

タイトル	母音/a/発声時における鼻腔を伴う声道の音響特性
著者	松崎，博季；元木，邦俊
引用	北海学園大学工学部研究報告，33：171-181
発行日	2006-02-20

母音/a/発声時における鼻腔を伴う声道の音響特性

松 崎 博 季*・元 木 邦 俊*

Acoustic Characteristics of the Vocal Tract with the Nasal Cavity during Phonation of Vowel /a/

Hiroki MATSUZAKI* and Kunitoshi MOTOKI*

あらまし

口腔と鼻腔が結合した日本語母音/a/発声のMRIデータから作成した鼻腔付き3次元声道形状モデルとこのモデルから鼻腔を取り去った鼻腔無しモデルの音響特性を有限要素法を用いて解析した。有限要素法のシミュレーション結果より伝達特性と複素音響インテンシティを計算した。実験結果より、3 kHz以下の周波数領域で鼻腔が結合することでピークや谷が生じることが示された。3 kHzから5 kHz間では両モデルの伝達特性はほぼ一致したが、5 kHz以上では異なっていた。第1, 2ピーク周波数において、鼻腔付きモデルの複素音響インテンシティのベクトル分布は鼻腔無しモデルのものとは大きく異なる分布であった。鼻腔付きモデルの伝達特性に見られた近接した谷とピークの対の複素音響インテンシティのベクトル分布は僅かな周波数差にもかかわらず異なるものとなった。

キーワード：3次元有限要素法, 母音, 鼻腔, 声道, 音響解析

Abstract

Acoustic analysis of 3-D geometrical models of the vocal tract with and without the nasal cavity are performed by a 3-D finite element method (FEM). The models were based on MRI data during phonation of Japanese vowel /a/, which includes the coupling between the oral and the nasal cavities. Transfer functions and complex sound intensity are computed from the simulation results of the FEM. The results showed that the nasal cavity coupled with the oral cavity contributes to the appearance of peaks and/or valleys of the transfer functions below the 3kHz. The transfer function of the model with the nasal cavity is in good agreement with that of the model without the nasal cavity in the range from 3 to 5kHz, and is different above 5kHz. The distribu-

* 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

tions of the complex sound intensity vectors of the model with the nasal cavities are different from those of the model without the nasal cavity below the 4th peak frequency. In spite of a little difference between peak and valley frequencies of the transfer function of the model with the nasal cavity, the distributions of the complex sound intensity vectors show very large difference at those two frequencies.

Key words : 3-D FEM, vowel, nasal cavity, vocal tract, acoustic analysis

1 まえがき

筆者らは、母音発声時の3次元声道形状を対象とした音響解析を行っており、3次元声道形状作成のために母音発声MRIデータを利用している。これらの母音発声MRIデータの中には被験者によって、軟口蓋が完全に閉じておらず、口腔と鼻腔が結合しているデータも見受けられる。鼻音化母音を対象にした鼻腔と口腔の結合の強さに関する検討¹⁾は行われているものの、母音発声時における口腔と鼻腔が結合しているデータを対象にした研究は行われていないようである。そこで、本稿では口腔と鼻腔が結合している母音/a/発声のMRIデータを基に作成した3次元声道形状モデルを用いて有限要素法(FEM)による音響解析を行い、鼻腔がある場合と無い場合とで伝達関数および複素音響インテンシティのベクトル分布にどのような差が生じるのかを調べた結果を報告する。声道形状モデルの口腔と鼻腔を軟口蓋部のみならず口唇と鼻孔の放射部においても放射空間²⁾を通じて結合させて有限要素解析を行う。

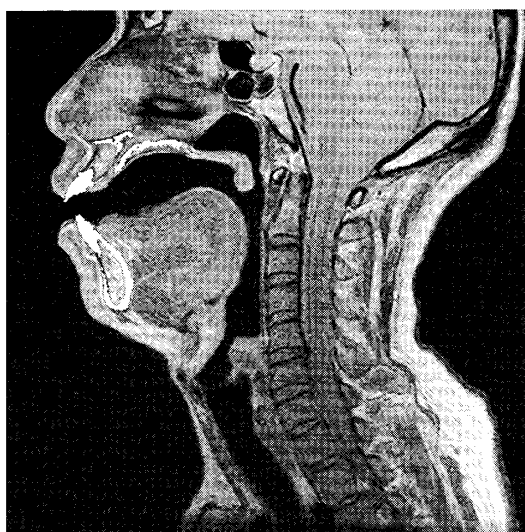
2 口腔と鼻腔が結合している母音発声MRIデータ

成人男性3名の母音/a/発声時の正中矢状面画像を図1に示す。いずれもATR脳活動イメージングセンタで撮像されたものである。被験者Aの画像はATR人間情報科学研究所・生体イメージング研究室が公開している母音発話MRIデータのうちの歯列補填されている画像である。被験者BおよびCの撮像時の撮像シーケンスはFast Spin Echo法(TE=9ms, TR=2900ms)である。撮像画像は、スライス厚2.5mm、視野サイズ256mm×256mm、画像サイズ512×512pixelの矢状断面画像である。

