

## 英語 /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 —\*

荒井 隆行 (上智大学)  
arai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

Chiba & Kajiyama (1942) は母音産出時における声道形状から物理模型を製作し、模型から作り出される音の質がもとの母音に近いことを確認している。それ以来、研究目的に声道模型は使われてきているが (梅田・寺西, 1966 など)、教育に応用した報告は少ない。一方、我々は Chiba & Kajiyama (1942) の模型を復元し (Arai, 2001)、その教育的な意義を報告している (Arai, 2007; Arai, 2012 など)。その復元モデルとして当初、筒型モデルとプレート型モデルの 2 タイプを開発した。筒型モデルは、Chiba & Kajiyama が行った直線近似 (1 次近似) をそのまま円筒管で実現したものである。それを階段近似 (0 次近似) にして穴の開いたプレートを横に並べる形式にしたのが、プレート型モデルである。いずれのモデルも現在、講義で用いられている他、一部の博物館・科学館などにおいても展示が行われている。

上記の復元モデル以降、声道模型は「よりシンプルな形状」から、頭部形状模型に代表されるように「より人間の音声生成機構に近いもの」まで多岐に渡って開発が進められてきている (Arai, 2007, 2008, 2010, 2012 など)。その中には、声道がまっすぐなモデルと、途中で直角に曲がるモデルとの両方が存在する。前者の例としては、Fant (1960) による 3 音響管モデルに基づくスライド式 3 音響管モデル (sliding three-tube model; S3T model) がある (Arai, 2012)。この S3T モデルを含め一連の声道模型を用いることによって、声道内の狭窄の位置と、母音の質の関係を確認することができる。またいずれのモデルにおいても、音声生成の音源フィルタ理論を学ぶ際に有効であることを確認している。

今までの模型の多くは母音を主な対象にしてきたが、子音に関する例としては、英語の /r/-/l/ 音についての試みを報告した (Arai, 2007)。しかし、そこでは調音器官が動かず、声道形状が変化しない静的なモデルであった。そこで動的なモデルの開発も行われた。より人間に近い声道模型の例として、声道形状をダイナミックに変えることができるような梅田・寺西による声道模型の改良版がある (梅田・寺西, 1966; Arai, 2010)。もともと、梅田・寺西 (1966) による模型では、プラスチックの角棒を側面から出したり引っこめたりすることによって、声道形状を変えることが可能となっている。我々は、その角棒にアクチュエータを取り付け、PC を介してその制御を行うことができるように改良した (Arai, 2010)。これにより、時々刻々と変化する声道形状を模型にて再現することが可能となった。この模型では比較的確々な声道形状とその動きを実現することが可能である。一方、自由度が

---

\* Prototype of a physical model for English /r/-/l/ sounds: Proposing a new tool for phonetic education (Takayuki ARAI, Sophia University)

大きい結果、ある特定の音を（特に手動で）出すことはそれほど容易ではない。

そこで英語の /r-/l/ 音に限定し、これらの音を声道形状の動的な動きと共に産出するため、新しい物理模型を開発した (Arai, 2013)。この模型は、断面の形状が基本的に長方形あるいは多角形をしており、口腔と咽頭腔がそれぞれまっすぐで両者が声道の中央で直角に接続されている。口腔にはアルミ製の「舌」が設置され、舌の途中には前方が上に向かって回転する機構が備わっている。その結果、舌はその前方部分を途中から上方へ折り曲げることができる。舌の先端部は長さの調節が可能で、短い場合は舌の折り返しはそり舌を形作り、/r/ 音（そり舌接近音）を産出することができる。一方、長い場合は舌端部が口蓋にあたり、かつ気流は折れ曲がった舌の側方を通過するため、/l/ 音（歯茎側面接近音）が作られる。

本研究では、これらの模型を使って実際に音声教育に応用することが可能であるかを探るため、1) 試作模型の再検討と新たにそり舌以外の /r/ 音として **bunched /r/** の検討、2) 各声道模型によって産出される音の音響分析、3) 大学院の音響音声学の講義におけるアンケート調査に基づく評価を行った。

## 2. 試作模型

### 2.1. 歯茎側面接近音用の声道模型

歯茎側面接近音のための声道模型に関して、正中矢状断面の模式図を図 1 に示す。この図において、声道形状の奥行きは 45 mm である。従ってこの試作模型では、45 mm × 20 mm の長方形の断面形状が基本となっている。

図 2 に試作模型の写真を示す。この図を見ると分かるように、声道形状の周囲は透明アクリルによって囲われており、中の様子が分かるように工夫されている。また、舌の上面に相当する部分（図 1 の A, B, C に相当）はアルミ素材によって作られており、図 1 の A と B の部分は軸を中心に回転することが可能となっている。実際の回転操作は、軸に取り付けられたレバーを倒したり戻したりすることで実現される。咽頭部には、アクリル製の舌根

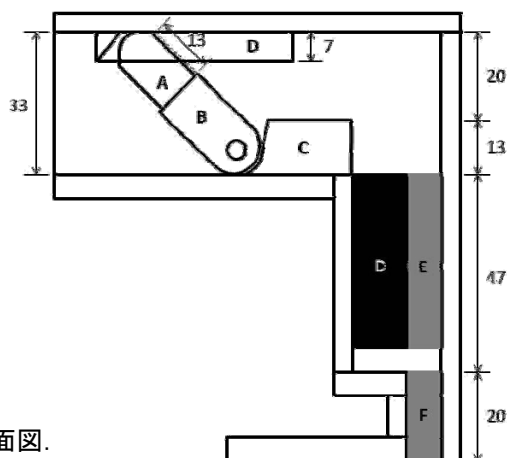


図 1: 側面接近音用の声道模型の断面図。

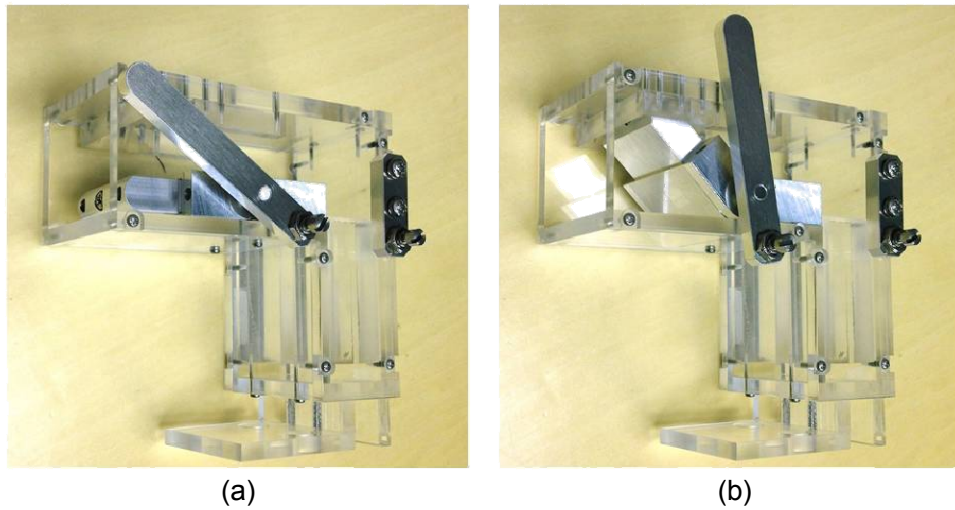


図 2: 側面接近音用の声道模型. (a)は母音/a/産出時, (b)は舌尖が歯茎部に接した時.

部（図 1 の D と E に相当）が挿入されている．この部品は  $45\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 45\text{ mm}$  の直方体の形状をしているが，咽頭壁側に長さ方向中央に沿って  $9\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  の溝が彫られている（図 1 の E に相当する部分）．一方，口腔は広く開いているため，図 2 (a)のように舌が寝ている回転位置にある場合には母音/a/が産出されるような声道形状となっている．なお，図 1 の F は喉頭部の狭窄を形成している部分であり，模型では  $9\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  の四角柱状の穴になっている．

この模型において，レバーを図 2 (b)のように立てると連動して舌前方が起き上がり，いざれ舌尖が歯茎部に接する．歯茎部の周りには上歯の歯列があるが（図 1 の D に相当），舌尖部の幅は  $32\text{ mm}$  で歯列の幅よりも狭いため，舌の両側には呼気流が流れる隙間がある．その結果，側面接近音が産出される．

## 2.2. そり舌接近音用の声道模型

2.1 節と同じ模型において，図 1 の A の部分が B に  $13\text{ mm}$  だけ挿入された状況を考える．すると，レバーを倒した際に舌尖は口蓋に接することなく，結果的に舌は反り返ることになる．このようにして側面接近音用の模型を使って舌尖部を引っ込めることにより，そり舌接近音を実現した．その様子を図 3 に示す．図 3 (a)は舌が寝ている状態であるため，図 2 (a)同様，母音/a/が産出される．一方，レバーを倒すと図 3 (b)のように，約  $100$  度まで舌が反り返る．

## 2.3. 軟らかい舌を伴う声道模型による "bunched /r/"

アメリカ英語の /r/ はそり舌接近音以外に，いわゆる "bunched /r/" になることが多いことが報告されている (Espy-Wilson, 2000 他)．そこで，bunched /r/ を声道模型によって実現することを考えた．そこで，以前から使用している軟らかいゲル素材による舌を伴う声道模型

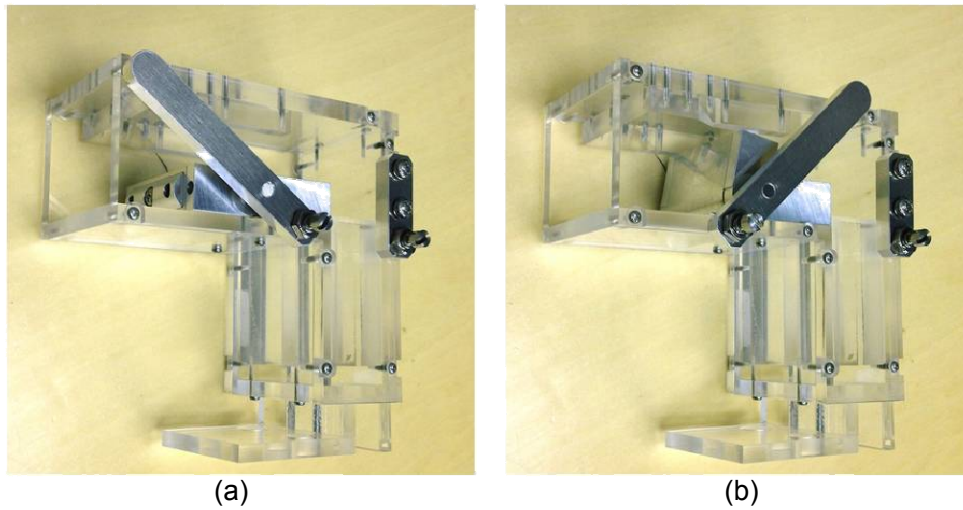


図 3: そり舌接近音用の声道模型. (a)は母音/a/産出時, (b)は舌尖が反り返った時.

(Arai, 2008) を使用することを試みた (図 4 (a)). そしてこの模型において, 母音/a/の形状から bunched /r/の舌形状を形作るような動作を実現した (図 4 (b), (c)).

### 3. 分析・評価

#### 3.1. 音響分析

2 節で述べた声道模型に対し, 音響分析を行った. 模型に対しては/aCa/という無意味音節を産出するように操作し, 音源にはリード式音源 (Arai, 2012) を用いた. 産出された音は, デジタルレコーダ (SONY, PCM-D1) を用いて録音した. マイクロホンは内蔵のものを使用し, マイクロホンを模型の口唇部から約 20 cm 離れた位置に配置した. その状態でリード式音源に息を吹き入れると同時に, /aCa/を産出するように舌を手で操作した. 標本化周波

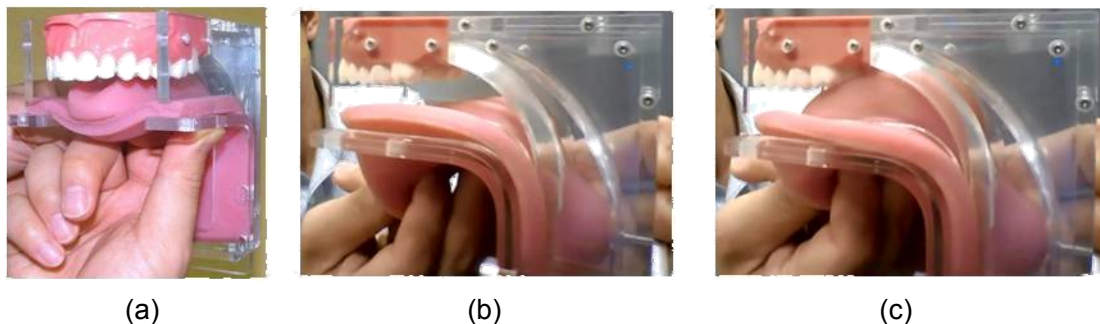


図 4: 軟らかいゲル素材による舌を伴う声道模型.

(a): 正面から. (b): 母音/a/の舌形状. (c): bunched /r/を模擬した舌形状.

数は 48 kHz、量子化ビット数は 16 bit であった。

図 5 に、2 節で述べた 3 つの模型に対する音響分析の結果を示す。この図は、48 kHz にてデジタル録音された音声信号を、8 kHz にまでダウンサンプリングした後、WaveSurfer にてサウンドスペクトログラムを計算し求めた。図 5 (a) は、歯茎側面接近音用の模型による結果である。この図を見ると、/l/ から後続母音への遷移部にて第 1 フォルマント (F1) が短時間で急峻に立ち上がっている様子が分かる。また、第 3 フォルマント (F3) が子音部において 2 kHz 以上 (約 2.5 kHz) に存在している。図 5 (b) はそり舌接近音用の模型による結果、図 5 (c) はゲル舌に基づく模型による bunched /r/ の結果である。これらの図を見ると、F3 が子音部において 2 kHz を下回っている様子が分かる。第 1 フォルマントに関しては、図 5 (c) において、よりはっきりと子音部での下降と上昇が観測された。

### 3.2. アンケート評価

2.1 節と 2.2 節で述べた /r/ と /l/ 用の声道模型を使って実際に音声教育に応用することが可能であるかを探るため、大学院の音響音声学に関する講義においてアンケート調査を行った。この講義には言語聴覚士や語学教師を志す者も半数程度含まれていた。デモンストレーションを交えた説明後に行ったアンケート結果に基づく評価について、以下に列挙する。

- ・良い点：音を聞きながら体感でき、興味が湧きやすい。舌のどこをどう配置すれば良いかが分かる。調音の違いを明確に理解できるだろう。いろいろな角度から見れる。舌の動きと音の変化の直接的な関係を実感することができる。
- ・改善点：舌全体を色付けするとより良いだろう。よりリアルな舌のほうが自分と比較し易く効果も高まるかも。どこに注目してデモを見たらいいかの詳しい説明が欲しい。/r/ と /l/ を瞬時に切り替えることができるとより良いかも。模型自信が小さく、遠いと手元が見えにくい。操作が大変のよう／レバーを速く操作する必要がある。

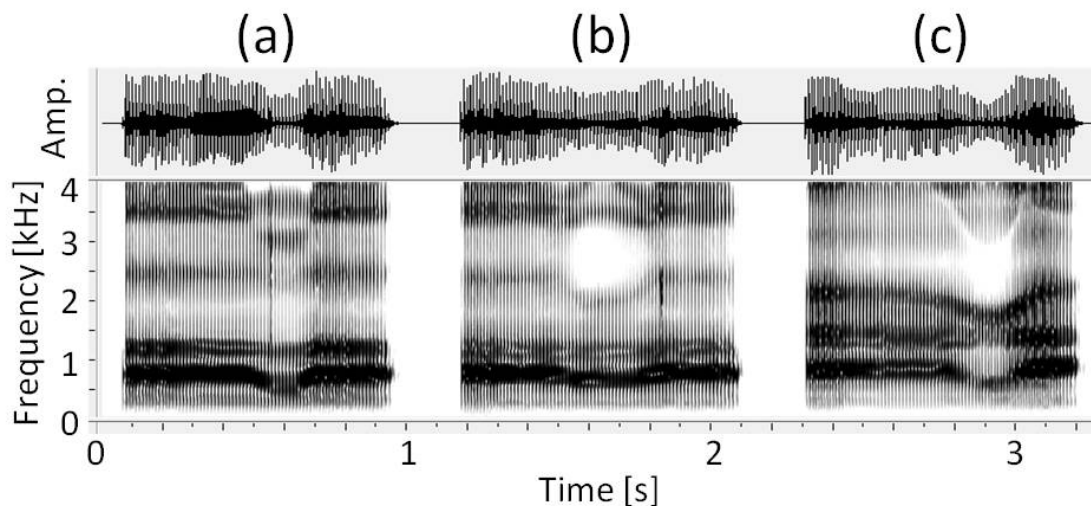


図 5: 各声道模型から産出された /aCa/ の時間波形とサウンドスペクトログラム。

(a): 歯茎側面接近音. (b): そり舌接近音. (c): bunched /r/.

この他、学習者自身が自分で操作することの利点についても指摘があった。

#### 4. おわりに

英語/r/-l/音のための声道模型を試作し、音声教育への応用の可能性を探るため、音響分析とアンケート調査に基づく評価を行った。対象は、歯茎側面接近音、そり舌接近音の他、bunched /r/についても検討した。その結果、操作を行いながら舌の動きを目で確認し、かつ音を聞いて実感できる点などを含め、その有効性が確認された。一方、音質の改善や、形状をより実物に近付けるなどの課題についても指摘があり、今後引き続き検討していきたい。

#### 5. 謝辞

内容の一部は JSPS 科研費 24501063 の助成を受けた。

#### 参考文献

- Arai, T. (2001) “The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity”, *Journal of the Phonetic Society of Japan*, 5(2), 31-38.
- Arai, T. (2007) “Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract”, *Acoustical Science and Technology*, 28(3), 190-201.
- Arai, T. (2008) “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*, 29(2), 188-190.
- Arai, T. (2010) “Mechanical vocal-tract models for speech dynamics”, *Proc. of INTERSPEECH*, 1025-1028.
- Arai, T. (2012) “Education in acoustics and speech science using vocal-tract models”, *Journal of Acoustical Society of America*, 131(3), Pt. 2, 2444-2454.
- Arai, T. (2013) “Physical Models of the Vocal Tract with a Flapping Tongue for Flap and Liquid Sounds”, *Proc. of INTERSPEECH*.
- Chiba, T. and Kajiyama, M. (1942) *The Vowel: Its Nature and Structure*. Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd.
- Espy-Wilson, C. Y., Boyce, S. E., Jackson, M., Narayanan, S. and Alwan, A. (2000) “Acoustic modeling of American English /r/”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(1), 343-356.
- Fant, G. (1960) *Theory of Speech Production*. The Hague, Netherlands: Mouton.
- Umeda, N. and Teranishi, R. (1966) “Phonemic feature and vocal feature: Synthesis of speech sounds, using an acoustic model of vocal tract”, *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 22(4), 195-203.