

タイトル	3次元有限要素法による声道音響特性の検討：声道の曲がりおよび断面形状の簡略化の影響
著者	松崎，博季；元木，邦俊；三木，信弘
引用	北海学園大学工学部研究報告，31：101-121
発行日	2004-02-20

3次元有限要素法による声道音響特性の検討 —声道の曲がりおよび断面形状の簡略化の影響—

松崎博季*・元木邦俊*・三木信弘†

A Study of the Acoustic Characteristics of the Vocal Tracts by 3-D Finite Element Method: Influences of the Simplification of the Bend and Cross-sectional Shape of the Vocal Tract

Hiroki MATSUZAKI*, Kunitoshi MOTOKI* and Nobuhiro MIKI†

あらまし

日本語5母音の声道形状をできる限りそのまま適用した声道モデルと、声道横断面のだ円近似、および声道の曲がりの省略という簡略化を施した近似モデルの音響特性を3次元の有限要素法を用いて求めた。これらの結果の比較により声道形状の簡略化の影響、及び声道壁を剛壁と仮定した場合の影響について検討した。この結果、これらの簡略化したモデルが基準としたモデルの近似として有効と考えられるのは、第3ホルマント周波数程度までとなった。また、声道壁を剛壁とした場合、声道伝達特性に高次モードによる鋭いピークと零点が3 kHz前後から出現するが、声道壁を軟らかい壁とした場合、これらのピークと零点の発生が抑えられることが示された。

キーワード：3次元有限要素法，日本語母音，声道伝達特性，声道モデル

* 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, motoki}@eli.hokkai-s-u.ac.jp

† 公立はこだて未来大学

† Future University-Hakodate

† miki@fun.ac.jp

Abstract

Using the 3-D finite element method (FEM), the purpose of this study is to investigate the acoustic characteristics of vocal tract models, which are specific to the five Japanese vowels' vocal tract shapes, minimally distorted, and their approximation models, which simplify the vocal tract shapes with regard to the cross-section and the bend. Comparing these results, we examined the effects of simplifying the vocal tract shape and when the vocal tract wall is assumed to be rigid. The results indicate that with the frequency range up to around the third formant these simplified models are considered to be effective approximations of reference models. Moreover, although the sharp peaks and zeros by the higher order mode appear from around 3 kHz in the vocal tract transfer functions when vocal tract walls are rigid, it is shown that the use of soft walls suppresses the appearance of these peaks and zeros.

Key words : 3-D finite element method, Japanese vowels, vocal tract transfer function, vocal tract model

1. はじめに

近年、3次元の有限要素法(3-D FEM)を利用した声道の音響特性の解析例が、多数の研究者によって報告されている[1-7]。このように多くの研究発表が行われる背景には、3-D FEMが音声分野において非常に強力なツールとして認められたことや、FEMによる数値解析のための優れた多くのソフトウェアが提供されていることに加え、とりわけ、計算機の性能が飛躍的に向上し、安価に計算できるようになったことが要因として挙げられる。しかし、3-D FEMによるシミュレーションには多くの処理時間を必要とし、得られた結果から実時間に近い時間で音声データを作成するまでには至っていない。また、3-D FEMによるシミュレーションのための前処理の一つである声道形状の有限要素メッシュ化にも、形状が複雑であればあるほど多くの時間を必要とするのが現状である。

計算時間やモデル作成の時間を短縮するための一つの手段として、声道形状の簡略化による近似を挙げることができる。複雑な声道形状を扱いやすい簡略な形状で置き換えることにより、有限要素メッシュの作成時間を短縮することができ、それに伴い有限要素メッシュ数が減少し、計算に必要な記憶領域の削減と計算時間の短縮が可能になると思われる。しかしながら、声道形状の簡略化が行われることによって、本来存在すべき声道の音響特性が失われては意味がないので、簡略化が有効な範囲を調べる必要がある。

本報告では、磁気共鳴映像法(MRI)によって得られた声道形状データを基に作成した基準となる3次元声道モデルと、そのモデルに簡略化を施した声道モデルの音響特性を3-D FEMを用いて計算する。声道モデル作成には、MRIより得られた成人男性1話者の日本語5母音発声時の形状データを用いる。声道の曲がりの省略(直線化)、および声道横断面のだ円近似を声道形状の簡略化として選択する。まず、基準となるモデルに対して、簡略化されたモデルの作成に要した時間、ならびに3-D FEMを用いて計算する際に要した記憶領域と計算時間がどの程度減少したかについて報告する。次に、これらのモデルから計算される声道伝達特性を比較することで、声道形状の簡略化の影響を検討する。また声道壁に壁インピーダンスを与えた場合についても検討を行う。

この結果、曲がりの省略に関しては、声道横断面のだ円近似によるモデル化の場合、8 kHz程度までは曲がりを省略しても伝達特性はほとんど一致するが、断面形状の簡略化を行わないモデルの場合、全ての母音モデルにおいて、5 kHz以上の高域では、曲がりを省略することには問題があることが示された。声道横断面のだ円近似による簡略化に関しては、だ円近似が妥当であると言えるのは、/u/のモデルを除いては、第3ホルマント周波数程度までとなった。簡略化を行わないモデルの場合、その声道伝達特性に鋭いピークと零点の対が5 kHz以下にも現れる。声道壁インピーダンスを境界条件として考慮すると、このようなピークと零点の発生が抑えられることが示された。

2. 声道形状モデルと有限要素メッシュ

2.1 有限要素メッシュ作成手順

声道の3次元形状データとして、成人男性1話者が日本語5母音を発声した時に撮像されたMRIより神山らが作成したもの [8,9] を用いた。なお、MRIでの撮像時に音声データの記録は行われていない。MRIからの形状データ抽出は以下のように行われている [8,9]。

1. 5 mm 間隔で撮像された頭部矢状断面、10 mm 間隔で撮像された前頭面および横断面から視察により、声道の輪郭をトレースしこれをディジタイザによって計算機に取り込んだ。歯列輪郭部分に関しては、必要に応じて、正中、軸断面画像および人体解剖図を参照することで補間した。母音/i/については、同被験者の口腔内の石膏レプリカを使用し、臼歯の大きさや口腔幅などの値を利用した。
2. ディジタイズされた複数の矢状断面データにそれぞれ奥行き成分の情報を与え3次元空間での座標を得た。
3. 声道の中心線(midline)を正中矢状断面の1画像から得られた声道輪郭線を元に、声門下部と口唇部の間を滑かに結ぶようにして視察により求めた。

4. この中心線上に約 5 mm 間隔の点を取り、中心線と垂直な平面と、矢状断面との交点を求め、それらを 4 点スプライン補間を施してできる形状を声道横断面形状とした。
5. 口唇端の位置を、声道横断面の輪郭線が閉曲線となる部分までとした。
6. 声門下部の位置を矢状断面画像および解剖図を参考にして、視察により決定した。

声道の中心線を求める方法として、正中矢状面から抽出した声道輪郭線に対して、調音モデル上に Grid line を描き、声道輪郭線と Grid line との交点から中心線を求める方法 [10-13]、声道輪郭線のみから中心線を求める方法 [14,15] などが示されている。ここでは輪郭線から中心線を自動抽出することは行わずに、既に報告された輪郭線と視察により求められた中心線のデータをそのまま用いた。なお、喉頭蓋谷や梨状窩などの分岐や窪みは省略されている。

