

# 声道伝達特性における喉頭腔の影響\*

北村達也 竹本浩典 本多清志 (ATR 人間情報科学研究所)

## 1. はじめに

声道伝達特性における喉頭腔の音響的效果に関しては、Fant<sup>[1]</sup> 以来様々な検討が行われてきた。最近では、今川ら<sup>[2]</sup> が喉頭管と喉頭室の断面積変化は第2, 第3, 第4ホルムント周波数および4 kHz以上のスペクトル形状に影響を与えると報告した。竹本ら<sup>[3]</sup> は、喉頭腔はヘルムホルツ共鳴器として働き、その形状変化は音声スペクトルの第4ホルムントのみに大きな影響を与えることを示した。また、本多ら<sup>[4]</sup> は喉頭腔と梨状窩から成る下咽頭腔の音響特性は主声道の音響特性とほぼ独立に働くとする新しい音声生成モデルを提案した。本研究では、これらの先行研究を検証するために、有限要素法 (FEM) を用いて喉頭腔の有無による音響的影響を調査する。

## 2. MRI 撮像

日本人成人男性1名を対象にして撮像を行った。タスクは日本語5母音の持続発声である。本研究では、骨伝導と体伝導を用いてMRI同期撮像法<sup>[5]</sup>のガイド音を呈示することによって、普段の調音に近い状態を高S/Nで撮像した<sup>[6]</sup>。

撮像は、ATR脳活動イメージングセンタに設置された島津 Marconi 社製 MAGNEX ECLIPSE 1.5T Power Drive 250 にてアトラスアレイコイル (頭頸部・胸部用コイル) を用いて行った。シーケンスは Fast Spin Echo 法, TE = 9 ms, TR = 4900 ms, FA = 90 度。撮像領域は 256 × 256 mm, 分解能は 512 × 512 pixels である。スライスは矢状方向で、厚み 2 mm, 間隔 2 mm, 41 スライスで撮像した。加算回数は 1 回で、撮像時間は約 8 分である。

被験者はガイド音の基本周波数 (120 Hz) に声の高さを合わせ、かつガイド音にタイミングに合わせて繰り返し発声を行った。

## 3. FEM による声道の伝達特性の推定

### 3.1 有限要素モデルの作成

MR 画像から声道領域および放射領域を抽出し、この領域に対して 6 面体 (立方体および直方体) の有限要素で要素分割を行った。

まず、MR 画像を 0.5 × 0.5 × 0.5 mm/voxel のボリュームデータに変換した。このボリュームデータに、事前に作成していた歯列のボリュームデータを Takemoto ら<sup>[7]</sup> による方法で補填した。次に、閾値処理に目視による修正を加えて声道領域および放射領域を抽出した。歯列間隙は除去し、放射領域における前鼻孔はふさいだ。また、この被験者は母音/a/発声時に主声道と鼻咽腔が連結するが、この鼻咽腔開口部もふさいだ。

このデータを 2 × 2 × 2 mm/voxel のボリュームデータに変換した。このサイズはシミュレーションに用いたソフトウェア (LMS 社 SYSNOISE) が扱える要素数の上限から決定した。

このボリュームデータに対して、Altair 社の Hy-

perWorks を用いて 6 面体要素で分割した。有限要素モデルの要素数を抑えるために、声道および顔近傍の領域は 2 × 2 × 2 mm の要素で分割し、放射領域は 2 × 2 × 4 mm の要素で分割した。放射領域は、鼻の先端から顎までの上下約 100 mm, 両口角を含む左右約 70 mm, 前後方向 48 mm から成る。以降では、これらの有限要素モデルをオリジナルモデルと呼ぶ。例として、母音/a/発声時のオリジナルモデルを図1に示す。

加えて、喉頭腔の音響的影響を明らかにするために、声道から喉頭腔を 2 mm だけ残して除去した有限要素モデルも作成した。以降では、これらの有限要素モデルを喉頭腔除去モデルと呼ぶ。

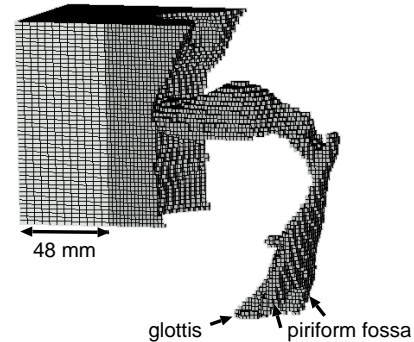


図1. 母音/a/発声時の声道形状のオリジナルモデル。

### 3.2 伝達特性の推定法

音圧  $p$  に関する波動方程式は次式で与えられる。

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

ここで、 $k$  は波数 ( $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $\omega$ : 周波数,  $c$ : 音速) である。有限要素モデルの声門部を入力端とし、正弦波振幅 1.0 m/sec の体積速度で励振させた。放射領域の境界面には空気の固有インピーダンス  $\rho c$  を与えた。入力端と放射領域の境界面以外の境界面は剛壁とした。気温を 35 °C とし、音速  $c$  および空気密度  $\rho$  はそれぞれ  $c = 352.33$  m/sec,  $\rho = 1.1255$  Kg/m<sup>3</sup> を用いた。以上の条件で上記の波動方程式をカラーキン法で解いた。FEM の解析プログラムとして LMS 社の SYSNOISE ver. 5.6B を用いた。

伝達特性  $H(\omega)$  は次の式で求めた。

$$H(\omega) = \frac{P_{out}(\omega)}{U_{in}(\omega)} \quad (2)$$

ここで  $\omega$  は周波数,  $P_{out}(\omega)$  は正中矢状断面における口唇先端から水平方向 38 mm の点の音圧,  $U_{in}(\omega)$  は入力端の速度である。伝達関数は 100 Hz から 4 kHz までを 50 Hz きざみで計算した。

\* Effects of the laryngeal cavity on vocal tract transfer functions.

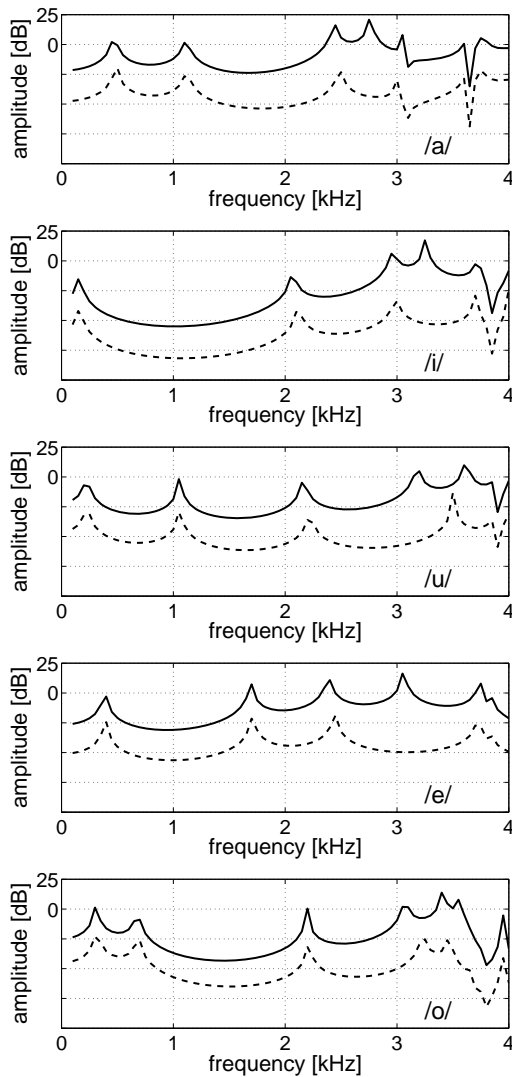


図 2. オリジナルモデルの伝達特性 (実線) および喉頭腔除去モデルの伝達特性 (破線). 上から母音/a/, /i/, /u/, /e/, /o/の伝達特性.

## 4. 結果および考察

### 4.1 伝達特性

5 母音のオリジナルモデルと喉頭腔除去モデルの伝達特性を図 2 に示す. これらの伝達特性に見られる谷は, 梨状窩と喉頭蓋谷が声道に対する分岐管として働くことによっても生じるものである.

母音/a/, /i/, /e/では喉頭腔を除去することによって, オリジナルモデルの伝達特性に現れていた第 4 ピークが消えるとともに, 第 4 ピークが現れていた周波数帯域のパワーが減少した. しかし, 第 4 ピーク以外のピークや谷の周波数変化は小さかった. これは竹本ら<sup>[3]</sup>の結果と一致する.

母音/u/と/o/では, 喉頭腔を除去することによって, 3 kHz から 3.5 kHz 付近の帯域に現れるピークの数 1 つ減少した. 一方, 3 kHz 以下のピークおよび梨状窩による谷の周波数には変化が小さかった.

喉頭腔の長さが約 20 mm であることを考えれば, 以上の結果は, 単に声道長が短くなったことでは説明できない. 本多ら<sup>[4]</sup>が提案したように喉頭腔による共鳴は主声道による共鳴に対して独立性が高いと考えるのが妥当であろう.

### 4.2 音圧分布

母音/a/のオリジナルモデルの伝達特性における第 1 から第 4 ピーク周波数での音圧分布を図 3 に示す. これらは正中矢状断面の音圧分布である. 第 1, 2, 3 ピークの音圧分布は声道を片開き管とみなしたときの 1/4, 3/4, 5/4 共鳴に対応している. しかし, 第 4 ピークに関しては, 7/4 共鳴の音圧分布が明確に観察されず, むしろ音圧の高い部分が喉頭腔に集中している. これは, 上述した第 4 ピークの音響的独立性と関連するものと推察される.

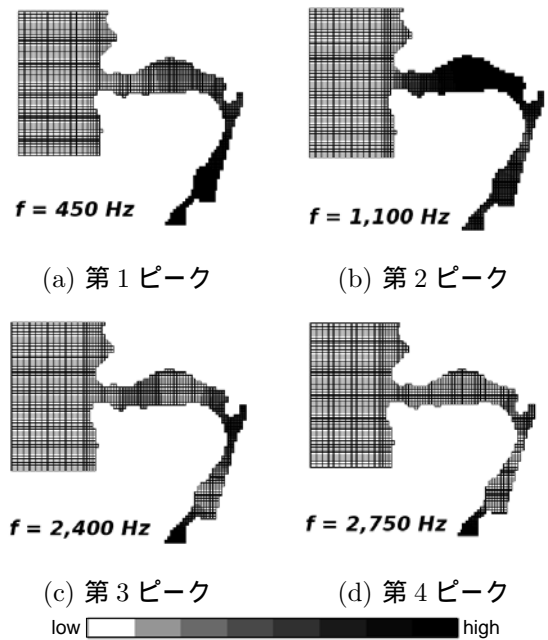


図 3. ピーク周波数における正中矢状断面の音圧分布 (母音/a/) (a) 第 1 ピーク (b) 第 2 ピーク (c) 第 3 ピーク (d) 第 4 ピーク.

## 5. おわりに

本研究では, FEM を用いて喉頭腔の有無による音響的影響を調査した. その結果, 本研究で用いた有限要素モデルに関しては, 喉頭腔は 2.5 kHz から 3.5 kHz 付近の帯域にピークを 1 つ生じさせるが, それ以外の帯域のピークや谷に対する影響は小さいことを示した. また, 母音/a/の第 4 ピーク生成時には音圧の高い部分が喉頭腔にのみ集中することを示した. 今後は喉頭腔共鳴の理論的解明を行う.

謝辞 本研究は情報通信研究機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」により実施したものである.

### 参考文献

- [1] Fant, "Acoustic theory of speech production," Mouton, 1970.
- [2] 今川ら, "喉頭管および下咽頭形状の音声への影響," 音講論 (秋), 277-278, 2003.
- [3] 竹本ら, "3次元 MRI 動画データに基づく声道下部構造のモデル化," 音講論 (秋), 281-282, 2003.
- [4] 本多ら, "下咽頭腔の共鳴特性," 音講論 (秋), 235-236, 2004.
- [5] Masaki et al., "MRI-based speech production study using a synchronized sampling method," JASJ(E), 20(5) 375-379, 1999.
- [6] 北村ら, "ボクセルメッシュを用いた有限要素法による声道の音響解析," 信学技報 SP2004-78, 2004.
- [7] Takemoto et al., "A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions," AST, 25(6), 468-474, 2004.