

タイトル	舌の4立方体モデルから得られた簡易声道形状モデルに関する有限要素法による音響シミュレーション
著者	松崎, 博季; 高野, 佐代子; 元木, 邦俊
引用	北海学園大学工学部研究報告, 35: 151-158
発行日	2008-02-00

舌の4立方体モデルから得られた簡易声道形状モデルに関する有限要素法による音響シミュレーション

松崎博季*・高野佐代子**・元木邦俊*

Acoustic Simulation by FEM of Simple Vocal-Tract Geometrical Model Obtained from 4-Cube Tongue Model

Hiroki MATSUZAKI*, Sayoko TAKANO** and Kunitoshi MOTOKI*

要旨

筆者らは人間の音声生成機構を模擬する舌および音響モデルの作成を目指している。これまでに磁気共鳴映像法（MRI）による発声時の舌の内部変形運動の計測を行い、さらにその運動特徴の実現を目指して4立方体舌形状モデルで舌の調音運動/ei/のシミュレーションを有限要素法（FEM）により行った。本稿では舌の調音運動/ei/のFEMシミュレーションの結果を用いて簡易声道モデルを作成し、時間的に変化する声道モデルの音響特性をFEMにより求めた。実際の人間の音声/e/および/i/の特徴と比較した結果と今後の課題について報告する。

1. はじめに

人間の発話機構は、舌や唇などが適切に変形し、声道の音響特性が変化することによって実現されている。このような人間の発話機構を模擬したロボットに人間のように発話させるためには、音声生成器官としての舌の調音運動の解析とこれを実現する舌筋の筋活動との関係を明らかにすることに加え、調音器官の運動によって変化する声道の音響特性を保証する必要がある。

近年、磁気共鳴画像装置などに代表される医療機器による体内器官の計測技術の発達に伴い、音声生成器官としての舌の調音運動の解析が盛んに行われている。高野らは運動する物体に格子状の陰影（タグ）を付加できるTagged-MRIを用いて、発話時の舌の内部変形の様子を調べている。母音連鎖/ei/の調音過程を撮像した結果、部分的に異なる立体的な運動が見いだ

* 北海学園大学工学部電子情報工学科

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

**ATR認知情報科学研究所 / ATR-Promotions BAIC

**ATR Cognitive Information Science Laboratories / ATR-Promotions BAIC

され、これまでに考えられてきた外舌筋の効果だけでなく、内舌筋（横舌筋）の関与が推察されている¹⁾。

この推察を確かめるために、筆者らは4立方体からなる簡易舌形状モデルを用いて/ei/の舌変形過程のシミュレーションをFEMで行なった結果、Tagged-MRIから得られた結果と非常に良く一致するシミュレーション結果が得られた²⁾。これらの観測結果とシミュレーション結果は、/e/から/i/の発話過程に横舌筋の関与があることを強く示唆している。以上のように、舌の変形過程のシミュレーションで舌筋の役割の一部を確認することができたわけであるが、このシミュレーション結果が/ei/という発話の音響的特徴に一致しているのかどうかは明らかではない。そこで、本稿ではこの4立方体簡易舌形状モデルとそのシミュレーション結果を用いて簡易声道形状モデルを作成し、有限要素法により音響解析を行った結果を報告する。

2. 4立方体舌形状モデル²⁾

4立方体舌形状モデルとその変形シミュレーションの概要を以下に述べる。舌変形シミュレーションモデルには文献3)のモデルを用いた。4立方体舌形状モデルの有限要素メッシュを図1に示す。4立方体舌形状モデルは1辺が4cmの立方体四つで構成されている。網掛けの面は固定されている。調音を行う舌筋として下段要素内で前後方向に収縮するオトガイ舌筋の後東部（Genioglossus muscle posterior, GGp）と、下段前方から上段後方方向に収縮するオトガイ舌筋の中東部（Genioglossus muscle middle, GGm）を仮定した。このGGpとGGmの筋収縮で

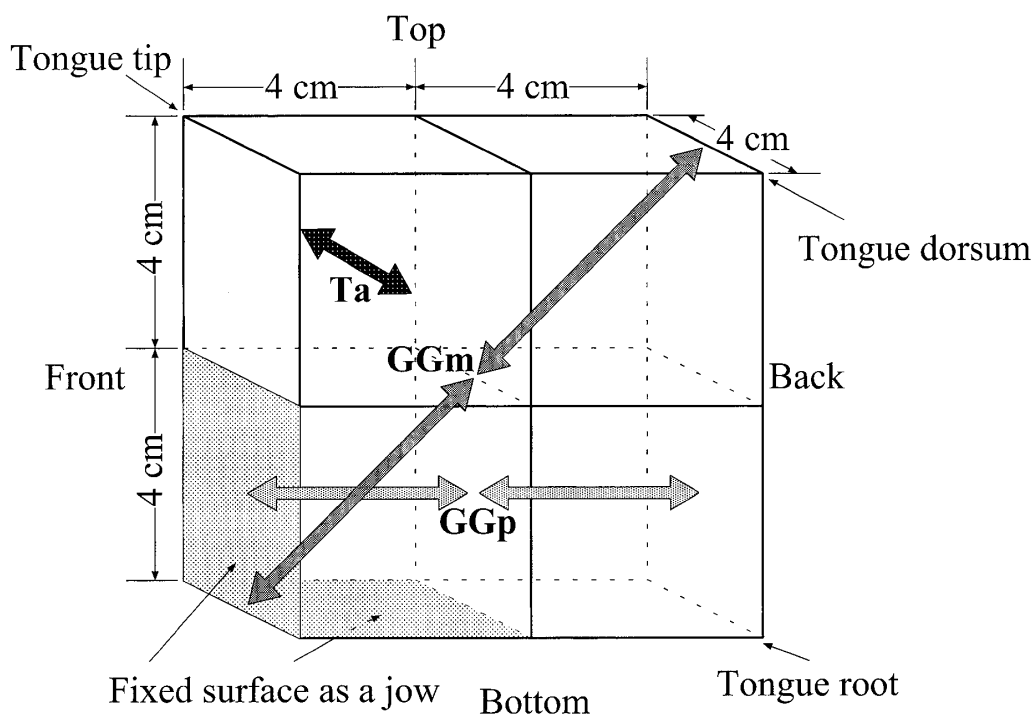


図1：4立方体舌形状モデルの有限要素メッシュ。

行った舌変形シミュレーションをGGp+GGmと呼ぶことにする。さらに、横舌筋の前束部 (Transverse anterior, Ta) の関与を確認するため、GGp+GGmに加えて上段前方要素内に横方向に収縮するTaがある場合でも同様にシミュレーションを行った。これをGGp+GGm+Taと呼ぶことにする。舌筋はいずれも図2に示す活性化関数，すなわち0から50 msecまで0から線形に最大値まで，その後，1 secまで最大値を保ったままで活性化した。以上の条件のもとで得られたシミュレーション結果の一例を図3に示す。

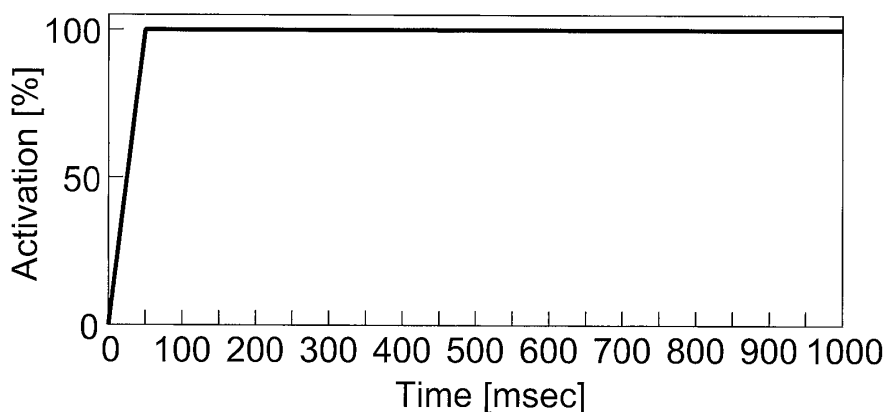


図2：舌筋の活性化関数.