これらの声道断面形状をもとに、各母音毎に以下に示す 4 種類の有限要素形状モデルを作成した。形状モデルの有限要素として 6 面体 1 次要素を用いた。

1. MRI データをできる限りそのまま表現したモデル(Original model, OM と略記)
2. OM から曲がりを省略したモデル(Original model with straight configuration, OMS と略記)
3. OM の各横断面をだ円で近似したモデル(Elliptical model, EM と略記)
4. EM から曲がりを省略したモデル(Elliptical model with straight configuration, EMS と略記)

声道形状の簡略化は、声道の直線化である曲がりの省略(OMS と EMS)と声道横断面のだ円近似(EM と EMS)の 2 種類である。図 1 は直線化の一例を示したものである。声道の中心線を直線化することで、声道の直線化を行った。各声道横断面を直線化した中心線に対して垂直に、また、中心線上における各区間長を同一にして再配置した。図 2 は声道横断面のだ円近似の一例を示したものである。だ円近似を行う際に、OM(OMS)の横断面と等価な断面積、および OM(OMS)の水平あるいは垂直方向で最長となる断面の長さをだ円近似の長軸の長さとして用いた。このようにして作成された各だ円断面を、その中心点が OM(OMS)の各横断面と図 1 に示される中心線の交点に一致するように配置して、EM(EMS)を作成した。なお、この方法で EM を作成する時に横断面同士が交差する可能性があるが、本稿で使用したモデルにおいては、交差することはなかった。

OM および OMS の有限要素メッシュを以下のようにして作成した。

1. 壁直交性に優れたメッシュを作成できる流体解析用メッシュジェネレータ Gridgen (Pointwise 社製)を利用して、まず、声道横断面の有限要素メッシュを構造格子(4 角形要素)で作成した。

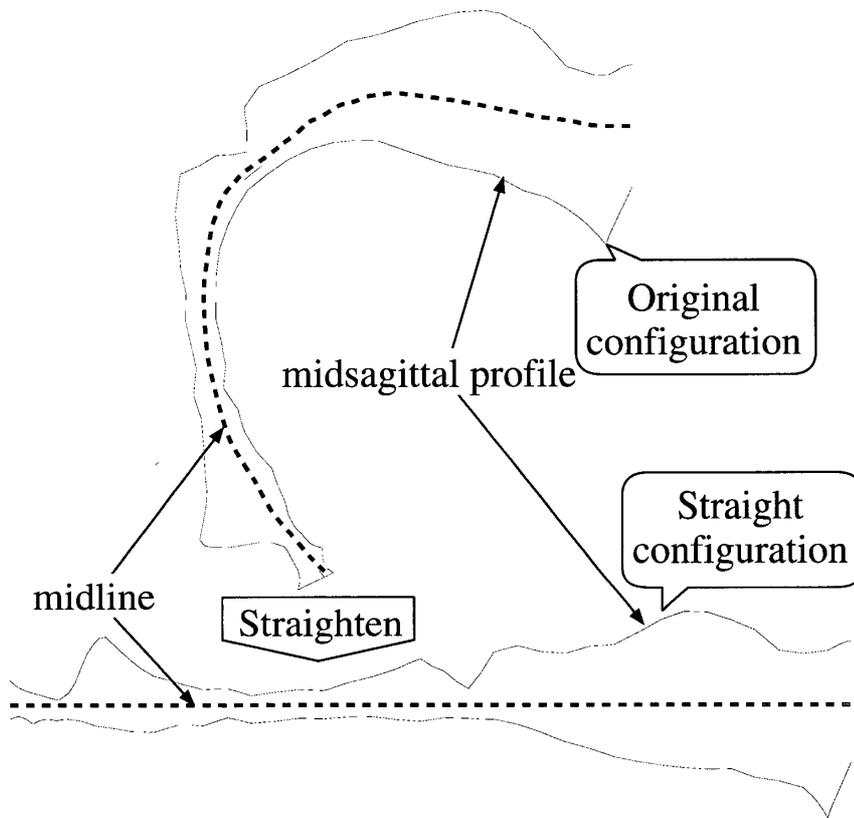


図1 直線化の一例

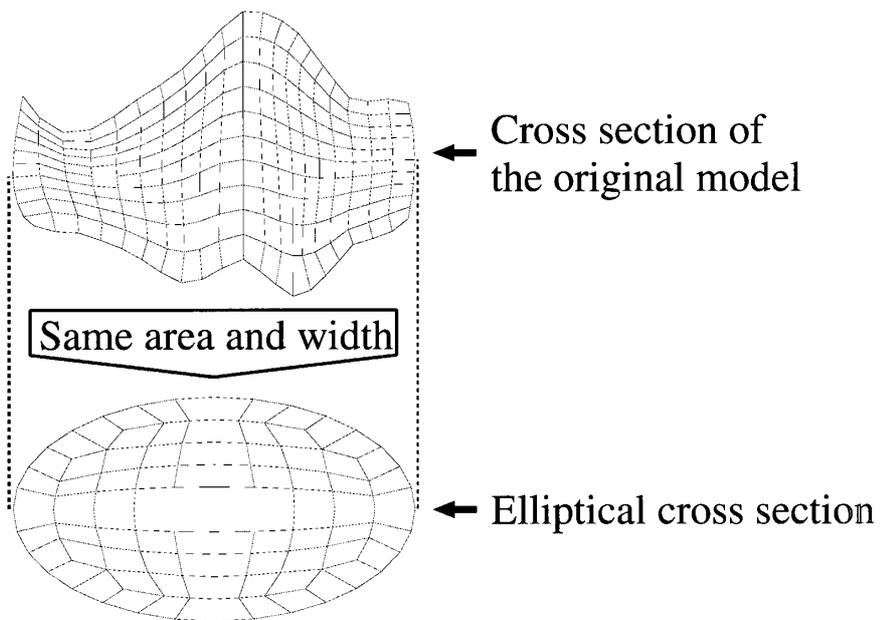


図2 声道横断面のだ円近似の一例

2. これらのデータを HyperMesh (Altair Engineering 社製) に取り込み、節点情報などの変更を行い、各断面間を補間することにより、OM および OMS を完成させた。

EM および EMS の有限要素メッシュを以下のようにして作成した。

1. 円を構造格子でメッシュ化したものを、既に述べたように OM および OMS の各断面の位置と一致するように配置して、これらを補間することにより、円筒状の声道形状の有限要素メッシュを作成した。
2. だ円の長軸長と短軸長をもとに各円断面をだ円断面に変形することで EM および EMS を完成させた。

図3に OM と OMS の各母音の有限要素メッシュを示す。同様に図4に、EM と EMS を示す。図3の/a/の有限要素メッシュに示されるように、有限要素メッシュの両端の断面が、それぞれ声帯部に相当する駆動面(driving surface)と口唇部に相当する放射端(radiation end)である。これは他の有限要素メッシュについても同様である。

