

タイトル	日本語母音/a/発声時における鼻腔を伴う声道の音響特性：声道壁インピーダンスの影響
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，34：73-81
発行日	2007-02-20

日本語母音/a/発声時における鼻腔を伴う声道の音響特性—声道壁インピーダンスの影響—

松 崎 博 季*・元 木 邦 俊*

Acoustic Characteristics of Vocal Tract with Nasal Cavity during Phonation of Japanese /a/ : Effect of Wall Impedance

Hiroki MATSUZAKI* and Kunitoshi MOTOKI*

Abstract

In this paper, the transfer functions and the active sound intensities of a vocal tract model with and without a nasal cavity were computed by a three-dimensional FEM. The models were based on vowel MRI data of the vocal tract with the nasal cavity during phonation of the Japanese /a/. An oral cavity was also coupled with the nasal cavity in a three-dimensional volume of radiation. The effects of wall impedance were also examined. The coupling of the nasal cavity to the oral cavity indicated the following aspects. The additional peaks appeared below 3 kHz for the lossless condition. However, they disappeared in the simulation for the soft wall condition. The sound energy circulation did not occur in the simulation for the soft wall condition. As for the effects of the wall boundary condition on the spectral envelope, the upward shift of lower formant frequencies were confirmed based on the three-dimensional simulations. However the disagreements of the formant frequencies between the simulation and real speech should be further investigated by adjusting the wall boundary condition to a more realistic one.

1 はじめに

日本語母音の声道形状を取得するために撮像されたMRIデータには、鼻腔が口腔と結合し、母音が鼻音化していると考えられるデータが存在する。鼻音化母音を対象とする研究は1次元の音声生成モデルを利用して多数行われてきた¹⁻⁶⁾。3次元鼻腔の音響特性の解析も有限要素法(FEM)により行われている⁷⁻⁹⁾。さらに、簡単化された形状モデルを用いた鼻腔と口腔の放射空間での音響的結合の影響に関する研究も行われている¹⁰⁾。しかしながら、MRIデータに

* 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

基づいた声道形状の口唇と鼻孔からの3次元の放射を伴った場合の音響特性は明確ではない。適切な境界条件を伴う詳細な声道を用いてシミュレーションを行うことは、音声の音響特性を研究する上で、特に個人性情報が含まれていることが予想される高域において重要である。

本研究では、日本語母音/a/発話時に撮像された、鼻腔を伴う声道の母音MRIデータを用いて、音声生成系の音響特性における鼻腔の影響について調べた結果を報告する。3次元声道形状モデルの音響解析にはFEMを用いる。MRIデータに基づいて鼻腔付きおよび鼻腔無しの二種類の声道形状モデルが作成される。鼻腔付きおよび鼻腔無しモデルのそれぞれの音響特性を比較することで、鼻腔が音響特性にどのような影響を与えるのかを考察する。声道壁インピーダンスの影響についての検討も行われる。

2 声道形状モデル

声道形状モデル作成には、ATR脳活動イメージングセンタが提供する男性話者の日本語母音MRIデータを使用した。これらのMRIデータのうち、歯列補填が施され、正中矢状断面上ではっきりと鼻腔と口腔が結合していることが確認できる母音/a/のデータセットを声道形状モデル作成に使用した。データセットのうちの正中矢状断面のMR画像を図1に示す。このデータの被験者の副鼻腔には手術歴があるため、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。これ以降の節で示されるシミュレーション結果にはこの手術の影響が含まれている可能性がある。しかしながら、分岐近傍の詳細な音場の様子や、鼻孔と口唇部の放射空間における結合の影響については、手術された鼻腔を用いて調査することも可能である。

声道形状モデルとして、2種類のモデルを作成した。一つ目のモデルは3次元の鼻腔を伴う

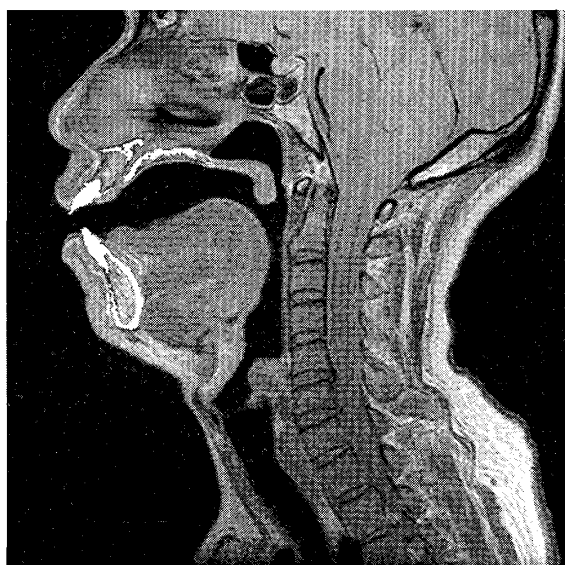


図1：母音/a/発声時の正中矢状断面のMR画像。

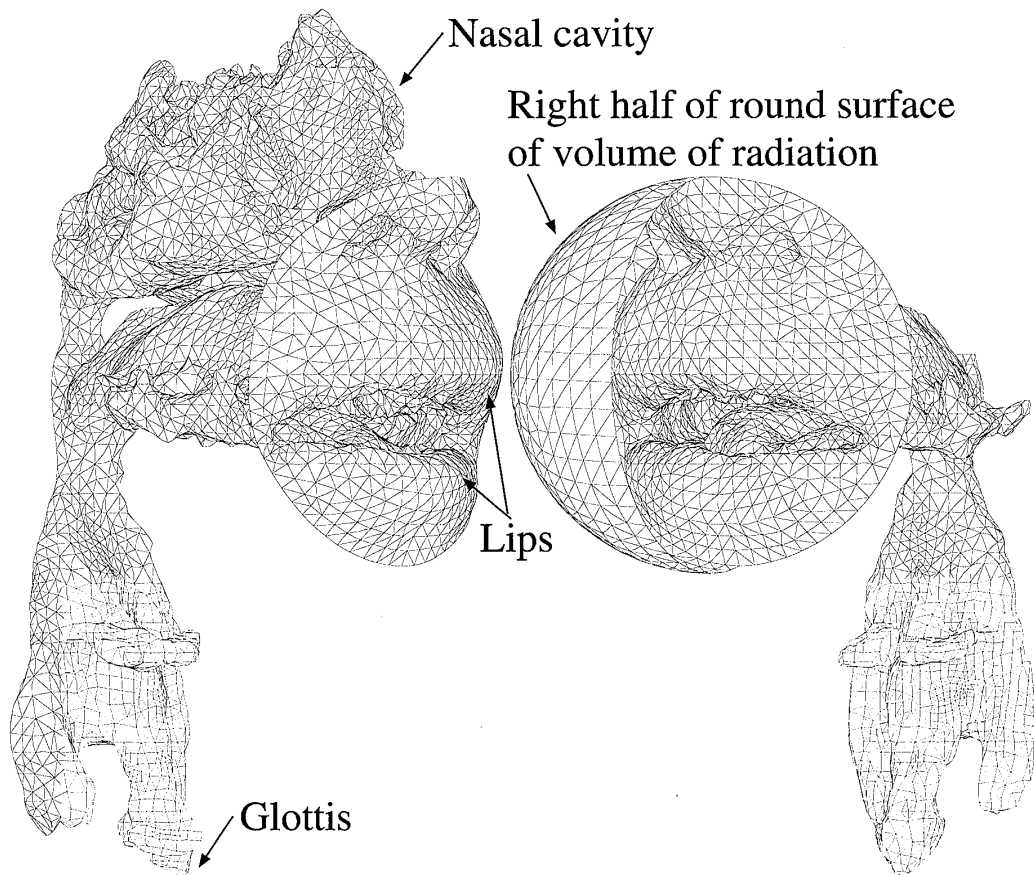


図2：各形状モデルのサーフェス・メッシュ。左：鼻腔無しモデル，右：鼻腔付きモデル。

モデルである。このモデルの鼻腔と口腔は、口唇部と鼻孔を通して3次元の放射空間内でも空間的に結合している。二つ目のモデルは最初のモデルから鼻腔を取り去ったモデルである。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¹¹⁾を設けた。放射空間の球面の境界条件には、球音源の比音響インピーダンスを仮定した。放射空間の境界条件はシミュレーションにおいて重要なパラメータである。放射空間の球面上に空気の音響インピーダンスを使用するという簡便な方法もあるが、比較的大きな放射空間を必要とし、それに伴い急激な要素数の増大をもたらす。我々は、口唇部レプリカを用いた音響計測による実験で、口唇部近傍の波面は球面で近似できることを確認した¹²⁾。この放射モデルを用いれば、空気の音響インピーダンスを用いる場合と比較して、放射空間の大きさを小さくすることが可能であるので、球音源の比音響インピーダンスを放射空間の境界条件として用いることにする。各形状モデルのサーフェス・メッシュを図2に示す。口腔と鼻腔の境界を矢状断面上における軟口蓋と咽頭の距離が水平方向で最も狭い位置とした。鼻腔無しモデルではこの境界より上の部分を取り去った。鼻孔はその周辺を囲む有限要素メッシュの節点に基づいたサーフェスで塞いだ。

3 FEMシミュレーション

速度ポテンシャルの定常状態における波動方程式に3次元のFEMを適用した。このFEMを使用して声道モデル内の音波伝搬の様子をシミュレーションした。駆動面としての声門を正弦波で駆動した。声道壁の境界条件の影響を調べるため、2種類の境界条件を声道壁および顔面に仮定した。最初のシミュレーションでは境界条件として剛壁を、次のシミュレーションでは軟壁を仮定した。軟壁の境界条件として、神山らが提案した壁インピーダンスモデル¹³⁾の厚さのパラメータが2 cmのときの値を与えた。シミュレーションによって得られた速度ポテンシャルから音圧および粒子速度を計算した。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。

4 実験結果および考察

音圧および粒子速度から声道伝達特性とアクティブインテンシティを求めた。伝達関数 $H(\omega)$ を次式で定義される計算式¹⁴⁾より計算した。

$$H(\omega) = K \left| \frac{\sqrt{W_{rad}}}{u_g} \right| \quad (1)$$

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 $H(\omega)$ を無次元量にするための定数である。

4.1 剛壁の場合

4.1.1 声道伝達特性

剛壁の場合の声道伝達特性を図3に示す。鼻腔付きモデルの声道伝達特性には第1ホルマント(F1)と第2ホルマント(F2)の間の639Hzにピークが生じている。零も761Hzに生じている。これらは鼻音化母音の特徴の一つである極零対¹⁾であると思われる。同様に第3ホルマント(F3)近傍の2455Hz、第4ホルマント(F4)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。鼻腔付きモデルと鼻腔無しモデルの伝達特性は3 kHzから7 kHzの間では、ほぼ一致している。このことは、この周波数領域において、鼻腔を除く主声道のみでスペクトル包絡が決定され、鼻腔の影響がほとんど無いことを示唆している。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。

表1に、声道伝達特性のF1からF4周波数および、鼻腔無しモデルのホルマント周波数を基準とした場合の鼻腔付きモデルのホルマント周波数の変化率を示す。鼻腔が口腔と結合する

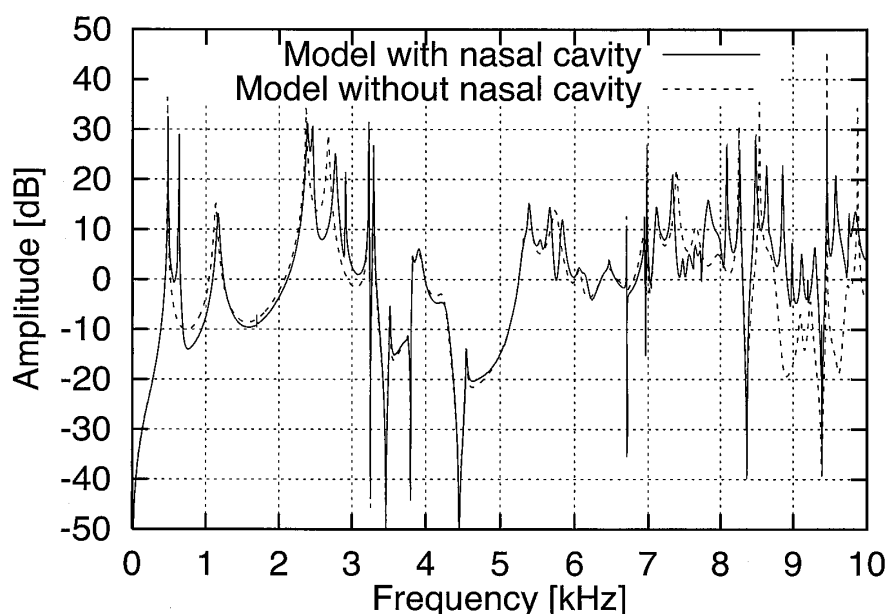


図3：剛壁の場合の声道伝達特性．鼻腔付きモデルは実線で，鼻腔無しモデルは点線で示される．

表1：声道伝達特性のF1からF4周波数 [Hz] および変化率 [%]．

	F1	F2	F3	F4
鼻腔付きモデル	488	1163	2386	2773
鼻腔無しモデル	482	1132	2369	2675
変化率	1.2	2.7	0.7	3.7

ことでホルマント周波数は高くなるが，変化する割合は大きくない．

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F1からF4周波数を求めており，それらはそれぞれ，563，1047，2578，3016Hzと示されている¹⁵⁾．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F1からF4周波数まで，それぞれ，－13.3，11.1，－7.4，－8.1%である．鼻腔付きモデルと音声データのホルマント周波数の間には大きな差が存在する．これらの差の原因の一つとして，ここでの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．

4.1.2 アクティブインテンシティ

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を図4に示す．周波数488Hzおよび1163Hzは鼻腔付きモデルのF1およびF2周波数である．639Hzおよび2455Hzは鼻腔付きモデルの声道伝達特性のみに見られたピークの周波数である．図4(a)に見られるように，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周波数によらずほぼ同じ分布となっており，大きな差は見られない．一方，図4(b)に見られるように鼻腔付きモデルの場合は，周波数によって大きく異なる分布となっている．F1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が口腔に流