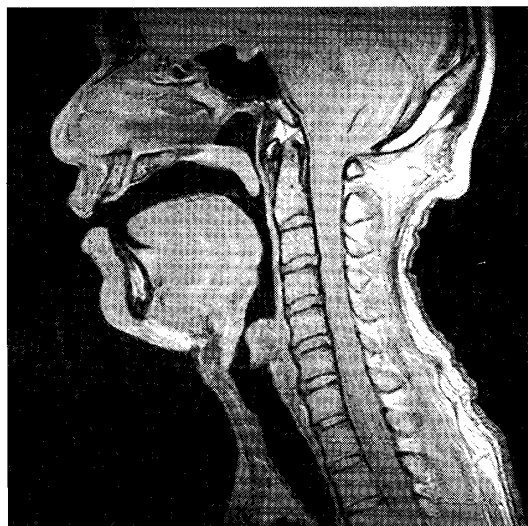
被験者Cでは軟口蓋が閉鎖し口腔と鼻腔が完全に分離している様子が見て取れるが、AとBにおいては完全に閉鎖しておらず、結合しているのがわかる。他の母音についても、被験者Cは完全に分離していたが、AとBは軟口蓋と咽頭壁の接触部がごく僅かであったりとほぼ同様の傾向であった。

3 声道形状モデル

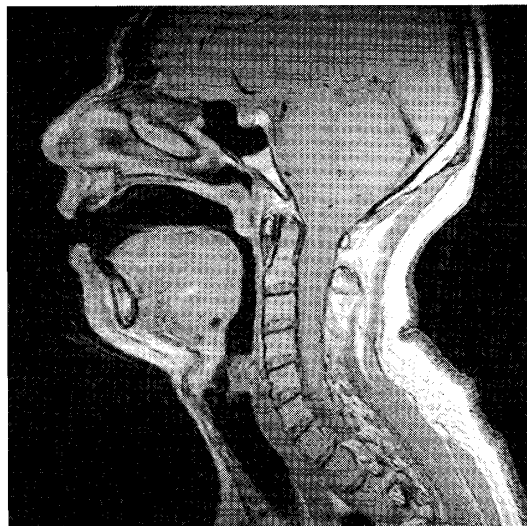
声道形状モデル作成のための口腔と鼻腔が結合している母音発声MRIデータとして、前節で



(a) Subject A



(b) Subject B



(c) Subject C

図1：母音/a/発声時の正中矢状面画像。

Fig. 1 : MR images on the mid-sagittal plane during phonation of vowel /a/.

示した被験者Aの母音/a/発声時のデータを用いた。なお、被験者Aは両側の副鼻腔に手術歴があり、鼻腔形状には下鼻道と上顎洞の結合など正常とは異なる部分もある。最初に、MRIデータからCT/MRIスライスデータの可視化およびSTL化を行うMaterialise社のMimicsを用いて3次元のサーフェスデータを作成した。次に、このサーフェスデータからAltir Engineering社の有限要素解析プリポストシステムHyperMeshを用いて4面体2次要素で分割した3次元有限要素メッシュを作成した。節点間隔は概ね2 mmになるようにした。口唇部と鼻孔を含む顔表面を覆う形で、半径4 cmの球形の放射空間²⁾を設けた。放射空間の大きさはもう少し大きい方が望ましいと思われるが、計算コスト（計算時間や記憶容量）との兼ね合いから半径4 cmにし

た．軟口蓋が完全に閉鎖，すなわち鼻腔と口腔が結合していない声道のみの場合との比較のため，鼻腔付きモデルから鼻腔だけを取り外した鼻腔無しモデルも作成した．口腔鼻腔結合部の最も断面積が狭い水平断面を分割面とした．鼻孔については鼻腔付きモデルの有限要素メッシュを基に，視察により鼻孔の外周上の節点を選び，これらの節点で囲まれたサーフェスを作成することでふさいだ．両モデルのサーフェスメッシュを図2に示す．放射空間の球面は鼻腔無しモデルの左半分のみ示されている．有限要素メッシュの節点数および要素数は，鼻腔付きモデルで87318および50264，鼻腔無しモデルで49855および29697である．

4 FEMによるシミュレーションと解析結果の考察

定常状態における速度ポテンシャル ϕ の波動方程式

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

にFEMを適用してシミュレーションを行なった．ここで k ($=w/c$, w :角周波数, c :音速)は波数である．声門部を駆動面として正弦波で駆動した．放射空間の球面には呼吸球の放射インピーダンスを与えた²⁾．その他は剛壁とした．シミュレーションによって得られた速度ポテンシャル ϕ から音圧 p を以下の式より計算した．