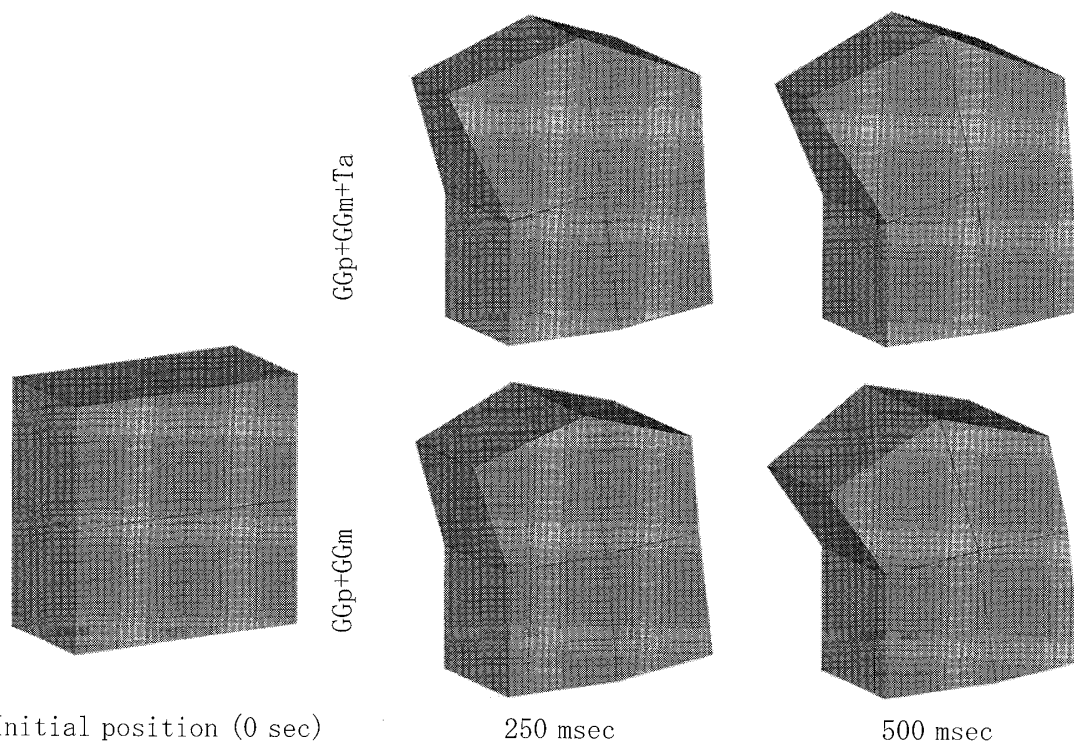


図3：4立方体舌形状モデルを用いた舌変形シミュレーション結果の一例。左側が舌前方，右側が舌後方。

3. 4立方体舌形状モデルの計算結果を利用した声道形状モデルとシミュレーション

3.1 声道形状モデル

4立方体舌形状モデルの変形シミュレーションの結果を元に3次元声道形状モデルを作成した。4立方体舌形状モデルの変形シミュレーションでは初期状態の母音を/e/、1 sec後の母音を/i/と仮定している。文献4)の母音/e/および/i/の断面積関数を参考にして、初期状態の声道形状を決定した。声道断面は簡単のため矩形とした。初期状態における声道形状モデルの側面図を図4に示す。網掛け部分は4立方体舌形状モデルを示す。声道断面の横幅は図4の斜線部分を除く全ての部分を4立方体舌形状モデルと同じ4 cmとした。斜線分の横幅は1.2 cmである。太線は固定面を示す。下唇部を含む点線で囲まれた部分は形を保ったまま垂直上方のみに移動するとした。破線は声道形状モデルの声道長を求めために仮定した中心線で、長さは20.255cmである。この声道長が一般的な成人男性の声道長よりかなり長いのは、4立方体舌形状モデルの大きさが、一般的な成人男性の舌の大きさよりも大きい事による。舌前方と下顎の間に大きな空間があるが、これは舌端の前方への移動を受け入れるために設けたものである。

4立方体舌形状モデルのシミュレーション結果からの10msec毎の各節点の座標値を求め、

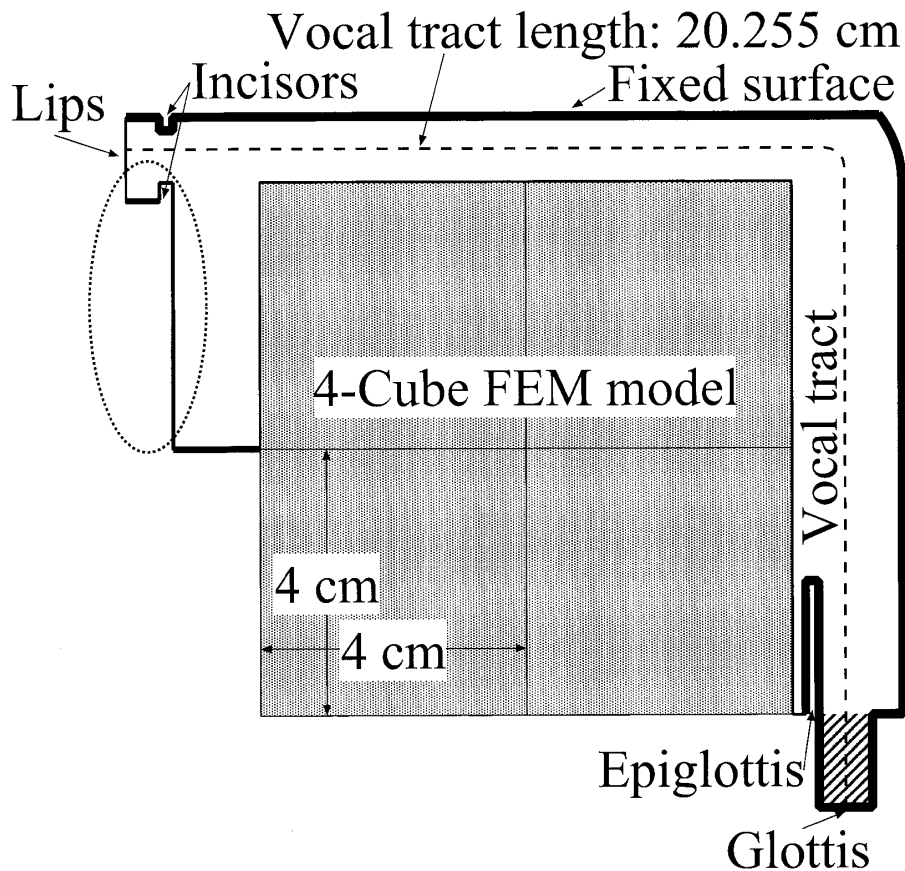


図4：4立方体舌形状モデルを元に作成した声道形状モデルの側面図。

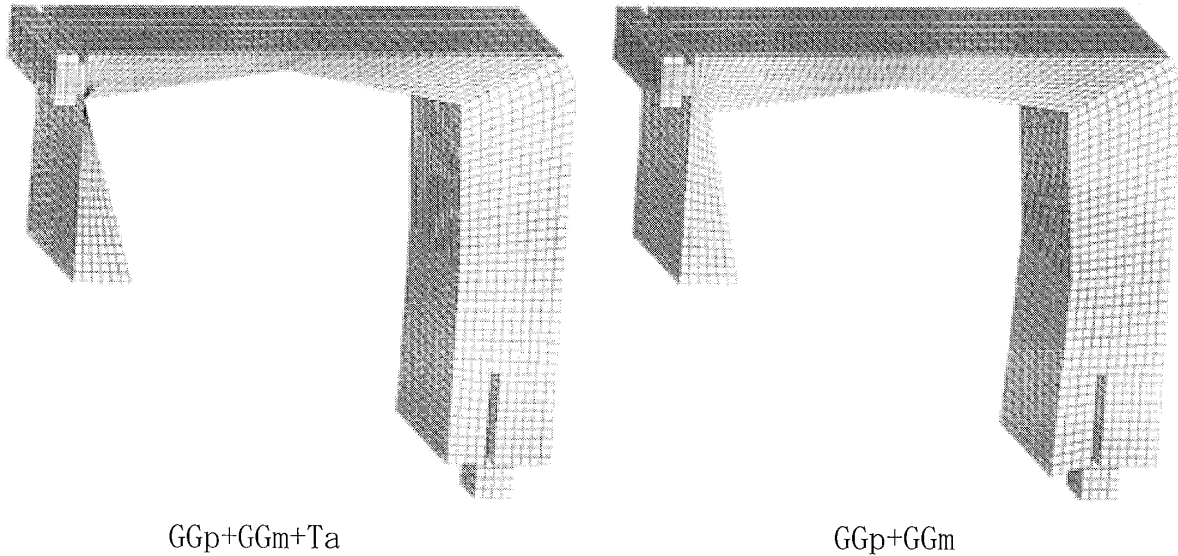


図5：1 sec後の声道形状モデルの斜視図。

初期状態の声道形状モデルに適用することで、声道形状モデルを作成した。1 sec時の声道形状モデルの斜視図を図5に示す。

各時刻の声道形状モデルは全て、6面体1次要素で要素分割されており、節点数は25921、要素数は21960である。

3.2 有限要素シミュレーション

音響シミュレーションには、3次元のFEMを適用した速度ポテンシャルの定常状態における波動方程式を用いた。駆動面としての声門を正弦波で駆動した。声道壁は全て剛壁と仮定した。口唇端には、口唇端と同じ断面積の円形振動板を持つ半径8.5cmの球形バツフルの比音響インピーダンス⁵⁾を境界条件として与えた。シミュレーションは、各時刻毎に駆動周波数10Hzから5kHzまで10Hzおきに行った。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。

4. シミュレーション結果および考察

声道伝達関数 $H(\omega)$ を次式で定義される計算式より計算した。

$$H(\omega) = 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{A_r}{n_r} \sum v_r(\omega)}{\frac{A_d}{n_d} \sum v_d(\omega)} \right| \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 $v_d(\omega)$ および $v_r(\omega)$ は駆動面と口唇端断面上の粒子速度の垂直方向成分である。 A_d および A_r は駆動面と口唇端の断面積である。また、 n_d および n_r は駆動面と口唇端の節点数である。声道伝達特性および変形シミュレーションから得られた舌の各点の位置の時間変化を図6と図7に示す。図6はGGp+GGm+Taの場合を、図7はGGp+GGmの場合を示し

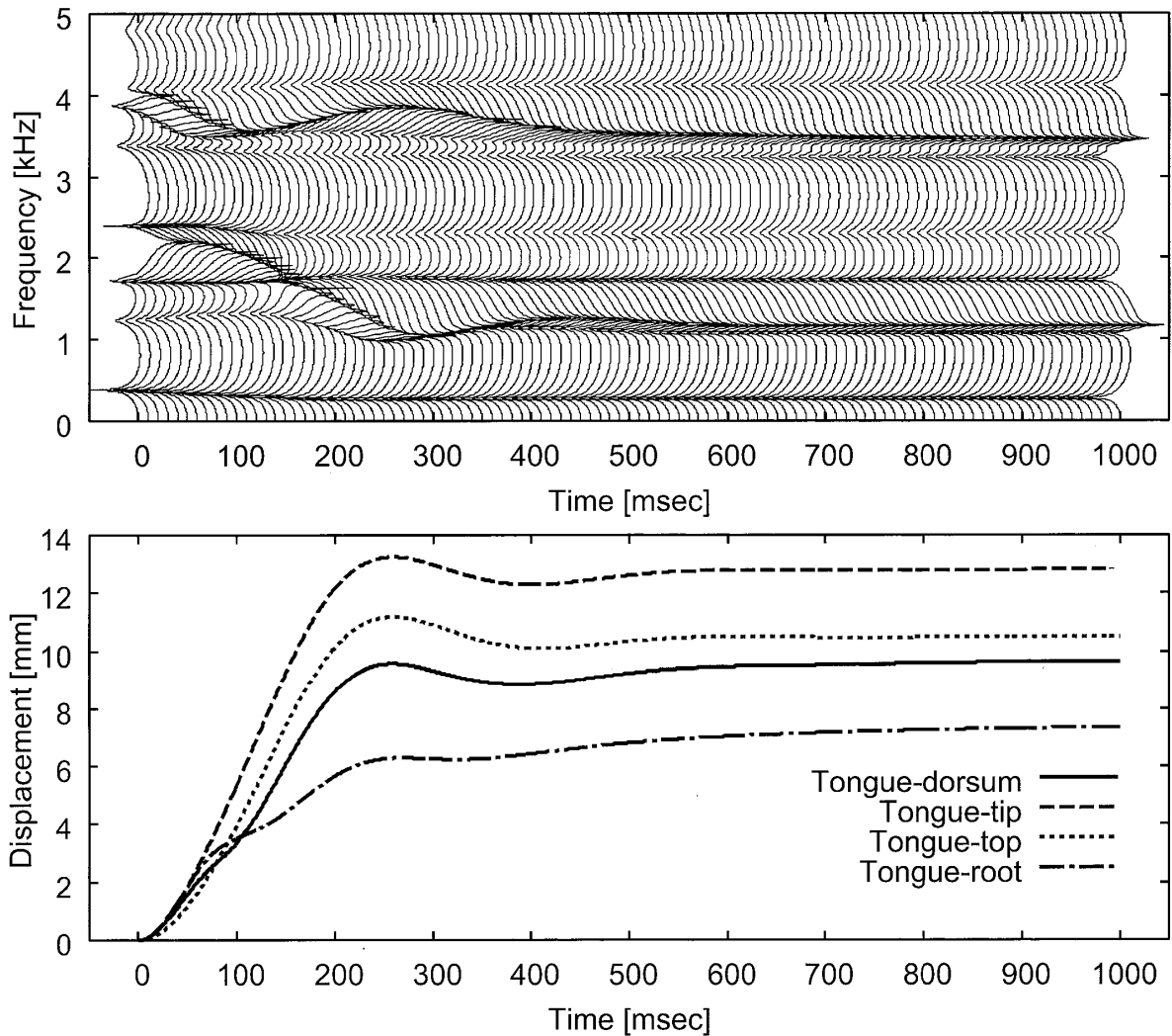


図6：GGp+GGm+Taの場合．声道伝達特性および変形シミュレーションから得られた舌の各点の位置の時間変化．

ている．また，初期状態（0 sec）と1 secにおける，第1から第4ホルマント周波数（F1～F4），および最初の二つの零周波数（Z1，Z2）を表1に示す．

一般に/i/のF1は/e/よりも低く，/i/のF2は/e/よりも高い．1 secの状態は/i/を仮定しているため，F1は0 secの状態よりも低く，F2は高くなっていることが望ましい．表1より，F1はGGp+GGmおよびGGp+GGm+Taいずれの場合にも，0 secの状態よりも低域に移動している．その移動量はGGp+GGm+Taの場合の方が大きい．これはGGp+GGmの場合と比べて良好な結果であると考えられる．一方，F2においては，GGp+GGmの場合は約3%の高域への移動が見られるが，GGp+GGm+Taの場合は低域に移動している．/i/は前舌部が上昇することにより，舌の左右が硬口蓋に接触して舌の正中にほぼ均一な幅の導管（舌正中溝）を作る⁴⁾が，本モデルの場合，舌中央部の窪みは考慮されていない．また，図5に示したGGp+GGm+Taの声道形状モデルからも明らかな通り，硬口蓋が直線形状をしているため，硬口蓋中央付近に狭

