. 29-34, 2008. (査読無)
- ⑫ 今泉敏, 荒井隆行, "言語聴覚士のための音響教育: 基礎から実用へ," *日本音響学会誌*, Vol. 64, No. 1, pp. 47-51, 2008. (査読無)
- ⑬ 荒井隆行, "音の科学教室:音のふしぎ・声をつくろう," *日本音響学会春季研究発表会講演論文集*, pp. 1483-1486, 2008. (査読無)
- ⑭ 荒井隆行, "軟らかい舌による声道模型教材," *日本音響学会春季研究発表会講演論文集*, pp. 439-442, 2008. (査読無)
- ⑮ T. Arai, "Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 190-201, 2007 (査読有)
- ⑯ 荒井隆行, "声道模型を用いた音響教育: 音声生成のしくみ," *ソフィア*, Vol. 55, No. 2, pp. 103-121, 2007. (査読無)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 荒井隆行, "言語聴覚士に対する音響教育," *ミニシンポジウム「音声研究と言語聴覚士教育・臨床」*, 2008年6月28日, 北海道医療大学・日本音声学会・日本音響学会聴覚研究会共催, 大学共同利用施設 ACU
- ② T. Arai, "Spectrographic representation of speech based on the short-time Fourier transform," *Sophia Symposium on Modern Mathematics and Its Application to Modern Technology*, Sophia University, 2007.

[その他]

声道模型を用いた音響教育のアウトリーチ活動等

- ① 日本音響学会ビギナーズセミナー講師
2009年3月
- ② 国立科学博物館「音の科学教室、「音の不思議—声をつくろう—」(日本音響学会音響教育調査研究委員会共催) 講師
2007年10月・2008年10月
- ③ 日本音響学会サマーセミナー講師
2007年夏・2008年夏
- ④ 声道模型に関する動画教材(2008年春アメリカ音響学会 Gallery of Acoustics 最優秀賞受賞作品):
http://www.splab.ee.sophia.ac.jp/Vocal_Tract_Model/Gallery_of_Acoustics_2007.wmv
- ⑤ NHK BS ハイビジョン「アインシュタインの眼」出演(頭部形状模型と肺の模型を用いて発声のしくみを説明)
2008年1月
- ⑥ NHK 教育テレビ「音楽のちから」出演(頭部形状模型と肺の模型を用いて発声のしくみを説明):
2007年4月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 隆行 (TAKAYUKI ARAI)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 80266072

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし