

## 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

☆山田美帆, 荒井隆行 (上智大・理工)

## 1 はじめに

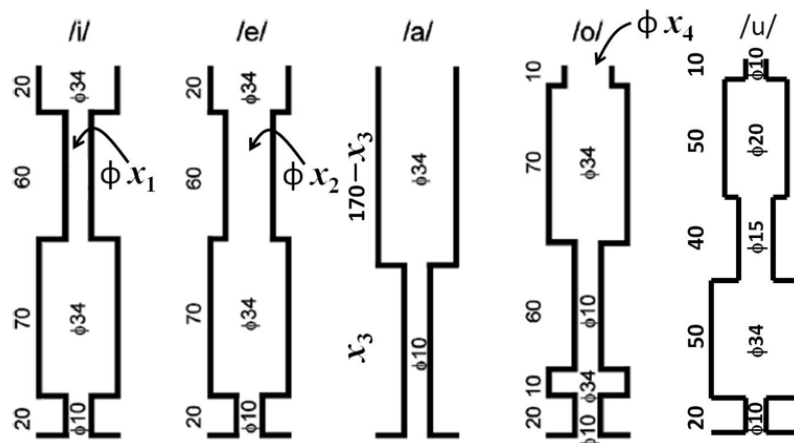
近代における声道模型の研究は Chiba and Kajiyama [1]が母音生成時の声道形状を簡素化し、モデル化したことに由来する。Chiba and Kajiyama [1]は声道模型を用いて、母音の質の違いが形状の違いにあることを証明した。その後、Arai [2]は Chiba & Kajiyama [1]の日本語 5 母音 (/i/, /e/, /a/, /o/, /u/) の声道模型を復元し、声道模型が音声生成の仕組みを理解する上で、有効であることを示した。このように、声道模型は母音生成時の形状を理解する上でも、音声学等の教育的場面でも有効である[3,4,5]。

本研究では、Arai [6]による簡素化された Chiba & Kajiyama モデルを基本とし、その形状をさらに微調整することによって、母音の質がどう変化するかを検討する。

## 2 模型について

対象とした声道模型は Arai [6]で用いた日本語 5 母音を簡素化した形状をベースとした。

ただし、/u/については、より Chiba & Kajiyama の形状に近付けたものを用いた。Fig. 1 にその断面図を示す。この図を見るとわかるように、/i/, /e/, /a/, /o/については、Arai [6]が基本となっている。特に、/i/は口腔の狭めの直径  $x_1$  が 10 mm の場合、/e/は同じく口腔の狭めの直径  $x_2$  が 20 mm の場合、/a/は咽頭腔の長さ  $x_3$  が 80 mm の場合、/o/は口唇の丸めに伴う開口部の直径  $x_4$  が 20 の場合、ともに Arai [6]と一致する。さらに、/i/については、 $x_1$  を 8 から 18 mm まで 2 mm 刻みに変化させた。/e/については、 $x_2$  を 20 から 24 mm まで 2 mm 刻みに変化させた。/a/については、 $x_3$  を 80 から 90 mm まで 5 mm 刻みに変化させた。/o/については、 $x_4$  を 20 mm と 14 mm とした。加えて、 $x_4$  が 14mm の際、咽頭腔の始まり部分について、急激な直径の変化を斜めにしたものも用意した。その結果、5 母音で合わせて 16 本の模型が揃った。この 16 本すべての声道模型について、Fig. 2 に模型形状の模式図を示す。



$\phi x_1 = 8$  (i1), 10 (i2), 12 (i3), 14 (i4), 16 (i5), 18 (i6)  
 $\phi x_2 = 20$  (e1), 22 (e2), 24 (e3)  
 $x_3 = 80$  (a1), 85 (a2), 90 (a3)  
 $\phi x_4 = 20$  (o1), 14 (o2), 14 (o3)

Fig. 1 各母音における声道模型の断面図

\* Effects of difference in shape of the connected-tube vocal-tract models on their acoustic properties, by YAMADA, Miho, and ARAI, Takayuki (Sophia Univ.).