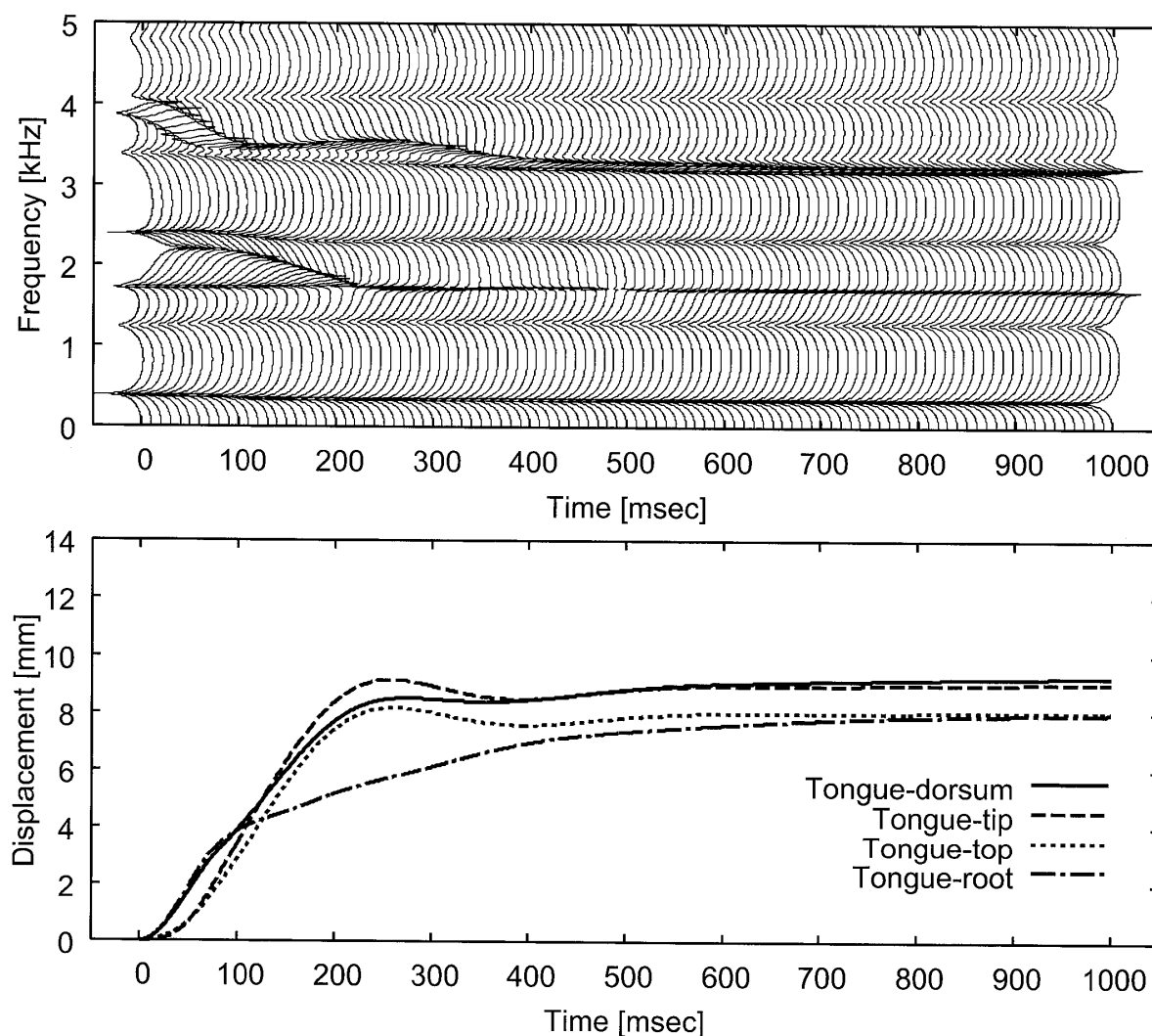


図7：GGp+GGmの場合．声道伝達特性および変形シミュレーションから得られた舌の各点の位置の時間変化

めが作られてしまう．このような形状では，舌正中溝の有無が音響特性に大きく影響を与える可能性がある．以上の事からGGp+GGm+Taの場合，F2の高域への移動が生じなかったと思われる．

F3とF4はGGp+GGm+TaとGGp+GGm間での差が小さい．特に，F3は両者とも0 secと1 secで同じ値となっている．

零が3 kHz以下の低域に生じている．これは舌前方と下顎の間にできた空間が分岐となって生じていると考えられる．実際にはこれほど大きな空間は存在しないので，形状の改善が必要である．

ホルマントの移動と比べると，零の移動は大きい．零の移動は変形シミュレーションから得られた舌の各点の位置の時間変化と類似性があることがわかる．さらに，位置の移動量の大きいGGp+GGm+Taのほうが零の移動量も大きい．

表1. 第1～第4ホルマント周波数 (F1～F4)[Hz]と最初の二つの零周波数 (Z1, Z2)[Hz].

	0 sec	1 sec	
		GGp+GGm+Ta	GGp+GGm
F 1	380	280	330
F 2	1240	1070	1280
F 3	1730	1730	1730
F 4	2390	2300	2320
Z 1	2220	1170	1690
Z 2	4010	3450	3220

5. まとめ

4立方体簡易舌形状モデルとその/ei/変形のシミュレーション結果を用いて作成した簡易声道形状モデルの音響解析をFEMにより行った結果を報告した。声道形状モデルの大きさが一般の成人男性よりも大きいことや、硬口蓋にあたる部分の形状が実体をうまく表現していないなどの問題点があり、シミュレーション結果も良好であるとは言えなかった。