

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24501063

研究課題名(和文)より人間らしい音声に対応した小児・成人の声道模型と音響教育への応用

研究課題名(英文)Vocal-tract models for child and adult human-like speech and their application to 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：音声の生成機構に関する仕組み等を直感的に分かりやすく理解するため、「より人間らしい」音声に対応した声道模型を中心とする教材、教育プログラムの開発等を行った。特に、より多様な音声を表現できるように従来からの教材群の拡大を図り、成人男性のみならず成人女性や子どもも対象とし、さらに日本語の母音から子音にまで広げた。その結果、大学の講義、科学教室や博物館・科学館展示に至るまで、より広く活用されると同時に、今まで以上の有効性を実証的できた。成果の一部はAcoustic-Phonetics Demonstrationsとしてインターネット上で公開すると共に、一部の動画はYouTubeにおいても公開した。

研究成果の概要(英文)：To achieve intuitive and easy understanding of the mechanisms behind human speech production, we have developed various educational tools and programs, the main focus of which is a set of vocal-tract models that behave in a human-like manner. We extended our previous models to produce a greater variety of speech sounds, including target speakers that are not only adult males but also adult females and children. In addition, target sounds were not only Japanese vowels but also consonants. These models and programs are being increasingly used for lectures, workshops, and even exhibitions at science museums, and their effectiveness has been ably demonstrated in such situations. Examples of these models in action are now available on our Web site under the name of "Acoustic-Phonetics Demonstrations", and some video clips can be also seen on YouTube.

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、音響学、音響音声学、音響教育

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・可聴化 母音・子音

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、その立体形状を簡素化することで声道模型を製作。そこから生み出される音が実際の母音と類似したものとなることを確認している。その後も声道の物理模型は、梅田・寺西 (1966) らによって研究目的に用いられたり、現在も様々な研究者によって模型開発がなされていたりしているが (例えば、本多他, 2004; 菅田他, 2007 など)、「教育」を目的としたものはほとんどなかった。実際、教材として使われている例は従来、一部の博物館における初歩的な展示のみであった。

一方、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。その結果、教材としての優れた有効性を確認し、2002-2008年の間、**NTT-AT社から教材として約120セット販売**した (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 / C-21500841)**の助成を受け、研究が加速的に発展した。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) などにも声道模型が展示され、好評を博している。

最近では、日立シビックセンター科学館において「声道模型」展示を監修し、2010年3月より Chiba and Kajiyama の声道形状に基づく声道模型とリード式音源の改良版が設置された。また、スライド式3音響管やその他の声道模型を中心とする音響教育の取り組みが認められ、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**の中で原著論文が出版された。

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・聴覚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、そして聞いているか、音声生成・音声知覚の機構を理解してもらうことにある。

特に本研究では、音声生成に関する仕組みを分かりやすく理解するため「**より人間らしい音声**」に対応した小児・成人の声道模型を中心とする教材ならびに教育プログラムの開発等を進めた。より多様な音声を表現できるように従来からの教材群の拡大を図り、対象を成人男性に限らず成人女性や子どもの音声にまで広げ、ターゲットとなる音も日本語の母音のみならず子音 (日本語ラ行音や英語の /r/・/l/ 音など) にまで広げた。

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、「声道模型を中心とした音響教育」において、それぞれの模型のタイプや教材、教育プログラムごとに、本研究の目的に沿った開発や評価を行った。以下は、その分類を示す：

- (1) スライド式3音響管 (S3T)
 - (2) 筒型声道模型および頭部形状模型
 - (3) 可動式アクリル製ブロックを用いた屈曲型声道模型
 - (4) はじき音/接近音用屈曲型声道模型
 - (5) 梅田・寺西型声道模型の改良版
 - (6) 鼻腔を伴う屈曲型声道模型
 - (7) デジタル・パターン・プレイバック
 - (8) 教育プログラム等
- それぞれの項目に対し、模型の設計・試作、改良、評価を行うと共に、一部はコンピュータ・プログラムの開発・改良を、また電子教材では物理模型と融合を試みた。

4. 研究成果

上記の各項目について、以下のような成果があった。

- (1) スライド式3音響管 (S3T)

短くかつ細い筒を用いることで、子どもや女性用の模型も実現できることを確認した。それらについて、科学館用に改良も行った (**沖縄こどもの国とスイス Technorama** の両科学館にて2014年度から)。さらに、科学教室用のものも開発。リード式音源について、簡単な素材で実現できるように、厚紙と OHP シートなどを利用する工夫も行った。
- (2) 筒型声道模型および頭部形状模型

S3T で確認された母音の形状を1音ずつ実

現するパイプ式声道模型を複数タイプ製作。そのうちの1タイプ、および頭部形状模型の改良版が**沖縄こどもの国ワンダーミュージアム**と**スイス Technorama**の展示に使われた。円筒管接続式と角パイプ接続式に関しては、成人男性のみならず成人女性、子どものサイズのものも設計・製作を行った。



図1：沖縄こどもの国ワンダーミュージアムにおける声道模型の展示風景

(3) 可動式アクリル製ブロックを用いた屈曲型声道模型

初期のものに対して再設計を行った。その結果、舌位置により各母音において高い認識率を確認した。

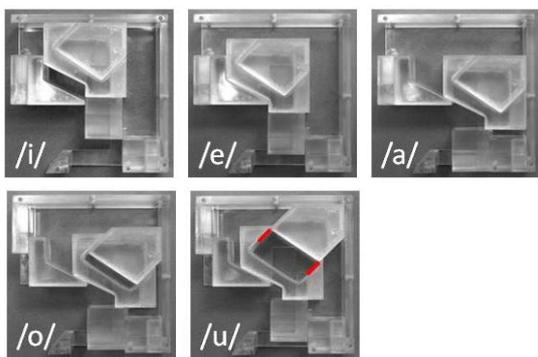


図2：ブロック式屈曲型声道模型（上段左から、/i/, /e/, /a/, /o/, /u/）

(4) はじき音／接近音用屈曲型声道模型

アルミ製舌の上部をレバーで操作し、舌の上半分が折れ曲がる模型を2種類設計・開発した。一方ははじき音（日本語の/r/）、他方は接近音が可能である。さらに後者は舌の長さも可変式で、側面接近音（英語の/l/）とそり舌音（英語の/r/）に対応するものである。全てにおいて所望の音が生成されることを生成実験と聴取実験にて確認した。さらに

これらの模型について**特許を出願**した。また、日本語を母語とする子どもがラ行子音を獲得するのが難しいというテーマについて、模型を使った説明を展開（**日本コミュニケーション障害学会にてシンポジストとして報告**）。

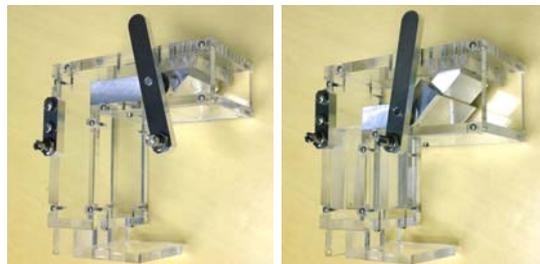


図3：はじき音／接近音用屈曲型声道模型

(5) 梅田・寺西型声道模型の改良版

声道形状を板ブロックの抜き差しで実現する模型を3種類実現した。1つ目は従来の梅田・寺西型と同じく真っすぐなもの。ただし、各ブロックは自重にて開放状態に戻る機構を持つ。2つ目はそれを屈曲型にしたもの。この場合、バネの力によって開放状態に戻る機構とした。3つ目は屈曲型だが声道の前方半分のみ板ブロックを配置。自重にて開放状態に戻る機構とした。特に3つ目の模型を用いて、母音の他、子音（特にはじき音と接近音）を実現できた（上記の**特許出願**に含まれる）。

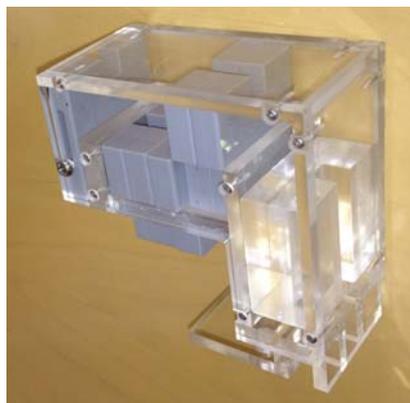


図4：口腔形状を板ブロックの上下によって変えられる屈曲型声道模型

(6) 鼻腔を伴う屈曲型声道模型

屈曲型の模型に鼻腔を追加し、シンプルな断面積関数で鼻音化母音の生成にも成功した。

(7) デジタル・パターン・プレイバック

従来の単一イントネーションに加え、基本周波数を可変にしたり、歌声を合成するなどの改良を実施した。タブレット PC によりフ

オルマンの時間変化を指で入力できるアプリも開発した。また、スペクトログラム・ボコーダとして拡張させた（日本音響学会2015年春季研究発表会にて**招待講演**）。

(8) 教育プログラム等

Acoustic-Phonetics Demonstrations として、成果の一部を説明文、デモ動画・音声等で web 上にて公開した。その取り組みについては、国際音響学会議 (International Congress on Acoustics) と日本音響学会の研究発表会にて共に**招待講演**の中で紹介した。また、北海道大学など他機関による利用も始まっている。さらに一部の動画は、YouTube にて配信を始めた。

(9) その他

それぞれの成果は、上智大学を始めとする私が担当する講義の中で活用し、また評価を行っている。そして、また次の改良や新規の開発につながっている。

次の国内外の大学には、声道模型を送り、活用してもらうと同時に評価も行った：和歌山大学・石川高専、スイス Zurich 大学、英国 University College London 大学、ドイツ Munich 大学、オーストラリア Western Sydney 大学、チリの大学、アメリカ Texas 大学・Indiana 大学・Cincinnati 大学・California 大学 Los Angeles 校。アメリカ Cincinnati 大学とは、声道模型を活用した共同研究の可能性を含め情報交換も行った。また、アメリカ Southern California 大学での workshop (中学 2 年生対象) で模型が活用された。

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 5 件)

①荒井隆行, "音声生成を直感的に理解するための声道模型とその教育応用," 日本音響学会誌, 70(5), 243-251, 2014. (査読有, **★招待論文**)

②荒井隆行, "構音の獲得に潜む音響的側面を探る: 日本語ラ行音を中心に," コミュニケーション障害学, 31, 30-35, 2014. (査読無)

③T. Arai, "Mechanical Models of the Human Vocal Tract," Acoustics Today, 9(4), 25-30, 2013 (査読無) DOI: 10.1121/1.4827000

④T. Arai, "Mechanical bent-type models of the human vocal tract consisting of blocks," Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 19, 025012, 1-8, 2013. (査読有)

DOI: 10.1121/1.4800980

⑤T. Arai, "Learning acoustic phonetics by listening, seeing, and touching," Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 19, 025017, 1-9, 2013 (査読有, **★招待講演**)

DOI: 10.1121/1.4799629

[学会発表] (計 19 件)

①荒井隆行, "パターン・プレイバックからスペクトログラム・ボコーダへ," 日本音響学会春季研究発表会, 中央大学 (東京都・文京区), 2015/3/18. (**★招待講演**)

②T. Arai and M. Budhiantho, "Education in acoustics of nasalized vowel using physical models of the human vocal tract with nasal cavity," 日本音響学会春季研究発表会, 中央大学 (東京都・文京区), 2015/3/16.

③T. Arai, "Retroflex and bunched English /r/ with physical models of the human vocal tract," INTERSPEECH, Singapore, 2014/9/15.

④F. Satoh, T. Arai and A. Nishimura, "History and activities of the Research Committee on Education in Acoustics in ASJ," Forum Acusticum, Krakow (Poland), 2014/9/7-12.

(**★招待講演**)

⑤荒井隆行, "音響学と言語聴覚士との間を取り持つ物理模型の提案," 日本音響学会秋季研究発表会, 北海学園大学 (北海道・札幌市), 2014/9/4.

⑥荒井隆行, "メロディーを音楽と歌声で合成しながら学ぶ," 日本音響学会秋季研究発表会, 北海学園大学 (北海道・札幌市), 2014/9/3.

⑦T. Arai, "Perceptual cues of Japanese /r/ sounds: Formant transitions vs. intensity dip," Conference on Laboratory Phonology, 国立国語研究所 (東京都・立川市), 2014/7/25.

⑧荒井隆行, "視聴覚情報を活用しながら音響音声学を学ぶ," 日本音響学会春季研究発表会, 日本大学 (東京都・千代田区), 2014/3/11.

(**★招待講演**)

⑨荒井隆行, "英語の/r/-/l/音に対する物理模型の試作: 音声教育のための新しい教材の提案," 日本音声学全国大会, 金沢大学 (石川県・金沢市), 2013/9/28.

⑩荒井隆行, "ブロック式声道模型による母音の韻質評価," 日本音響学会秋季研究発表会, 豊橋科学技術大学 (愛知県・豊橋市), 2013/9/27.

⑪荒井隆行, "はじき音を生成する声道模型の開発," 日本音響学会秋季研究発表会, 豊橋科学技術大学 (愛知県・豊橋市), 2013/9/26.

⑫T. Arai, "Physical models of the vocal tract with a flapping tongue for flap and liquid sounds," INTERSPEECH, Lyon (France), 2013/8/28.

⑬T. Arai, "On Why Japanese /r/ sounds are difficult for children to acquire," INTERSPEECH, Lyon (France), 2013/8/28.

⑭荒井隆行, "構音の獲得に潜む音響的側面を探る: 日本語ラ行音を中心に," 日本コミュニケーション障害学会学術講演会, 上智大学 (東京都・千代田区), 2013/7/21. (**★招待講演**)

⑮荒井隆行, "日本語/r/音の音響特性と幼児音声にみられる speech error," 日本音響学会春季研究発表会, 東京工科大学 (東京都・八王

子市), 2013/3/15.

⑯荒井隆行, “音響教育を究め伝えるということ.” 日本音響学会春季研究発表会, 東京工科大学, (東京都・八王子市), 2013/3/13.

(★招待講演)

⑰荒井隆行, “触覚で音の共鳴現象を感じて学ぶ” 日本音響学会秋季研究発表会, 信州大学 (長野県・松本市) 2012/9/19.

⑱T. Arai, K. Amino, M. Sonu, K. Yasu, T. Igeta, K. Tomaru and M. Kasuya, "Hands-on speech science exhibition for children at a science museum," Workshop on Child, Computer and Interaction, Portland, (Oregon, USA), 2012/9/14.

⑲ T. Arai, "Vowels produced by sliding three-tube model with different lengths," INTERSPEECH, Portland, (Oregon, USA), 2012/9/13.

[図書] (計 1 件)

日本音響学会編、コロナ社、音響キーワードブック、(発行年、及び総ページ数未定)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 声道模型

発明者: 荒井隆行

権利者: 上智学院

種類: 特許

番号: 特許出願 2013-264444 号

出願年月日: 2013 年 12 月 20 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等:

Acoustic-Phonetics Demonstrations (日本語):

<http://www.splab.net/APD/index-j.html>

Acoustic-Phonetics Demonstrations (英語):

<http://www.splab.net/APD/index-e.html>

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:

①Haendel Haus (ドイツ・音楽家ヘンデルの生家)における声道模型展示を監修 (2015 年 2 月より展示開始)。

②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 (2014 年 8

月、2013 年 8 月、2012 年 8 月に実施)。2014 年にはワークシートを導入。

③沖縄こどもの国ワンダーミュージアムにおいて常設展示「アイウエオン」の監修 (2014 年 4 月 19 日より展示開始)。2014 年 8 月に現況を視察し、指導・助言。声道模型と音源部を一部改良。

④Technorama (スイス) にて、音や声に着目した特別展「Soundscapes」が 2014 年 4 月 15 日～2015 年 12 月 31 日までの会期で開催。声道模型の展示を監修。

⑤建国大学・西江大学 (韓国) にて研究成果を交えた授業を実施 (2012 年 10 月)。

⑥日本音響学会サマーセミナー講師 (2012 年～2013 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