

声道の非対称形状が音響特性に与える影響について

松崎博季*・元木邦俊*

Acoustic effect of asymmetrical shape of vocal tract

Hiroki MATSUZAKI* and Kunitoshi MOTOKI*

1. はじめに

音声は3次元空間の中で生成される。したがって、音声のなかには3次元形状によってのみ特徴づけられる音響的特徴量が存在するはずである。筆者らはそのような音響的特徴量を見出すために、任意形状内の状態を解析するのに適した近似解析手法である有限要素法により声道内の音響特性を3次元的に数値解析している。最初の段階として、実声道形状の声道断面と断面積や周長と等価な楕円断面の音響管の縦続接続によって作成された簡単な形状の声道近似モデルを使用した[1,2]。この近似モデルの放射端には、1次元モデルでは表現し得ない、口唇部からの3次元の放射を模擬するための放射空間[3]が取り付けられた。この近似モデルは、声道の非対称形状を表現することはできないが、作成が容易で、少量のデータで構成可能なので、従って、計算に必要なメモリと時間、さらには解析結果のデータ量が少なくて済むという利点がある。また、1次元の縦続接続モデルとの比較も行える。上記の近似モデルは、形状的には1次元モデルと等価であるが、管軸方向以外にも音波が伝搬するため、モデル内では5 kHz以下でも必ずしも平面波的な音圧分布とはならない。また、声道伝達特性に零点が生じる場合があることが示された。しかしながら、先に述べたように、この近似モデルは軸に沿って対称な形状をしており、声道の非対称な形状の影響までを見出すまでには至っていない。

本報告では、声道の非対称形状の影響を調べるために、成人男性が日本語母音/a/を発声したときの磁気共鳴画像(MRI)を使用して得られた36個の声道断面の数値データ[4]をもとにし

* 北海学園大学工学部電子情報工学科

* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering Hokkai-Gakuen University

E-mail: matsu@eli.hokkai-s-u.ac.jp

て作成された、声道の非対称形状を反映した声道近似モデル内の音響解析を行った結果を報告する。この近似モデルの声道断面は MRI より得られた声道断面を、同じ大きさの正形状で分割することにより近似される。その際、極力、声道断面形状と断面積を保つようにする。この近似モデルは管軸方向に対しても等分割されているので、全て同じ形状の立方体で構成されており、モデル作成が容易であるという利点を持つ。また、実声道形状にしたがって、このモデルに管軸方向に対して曲りを加えたモデルも作成した。なお、曲りを加えられたモデルにおいては、すべての有限要素は同じ形状にはならない。

シミュレーション結果から計算された声道伝達特性より、第1ホルマントから第3ホルマント周波数は従来の楕円近似モデルのものよりも低周波数側に移動することが示される。特に曲りのあるモデルの場合、第3ホルマント周波数がさらに低周波数側に移動していることが示される。

2. 解析手法について

定常状態における速度ポテンシャル ϕ の波動方程式に適用された3次元の有限要素法(FEM)[5]を用いて、数値シミュレーションを行う。得られた速度ポテンシャルより、次式に対して、再びFEMを適用して粒子速度 v を計算する。

$$v = -\nabla\phi \quad (1)$$

3. 声道近似形状モデルの概要

成人男性が日本語母音/a/を発声したときのMRIを使用して得られた声門側から口唇部側までの、36個の声道断面の数値データ[4]をもとに、声道近似モデルを作成した。声道長は14.9 cmである。

図1に示すように、2 mm四方の正形状で声道断面を分割した。実線がMRIより得られた声道断面形状を、破線が近似断面形状の分割の状態を示している。このような要素分割を行うのはモデル作成が容易であるからである。要素分割する際には、視察により元の声道断面形状および断面積(original data)と極力等しくなるように努めた。

近似断面形状とMRIより得られた声道断面の断面積関数および周長関数をそれぞれ、図2、図3に示す。両図の実線がoriginal dataの、破線が近似断面形状のデータを意味する。断面積が等しくなるように要素分割されているので、当然ながら、断面積関数はほぼ一致している。周長関数においては、近似断面形状の周長が長くなる傾向がみられる。この原因として、分割

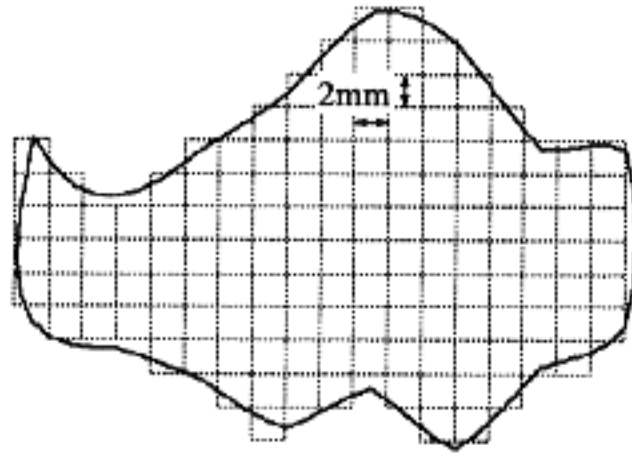


図1 要素分割例

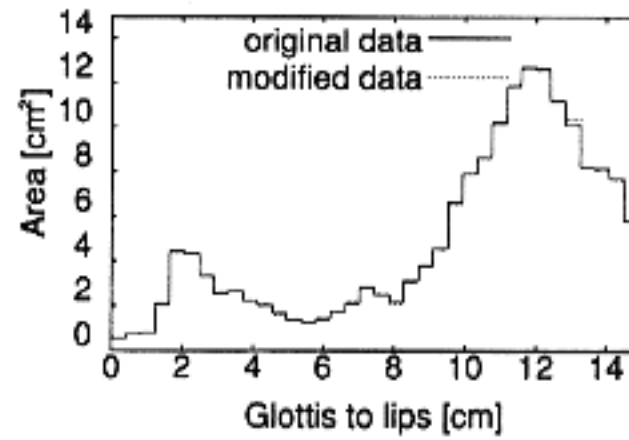


図2 断面積関数

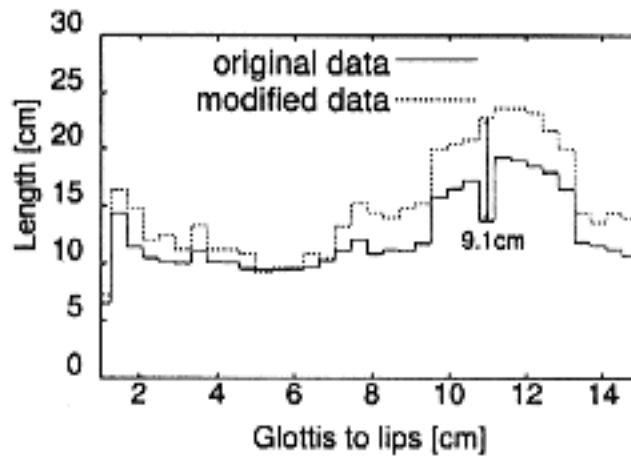


図3 周長関数

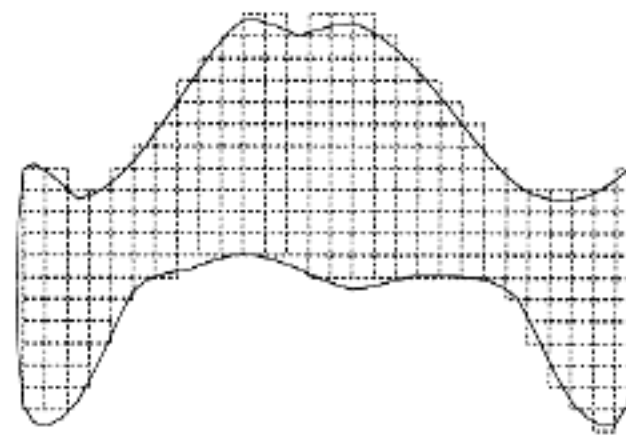


図4 周長差最大部の断面形状

の際に周長の事はまったく考慮していないこと、実形状の水平方向や垂直方向に対して斜めの境界部分が、近似断面形状では階段状になってしまう事、また、幅が2 mm未満の小さな突起部を2 mm四方の正方形で近似しなければならない事が挙げられる。最大で9.1 cmの差が生じている部分の断面形状を図4に示す。実線がMRIより得られた声道断面形状を、破線が近似断面形状の分割の状態を示している。この断面形状が水平方向あるいは垂直方向に対して、45度に近い斜めの境界部分を他の断面形状よりも多く有する事と、それに対して何の考慮もせず分割している事が、他の部分より近似断面形状の周長を長くさせた原因として考えられる。

これら近似断面を縦続接続することによって得られた声道近似モデル (straight model) を図5(a)に、また、この声道近似モデルに、MRIより得られた声道形状のデータを元にして曲がりを加えた声道近似モデル (bent model) を図5(b)に示す。壁面には剛壁を仮定する。放射面(口唇部側)には、3次元の放射を模擬するための半球状の放射空間[3]が取り付けられている。放射空間の付いていない、もう一方の端が駆動面(声帯側)で、粒子速度 $e^{j\omega t}$ (ω は角周波数)で駆動されているとする。

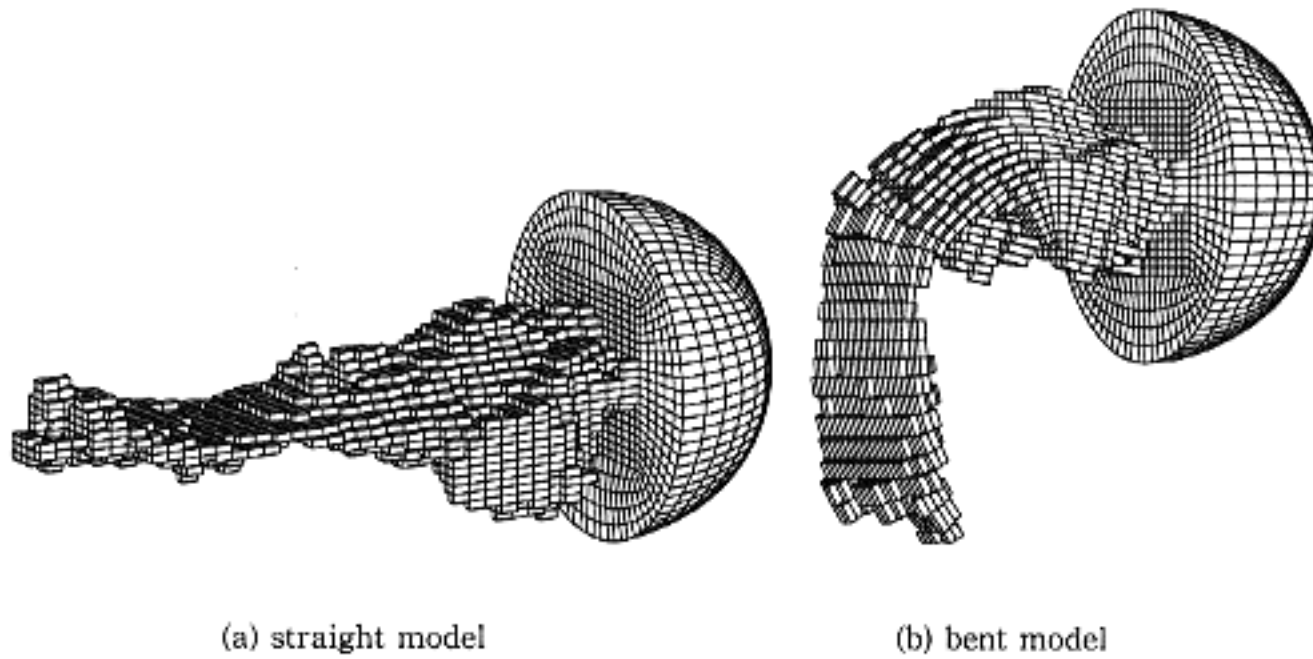


図5 有限要素モデル

4. 近似モデルのシミュレーション結果

4.1 1次元等価回路モデルから計算した声道伝達特性

FEMによる計算結果を示す前に、前節で示した断面積関数(図2)および周長関数(図3)を使用して、1次元等価回路モデル[6]から計算した声道伝達特性を図6に示す。実線がoriginal dataの、破線が近似モデルの声道伝達特性である。6 kHz以上でわずかな差異が見られるが、両者はほぼ一致している。これは、両者の断面積がほとんど等しく、また、壁を剛壁と仮定しているため、周長の差による影響がほとんど現れていないためであると思われる。

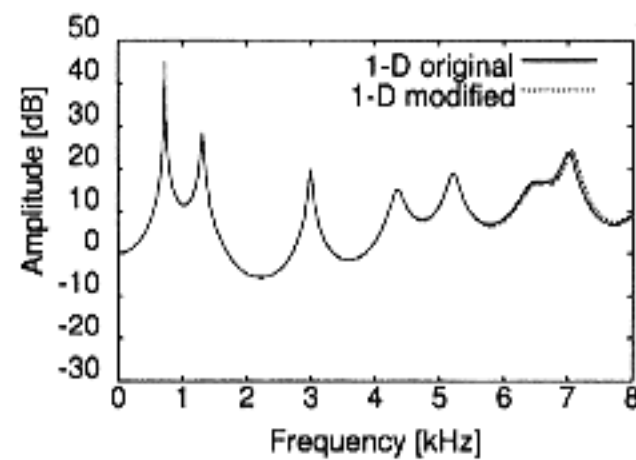


図6 1次元等価回路モデルから計算した声道伝達特性

4.2 FEMのシミュレーション結果から計算した声道伝達特性

FEMのシミュレーション結果から、次式より声道伝達特性 $H_v(\omega)$ が計算される。

$$H_v(\omega) = 20 \log_{10} \left| \frac{\sum_{n_r} A_r v_r(\omega)}{\sum_{n_d} A_d v_d(\omega)} \right| \quad (2)$$

ここで、 $v_d(\omega)$ および $v_r(\omega)$ は、それぞれ駆動面および放射面に垂直な粒子速度成分、 A_d およ

び A_r はそれぞれ駆動面および放射面の断面積である。なお、放射面とは口唇端の要素の端面を意味する。

図7に、本手法により得られた声道伝達特性を示す。破線が straight model, 一点鎖線が bent model に対する結果である。実線は、図6で示した、1-D original の声道伝達特性である。また、比較のため、図8に示す従来の楕円近似モデルから計算された声道伝達特性[2] を図9に示す。図9で、□は straight model, ×は bent model に対する声道伝達特性である。従来の楕円近似モデルの場合(図9参照)は、1-D original と比較して、第1, 第2ホルマントは、ほぼ一致し、第3ホルマントが低域に移動する程度であったが、本報告で提案しているモデルの場合(図7参照), 第1, 第2ホルマント周波数の低化が認められ、第3ホルマントにおいては、楕円近似モデルの場合よりもさらに低域側に移動している。さらに楕円近似モデルの場合, straight model と bent model で大きな差は見られないが、本報告のモデルにおいては、bent model に対する第3ホルマントが straight model に対するものよりも、より低域側になっており、そ

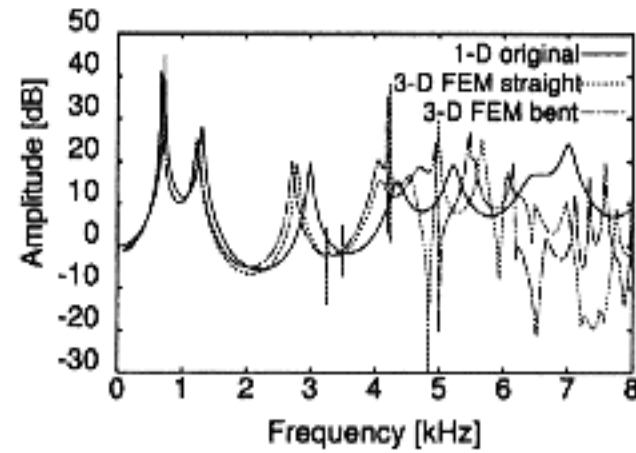


図7 声道伝達特性

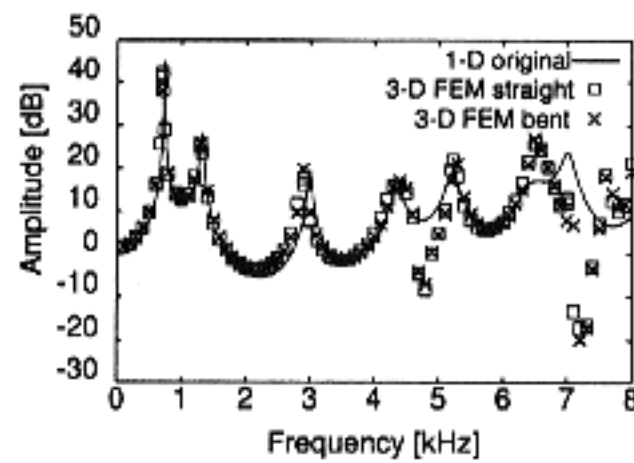
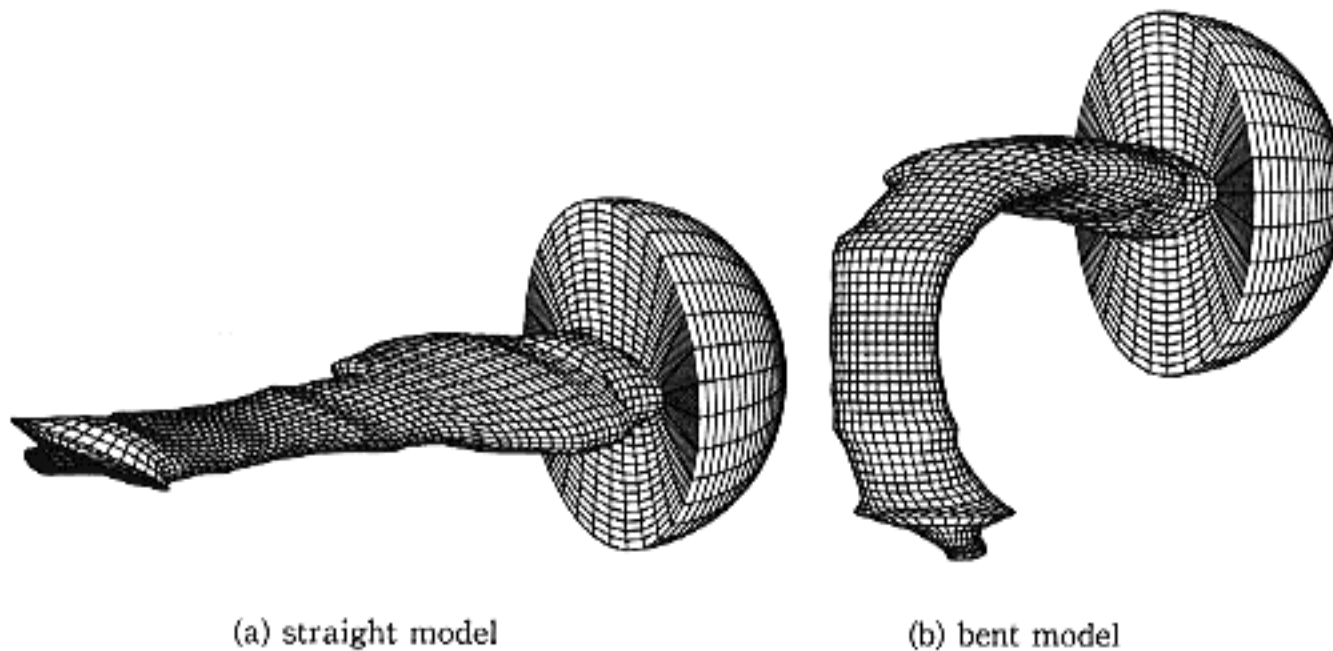


図9 楕円断面モデルの声道伝達特性



(a) straight model

(b) bent model

図8 楕円近似による有限要素モデル

れ以降の高周波数域では bent model と straight model で大きく異なった特性を示している。上記の事実は、非対称形状がより複雑な音波の伝搬経路を声道内に生じさせる事を意味する。母音の音響的特徴を決定づける第1、第2ホルマントにも、影響を与えていることから、非対称形状の音響特性に与える影響の重要性が伺える。

5. ま と め

声道の実形状を反映するような近似モデルを作成して、3次元の有限要素法により音響数値解析を行った結果を報告した。本報告の近似モデルの声道伝達特性において、ホルマント周波数が、従来の楕円近似の声道モデルのものよりもさらに低域側に移動し、また、曲がりの有無により、伝達特性上に大きな違いが生じることが示された。上記の事実より、声道形状の非対称性が音響特性に対して無視できない影響を与え得ると言える。声道伝達特性に急峻なピークが現れているが、これは、非対称形状の効果なのか、あるいは本近似モデルの鋭角的で不連続な形状の影響なのか、現在のところ不明である。

今後、上記の問題を解決すると同時に、3次元声道形状をどの程度まで、あるいはどのように簡略化することが適切であるのかという知見を得る必要がある。そのために、声道形状を滑らかに分割したモデルによる有限要素解析を行い、これまでの簡略化したモデルの解析結果との比較を行なう予定である。

謝 辞

本研究の一部は、平成10年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号09750522)、及び北海学園大学ハイテク・リサーチ・センター・プロジェクト“言語情報処理研究”により行われたものである。

参 考 文 献

- [1] H. Matsuzaki, N. Miki and Y. Ogawa, "3-D FEM analysis of vocal tract models using elliptic tubes with volume radiation," The XIIIth International Congress of Phonetic Science, Stockholm, Sweden, vol. 4, 82.12, pp. 440-443 (1995).
- [2] 松崎博季, 三木信弘, 小川吉彦, "だ円音響管モデルを用いた日本語母音の3次元有限要素解析," 電子情報通信学会論文誌(A), vol. J 81-A, no. 6, pp. 899-906 (1998).
- [3] H. Matsuzaki, N. Miki and Y. Ogawa, "FEM analysis of sound wave propagation in the vocal tract with 3-D radiation model," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 17, 3, pp. 163-166 (1996).
- [4] 神山直久, 三木信弘, 永井信夫, "粘弾性体モデルを用いた声道壁インピーダンスについての考察," 電子情報通信学会論文誌(A), vol. J 75-A, no. 11, pp. 1649-1656 (1992).

- [5] 松崎博季, 広奥暢, 三木信弘, 永井信夫, “壁インピーダンス分布を考慮した声道内音響特性の3次元FEMモデルによる解析,” 電子情報通信学会論文誌(A), J 77-A, No. 3, pp. 325-333 (1994).
- [6] J.L. Flanagan, “Speech analysis synthesis and perception,” 2nd Ed. pp. 25-35, Spriger-Verlag (1975).