

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500841

研究課題名（和文） 人間の音声生成機構を分かりやすく説明する声道模型の改良と  
その音響教育応用研究課題名（英文） Improving vocal-tract models for intuitive understanding  
of the mechanisms of human speech production and applications  
for education in acoustics

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（和文）：我々は今まで、音声の生成機構を直感的に理解できるような「声道模型」や「肺の模型」などを製作し、子ども向けの科学教室から大学での講義や講演に至るまで幅広く活用し、その有効性を実証してきた。模型にはそれぞれ一長一短があり、どの型が最善であるかは一概には言えない。そこで本研究では、目的や対象ごとに現状を調査してそれに基づいた改良を行うと共に、それまで実現できていなかった目的や対象に適した模型の設計・使用法の開発を行い、それら进行评估した。

研究成果の概要（英文）：In our previous studies, we have developed several physical models of human speech organs, such as the vocal tract and the lungs. These models give an intuitive understanding of the mechanisms of speech production, and we have shown that they are extremely useful in a wide range of situations including science workshops for children and university lectures. Each model has different advantages, and the best model to use depends on the application. In the current study, therefore, we first investigated what types of models were currently available for each application we identified, we improved already existing models and identified new ways to use them, and we developed new models for other new applications. Finally, we evaluated how well suited the models are for each application we identified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：自然科学教育、音響教育教材開発、音声生成、声道模型、可視化、母音

## 1. 研究開始当初の背景

模型を使った音声生成の試みは古くからある。現代の**音声に関する理論の基礎**を築いた **Chiba and Kajiyama (1942)**の研究においては、X線撮像などによって声道形状を測定し、それを音響的に等価な簡素化を行うこと

によって声道模型を製作し、実際の母音と比較している。その後も、梅田・寺西（1966）などによって声道の物理模型が研究目的に開発されてきたが、いずれも教育目的ではない（その他、本多他, 2004; 菅田他, 2007 などと同様）。教材として実際に使われている例

を数えても、ごく一部の博物館における初歩的な展示のみである。

我々は、Arai (2001)において Chiba and Kajiyama の声道模型を復元し、音響教育目的に使用した結果、教材としての優れた有効性を確認した(2002-2008年の間、**NTT-AT 社から教材として約 120 セット販売**。プレート型は Arai のオリジナル。)。その後、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)」を直感的かつ系統的に学べるような教材の開発を目的とし、Arai (2001)のモデルを拡張して頭部形状模型や肺の模型などを実現しその教育応用を検討した。その結果、音声生成機構を系統的に示す教育システムとして、その有効性が示された。そして、その学術的内容と社会的波及効果が高く評価され、Arai (2007)は**日本音響学会佐藤論文賞を受賞**している。

2005 年からは**科学研究費補助金**(C-17500603 / C-19500758)の助成を受け、研究が加速した。少ない自由度で効率的に声道形状を変えることができる**スライド式 3 音響管モデル**もその成果の一部であり、構造が極めて単純で身近な材料で製作可能なため、**音の科学教室**(主に小学生対象、**国立科学博物館にて 2006 年～2009 年実施**)のプログラムに工作実習として取り入れた。また、**静岡科学館**(常設展・筒型とプレート型)や、**ソニーエクスプローラサイエンス**(企画展・筒型、男女別声道模型の試作品)などにも声道模型が展示され、好評を博している。

## 2. 研究の目的

私たちは「ことば」を習得し、他者との意思疎通を行っている。「音声によるコミュニケーション」は私たちにとって身近で重要なテーマのひとつであり、音声科学の知識は補聴技術(補聴器・電話・テレビ・ラジオなど)や音響技術、外国語の発音習得や言語障害者のリハビリテーション等、様々なところで応用されている。本研究の究極的な目的は、音声に関する専門知識を必要とする人だけでなく、子どもから大人まで広く「**音声科学**」のテーマに触れてもらい、さらに私たちがどのように音声を作っているか音声生成過程を理解してもらうことにある。楽器の原理はイメージできても、「声」が模型で生成できることはかなり意外なようで、**可視化・可聴化の効果**を実感している。今まで我々が開発した模型にはそれぞれ一長一短があり、どれが最善かは一概には言えない。そこで本研究では、目的や対象ごとに現状を調査してそれに基づいた改良を行うと共に、まだ実現できていない目的や対象に適した模型の設計・使用法の開発を行い、それらを評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

