

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00930

研究課題名(和文) 子音を含む音声を生成する声道模型と音響教育への応用

研究課題名(英文) Vocal-tract models producing vowels and consonants and their application 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：音声の生成機構等を直感的に分かりやすく理解するため、子音と母音に関する模型を中心に教材・教育プログラムを開発した。子音は、鼻音・接近音・はじき音・破裂音・摩擦音を対象に模型の開発・評価を行った。母音は、日本語(音源も工夫し国内科学館にて企画展示)、エストニア語(海外博物館にて常設展示)に引き続き、ニーズの高い英語も対象とした。複数の子音を出すことが可能な屈曲式一体型模型については、毎年、改良を重ねた。見た目がより人間の解剖図に近いタイプでは、母音の声道形状を抽象化して静的モデルを開発し高評価を得た。千葉・梶山の測定に基づく屈曲式模型も製作。スライド式声道模型の普及のため、さらなる改良も重ねた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a set of tools which model the human vocal-tract and give an intuitive understanding of the mechanism of human speech production. Some of our models produce consonants, such as nasals, approximants, flaps, plosives and fricatives. Other models produce vowels, especially the English, Japanese, and Estonian inventories. Both the Japanese and Estonian vowel models are on exhibition in museums. One model which we continued to develop over several years is a bent model which produces several different consonants. Another model, very well received, is a static anatomical model producing the vowel /a/ which shows the human anatomy of the vocal mechanism, including the lungs and thoracic cavity. We also developed an additional set of bent models based on Chiba and Kajiyama's measurements, and we have a sliding vocal-tract model in widespread use around the world.

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

声道模型を用いて音声を生成する試みは古くからあるものの、それを教育目的に応用する例は、なかなか文献には残っておらず、さらには科学的な考察を追求した例はほとんどない。現在の音声研究分野において声道模型を用いたものとしては、Chiba and Kajiyama (1941-42) が当時、先駆的な声道に対する 3D 形状計測を行った結果を用いて声道模型を製作し、音響的にも所望の母音が生成されることを確認している。その後、梅田・寺西 (1966) によって音声の韻質と声質の研究等に応用された例や、最近では MRI による詳細な声道形状の物理模型での再現 (本多ら, 2004)、発話ロボットの開発 (菅田ら, 2007) などの例はある。しかし、教育目的の応用例は一部の博物館に基本原理に関する展示があるのみであった。

そのような中、我々は Chiba and Kajiyama の声道模型を復元した Arai (2001) をきっかけに声道模型を中心とする音声に関わる音響教育教材を開発し、その有効性を示してきた。その一部は、2002-2008 年の間、NTT-AT 社から教材として約 120 セット販売した。また、頭部形状模型や肺の模型など模型の幅も広げることで、音声生成機構を系統的に示す教育システムへと発展し、それが認められて Arai (2007) は **日本音響学会佐藤論文賞を受賞**した。

2005 年からは **科学研究費補助金** (17500603 / 19500758 / 21500841 / 24501063) の助成を連続して受け、研究が加速的に発展した。**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**) や小学校での**工作教室**に取り入れた。また、**静岡科学館** (常設展) や、**ソニーエクスプローラサイエンス** (企画展)、**日立シビックセンター科学館** (常設展)、**沖縄こどもの国** (常設展)、**スイス Technorama** (企画展)、ドイツ **Haendel Haus** (常設展) などにも声道模型が展示され、好評を博している。

その後、アメリカ音響学会の **Journal of Acoustical Society of America** にて**音響教育特集号**の中で原著論文が 2012 年に出版され、また**日本音響学会誌**でも**音響教育特集号**の中で**招待論文**が 2014 年に出版された。

### 2. 研究の目的

本プロジェクトを開始する当初、すでに声道模型を用いた音響教育に関する活動は国内外で評価を受け始めていた。しかし、その物理模型や電子教材を含む教材・教具の開発や教育プログラムには、まだ実現できていない側面も多々あった。

本研究テーマの究極的な目的は、人と人の意思疎通、情報伝達の一つの方法である「音声コミュニケーション」に関わる科学的な側面として、音声生成や音声知覚に関わる機構

を解明し、皆さんに広く理解していただくことにある。特に音声生成に関する仕組みを分かりやすく解説するためには、音声に関わる様々な音をカバーする必要があり、その教材・教具の幅もおのずと広がる。

そこで、本プロジェクトでは今まで力点が置かれてきた母音のみならず、子音に関する教材の幅も拡大し、子音と母音の両方をターゲットに音声生成の仕組み等を分かりやすく理解するための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。

### 3. 研究の方法

今まで既に、日本語 5 母音のみならず、日本語の子音、外国語の母音と子音を含むより多様な音声を対象としてその範囲を拡大しつつあった。それに加えて、以下の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。

- (1) 舌の前半部分が折れ曲がる模型
- (2) 板ブロック抜き差し式模型
- (3) 筒型声道模型
- (4) 頭部形状模型
- (5) スライド式 3 音響管 (S3T)
- (6) 梅田・寺西型の声道模型に関する応用版
- (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) 舌の前半部分が折れ曲がる模型  
子音の中でもはじき音や接近音を生成できるように工夫した。さらに口唇部を設け、下唇を可動式にすることで両唇破裂音にも対応した。加えて、鼻腔も付けて結合部の面積を可変にし、鼻咽腔結合の度合いを変化さ

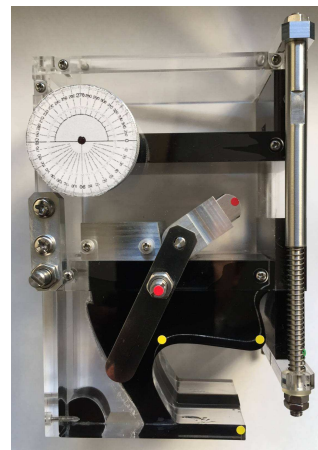


図 1 : 鼻腔を伴う屈曲型声道模型 (舌前半部、下唇部、鼻咽腔結合部が可変式)。

せることができる模型へと発展させた結果、鼻子音にも対応できた。図1は、それらをすべて備えた2017年版の模型である（初期のものは INTERSPEECH 2016、改良版は INTERSPEECH 2017 にて発表）。

### (2) 板ブロック抜き差し式模型

声道形状を板ブロックの抜き差しで実現する模型には3種類があるが、それらを複数の国際会議（ICPhS 2015 / INTERSPEECH 2015）で報告した。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、各ブロックはバネの力によっ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。この場合も、バネの力によって開放状態に戻る機構を持つ。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を持つ。特に3つ目の模型では、口唇部を追加することで、英語の /r/ の音がより明瞭に出ることが分かった。また、3つ目の模型に関して英語の母音を日本人が学習する際に有効であることを報告し、高い評価を得た。

### (3) 筒型声道模型

日本語5母音に対する筒型声道模型の中でも VTM-N20 と VTM-T20 に関して、3Dプリンタ用のファイルについて一般公開を開始した。そのファイルや関連する説明を含めて、以下の(8)で記載する Acoustic-Phonetics Demonstrations (APD) のページからアクセスできるようにした。このような声道模型と APD の取り組みの結果、**日本音声学学会学術研究奨励賞を受賞**するに至った。図2は、素材が石膏の場合の3Dプリンタによる出力結果。

ニーズの高い英語についてもその一部については筒型声道模型の標準セットを整えた。

日本語と英語以外として、エストニア語について9母音を筒型声道模型で実現することに成功し、**エストニア国立博物館の常設展**にて展示されることになった（2016年10月から）。2017年には実際に同館を訪問した。図3はそのときの写真。

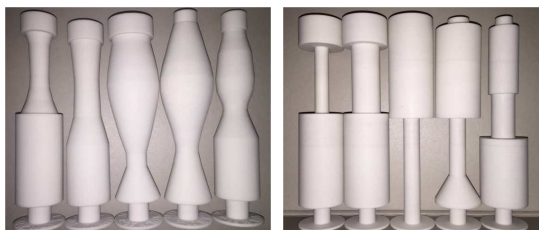


図2：3Dプリンタによって出力された VTM-N20（左）と VTM-T20（右）。



図3：エストニア国立博物館における声道模型の展示風景（常設展）。

### (4) 頭部形状模型用の屈曲式静的模型

解剖模型のように見た目がより人間の顔に近いタイプでは、母音/a/の声道形状をある程度の抽象化を経て静的モデルとして製作（図4）。2017年の国際会議 INTERSPEECH で報告したところ、**Best Show & Tell Paper を受賞**した。

また、千葉・梶山著「The Vowel」に登場する屈曲した声道形状をCAD経由で3Dプリンタ出力した模型については、音声研究の歴史を扱う国際ワークショップ(HSCR)にて2017年に報告した。

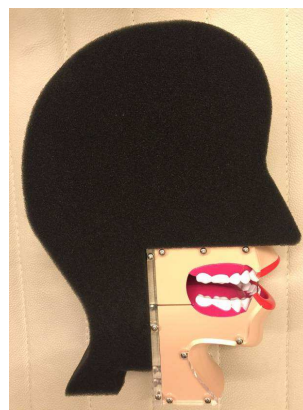


図4：解剖模型風の声道模型。

### (5) スライド式3音響管 (S3T)

スライド式の声道模型を普及させるために改良を続けた結果を中心に、2018年3月に日本音響学会の研究発表会にて**音響工作・教材コンテストに出展**した結果、**デモンストレーション賞を受賞**した。

### (6) 梅田・寺西型の声道模型に関する応用版

人間の調音運動を計測した結果を参考に、PC制御式の梅田・寺西型声道模型を使って、子音を含む短い発話を生成する実験を行っ

た。

(7) デジタル・パターン・プレイバック

タブレット PC のアプリとして、写真撮影したスペクトログラムに対し、基本周波数情報を指で描き加え、音声合成するソフトウェアを開発し、国立科学博物館のサイエンススクエアで使用している。

(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 上にて公開している。その webpage の項目を増やしたり、内容を充実させるなどを続けている。



図5：アメリカ・サンフランシスコにある科学館 Exploratorium での交流の様子(スタッフが手にしているのは声道模型の木型)。



図6 博物館・科学館における声道模型の展示風景。左：ドイツ Haendel Haus (常設展)、右：スイス Technorama (企画展のため現在は終了)。



図7 渋谷区「こども科学センター・ハチラボ」での展示の様子。左：肺の動画のプロジェクションマッピング、右：声道模型。

(9) 博物館・科学館とのその他の連携・交流

Chiba and Kajiyama (1941-42) が The Vowel の中で製作した声道模型を我々が独自に復元していた一方、アメリカ・サンフランシスコにある科学館 Exploratorium でも同じ The Vowel を参考にした模型が展示されている。その展示を過去に視察したことがあったが、2016年に改めて同館を訪問し、開発当初から携わったスタッフともお会いしながら特別に交流の場を持つことができた。図5はそのときの様子。(The Vowel については、**日本音響学会 90周年記念シンポジウムにて講演。**)

日本語5母音の簡型声道模型について、ドイツ Haendel Haus (音楽家ヘンデルの生家) とスイス Technorama において、VTM-T38 と VTM-T20 がそれぞれ展示されている (Technorama では、頭部形状とスライド式の声道模型も展示された)。それを受け、2015年に両施設を訪問。声道模型の展示を中心に視察し、改良点なども検討した(その様子は日本音響学会研究発表会等で報告)。図6はそのときの写真。

国内では、2014年から沖縄こどもの国ワンダーミュージアムにおいて簡型声道模型 (VTM-T50) が展示されている (常設展)。その展示において、一部、改良を施すことで音質の改善を試みた。

日本語5母音の声道模型を効率的・効果的に展示する工夫を進め、肺の動画をプロジェクションマッピングする手法と組み合わせ、渋谷区「こども科学センター・ハチラボ」にて展示した(2016年11月から2017年1月の企画展)。この展示では、音源とポンプを組み合わせることにより、安価に高音質で安定した喉頭原音を出せるような工夫を試みた。図7は、声道模型の展示の様子。(肺のモデルは日本音響学会英文誌 AST の Short Note、展示の様子は同学会研究発表会にて報告。)

国立科学博物館のサイエンススクエアでは、簡型の声道模型やデジタル・パターン・プレイバックを含む音響教育の展示を2012年から行っているが、2014年から導入したワークシートに関し、2015以降もその改良を重ねた。(その様子は AST 誌等で報告。)

(10) 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。(声道模型を中心とする音響教育と日本音響学会音響教育研究会の活動状況は、AST 誌 Invited Paper・Invited Review 及び日米音響学会ジョイント会議の招待講演数件で報告。)

次の国内外の大学には、声道模型や音源を送り、活用してもらおうと同時に評価も行った：北海道大学・神戸大学・会津大学、アメリカ MIT・University of Texas・Eastern New Mexico University・Manhattan School of Music、カナダ University of Alberta、ドイツ Technical

University of Dresden・University of Mannheim、イギリス University of Sheffield、スウェーデン KTH Royal Institute of Technology in Stockholm. その他、高等学校から国立大学大学院、言語聴覚士養成コースなどの授業、美大での卒業制作に至るまで、幅広く応用された。また、声道模型を工作しながら音について学ぶワークショップを都内小学校にて夏休みに実施した。日本大学での子ども向けイベントにも協力。

NHK E テレで放映中の子ども向け英語番組「えいごであそぼ with Orton」では、英語の音を生成する仕組みを踏まえ、発音に気付きを与える様々な実験道具を提案するなど、実験監修を務めている。(声道模型を中心とする音響教育や「えいごであそぼ with Orton」での実験監修の様子は、日本音響学会 2017 年秋季研究発表会や音学シンポジウム、日本英語学会での各招待講演でも報告。)

#### 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 8 件)

- ① T. Arai, "What Tsutomu Chiba left behind," 音声研究, 20, 117-120, 2016. 査読無, DOI : 10.24467/onseikenkyu.20.3\_117
- ② 荒井隆行, "サウンドスペクトログラフ," 日本音響学会誌, 72(9), 570-571, 2016. 査読無, DOI : 10.20697/jasj.72.9\_570
- ③ T. Arai, "Vocal-tract models and their applications in education for intuitive understanding of speech production," Acoust. Sci. Tech., 37(4), 148-156, 2016. 査読無 (**Invited paper**), DOI : 10.1250/ast.37.148
- ④ Takayuki. Arai and Takashi. Arai, "Virtual lung model for education in phonetics and speech science," Acoust. Sci. Tech., 37(4), 173-174, 2016. 査読有
- ⑤ T. Arai and R. Uchida, "Projection mapping of articulation for education in phonetic science," Acoust. Sci. Tech., 37(4), 175-177, 2016. 査読有
- ⑥ K. Amino, T. Arai, F. Satoh, K. Nakamura, A. Nishimura, S. Yokoyama, "Exhibition at 'Summer-Holiday Science Square' hosted by National Museum of Nature and Science," Acoust. Sci. Tech., 37(4), 178-180, 2016. 査読有
- ⑦ F. Satoh, T. Arai and A. Nishimura, "History and activities of the Research Committee on Education in Acoustics in ASJ," Acoust. Sci. Tech., 37(4), 143-147, 2016. 査読無 (**Invited**

#### review)

⑧ T. Arai, "Vocal-tract models old and new: From Chiba to Arai," 上智大学言語学会会報, 30, 16-22, 2015. 査読無

[学会発表] (計 23 件)

- ① 荒井隆行, "母音を作ろう! アクティビティー・キット," 日本音響学会春季研究発表会, 2018. **【音響教育 デモンストレーション賞】**
- ② 荒井隆行, "子どもの『聞く』と『しゃべる』の話題," 日本音響学会北陸支部主催のシンポジウム 保育と音環境 - 赤ちゃんの声・耳について考えたことはありますか? -, 2017.
- ③ 荒井隆行, "英語教育のための学際的アプローチによる音声研究," 日本英語学会 第35回大会 公開特別シンポジウム, 2017.
- ④ 荒井 隆行, "音声コミュニケーションにおける Speech Chain を考える," 音学シンポジウム 2017(第115回 音楽情報科学研究会), 2017. **【招待講演】**
- ⑤ T. Arai, "Integrated mechanical model of [r]-[l] and [b]-[m]-[w] producing consonant cluster [br]," INTERSPEECH, 2017.
- ⑥ T. Arai, "Vocal-tract Model with Static Articulators: Lips, Teeth, Tongue, and More", INTERSPEECH, 2017. **【Best Show & Tell Paper 賞】**
- ⑦ T. Arai, "Chiba and Kajiyama measured 3D configurations of the human vocal tract and made physical models based on the measurements," International Workshop on the History of Speech Communication Research, 2017.
- ⑧ 荒井隆行, "音や声に関する工作を介した学びを考える," 日本音響学会秋季研究発表会, 2017. **【招待講演】**
- ⑨ 西村明, 荒井隆行, 佐藤史明, 横山栄, "小中学生のための音響教材と音響教材コンテンツ開催案," 日本音響学会秋季研究発表会, 2017. **【招待講演】**
- ⑩ 荒井隆行, "博物館・科学館における「声」に関する展示の実例," 日本音響学会春季研究発表会, 2017.
- ⑪ T. Arai, "Tools for education in acoustics and phonetics," 5th Joint Meeting: Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016. **【招待講演】**

⑫ F. Satoh, T. Arai and Akira Nishimura, "Activities of the research committee on education in acoustics in ASJ for children," 5th Joint Meeting: Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016. **【招待講演】**

⑬ T. Kimura and T. Arai, "Goodness evaluation by L1 Spanish speakers of various allophones, made by human and by vocal tract models, of the Spanish phonemes /l/ and /t/," 5th Joint Meeting: Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016. **【招待講演】**

⑭ T. Arai, "Mechanical Production of [b], [m] and [w] using controlled labial and velopharyngeal gestures," INTERSPEECH, 2016.

⑮ T. Arai, "What Tsutomu Chiba left behind," 30th General Meeting of the PSJ, 2016.

⑯ 荒井隆行, "千葉勉が遺したもの," 日本音響学会, 2016.

⑰ 山田美帆, 荒井隆行, "形状の差異が円筒管接続式声道模型の音響特性に与える影響," 日本音響学会秋季研究発表会, 2016.

⑱ 荒井隆行, "科学館・博物館における展示を目的とした声道模型の工夫," 日本音響学会春季研究発表会, 2016.

⑲ 荒井隆行, 木村琢也, 内田玲, "エストニア語の母音を声道模型から生成する試み," 日本音響学会秋季研究発表会, 2015.

⑳ T. Arai, "Hands-on tool producing front vowels for phonetic education: Aiming for pronunciation training with tactile sensation," INTERSPEECH, 2015.

21. T. Arai, "Two extensions of Umeda and Teranishi's physical models of the human vocal tract," INTERSPEECH, 2015.

22. T. Arai, "Physical models of the vocal tract sound different with the same shape but different temporal characteristics and vice versa," Int'l Cong. of Phonetic Sciences, 2015.

23. T. Arai, "Vocal-tract models old and new: From Chiba to Arai," 上智大学言語学会第30回大会, 2015. **【招待講演】**

〔図書〕(計 2 件)

① 荒井隆行 (分担執筆), 医師薬出版株式会社, 言語聴覚士テキスト 第3版, 2018. 全456ページ (「音響学」の項目を執筆, pp. 203-212)

② 日本音響学会編, 荒井隆行 (分担執筆), 音

響キーワードブック, コロナ社, 2016. 全482ページ (「声道模型」の項目を執筆, pp. 262-263)

〔その他〕

ホームページ等

Acoustic-Phonetics Demonstrations (APD)

(日本語) <http://www.splab.net/APD/index-j.html>

(英語) <http://www.splab.net/APD/>

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