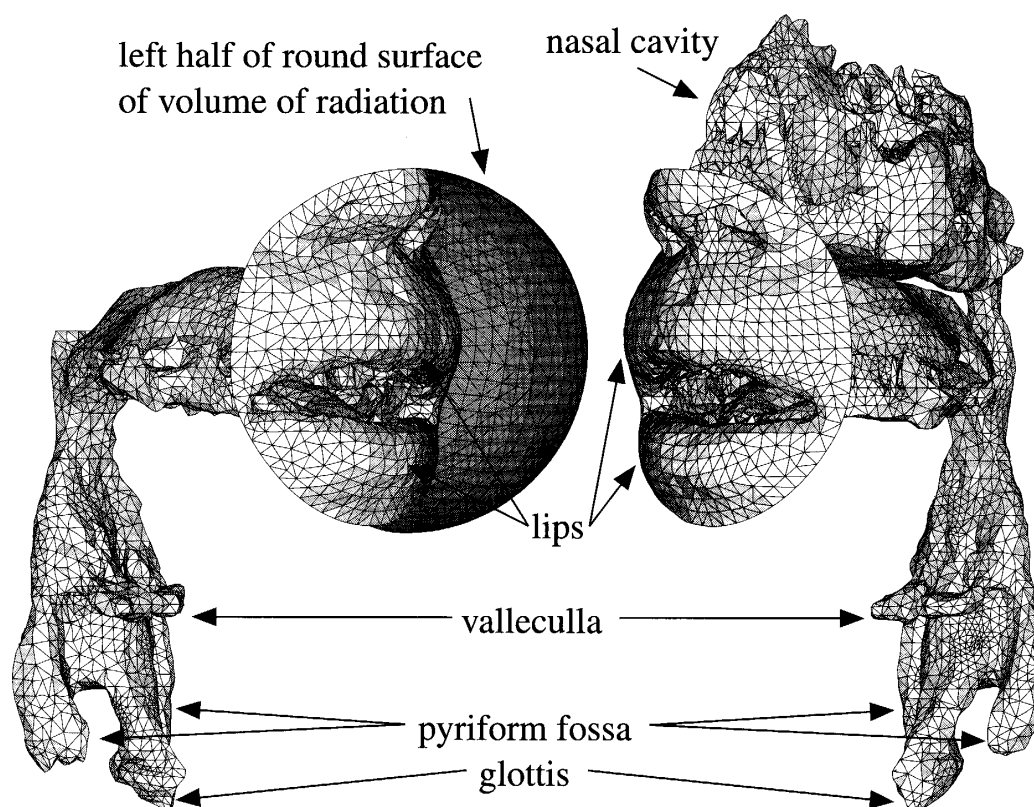


図2：サーフェスメッシュ．左：鼻腔無しモデル，右：鼻腔付きモデル．

Fig. 2 : Surface meshes. Left : vocal tract model without the nasal cavity, right : vocal tract model with the nasal cavity.

$$p = j\omega\rho\phi \quad (2)$$

ここで、 ρ は空気密度である．同様にFEMを次式に適用して，速度ポテンシャル ϕ から粒子速度 v を計算した．

$$v = -\nabla\phi \quad (3)$$

シミュレーションは，駆動周波数100Hzから10kHzまで10Hzおきに，さらに伝達関数のピークと谷の近傍では1 Hzおきに行なった．連立1次方程式の解法にはスカイライン法を用いた．CPUがAMD Opteron processor 250 2 way，メモリ（DDR-SDRAM PC3200 CL3）サイズが6 GB，OSがSUSE Linux Professional 9.2であるPCを用いた時の1周波数あたりの音圧（あるいは粒子速度）を計算するのに要した時間は，コンパイラにAbsoft 64-bit Fortran 95 for AMD64Linux 9.0を使用した場合，鼻腔付きモデルで平均約6分半，鼻腔無しモデルで平均約2分であった．

伝達関数 $H(w)$ を次式で定義される計算式³⁾より計算した．

$$H(w) = K \frac{\sqrt{W_{rad}}}{u_g} \quad (4)$$

ここで、 u_g は音源部の体積速度， W_{rad} は放射空間の球表面上での音響インテンシティの総和から計算された放射パワーである．また、 K は $H(w)$ を無次元量にするための定数である．さらに，音圧および粒子速度から複素音響インテンシティ（アクティブインテンシティおよびリアクティブインテンシティ）を求めた．

4.1 伝達関数

両モデルの伝達関数を図3に示す．鼻腔無しモデルの伝達関数を基準とすると，鼻腔付きモデルの伝達関数には，第1ピークと第2ピークの間の639Hzにピークが存在し，そこから第2ピークまで最大約4 dB弱の振幅の低下が見られる．同様に第3ピーク近傍の2455Hz，第4ピーク近傍の2912Hzに鼻腔無しモデルの伝達特性には見られないピークが近接して存在している．本モデルでは，下鼻道と上顎洞が結合しており，鼻腔の他の部分の変形もあり得るため，この結果を一般化することはできないが，母音発声時に結合する鼻腔は1 kHz以下の低い周波数域で伝達関数にピークや谷を生じさせる可能性がある．3kHzから5 kHzの間の両者の伝達関数はほぼ一致している．5 kHz以上の周波数領域では，一致する部分はあるものの，大部分は異なっている．

表1に伝達関数の第1から第4ピーク周波数を示す．鼻腔付きモデルのピーク周波数がいずれも鼻腔無しモデルのものよりも高くなっている．鼻腔無しモデルのピーク周波数を基準とすると，その変化率は第1ピーク周波数からそれぞれ約1.2，2.7，0.7，3.7%である．鼻腔が結合することでピーク周波数は高くなるが，変化する割合は大きくない．

北村らによる同じ母音発声MRIデータで鼻腔の無い有限要素モデルの伝達関数の第1から第

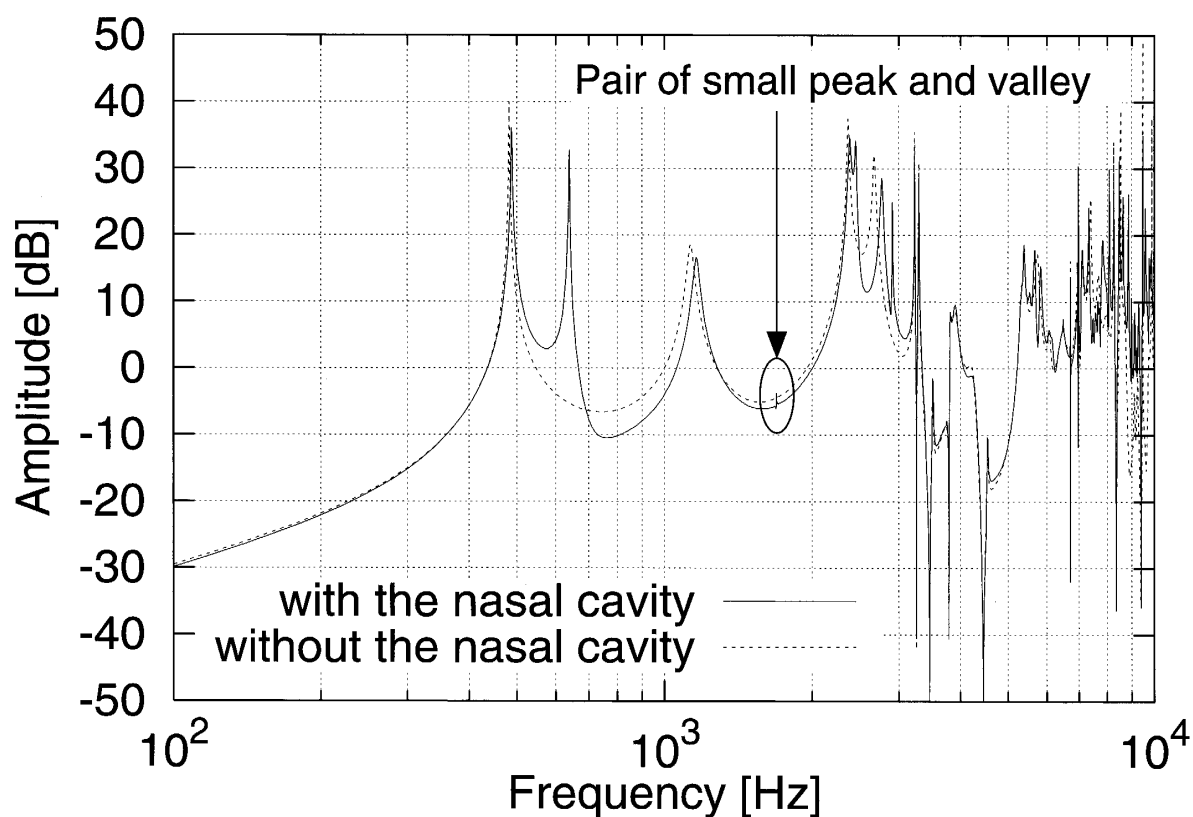


図3：伝達関数。実線は鼻腔付き，破線は鼻腔無しモデルに対応する。

Fig. 3 : Transfer functions of the vocal tract models with (solid line) and without (dotted line) the nasal cavity.

表1：伝達関数の第1から第4ピーク周波数。

Table 1 : From 1st to 4th peak frequencies of transfer functions.

	F1	F2	F3	F4
Model with the nasal cavity	488	1163	2386	2773
Model without the nasal cavity	482	1132	2369	2675

4 ピーク周波数はそれぞれ，450，1100，2400，2750（50Hzきざみで計算されている）⁴⁾である。北村らの有限要素モデルの放射空間の形状および境界条件は筆者らのものと異なるが，ピーク周波数はほぼ同じとなった。北村らはMRI撮像の同一被験者から収録した音声の平均スペクトラム包絡の第1から第4ホルマント周波数も求めており，それらはそれぞれ，563，1047，2578，3016Hzと示されている⁴⁾。鼻腔付きモデルのピーク周波数は第2ホルマント以外，これらのホルマント周波数よりも低くなっている。これらのホルマント周波数を基準とすると，その変化率は第1ホルマント周波数からそれぞれ，-13.3，11.1，-7.4，-8.1%である。丁度可知差異（just noticeable difference, jnd）はほぼ1から5%程度である⁵⁾ことを考慮すると，これらの差は小さくない。これらの差の原因の一つとして，FEMによるシミュレーションでは声道壁を剛壁と仮定したことがあげられる。声道壁インピーダンスが比較的低い周波

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⁶⁻⁸⁾ことが示されており、声道形状モデルの壁に境界条件として適切な壁インピーダンスを与えれば、両者の第2ホルマント周波数以外のピーク周波数の差は縮まるものと思われる。さらに5 kHz以下に現れる極めて接近したピークと零点の発生を抑える⁹⁾ので、同様に適切な壁インピーダンスを与えれば、鼻腔付きモデルの伝達関数に見られた近接したピークや谷が抑制されて結合あるいは消滅する可能性があり、その伝達関数は実音声の特性により近くなるのではないと思われる。