人間の音声生成機構を分かりやすく説明するため、「声道模型を用いた音響教育」において、目的や対象ごとに声道模型やその活用方法に関する現状を調査した。その際、模型を、A「より単純な機構」、B「スタンダード」なもの、C「より複雑な機構」の3つに大まかに分類し、調査の結果を踏まえて、それぞれのカテゴリーにおいて模型の改良を行うと同時に、まだ実現できていない目的や対象に適した模型の設計に取り組んだ。

### (1) A「より単純な機構」

このタイプは機構が単純であるため、対象とする現象などの本質を、より分かりやすく教えることが可能である。また、手作りが可能であることから、スライド式声道模型のように工作教室などへの応用に優れている。

### (2) B「スタンダード」

従来からあるこのタイプに関しては、男性・女性の別、あるいは成人・子どもの別を比較できるような模型の試作は過去に行われていた。それに加えて、より教材としての改善を試みた。

### (3) C「より複雑な機構」

このタイプは機構がより人間に近い、発音の訓練など幅広い音声教育に応用できる可能性を持っている。舌の動きを手で操作することが可能な模型の他、肺の模型を含め呼吸を含めた発声のメカニズムを系統的に体得できる。

## 4. 研究成果

声道部、音源部、音響教育応用に分けて別記する。従来からあるスタンダードを B としてそれをより発展させたものを B'、機構がより単純なものには A (あるいは A')、機構がより複雑なものには C を付した。

### <声道部>

#### (1) スライド式声道模型による母音図 (A)

「より単純な機構」であるスライド式声道模型について、生成できる母音の範囲を調査した(文献⑮)。その結果、最も狭い狭窄部を用いた場合、母音/i/, /a/, /o/, /u/が生成され、口唇の狭めを伴う場合、母音/o/と/u/がより明瞭に生成された。また、狭窄部の狭めの面積を少し広げることで母音/e/などが生成されることを確認した。

#### (2) 円筒管接続式声道模型 (A')

「スタンダード」の筒型声道模型(千葉・梶山による声道形状の実測値の1次近似に基づく模型)の形状をさらに簡素化した「円筒管接続式声道模型」を用いた音響教育について、学会で発表した(文献⑯⑰)。その円筒管接続式声道模型について、明瞭性に少し問題があった母音/u/についても改良を重ね、

特に前腔の狭窄部を狭く設計することで改善が見られた。

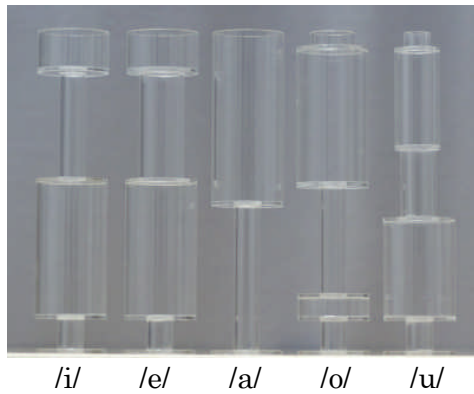


図1：円筒管接続式声道模型（一番右は新しい/u/）

(3) 角パイプ接続式声道模型 (A')

円筒パイプに加え、角パイプによる管接続式模型を製作し比較した(文献⑥)。その結果、断面積の円形や角型という形状は明瞭性にそれほど影響を及ぼさず、むしろ長さ方向の断面積変化が重要であることが再確認された。

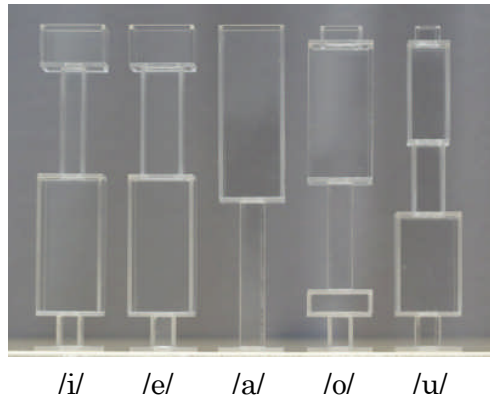
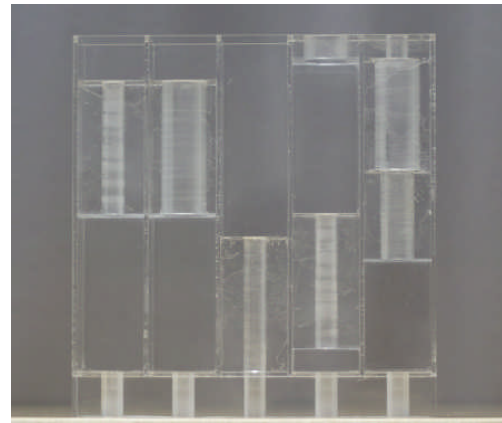


図2：角パイプ接続式声道模型

(4) 一体化された管接続式声道模型 (A')

「管接続式声道模型」に関しては、5母音が一体化された模型を試作し、国際会議等でデモンストレーションを行った。その結果、5本の模型を1つ1つ持ち替えることなく横にスライドさせるだけで5母音を短時間で切り替えられることができ、効果的に実演できることが実証された(文献⑥)。



/i/ /e/ /a/ /o/ /u/

図3：一体化された管接続式声道模型

(5) コンピュータ制御式梅田・寺西モデル (C)

「より複雑な機構」の声道模型として、人間の発話のように声道形状がダイナミックに変化する「梅田・寺西モデル」の声道模型について、コンピュータによる自動制御化を試みた。これにより、人間が連続音声を発する際の声道形状のダイナミックな時間変化を再現性をもって実現できるようになった(文献⑩)。その様子は、国際会議 INTERSPEECH 2010 (2010年9月)におけるスペシャルセッション「Fact and Replica of Speech Production」にて発表した。

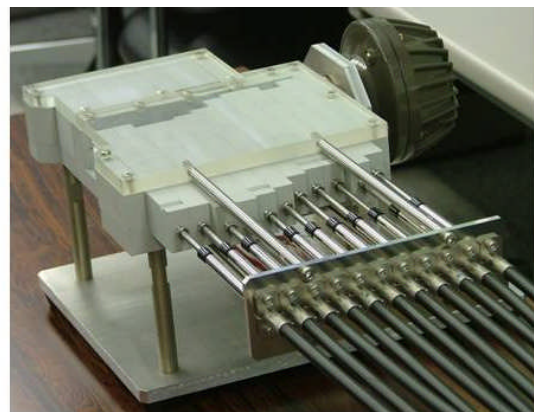


図4：コンピュータ制御式梅田・寺西モデル

(6) 舌スライド式声道模型 (C)

頭部形状模型については、スライド式声道模型の良さと頭部形状模型の良さを両方兼ね備えた、「舌スライド式」を新たに設計(文献⑩)。さらに舌スライド式の模型について、ブロック式の模型を新たに設計し、1つの模型によって5母音が再現性をもって生成されることを確認した。

<音源部>

(7) リード式音源の形状 (A)

「リード式音源」について、形状を半円筒型や角型にするのに加え、様々にサイズ（長さや太さ）を変えながら試作すると共に、比較検討を行った。その結果、角型のものが、今までの中で最も音質が良いものと同程度である上、様々な声の高さを容易に実現できることが分かった（文献⑦）。一方、科学教室向けの工作に際しては、円筒パイプを斜めにカットしてリード式音源に用いる作り方を考案し、それが今までの中で最も作りやすく音質もそこそこ良いことを確認した（文献①）。特にこの文献①はアメリカ音響学会が発行する **Journal of Society of America (JASA) の音響教育特集号**の中で発表した原著論文であり、この論文の中で子ども向け科学教室での工作の仕方を丁寧に解説している。

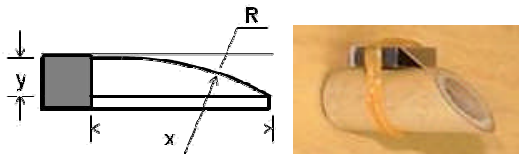


図5：リード式音源（左：角型、右：工作用）

(8) 周波数可変リード式音源 (B')

手動でピッチを変えることができるリード式音源を実現することに成功した。リード式音源はそれまで、基本周波数を積極的に変えることができなかった。それを可変式にしたところ、音源フィルタ理論をより簡潔に説明できる、あるいは発声にイントネーションをつけることができる、あるいは歌が歌えるなど、応用が広まった（文献⑤⑦）。より人間らしい音声に聞こえるので、音声学の講義や科学セミナーなどの導入にも効果的に活用できる。