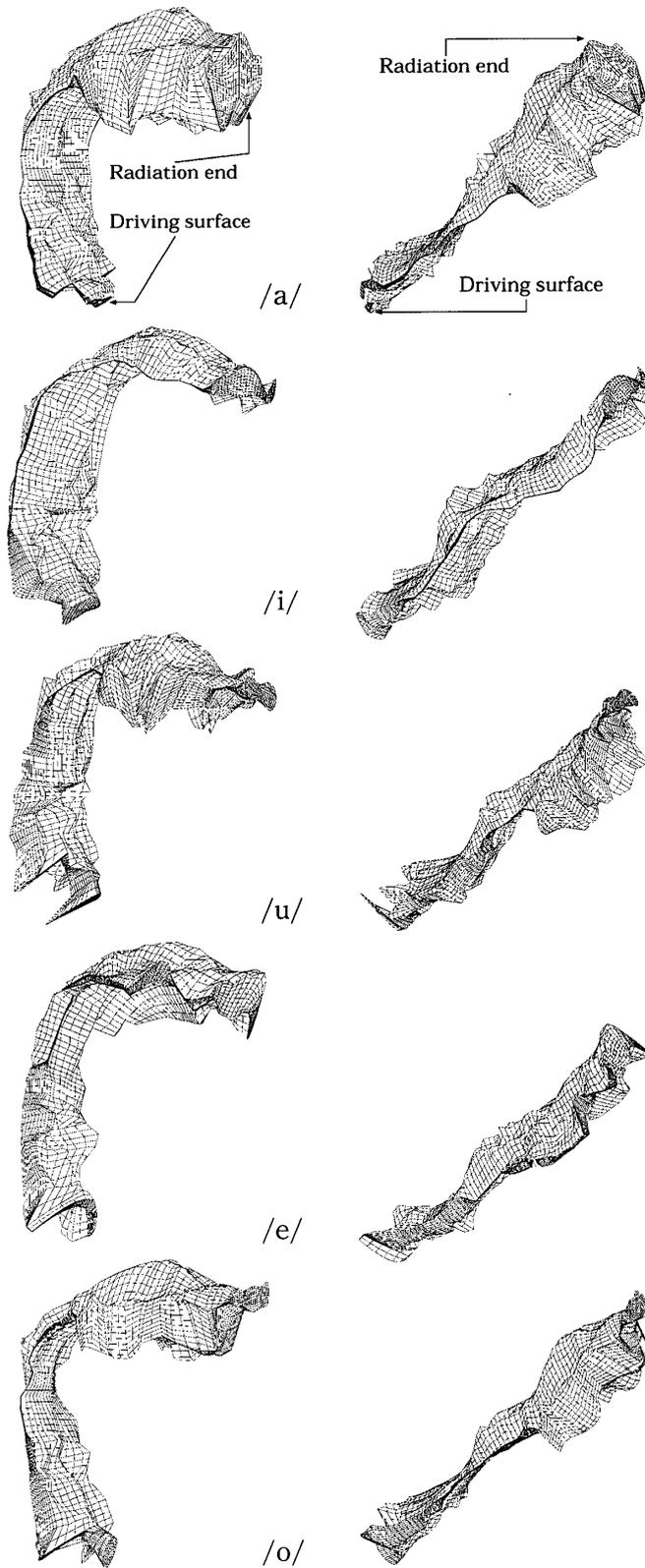


図3 OM と OMS の各母音の有限要素メッシュ (左列が OM, 右列が OMS で, 上から順に母音 /a/, /i/, /u/, /e/ および /o/ に対応する。)