4.2 複素音響インテンシティ

鼻腔付きモデルのピーク周波数における複素音響インテンシティの比較を行なうことで、鼻腔がある場合と無い場合とでどのような差が生じるのかを調べる。正中矢状面および顔面におけるアクティブインテンシティのベクトル分布をそれぞれ図4および図5に示す。なお、正中矢状面では鼻中隔がその大部分を占めるため、鼻腔は一部しか表示されていない。鼻腔無しモデルのアクティブインテンシティのベクトル分布は正中矢状面（図4（b））および顔面（図5（b））ともに周波数によらずほぼ同じ分布となっている。鼻腔付きモデルの正中矢状面のベクトル分布図（図4（a））において、F1、F3、F4では音のエネルギー流が咽頭から鼻腔と口腔にそれぞれ分岐して流れているが、F2では鼻腔からの音のエネルギー流と、鼻腔と口腔の分岐部近傍で合流し口腔に流れ込む形になっている。また鼻孔付近の音のエネルギー流は、F

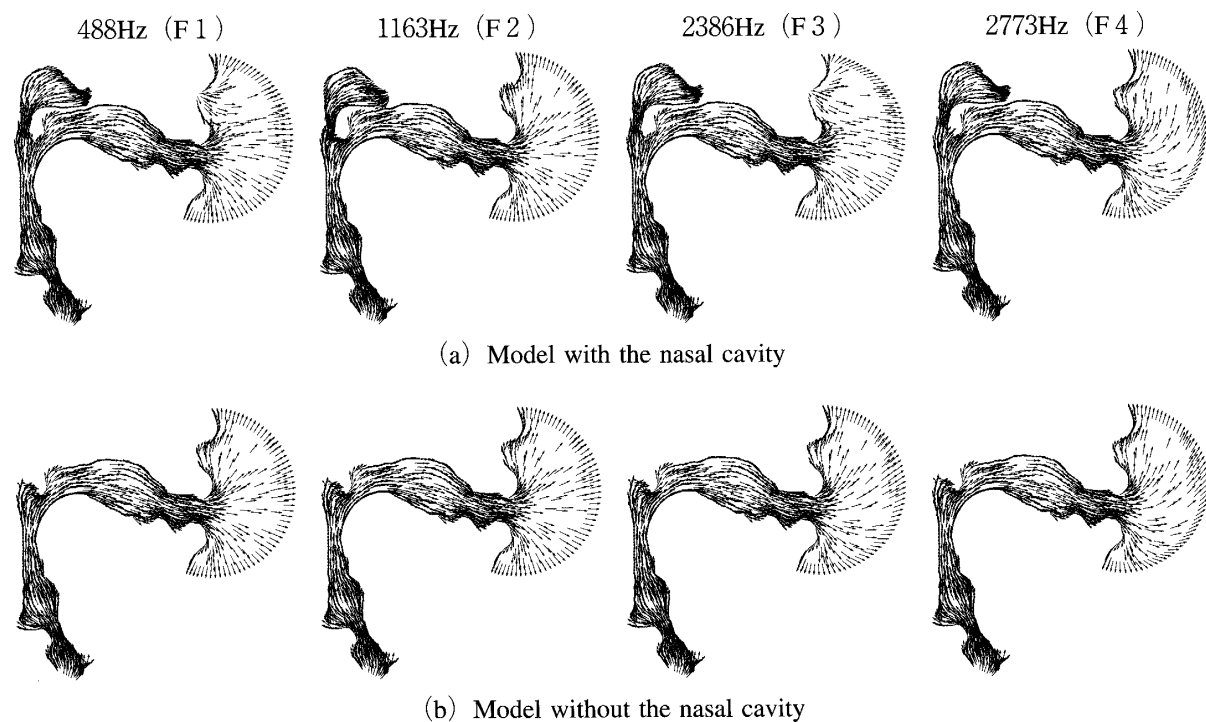


図4：正中矢状面におけるアクティブインテンシティのベクトル分布。
Fig.4：Distributions of the active sound intensity vectors on the mid-sagittal plane.

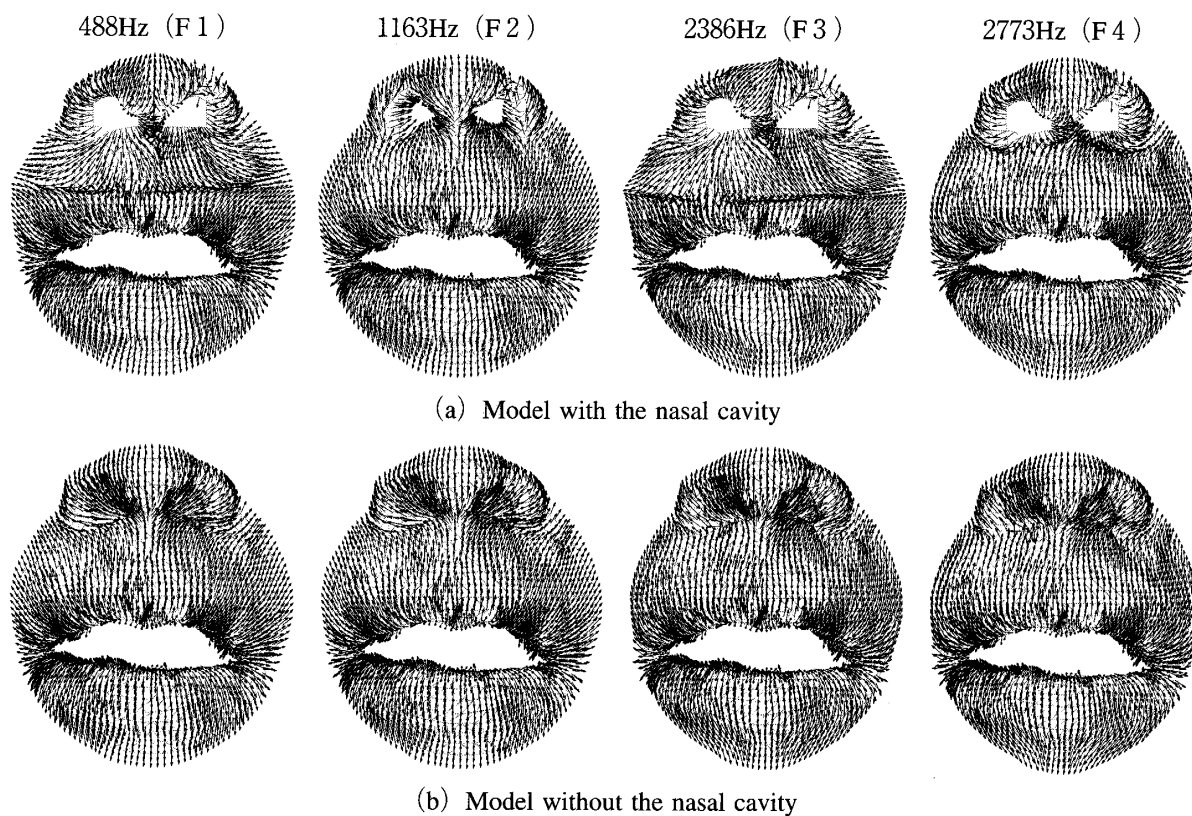


図5：顔面におけるアクティブインテンシティのベクトル分布。
Fig.5：Distributions of the active sound intensity vectors on the face.

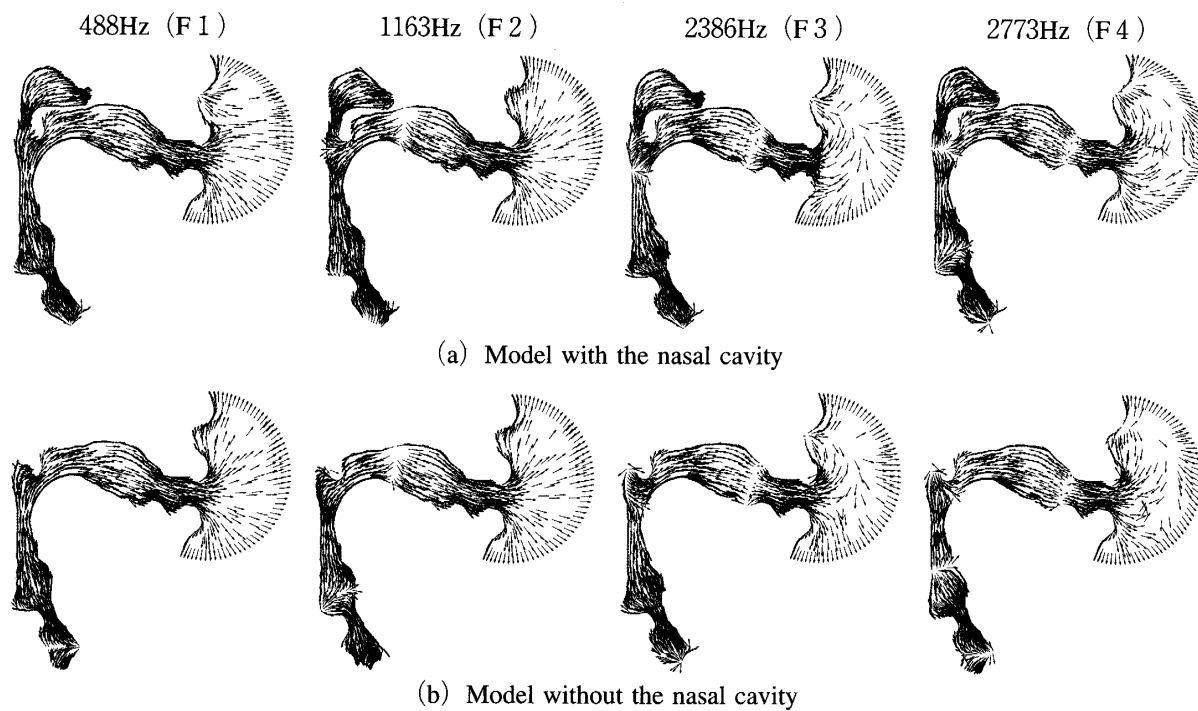


図6：正中矢状面におけるリアクティブインテンシティのベクトル分布。
Fig.6：Distributions of the reactive sound intensity vectors on the mid-sagittal plane.

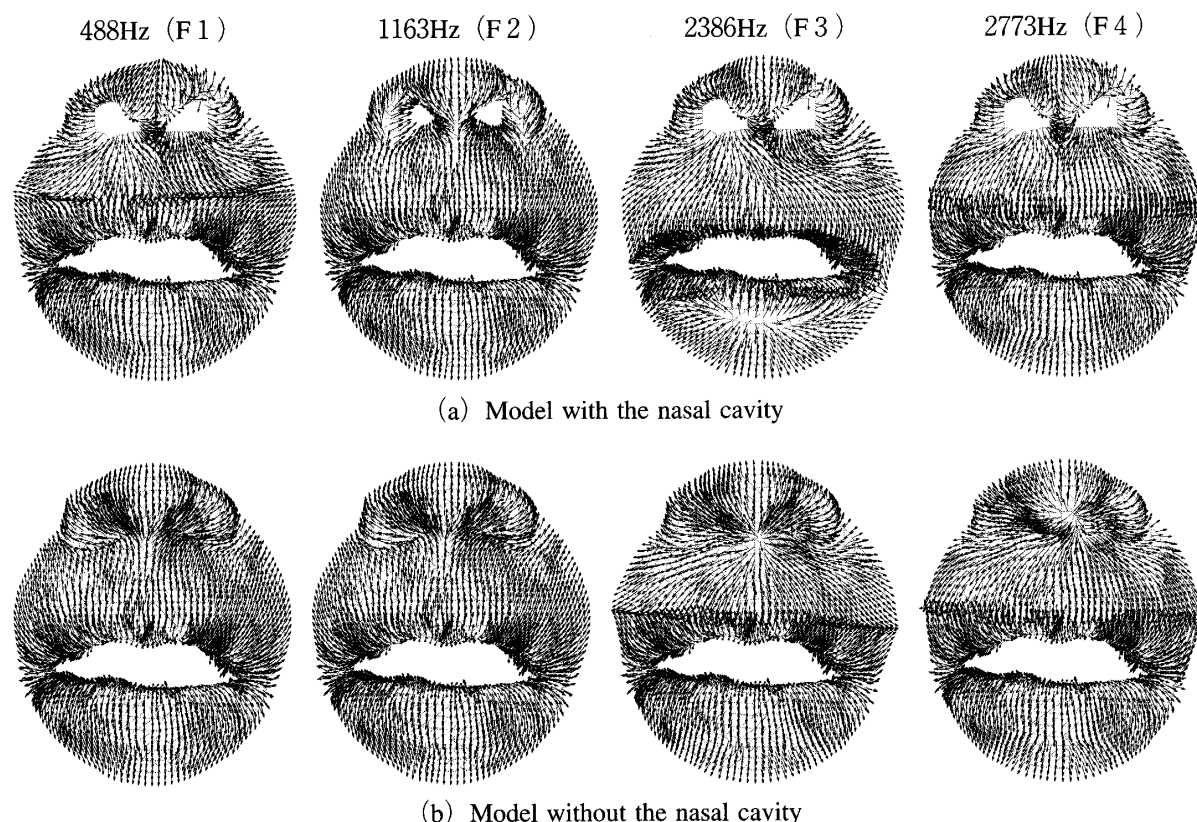


図7：顔面におけるリアクティブインテンシティのベクトル分布。
Fig.7：Distributions of the reactive sound intensity vectors on the face.

4では鼻腔無しモデルの分布とほぼ同じであるが、F1およびF3では鼻孔から放射し、F2では鼻孔へ流入している。顔面のベクトル分布図（図5（a））においては、F1とF3では口唇の開口部および鼻孔から流れ出る音のエネルギー流が鼻と上唇の間で合流し、横方向に流れている。F4でも同様に合流しているが、その位置は鼻孔近傍である。F2では音のエネルギー流が鼻孔に流入している。上記の事実、鼻腔が結合している場合、3 kHz以下でも音の伝搬経路が周波数によって大きく異なることを示唆するものである。

正中矢状面および顔面におけるリアクティブインテンシティのベクトル分布をそれぞれ図6および図7に示す。リアクティブインテンシティの分布図では、ベクトルの湧き出し部分が音圧の腹に対応し、矢尻が向き合う部分が音圧の節に対応する。鼻腔付きおよび無しモデルの正中矢状面におけるリアクティブインテンシティのベクトル分布図（図6）を比較すると、口腔部における音圧の腹や節の位置がほぼ一致しているものの、喉頭から咽頭においては異なる分布となっている。同様に顔面におけるベクトル分布図（図7）を比較してみると、F2ではほぼ同じような分布になっているが、その他は異なっている。

図3の鼻腔付きモデルの伝達関数には、1691Hzと1694Hzに非常に小さな谷とピーク対が見られる（図3のだ円部分）。図8は両周波数の顔面における複素音響インテンシティのベクトル

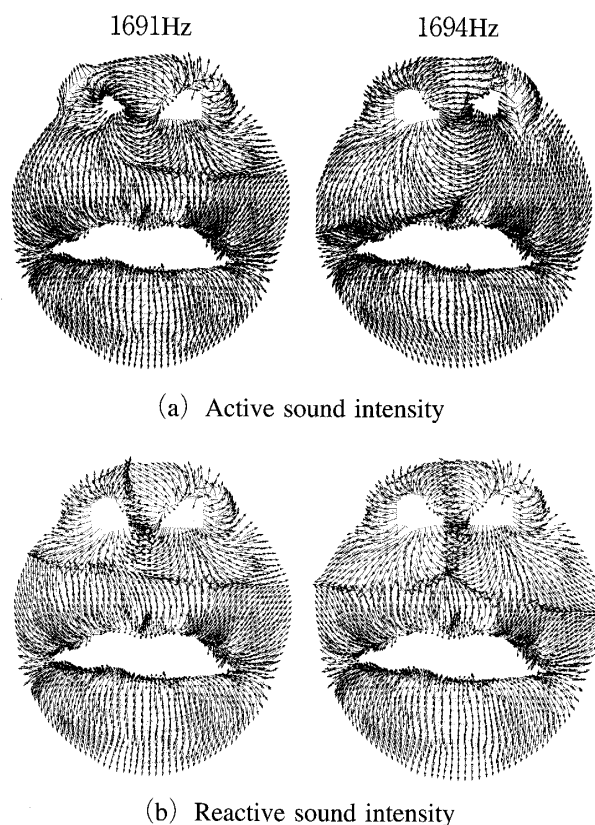


図8：顔面における複素音響インテンシティのベクトル分布。
Fig. 8 : Distributions of the complex sound intensity vectors on the face.

分布である．アクティブインテンシティのベクトル分布（図8（a））より，1691Hzでは左の鼻孔から右の鼻孔へ，1694Hzでは反対に右から左へ音のエネルギー流が流れている様子が伺える．リアクティブインテンシティのベクトル分布（図8（b））では，節の位置が少なからず異なっていることがわかる．ここでは示していないが，このような非対称性を示す分布は鼻腔無しモデルでは見られず，周波数の違いによる差はほとんどみられなかった．これらは，伝達特性上は無視し得る特性であるが，両周波数での鼻腔の3次元形状の微細構造に起因する影響が現れたものであると思われる．

5 まとめ

口腔と鼻腔が結合している日本語母音/a/発声時のMRIデータを用いて作成した鼻腔が結合した鼻腔付き3次元声道モデル内の音響解析をFEMで行なった．このモデルの口腔と鼻腔を放射空間を用いることで放射側でも結合するようにした．比較のため，このモデルから鼻腔を取り去った鼻腔無しモデルも作成し，同様に有限要素解析を行なった．解析結果より，3 kHz以下の周波数領域で鼻腔が結合することでピークや谷が生じることが示された．3 kHzから5 kHz間では，両モデルの伝達関数はほぼ一致したが，5 kHz以上では異なっていた．F4までに

におけるアクティブインテンシティのベクトル分布より、鼻腔無しモデルは周波数によらずほぼ同じ分布を示したが、鼻腔付きモデルは周波数ごとに異なる分布となった。鼻腔付きモデルでは、音のエネルギー流が鼻孔から放射されるだけでなく、放射側から鼻腔へ流入、あるいは鼻腔と口腔の分岐部で鼻腔から口腔へ流れる様子が示された。リアクティブインテンシティのベクトル分布より、両モデルの口腔内の腹と節の位置はほぼ一致していたが、それ以外の部位では異なっていた。鼻腔付きモデルの伝達関数に見られた近接した1691Hzの谷と1694Hzのピークの対の複素音響インテンシティは僅かな周波数差にもかかわらず異なるものとなった。

本稿で使用したMRIデータは副鼻腔が一部鼻道と結合したものとなっている。今後は歯列補填した通常の形状の鼻腔を用いた計算による比較が必要である。また、他の母音、ならびに鼻腔が軟口蓋において完全に閉鎖されたモデルを用いて同様の実験を行なう予定である。

謝 辞

本研究は「ATR母音発話MRIデータ」を使用して行われた。本研究の一部は、平成16年度北海学園学術研究助成金、およ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”からの支援により行われたものである。

参考文献

- 1) 高橋, 石田, 中井, 鈴木: “声道の音響管モデルにおける鼻腔と口腔の結合の強さに関する検討”, 信学技報, SP95-11, pp.7-14, 1995.
- 2) H. Matsuzaki, N. Miki and Y. Ogawa: “Fem analysis of sound wave propagation in the vocal tract with 3-d radiation mode”, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 17, 3, pp.163-166, 1996.
- 3) 元木: “高次モードを考慮した声道音響モデルの構築法”, 音響学会誌, 54, 12, pp.850-856, 1998.
- 4) 北村, 竹本, 本多: “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, pp.41-46, 2004.
- 5) J. Lyzenga and J. W. Horst: “Frequency discrimination of bandlimited harmonic complexes related to vowel formants”, J. Acoust. Soc. Am., 98, 4, pp.1943-1955, 1995.
- 6) 鈴木: “声道壁インピーダンスの検討”, 音響学会誌, 34, 2, pp.149-156, 1978.
- 7) 神山, 三木, 永井: “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, pp.227-228, 1989.
- 8) 堤, 加川: “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, 3, pp.101-110, 1998.
- 9) 松崎, 元木, 三木: “有限要素法における3次元声道モデルの曲がりおよび断面形状の簡略化に関する検討”, 音響学会誌, 59, 8, pp.440-449, 2003.