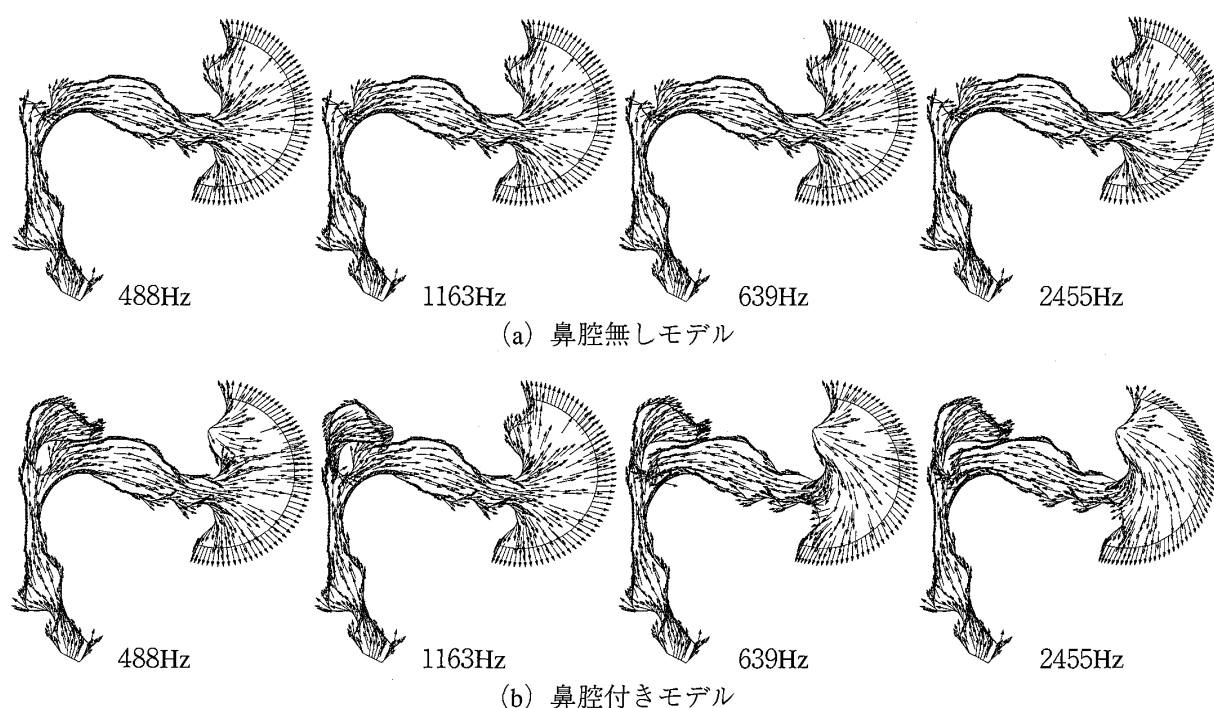


図4：剛壁の場合の正中矢状面におけるアクティブインテンシティのベクトル分布。

れ込む形になっている。639Hzおよび2455Hzでは、音のエネルギー流が鼻孔から放射し、口腔へ流れ込んでいる。これらの奇妙なエネルギー流の分布は声道モデル内を無損失とした事によりもたらされたものであると思われる。声道壁の影響については、次節で検討される。

4.2 軟壁の場合

4.2.1 声道伝達特性

軟壁の場合の声道伝達特性を図5に示す。壁が軟くなることで、鋭いピークや谷は消滅し、ホルマントの帯域幅が増加している¹⁶⁻¹⁸⁾。また、図3に見られた、639Hz、2455Hzおよび2912Hzのピークはいずれも見られない。これらのピークは、その帯域幅が増加することで、近傍のホルマントと結合したものと思われる。

表2に、声道伝達特性のF1からF4周波数および、鼻腔無しモデルのホルマント周波数を基準とした場合の鼻腔付きモデルのホルマント周波数の変化率を示す。剛壁の場合のホルマント周波数と比較して、F1、F2およびF3周波数は上昇している。音声データのホルマント周波数を基準とすると、鼻腔付きモデルのF1からF4周波数の変化率はそれぞれ、約-1.6、12.0、-6.2および-8.6%である。鼻腔付きモデルと音声データの間のホルマント周波数の差は、節4.1.1で示された剛壁の場合と比較して、F1で最も大きく減少し、F3で僅かに減少したのに対して、F2とF4では僅かに増加した。実音声との良い一致が見られないのは、壁インピーダンスを声道および鼻腔全体に一樣に分布させたことなど、実体を十分に表現できていない部分が残っているためであると思われる。

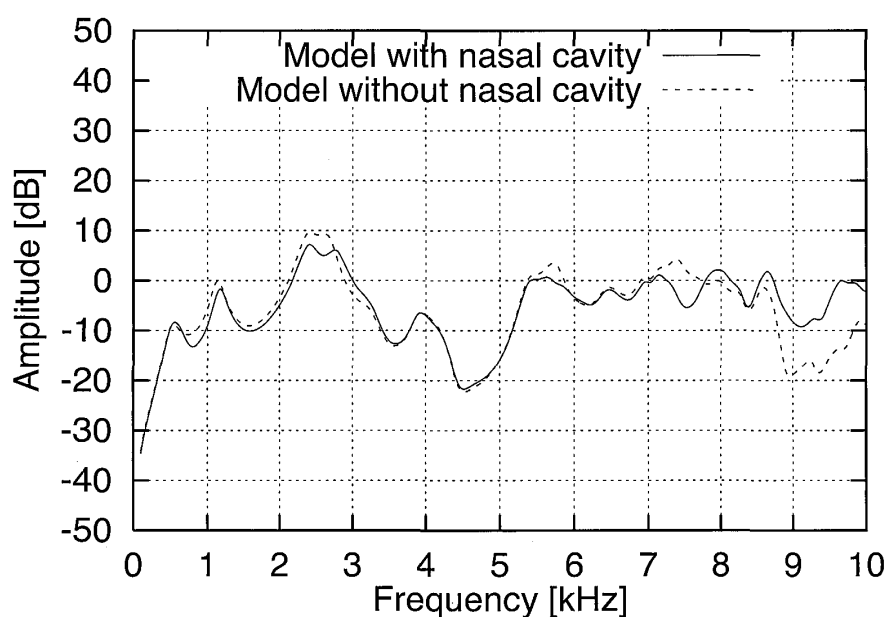


図5：軟壁の場合の声道伝達特性．鼻腔付きモデルは実線で，鼻腔無しモデルは点線で示される．

表2：声道伝達特性のF1からF4周波数 [Hz] および変化率 [%]．

	F1	F2	F3	F4
鼻腔付きモデル	554	1173	2417	2758
鼻腔無しモデル	535	1140	2418	2625
変化率	3.6	2.9	-0.0	5.1

4.2.2 アクティブインテンシティ

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を図6に示す．周波数554Hzおよび1173HzはF1およびF2周波数である．639Hzおよび2455Hzは剛壁を仮定した場合の鼻腔付きモデルの声道伝達特性のみに見られたピークの周波数である．図4(b)と比較して，鼻孔からの放射はF1では大きく減少した．F2において，剛壁の場合に見られた鼻腔から口腔へ音のエネルギー流が流れ込む様子は見られない．同様に，639Hzおよび2455Hzにおいて，3次元の放射空間から口腔へ音のエネルギー流が流れ込む様子は見られない．これらの結果は3次元形状に基づいたシミュレーションの境界条件は大きくシミュレーション結果に影響を及ぼ