今後は4立方体簡易舌形状モデルおよびそのシミュレーション結果を実際の舌の大きさに適合させ、さらに、硬口蓋などの形状もMRI画像からトレースしたものをを用いるなどして、より実体に即した声道形状モデルを作成して実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成19年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号18300069)、平成18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。舌モデル構築に御支援いただいたNTTコミュニケーション科学基礎研究所に感謝致します。

参考文献

- [1] Sayoko Takano, Kiyoshi Honda, "Measurement of tissue deformation in the tongue during a vowel sequence /ei/ using tagged-cine MRI," Proc. 7th International Seminar on Speech Production, pp. 443-450, 2006.
- [2] Sayoko Takano, Hiroki Matsuzaki and Kunitoshi Motoki, "A four-cube FEM model of the extrinsic and intrinsic tongue muscles to simulate the production of vowel /i/," Proc. Interspeech2007, TuC. 02-3, pp. 62-65, 2007.
- [3] Reiner Wilhelms-Tricarico, "Physiological modeling of speech production: Methods for modeling soft-tissue articulators," J. Acoust. Soc. Am. (5), Pt. 1, pp. 3085-3098, 1995.
- [4] 千葉勉, 梶山正登, "母音-その性質と構造- (杉藤美代子, 本多清志訳)," 岩波書店, 2003.
- [5] P. M. Morse and K. U. Ingard, "Theoretical Acoustics," McGraw-Hill, pp. 332-356, 1968.