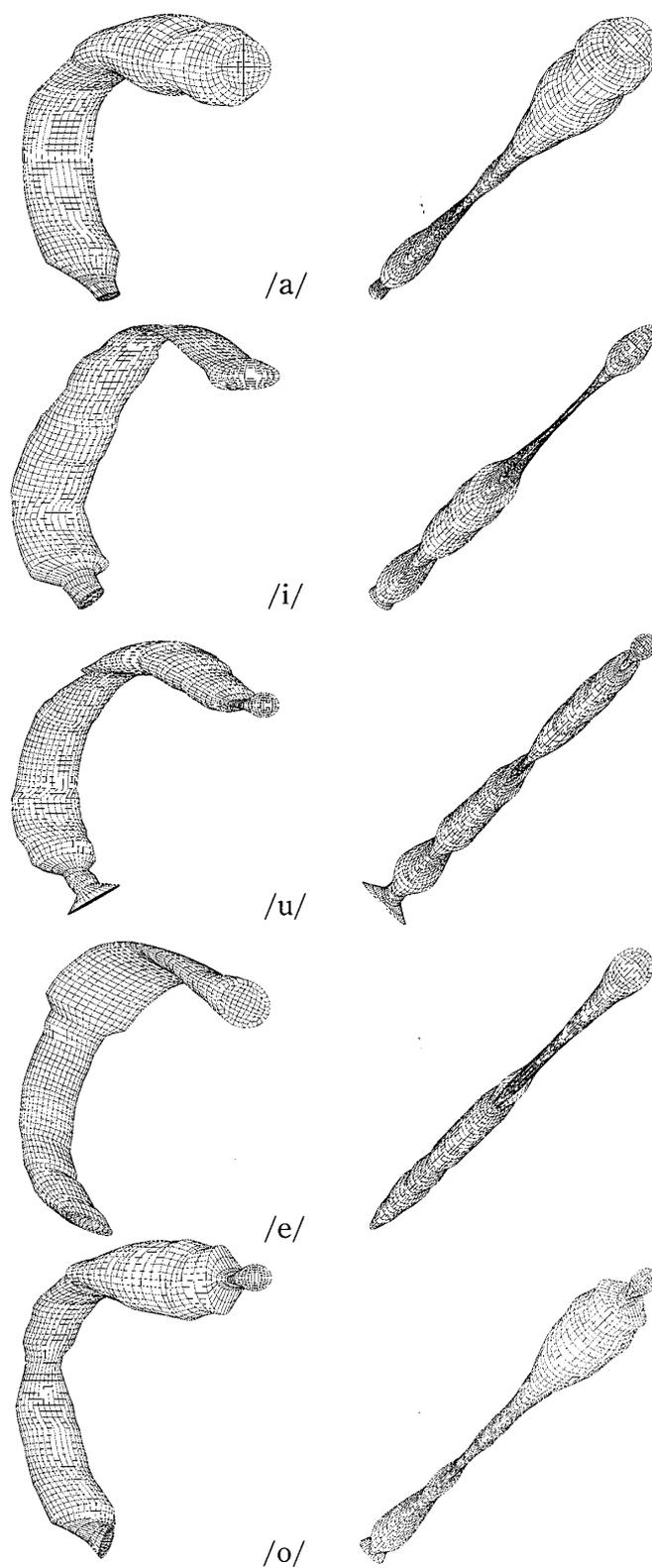


図4 EMとEMSの各母音の有限要素メッシュ（左列がEM，右列がEMSで，上から順に母音/a/，/i/，/u/，/e/および/o/に対応する。）

2.2 有限要素メッシュ構築時間, 節点数, 要素数, 記憶容量および計算時間の比較

表1に各モデルの有限要素メッシュの構築時間, 節点数, 要素数, 計算時に必要な記憶容量, および1周波数当りの計算時間(Intel PentiumIV 3.06 GHz Processor 使用時)を示す。ただし, 構築時間については, 声道横断面形状およびその断面積と周長が与えられたときに, 各モデル作成までの平均的な時間を示したものである。計算に使用したOSはMicrosoft WindowsXPである。このOSにCygwin[16]をインストールしCygwin上でソルバのソースファイルのコンパイルおよび計算を行った。OMの有限要素メッシュ構築時間に対して, OMSの構築時間が大幅に短くなっているが, これはOMの作成過程を元にして自動的に構築しているためである。OMが無ければ, OMSを構築する時間はOMとほぼ同じである。EMとEMSの構築時間がOMと比較して大幅に短いのは, EMSの場合, 最初に円柱状の有限要素メッシュを自動的に作成し, 各断面をだ円の長軸長および短軸長に合わせて変形するという作業を自動的にしているからである。EMの構築時間がEMSより1時間程度長いのは, 基準となる面に対する各声道横断面の傾きの角度の計算が必要なためである。OM(OMS)の計算時に必要な記憶容量に対してEM(EMS)の記憶容量は平均で64%程度となっている。これはEM(EMS)の節点数および要素数がOM(OMS)よりも少なくなっているためである。OM(OMS)の場合, 形状が複雑なため, その形状を表現するためにどうしてもメッシュを細かくする必要がある。一方, EM(EMS)の場合, 形状が単純なため, 節点間の距離にさえ注意すれば, OM(OMS)のような細かいメッシュが必要ないので, 節点数および要素数が少なくて済み, 計算時の記憶容量も少なくなる。EM(EMS)の計算時間は, OM(OMS)に対して平均で55%程度である。

曲りの省略に関しては, EMSの有限要素メッシュ構築時間がEMの半分程度になる点以外

表1 有限要素メッシュの構築時間, 節点数, 要素数, 計算時に必要な記憶容量および1周波数当りの計算時間

		OM	OMS	EM	EMS
構築時間 [hour]		120	1	2	1
節点数	Max.	22537		17165	
	Min.	18566		16075	
要素数	Max.	19560		15136	
	Min.	15900		14216	
記憶容量 [MB]	Max.	312		191	
	Min.	257		178	
	Avr.	287		184	
計算時間 [sec]	Max.	77		40	
	Min.	61		37	
	Avr.	69		38	

のメリットは無い。しかし、EM(EMS)を使用することに関しては、有限要素メッシュ構築時間、記憶容量、および計算時間のいずれにおいてもOM(OMS)より優位である。ただし、これらの優位性は簡略化されたモデルの音響特性が基準となるモデルのものと比較して、大きく異なる範囲でのみ有効であると考えられる。以降では各モデルの音響特性を比較することで、声道形状の簡略化の影響について検討を行う。

3. 境界条件のモデルと各形状モデルを評価する基準

解析方法として、定常状態(駆動面を正弦波駆動)における波動方程式を3-D FEMに適用したものを使用する。3次元の放射を模擬するために、各有限要素メッシュの放射端に半径4 cmの半球状の放射空間を付けた[17]。FEMにより8 kHzまでの各モデル内の音圧および粒子速度を計算し、その結果を元に音圧分布、及び声道伝達特性 $H_v(\omega)$ を求めた。OMの声道伝達特性を基準として、他の簡略化を施されたモデルの声道伝達特性との比較を行う。

$H_v(\omega)$ の計算には、次式を用いた。

$$H_v(\omega) = 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{A_r}{n_r} \sum_{j=1}^{n_r} v_{r,j}(\omega)}{\frac{A_d}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} v_{d,i}(\omega)} \right| \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 n_d および n_r は駆動面と放射端の節点数、 $v_{d,i}(\omega)$ および $v_{r,j}(\omega)$ は駆動面と放射端の断面上の粒子速度の垂直方向成分である。また、 A_d および A_r は駆動面と放射端の断面積である。

4. 計算結果

まず最初に、声道壁を剛壁と仮定してFEMによるシミュレーションを行った。図5に式(1)を用いて求めた各母音ごとの声道伝達特性を示す。実線、破線、点線、1点鎖線は、それぞれOM, OMS, EM, EMSの声道伝達特性を示す。なお、EMとEMSの伝達特性はほとんど一致している。図6は、OMを基準とした場合の各モデルの第1, 第2, 第3ホルマント周波数の移動量を以下の式を用いて百分率で表したものである。

$$\frac{f - f_{\text{orig}}}{f_{\text{orig}}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 f はOMS, EMあるいはEMSの、 f_{orig} はOMのホルマント周波数である。各点の横軸の値がOMのホルマント周波数を表している。マイナスはOMS, EMおよびEMSのモデルの

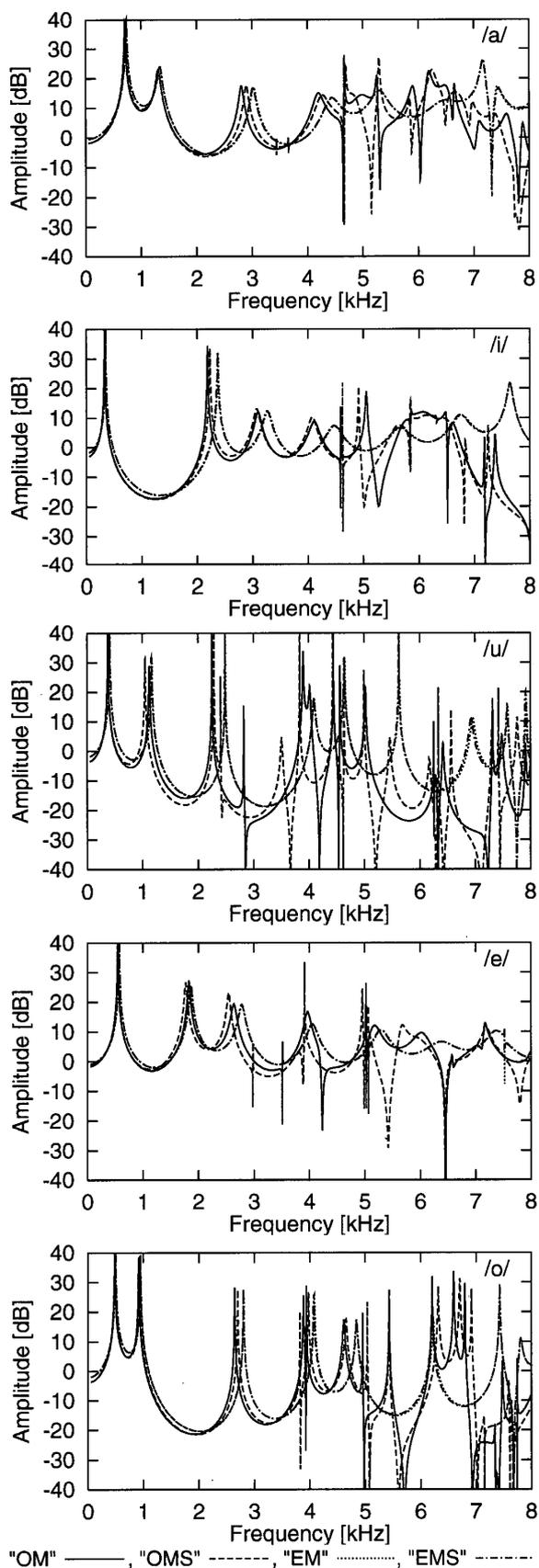


図5 声道壁を剛壁と仮定した場合の声道伝達特性(上から順に母音/a/, /i/, /u/, /e/ および/o/に対応する。図中の実線, 破線, 点線, 1点鎖線は, それぞれOM, OMS, EM, EMSの声道伝達特性である。)

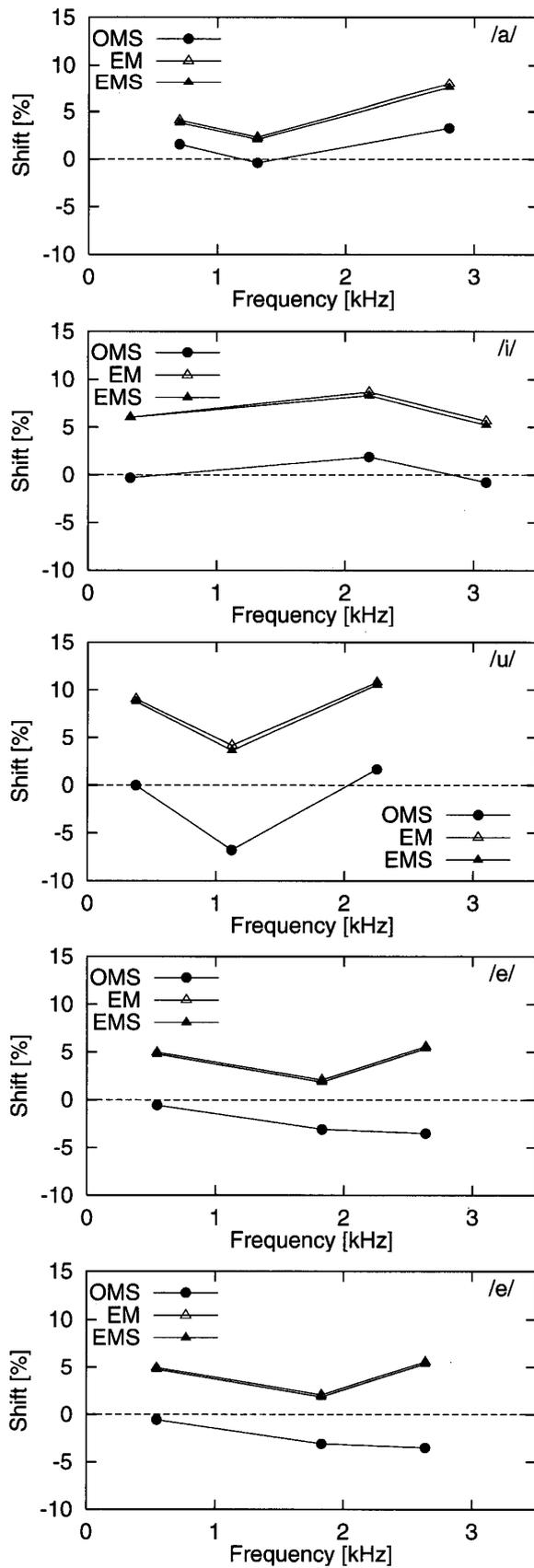


図6 第1, 第2, 第3ホルマント周波数の移動量の百分率(上から順に母音/a/, /i/, /u/, /e/および/o/に対応する。)

ホルマントがOMのものよりも低域側にあることを意味する。

4.1 曲がりの省略の影響

図5および図6より、曲がりの省略の影響について、だ円近似モデルの場合(EMとEMS)と断面形状の簡略化を行わないオリジナルモデル(OMとOMS)の場合にわけて考察する。

4.1.1 だ円近似モデルの場合

図5および図6より、各母音ともにEMSのホルマントの移動量がEMのものよりも少ない傾向にあるが、その差は僅かで、EMとEMSの声道伝達特性はほぼ一致していることがわかる。上下左右に対称性を有するだ円による断面近似でのモデル化では、声道形状が有する程度の曲がりを省略しても、音波の伝搬経路がほとんど変化しないと考えられる。母音によらずEMとEMSの声道伝達特性はほぼ一致しているので、だ円近似によるモデル化の場合、8 kHz程度までは曲がりの影響は無視できると言える。

4.1.2 断面形状の簡略化を行わない場合

図6より、/u/の第2ホルマントを除けば、OMとOMSの差は5%以内に収まっている。ところで、文献[18]によれば、多くの研究で第1、第2ホルマント周波数の移動による丁度可知差異(just noticeable difference, jnd)はほぼ1から5%程度であることが示されている。従って、/u/を除けば、少なくとも第2ホルマント周波数までは曲がりの影響は非常に少ないと思われる。一方、図5より、5 kHz以上の高域では、各母音ともに両者に良い一致が見られないことがわかる。また、だ円近似モデルの場合、EMSのホルマントがEMのものよりも必ず低域側にあったが、断面形状の簡略化を行わない場合、移動する方向が一定していない。これらは、非対称な断面形状で構築されるモデルの場合、断面形状および断面間の中心線上における区間長が同じでも、各断面の位置の僅かな違いで、音波の伝搬経路が変わりやすいということを示唆している。

OMとOMSでモデル作成にかかる時間がほとんど変わらないこと、ならびにOMでは3次元の輪郭線データが与えられた場合には中心線を必要としないことを考えると、OMSを利用する理由はほとんど無いと思われる。

4.2 声道横断面のだ円近似の影響

図5および図6より、OMとEMの結果を比較することで、声道横断面のだ円近似の影響について検討する。図6より、母音によらずEMのホルマント周波数はOMのものよりも高域側に存在していることが分かる。これは、EMの音響的な声道長がOMのものよりも短く見えることを意味する。第1ホルマントの移動量が5%以内に収まっているのは、/a/, /e/, /o/である。/i/の移動量は僅かに5%を上回る程度であるが、/u/の移動量は10%に近い値となっている。

る。第2ホルマントの移動量は、/i/を除けばいずれも5%以内に収まっている。第3ホルマントの移動量は、/u/以外の母音では5%を僅かに越える程度であるが、/u/は10%以上となっている。図5より、5 kHz程度より高域では、母音によらずEMの声道伝達特性はOMのものとは大きく異なっていることがわかる。特に、OMの声道伝達特性には鋭いピークが多数見られるが、EMの声道伝達特性においては、7 kHzから8 kHzの間に零点が見られる程度である。以上の結果から、だ円近似が妥当であると言えるのは、/u/を除いては、第3ホルマント周波数程度までと考えられる。

4.3 声道壁の境界条件

図5において、OMおよびOMSの声道伝達特性には、母音によらず、鋭いピークと零点が僅か数Hzの間隔で存在している部分が見られる。最も低域側に生じているこのピークの周波数は、OMの場合、/a/、/i/、/u/、/e/および/o/に対して、それぞれ、おおよそ3700、4600、2800、3500および3900 Hz、OMSの場合、それぞれ、おおよそ3400、4600、2400、3000および3900 Hzである。/i/を除けば、4 kHz以下にこのピークが生じている。これらの周波数近辺では、口腔の石膏レプリカ内部の音圧分布計測結果 [19] と同様に、声道内部の横方向の共振が生じている可能性がある。図7はOMの各母音毎の最も低域側に存在する鋭いピークと零点の対のうちの、ピークの周波数に対する3次元音圧分布図である。同図上部左端に示す/a/の有限要素メッシュのように声道を上(硬口蓋側)斜め後ろから見込んだもので、下端が声帯側(駆動面)で、上方右端が口唇側(放射端)である。薄い色の線は有限要素メッシュの輪郭線である。音圧レベルが示されているが、これらは相対的なものである。全ての母音の有限要素メッシュの口腔に相当する部分において、中心軸方向に伝搬する平面波は見られず、横方向などに振動する高次モードが生じているのがわかる。/i/に対するピークだけが4 kHz以上と最も高い周波数で最初に生じているが、これは口腔部が他の母音のものよりも狭まっていることが影響していると考えられる。

一方、これらの極めて接近したピークと零点は、声道の複雑で非対称な3次元形状によってもたらされたものではあるが、実音声の母音をARMA分析した結果からは鋭いピークなどは推定されていない [20]。ARMA分析は極と零点を同時に推定するので、鋭いピークを検出するのに向いた分析法であることを考慮すると、実音声がこのような特性を有しているとは考えられない。実際の声道壁は舌などの軟かい壁を有しているにもかかわらず、これまでのシミュレーションでは声道壁が剛壁であるという損失のない特異な条件を仮定したことが、このような鋭いピークと零点の対を生じさせている原因ではないかと考えられる。そこで、頬の内側に密着させた均一音響管内の音圧を測定することによって求められた声道壁の比音響インピーダンス Z_w [21]

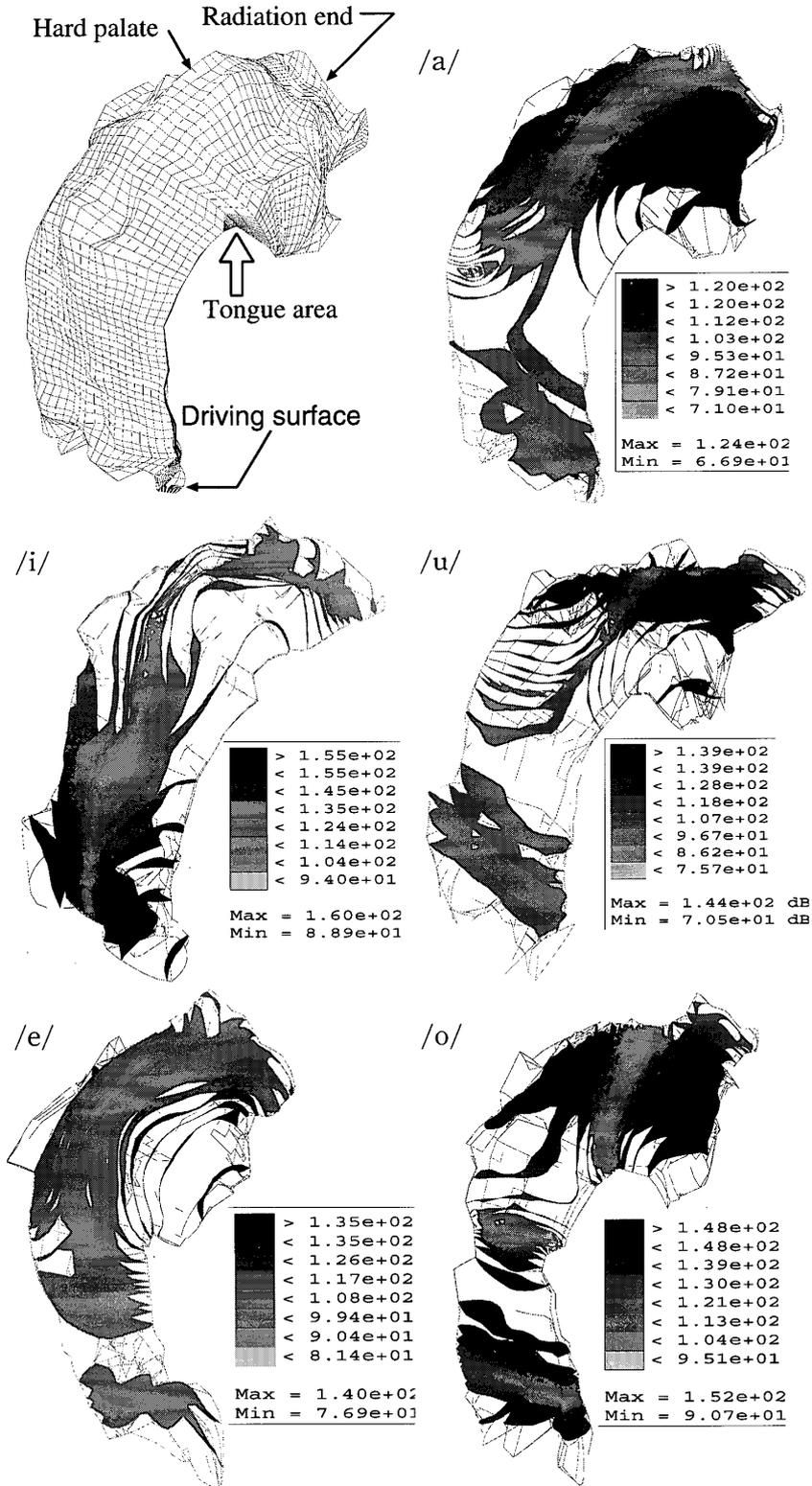


図7 声道壁を剛壁と仮定した場合のOMの音圧分布図（駆動周波数は/a/, /i/, /u/, /e/および/o/に対しそれぞれ、3654 Hz, 4591 Hz, 2825 Hz, 3516 Hz および 3938 Hzである。等高線はdBで表示されている。左上の図は視点の方向を示すための有限要素メッシュの一例である。）

$$Z_w = 1900 + j\omega 0.3 [g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}] (f \geq 325 Hz) \quad (3)$$

を声道壁全体に与え、壁が軟かい場合について、FEM シミュレーションを行った。図7に示した音圧分布図と同一周波数におけるOMの各母音に対する3次元音圧分布図を図8に示す。図7と比較すると、各母音ともに口腔部の横方向の振動が減少し、中心軸方向に平面波的に音波が伝搬しているのがわかる。これは、壁が軟かい場合、壁面に対する垂直入射音圧反射係数 $S_p = (Z_w - Z_c) / (Z_w + Z_c)$ (Z_c は空気の特徴インピーダンス)の大きさが、2800 Hz~4600 Hzの範囲では、0.995~0.998となり横方向の振動を生じさせていた反射波が減衰したためであると考えられる。図9はOMとOMSの各母音に対する声道伝達特性である。実線はOM、破線はOMSの声道伝達特性に対応する。図5のOMとOMSの結果と比較すると、OMとOMSのいずれの母音に対する結果においても、5 kHz以下の周波数領域では図5で見られた極めて接近したピークと零点の対が完全に消滅しているか、大幅に減少している。また、/u/以外の母音では、OMとOMSの伝達特性の違いは、5 kHz以上の高域で顕著に現れている。従来より、声道壁インピーダンスは、比較的低い周波数域のホルマント周波数を上昇させ、ホルマント帯域幅を増加させる効果があるとされてきた [2,22,23]。声道壁インピーダンスには、これらの効果に加えて、5 kHz以下に現れるこれらの極めて接近したピークと零点の発生を抑える効果があると思われる。実音声の母音の分析結果からは、このような鋭いピークと零点の対が推定されていないこと、また、モードマッチング法に基づく無損失な3次元声道モデルの計算 [24] においても、極めて接近したピークと零点の対が生じていることを考えると、剛壁を境界条件とした場合には3次元形状に起因する伝達特性の微細構造が現れるものと思われる。壁インピーダンスを導入した場合にも、図9では5 kHz以上の高域に帯域幅の狭い多くのピークと零点が見られる。このような周波数域では、壁インピーダンスの絶対値は非常に大きく剛壁に近くなるため、図5とほぼ同様の伝達特性となる。

本稿の計算では、空気の熱損失、粘性損失を考慮していない。これらの損失因子は周波数の平方根に比例して増大するとされているので、これらを考慮した場合には図9の5 kHz以上の高域で見られたような帯域幅の狭いピークと零点の発生が抑制されるものと推測される。

5. ま と め

実声道形状をもとに作成した基準となる声道モデルとこのモデルに声道横断面のだ円による近似、ならびに声道の曲がりの省略という声道形状の簡略化を施した近似モデルの音響特性をFEMにより求めた。その際、基準となるモデルに対して簡略化されたモデルの作成時間、ならびに計算コストが削減されることを示した。本稿で示した声道形状の簡略化の影響として、以

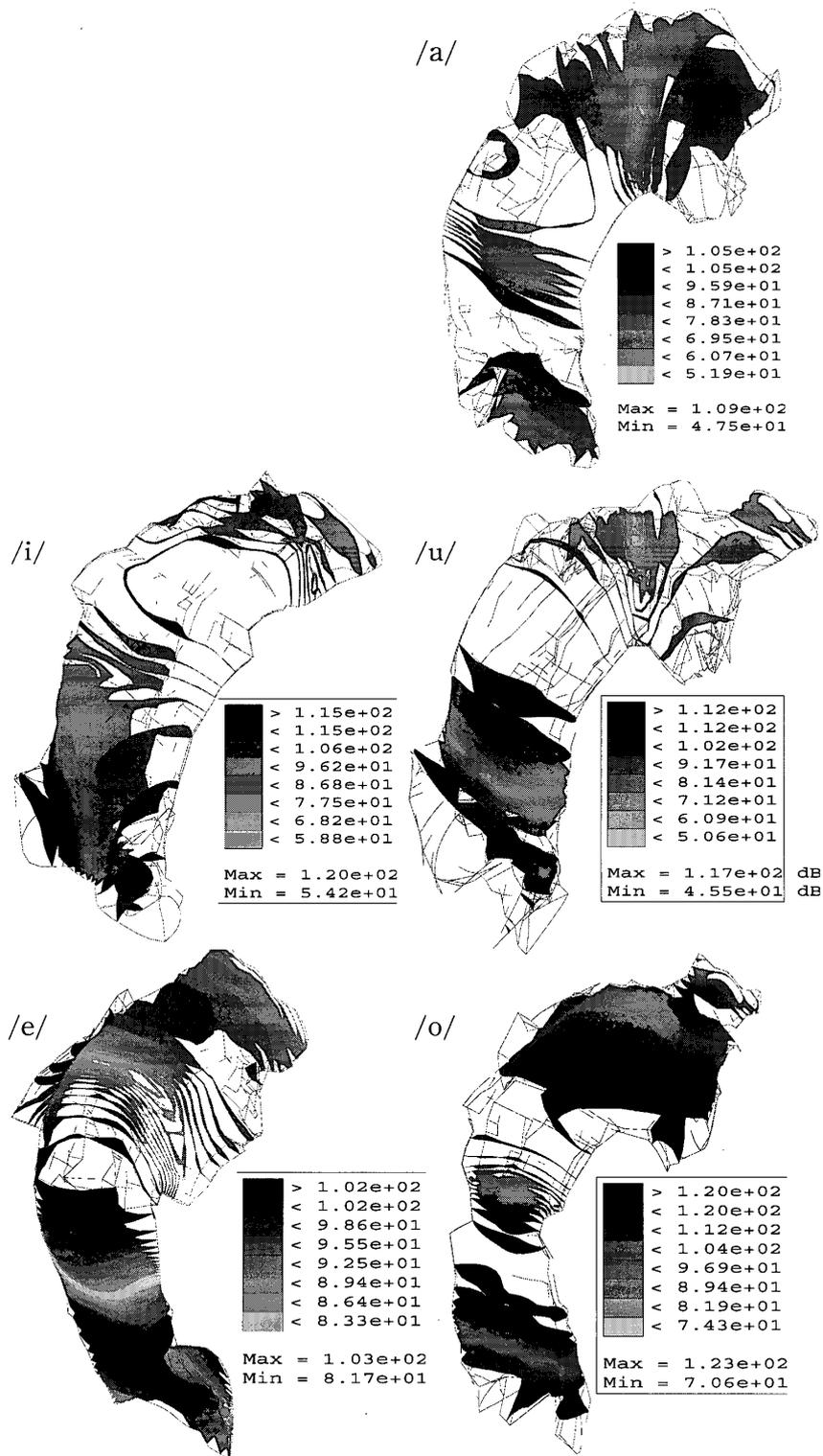


図8 壁が軟かい場合のOMの音圧分布図(駆動周波数は図7で示されているものと同じである。等高線はdBで表示されている。)

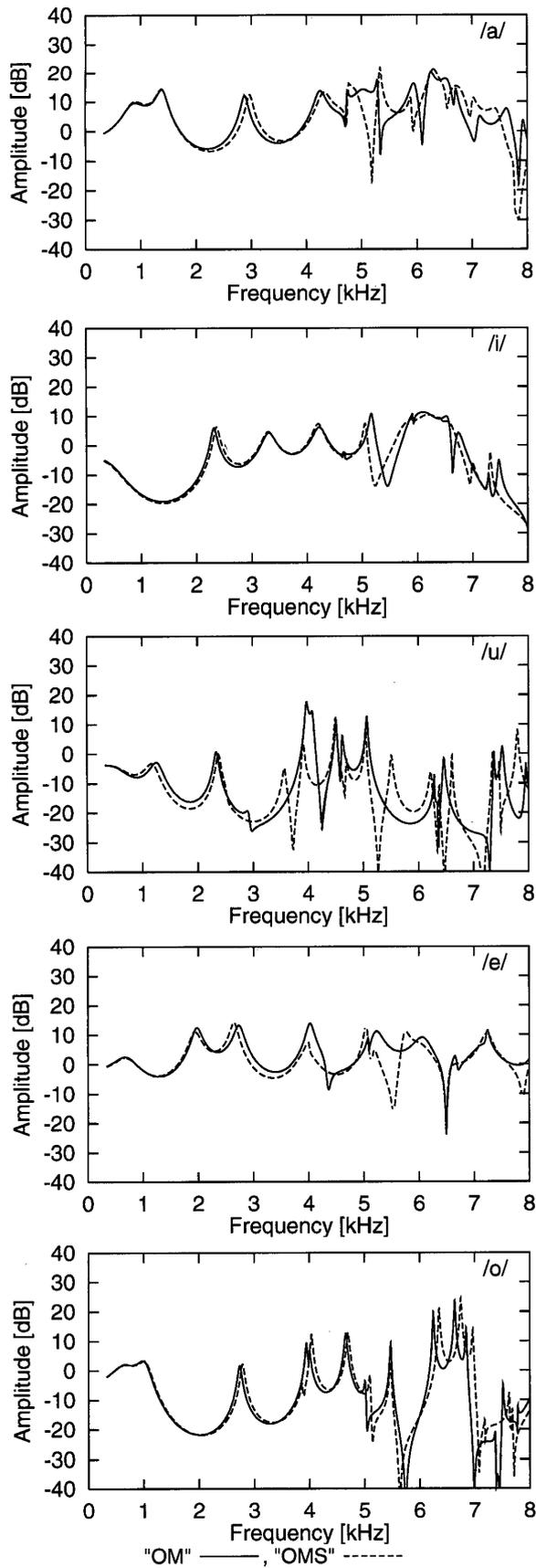


図9 壁が軟かい場合の声道伝達特性（上から順に母音/a/, /i/, /u/, /e/および/o/に対応する。図中の実線、破線は、それぞれOM, OMS声道伝達特性である。）

下の結果が得られた。

1. 声道横断面がだ円で近似されたモデルの場合、母音に関係無く、8 kHz 程度までは声道の曲がりの影響は、ほとんど現れない。
2. 声道横断面の簡略化を行わないモデルの場合、曲がりを省略すると母音によって、ホルマント周波数の移動する方向と移動量にばらつきが見られる。
3. 声道横断面がだ円で近似されたモデルのホルマントは、声道横断面がそのまま用いられたモデルのものよりも高域側に移動する。
4. 本稿で用いた声道形状に対して、だ円近似モデルを使用できるのは、/u/を除いて、第3ホルマント周波数程度までであると考えられる。/u/については、第1, 第3ホルマントに、10%程度の差異が生じる。
5. 声道横断面の簡略化を行わないモデルの場合、声道壁全体を剛壁と仮定すると、5 kHz 以下に鋭いピークと零点の対が現れるが、軟かい壁を仮定した場合にはこれらのピークと零点は抑えられる。

曲がりの省略とだ円近似の有効範囲は、5%のホルマント周波数の移動を許容すると、/u/以外では第3ホルマント周波数程度となり、断面形状の違いに影響されない1次元モデルの有効性を確認する結果となった。/u/の場合には簡略化モデルの違いによりホルマント周波数の差異が10%前後となったが、放射開口面積が最も小さく舌後部の狭めより先の口腔部分が広いことが影響している可能性が考えられる。この原因については口腔部分での音圧分布特性に基づいて調べる必要がある。

声道壁を軟かくした場合のシミュレーションでは、壁面全体に均一に壁インピーダンスを与えたため、実際の声道壁の状態を表現しているとは言えず、壁の境界条件の部分に関しては問題が残った。より実体に即したシミュレーションを行うためには、詳細な声道壁インピーダンス値とその分布状態を調べる必要がある。それらを求めたうえで、声道壁の境界条件をどの程度まで精密に表現すべきかについて調べることは今後の課題である。本稿で使用した声道のオリジナル形状モデルには梨状窩などの分岐が反映されていなかったり、口唇部や声帯の形状に曖昧さが残るなどの問題が残っている。今後はさらに標本数を増やし、より精密な声道形状モデルを使用することで、本稿で示した結果と同様な傾向が得られるのかどうかについても調べる必要がある。

謝辞

本研究の一部は、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”，平成13年度文部科学省科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号12750345)及びCREST/JSTからの支援により行われたものである。

参考文献

- [1] 堤一男, 加川幸雄: 声道の音響管モデル近似に関する二, 三の考察—その1 X線正中断面図からの3次元声道モデルの形成—. 音響学会誌, **54**, 94-100 (1998).
- [2] 堤一男, 加川幸雄: 声道の音響管モデル近似に関する二, 三の考察—その2 有限要素モデルとの比較—. 音響学会誌, **54**, 101-110 (1998).
- [3] 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. 信学論(A), **J81-A**, 899-906 (1998).
- [4] T. Niikawa, M. Matsumura, T. Tachimura and T. Wada: Modeling of a speech production system based on MRI measurement of three-dimensional vocal tract shapes during fricative consonant phtation. *Proc. 6th International Conference on Spoken Language Processing*, **2**, 174-177 (2000).
- [5] T. Nakai, K. Ishida and H. Suzuki: Sound pressure distribution and propagation paths in the vocal tract with the pyriform fossa and the larynx. *Proc. 6th International Conference on Spoken Language Processing*, **4**, 89-92 (2000).
- [6] 西本博則, 赤木正人, 北村達也, 鈴木規子: 舌・口底切除患者の声道モデルを変形させたモデルの声道伝達特性の分析. 信学技報, SP 2002-58, 5-10 (2000).
- [7] 佐々木幸司, 三木信弘, 松崎博季, 宮永喜一: 3次元声道音響解析における有限要素法の計算の高速化. 信学論(A), **J85-A**, 1211-1218 (2002).
- [8] 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. 信学論(A), **J75-A**, 1649-1656 (1992).
- [9] 神山直久: 音声生成過程における音響特徴量抽出と実体的声道モデルに関する研究. 北海道大学 学位論文, 第6章, 66-86 (1993).
- [10] B.E.F. Lindblom and J.E.F. Sundberg: Acoustical consequences of lip, tongue, jaw, and larynx movement. *J. Acoust. Soc. Am.*, **50**, 1166-1179 (1971).
- [11] P. Mermelstein: Articulatory model for the study of speech production. *J. Acoust. Soc. Am.*, **53**, 1070-1082 (1973).
- [12] T. Bear, J.C. Gore, L.C. Gracco and P.W. Nye: Analysis of vocal tract shape and dimensions using magnetic resonance imaging: Vowels. *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 799-828 (1991).
- [13] D. Beautemps, P. Badin and R. Laboissière: Deriving vocal-tract area functions from midsagittal profiles and formant frequencies: a new model for vowels and fricative consonants based on experimental data. *Speech Communication*, **16**, 27-47 (1995).
- [14] 松村雅史, 杉浦淳: 磁気共鳴映像法(MRI)による声道形状の計測. 信学論(A), **J75-A**, 1115-1123 (1992).
- [15] 楊長盛, 粕谷英樹, 加納滋, 佐藤俊彦: MRIによる声道形状の精密計測法の検討. 信学論(A), **J77-A**, 1327-1335 (1994).
- [16] <http://cygwin.com/>
- [17] H. Matsuzaki, N. Miki and Y. Ogawa: FEM analysis of sound wave propagation in the vocal tract with 3-D radiational model. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **17**, 163-166 (1996).
- [18] J. Lyzenga and J.W. Horst: Frequency discrimination of bandlimited harmonic complexes related to vowel formants. *J. Acoust. Soc. Am.*, **98**, 1943-1955 (1995).
- [19] K. Motoki, N. Miki and N. Nagai: Measurement of sound-pressure distribution in replicas of the oral cavity. *J. Acoust. Soc. Am.*, **92**, 2577-2585 (1992).
- [20] 宮永喜一, 三木信弘, 永井信夫: ピッチ推定を含めた音声のARMAパラメータの一推定法, 信学論(A),

J63-A, 737–744 (1980).

- [21] N. Kamiyama, N. Miki and N. Nagai : Measurement of acoustic reflection characteristics of the human cheek. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **11**, 207–214 (1990).
- [22] 鈴木誠史 : 声道壁インピーダンスの検討. 音響学会誌, **34**, 149–156 (1978).
- [23] 神山直久, 三木信弘, 永井信夫 : 音圧駆動によって得られた声道壁インピーダンスの検討. 音講論集, 227–228 (1989.10).
- [24] K. Motoki, X. Pelorson, P. Badin and H. Matsuzaki : Computation of 3-D vocal tract acoustics based on mode-matching technique. *Proc. 6th International Conference on Spoken Language Processing*, **1**, 461–464 (2000).