図6：周波数可変リード式音源の例

なお、この周波数可変リード式音源を肺の模型と組み合わせるなどして国際会議 INTERSPEECH 2011 (2011年9月)における

スペシャルセッション “Show and Tell” にて発表した。その結果、聴衆に対してかなりインパクトのあるデモンストレーションを行うことができ、審査の結果、最も優れたデモに与えられる “Show and Tell Award” を受賞した。

(9) 組立式肺の模型 (C)

肺の模型はアウトリーチ活動等で幅広く活躍するため、運搬しやすいように組立式、小型化のものを設計・製作した。

<音響教育応用>

(10) 音声学の講義における応用 (A)

円筒管接続式声道模型と共にスライド式声道模型を用いて、実際に米国の大学の音声学の講義に使用していただき、その教育的効果を調べた。その結果、まずスライド式模型を用いて口腔内に狭めない「あいまい母音」から出発し、狭めとなるスライド部を挿入することによりその位置の違いによって /a/ や /i/ になることを説明。そして、円筒管接続式模型を用いて、舌の位置や口唇の丸めの有無など話をその他の母音へと展開していくなどによって、導入から本題の説明に渡って効果的であることが示された（詳しくは JASA に掲載された原著論文である文献①を参照）。

(11) 音源周波数と声道長の関係 (A)

基本周波数を変えることで、男性の音声のみならず、女性や子どもの音声を発することができるが、それに対応させるために、短い長さから長いものまで、異なる長さのスライド式声道模型を製作した。そして、様々な基本周波数の音源と様々な長さの声道模型とを組み合わせることによって、音源の周波数と声道長との間には負の相関関係があり、それを逸脱すると明瞭性が下がることを確認した（文献⑧）。

(12) 日立シビックセンター科学館 (B)

日立シビックセンター科学館において「声道模型」展示を監修。「スタンダード」の Arai のモデルに対し、本科学館において2010年3月より模型が設置された。

音源に関しては、リード式音源を採用し、ふいごの気流で適度な音量かつ高音質で鳴るように調整した。「音源フィルタ理論」に倣い、子ども達が自ら操作しながら「音源の原音」と、「声道模型に接続した際に生成される音」の変化を体験できるように工夫した。筒型模型と音源に関して、科学館展示に適するようにハードウェアの開発・改良と調整を行った（維持、管理の容易さ、再現性、適度な音量、高い圧力でも適度に励振するリードの設計、子どもの操作性を考慮した調整な

ど)。2010年4月に科学館を訪問し、小学生や親子連れを中心とする方々の利用状況を査察。ほぼ目的通りに利用されていることを確認した(文献⑨)。



図7：監修した日立シビックセンター科学館における声道模型の展示

#### (13) 音声から声道模型用音源へ変換

将来、別の展示にて自分で発した声から音源情報を抽出し、その音源信号を使って声道模型を駆動するようなシステムを想定して、マイクロホンから入力された音声信号を実時間で音源信号に変換するシステムを開発した(文献⑫)。その結果、発声した音声から音源情報を実時間処理によって抽出でき、その音源信号をホーンスピーカのドライバユニットを介して声道模型に入力したところ、入力音声の抑揚と声道模型による母音の韻質が組み合わさった音声が生産されることを確認した。これによって、例えば学習者が自分の声を用いて抑揚を変えながら、音源フィルタ理論等を学べるようなシステムが構築されることが確認された。

#### (14) デジタル・パターン・プレイバック

音声进行分析することで得られたスペクトログラムを、また音声に再変換する「デジタル・パターン・プレイバック(DPP)」に関する成果を発表した(文献②③⑩⑬)。特に、2011年の夏に国立科学博物館にて開催されたサイエンススクエアにブースを出展した際、声道模型を用いた母音生成の説明と共にこのDPPを使って声紋から音声を再合成する体験コーナーを実施したところ、小学生を中心とする来場者に対して大変好評であった。

#### (15) その他

音響音声学を中心とした音響教育の課題、教材などについて発表した(文献④⑩⑬⑭)。特に、2012年日本音響学会春季研究発表会では、國學院大学の久野マリ子先生と共に招

待講演を行った。

#### 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19件)

① T. Arai, "Education in acoustics and speech science using vocal-tract models," J. Acoust. Soc. Am., 131(3), Pt. 2, pp. 2444-2454, 2012. (査読有) DOI: 10.1121/1.3677245