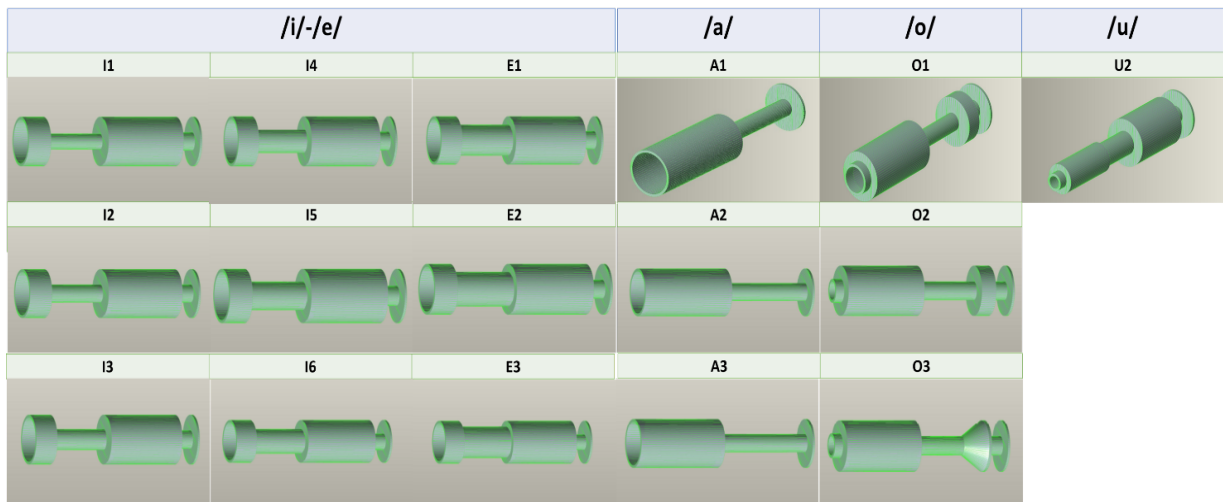


Fig. 2 各母音において使用した声道模型の模式図

### 3 測定方法

インパルス応答の測定は上智大学の防音室にて、WinMLSのソフトウェアを用いて行った。信号音はPCから再生しアンプ(Onkyo, MA-500U)で増幅した後、ドライバユニット(TOA, TU-750)に入力した。このドライバユニットの上にある皿は声道模型用に改良してある[3]。増幅後の信号音を声道模型の声門側に入力し、出力音を声道模型の口唇側から20 cm離れたマイク+プリアンプ(RION, NH-22)を介し、騒音計(RION, NL-32)経由で収録した。信号音は、swept sine信号を用いた。PCからの音の入出力はサウンドカード(Roland, UA-25EX)を通して行われた。測定方法のブロック図をFig.3に示す。

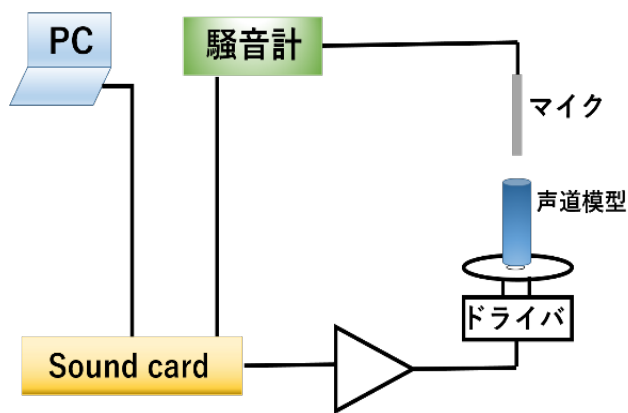


Fig. 3 測定方法のブロック図

### 4 分析結果

各母音の模型の周波数特性を、スペクトログラムの形でFig.4に示す。また、インパルス応答に基づいた結果をベースに、スペクトログラムから読み取った第1, 第2フォルマント周波数(F1, F2)をTable 1に示す。さらに、この表から得られるF1-F2図をFig.5に示す。

Table 1 各模型のF1, F2の測定値

Vowels	F1 [Hz]	F2 [Hz]
i1	290	2270
i2	330	2220
i3	360	2170
i4	380	2090
i5	410	2030
i6	440	1970
e1	480	1910
e2	510	1860
e3	540	1790
a1	840	1400
a2	870	1370
a3	890	1280
o1	610	890
o2	490	810
o3	490	860
u2	400	1270

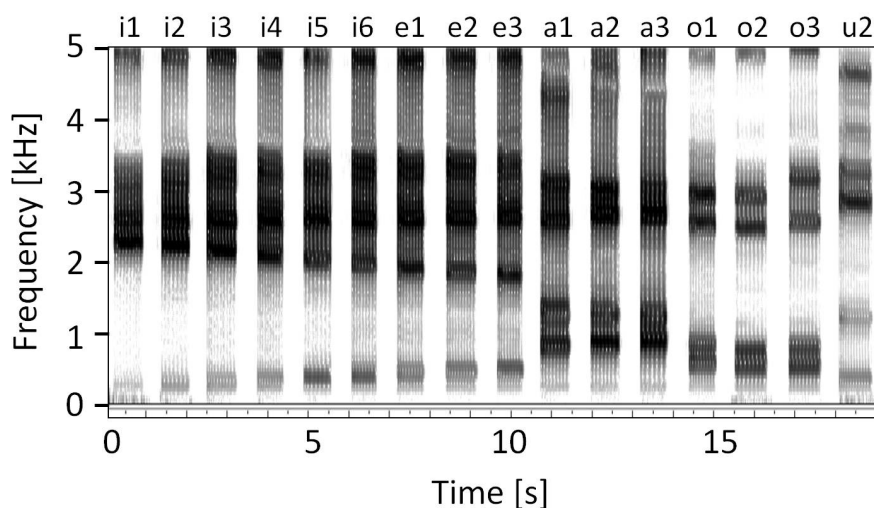


Fig. 4 各声道模型からの出力音に基づくスペクトログラム

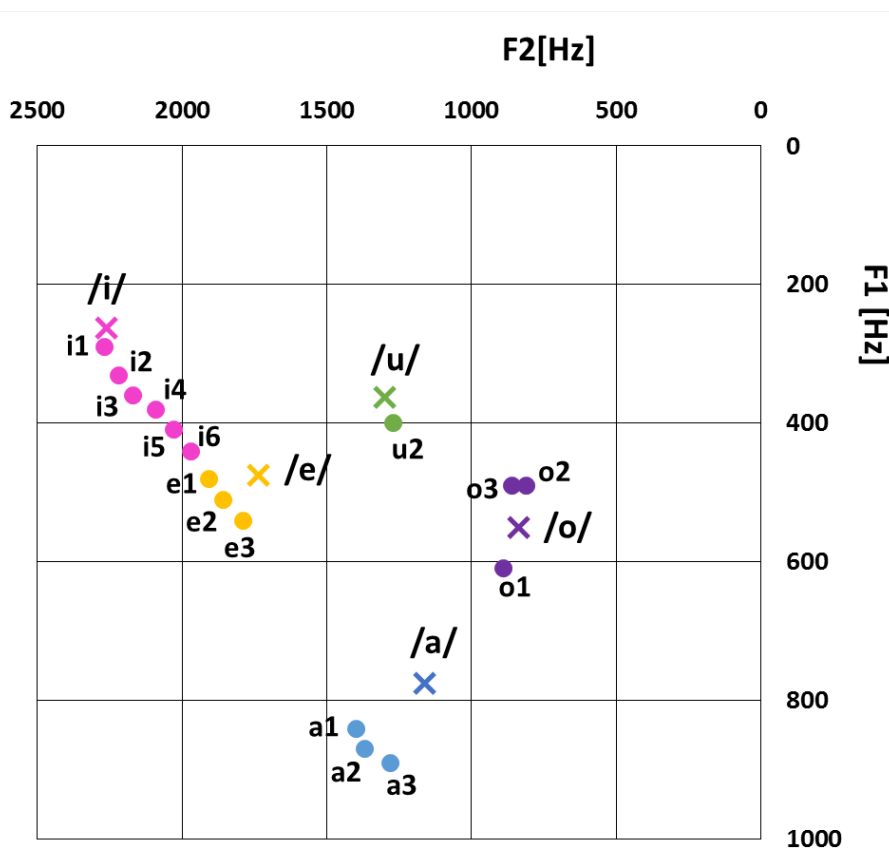


Fig. 5 各声道模型からの出力音に基づく F1-F2 図  
 (●:声道模型の測定値, ×:日本人成人男性の平均値[7])

## 5 考察

### 5.1 フォルマント値の違い

母音の分布を示す Fig.5 には、粕谷ら[7]による日本人成人男性の各母音のフォルマント周波数の平均値も示している。この図を見ると

わかるように、各母音で平均値に近いところに模型による出力が得られている様子がわかる。先行研究[6]では i2,e1,a1,o1 を用いていた。これらの模型を Fig.5 上で比較すると、そこそこ平均値に近いことが確認できた。

母音ごとに注目してみると、/i/については、i2 よりも円筒管の前腔を狭めた i1 の方が、F1 が低く、日本人成人男性の平均値に1番近い結果となった。/e/については、e1 よりも、さらに前腔を開いた e3 の F2 が下がり日本人成人男性の平均値に1番近い結果となった。/i/-/e/の模型ごとのフォルマント値をみると、前腔の狭めが狭くなればなるほど、F1 が下がり、F2 が上がっている。このことはパータベーション理論によっても裏付けられる。すなわち、F1 モードでは空気粒子の速度分布の腹に、F2 モードでは同分布の節に狭めがあるため、F1 が下がり、F2 が上がる結果となった。/a/については a1 よりも後腔が長い a3 の F2 が下がり、日本人成人男性の平均値に近づいた。/o/については o1 だと少し口唇の開きが大きく、多少/a/にフォルマント値が寄っていたが、口唇の開きを狭くしたところ、F1 と F2 が下がり、日本人成人男性のフォルマント平均値に近づいた。値は o3 が1番男性平均と近い値であった。/u/については、1つの模型だけであるが、男性平均と十分近いフォルマント値が得られた。

## 5.2 聴感上の違い

インフォーマルな聴覚印象評価では、各母音に対して日本語の各母音に聞こえるかどうかを評価した。/i/については、i2 でも十分であったが、i1 の方がより日本語の/i/に近い印象であった。/e/については、e1 でも十分であったが、e2, e3 の方が日本語の/e/に近い印象であった。/a/については、a1 でも十分だが、a3 の方が日本語の/a/に近い印象であった。/o/については、o1 は少し/a/に近い印象であったが、o2, o3 とも日本語の/o/に近づいた。/u/は十分に日本語の/u/の印象であった。

## 6 おわりに

本研究では、Arai [6]によって提案された円筒管接続式声道模型に対し、その形状を再検討した。音響分析に加え、informal な聴覚印象評価と照らし合わせると、総合的に次のように結論付けられた：

- ・/i/については、i2 でも十分だが、i1 のほうがより F1 が低く日本語の/i/に近い。
- ・/e/については、e1 でも十分であり、さら

に口を 2-4 mm 開いた e2 でも e3 でも日本語の/e/として十分であった。

- ・/a/については、a1 でも十分だが、さらに後腔が長い a3 のほうが F2 が低く日本語の/a/に近い印象であった。

- ・/o/については、o1 だと少し口唇の開きが大きく ( $\phi$  20 mm)、多少/a/に寄って印象であった。そこで、口唇の開きを狭くした場合 ( $\phi$  14 mm)、F1, F2 ともに低くなり、日本語の/o/に近づいた (o2・o3 ともに)。

- ・/u/については、フォルマント値が男性平均と近く、聴感上でも日本語の/u/として十分であった。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K00930 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] T. Chiba and M. Kajiyama, *The Vowel: Its Nature and Structure*, Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd., Tokyo, 1941-42.
- [2] T. Arai, "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *J. Phonetic Soc. Jpn.*, 5(2), 31-38, 2001.
- [3] T. Arai, "Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract," *Acoust. Sci. Tech.*, 28(3), 190-201, 2007.
- [4] T. Arai, "Education in acoustics and speech science using vocal-tract models," *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(3), Pt. 2, 2444-2454, 2012.
- [5] T. Arai, "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.
- [6] T. Arai, "Simple physical models of the vocal tract for education in speech science," *Proc. of INTERSPEECH*, 756-759, 2009.
- [7] 粕谷英樹, 鈴木久喜, 城戸健一, "年令, 性別による日本語 5 母音のピッチ周波数とホルマント周波数の変化," *日本音響学会誌*, 24(6), 355-364, 1968.