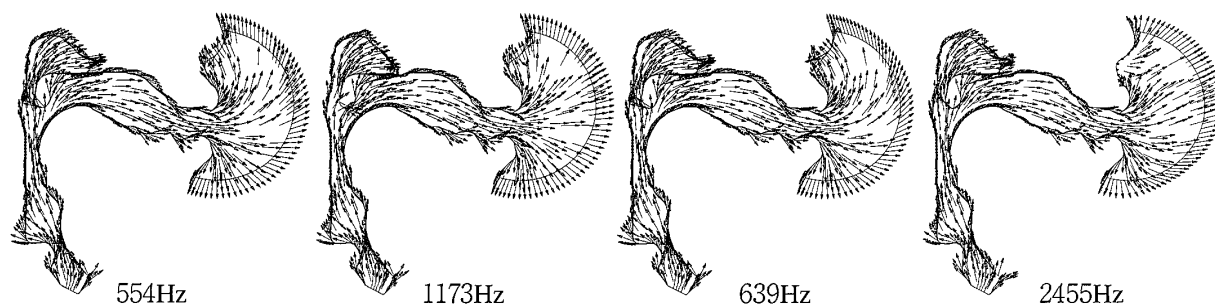


図6：軟壁の場合の正中矢状面におけるアクティブインテンシティのベクトル分布．

す事を示唆している。

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。声道壁インピーダンスの検討も行われた。

解析結果より、無損失を仮定した場合、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零が生じることが示された。しかしながら、これらのピークや零は壁が軟かい場合には見られなかった。音のエネルギー流の回転現象も壁が軟かい場合には生じなかった。スペクトル包絡における境界条件の影響として、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という現象が、3次元シミュレーションの場合においても確認できた。しかしながら、本シミュレーションと実音声のホルマント周波数には差が残る結果となった。本稿で示した結果は一人の話者のみを対象にしたものであったので、より一般的な結論を得るためには、異なる複数の話者に対して実験を行う必要がある。また、声道壁の境界条件をより実体に即した状態で与えることが今後の課題である。

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“視覚・画像・音声・言語情報処理の高度化と知的計測制御技術への応用”の支援により行われたものである。

参考文献

- 1) G. Fant : Acoustic Theory of Speech Production, Mouton, The Hague, pp. 139-161, 1970
- 2) O. Fujimura : Spectra of nasalized vowels, *MIT Res. Lab. Elect. Q. P. R.*, Vol. 58, pp. 214-218, 1960.
- 3) 竹内章司, 粕谷英樹, 城戸健一 : 鼻音性の音響関連量について, *日本音響学会誌*, Vol. 31, No. 5, pp. 298-309, 1975.
- 4) 竹内章司, 粕谷英樹, 城戸健一 : 鼻音のスペクトルに及ぼす鼻副鼻腔の影響, *日本音響学会誌*, Vol. 33, No. 4, pp. 163-172, 1975.
- 5) 竹内章司, 粕谷英樹, 城戸健一 : 鼻音性の知覚に関する 2, 3 の検討ースペクトル特徴と知覚との関係

- , 日本音響学会研究会資料, S73-09, pp.1-10, 1973.
- 6) 粕谷英樹, 田中豊秋: 鼻音化母音の知覚関連量, 日本音響学会研究会資料, S84-41, pp.319-326, 1984.
- 7) 高橋信之, 石田彰, 中井孝芳, 鈴木久喜: 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.
- 8) 榊原宏, 斎尾雅宏, 中井孝芳, 鈴木久喜: 鼻腔・副鼻腔のMRI観測とその変形による鼻道音響伝達特性の検討, 信学技報, SP96-3, pp.17-22, 1996.
- 9) H. Suzuki, T. Nakai and H. Sakakibarna: Analysis of acoustic properties of the nasal tract using 3-D FEM, *Proc. ICSLP96*, pp.1285-1288, 1996.
- 10) 幸地真史, 高橋信之, 中井孝芳, 鈴木久喜: 放射空間における口唇開口部と鼻孔開口部との音響結合を考慮した鼻音生成に関する基礎的検討, 信学技報, EA96-13, pp.9-12, 1996.
- 11) 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)*, Vol.17, No.3, pp.163-166, 1996.
- 12) K. Motoki, P. Badin and N. Miki: Measurement of acoustic impedance density distribution in the near field of the labial horn, *Proc. ICSLP94*, pp.607-610, 1994.
- 13) 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. J75-A, No.22, pp.1649-1656, 1992.
- 14) 元木邦俊: 高次モードを考慮した声道音響モデルの構成法, 日本音響学会誌, Vol.54, No.12, pp.850-856, 1998.
- 15) 北村達也, 竹本浩典, 本多清志: 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.
- 16) 鈴木誠史: 声道壁インピーダンスの検討, 日本音響学会誌, Vol.34, No.3, pp.149-156, 1978.
- 17) 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についての検討, 音講論集(秋), pp.227-228, 1989.
- 18) 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—, 日本音響学会誌, Vol.54, No.2, pp.101-110, 1998.