② T. Arai, "Digital pattern playback for education in digital signal processing and speech science," Proc. of IEEE ICASSP, pp. 2769-2772, 2012. (査読有)

③ 荒井隆行, "デジタル・パターン・プレイバックを用いた音響学ならびに信号処理工学への教育的応用," 日本音響学会春季研究発表会, pp. 1467-1470, 2012. (査読無)

④ 久野マリ子, 荒井隆行, "音声学と音響教育," 日本音響学会春季研究発表会, pp. 1541-1544, 2012. (査読無, ★招待講演)

⑤ T. Arai, "Physical models producing vowels with pitch variation," Proc. of INTERSPEECH, pp. 3309-3310, 2011. (査読有, ★Show and Tell賞)

⑥ 荒井隆行, "音響管を用いた音響学・音声学の教育," 電子情報通信学会技術報告, SP2011-38, pp. 47-50, 2011. (査読無, ★招待講演)

⑦ 荒井隆行, "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," 日本音響学会秋季研究発表会, pp. 1411-1414, 2011. (査読無)

⑧ T. Arai, "Producing vowels with sliding three-tube model: Effects of vocal-tract length and fundamental frequency," 日本音響学会秋季研究発表会, pp. 299-302, 2011. (査読無)

⑨ 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," 日本音響学会春季研究発表会, pp. 1587-1590, 2011. (査読無)

⑩ 荒井隆行, "音を聴いて学ぶ音響音声学," 日本音響学会音響教育研究会資料, 6(1), pp. 33-38, 2011. (査読無)

⑪ T. Arai, "Mechanical vocal-tract models for speech dynamics," Proc. of INTERSPEECH, pp. 1025-1028, 2010. (査読有)

⑫ 前田祐貴, 荒井隆行, 安啓一, "音響教育を視野に入れた声道模型のための音源生成システムの開発," 日本音響学会秋季研究発表会, pp. 1329-1332, 2010. (査読無, ★学生優秀発表賞)

⑬ 荒井隆行, 網野加苗, "音響音声学デモンストラーションの提案," 日本音響学会春季研究発表会, pp. 1479-1482, 2010. (査読無)

⑭ 網野加苗, 荒井隆行, "科学技術リテラシーのためのサイエンスカフェの波及効果と音

響教育への応用," 日本音響学会春季研究発表会, pp. 1475-1478, 2010. (査読無)

⑮ T. Arai, "Sliding vocal-tract model and its application for vowel production," Proc. of INTERSPEECH, pp. 72-75, 2009. (査読有)

⑯ T. Arai, "Simple physical models of the vocal tract for education in speech science," Proc. of INTERSPEECH, pp. 756-759, 2009. (査読有)

⑰ 日本音響学会音響教育調査研究委員会, "音響教育に関するアンケートと大学におけるシラバス調査の結果," 日本音響学会誌, 65(5), pp. 264-269, 2009. (査読無)

⑱ 荒井隆行, "人にやさしい音声の話題," 音響技術, 38(2), 25-30, 2009. (査読無)

⑲ 荒井隆行, "声道形状を単純化したモデル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)

[学会発表] (計0件)

[その他]

学会や博物館等における声道模型を用いた音響教育のアウトリーチ活動等

① 国立科学博物館「サイエンススクエア」(日本音響学会音響教育調査研究委員会が出展) 声道模型とデジタル・パターン・プレイバックを用いた体験型展示  
2011年8月

② 日立シビックセンター科学館における声道模型に関する展示の監修  
2010年春にリニューアルオープン

③ 日本テレビ「所さんの目がテン!」出演(声道模型と肺の模型を用いて発声のしくみを説明)  
2010年2月

④ 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  
2009年10月

⑤ 国際会議 INTERSPEECH 2009 における公開展示 Public Exhibition に出展  
2009年9月

※この展示コーナーは、実行委員長の Roger Moore 先生 (Sheffield 大学) に 1 年前 Brisbane で行われた INTERSPEECH の会場にて打診されていたもの。当日、展示コーナーは一般市民にも公開され、会場には Brighton & Hove 市長もいらしてくださり、声道模型のデモンストレーションをお見せすることができた。

⑥ 日本音響学会サマーセミナー講師  
2009年夏

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし