

有限要素法による母音発声時の三次元声道内音圧分布の推定

新川拓也 川野恵理 松村雅史

大阪電気通信大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

〒572-8530 大阪府寝屋川市初町18-8

あらまし 本稿では、有限要素法を用いて、MRIにより計測した三次元声道形状から音圧分布と伝達特性の推定を行った。被験者は成人男性1名で、母音 /a/ を対象に行った。MR撮像可能な歯冠プレートを着用して撮像した歯冠部を含む冠状面MR画像から、濃度補間により複数の矢状断面を推定する。それぞれの画像から声道輪郭を抽出し、三次元声道形状を推定した。この三次元声道形状に対し四面体要素で分割し、節点数3185の有限要素モデルを構築する。波動方程式を基本方程式とした有限要素解析を行い、三次元声道内音圧分布を推定し、波面の可視化を行った。その結果、高い周波数では、声道内を平面波伝搬していないことが示された。また、声道伝達特性を計算してホルマント周波数を推定し、実音声の線形予測分析結果と比較した結果、誤差は第2ホルマントを除いて8%以内であった。

キーワード 音声生成過程, 有限要素法, MRI, 三次元声道形状, 音圧分布, 声道伝達特性, ホルマント

1. まえがき

音声分野では、音声生成過程、音声分析・処理、音声合成、音声認識など基礎から応用に至る種々の研究が行われている。特に、人間が音声言語を発声するメカニズムの解明とそのモデル化は、音声研究の最も基礎的なテーマである。

このような音声言語生成過程の研究成果は工学的分野だけでなく、医療現場においても有用である。例えば、発話疾患を持つ人が正しい発音を行うためには、言語治療士の指導の下で発話訓練を行う。このような場合、熟練した言語治療士が患者の発声する音声信号を耳で聞き取りながら、自身の経験に基づいて治療を行うことが一般的である。これらを効率よく的確に行うためには、発声中の声道（声帯から口唇までの音波が伝搬する空間）の形状および伝達特性の推定が必要不可欠である。

声道伝達特性を推定する具体的な手法として、声道を異なる断面を持つ様な音響管の従属接続で近似したモデルを用いることが一般的である。この場合、等価音響管の断面積を口唇、あるいは声門からの距離の関数とした、いわゆる声道面積関数が調音

パラメータとなる。さらに、音響管モデルは音波の伝搬に平面波を与えることを仮定としており、伝搬経路によって断面積の値が異なる問題を含んでいる。また、声道本来の複雑な三次元形状には直接対応していない。

これら諸問題を解決することを目的として、より精密な声道伝達特性を得るために有限要素モデルを用いた解析（Finite Element Method : FEM）が試みられている^{[1]-[4]}。しかし、モデルの殆どが声道断面をそれぞれの面積に等しい円、もしくは楕円近似したものを用いており、実声道の形状を考慮したものは極めて少ない。

近年、X線や磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging : MRI）を用いた三次元声道形状の計測が行われ、精密な声道形状の推定結果がいくつか報告されている^{[5][6]}。

堤らは、X線を用いて計測した正中面の実声道輪郭データを基にして、構成した三次元声道形状を有限要素モデルに適用した^[7]。しかし、声道断面を部分的に楕円および矩形で近似しており、かつ左右対称としていることなど、いくつかの検討課題がある。

本稿では、三次元MR画像から推定し再構成した実際の三次元声道形状モデルを用いて、有限要素法

による声道内音圧分布の推定を行う。また、声道伝達特性を推定し検討を加える。

2. 三次元声道形状の計測

本研究では、超伝導MRIシステム(MAGNEX100HP, 島津製作所, 静磁場強度: 1.0T, 対象核種: プロトン)を利用して計測した三次元MR画像を用いて三次元声道形状を計測する。なお、このMR画像は、被験者に、MRIで撮像可能な歯冠プレートを着用させて、実音声と共に計測する。なお、被験者は発話疾患の無い健康な男性1名である。

まず、冠状面マルチスライスMR画像から濃度補間を用いて、正中断面を含む矢状断面画像を4[mm]間隔で推定する。この矢状断面像に対し二値化処理を行い、矢状断面の声道輪郭を抽出する。これら隣り合った声道輪郭線をスプライン関数で補間し、三次元声道形状を計測する。母音/a/発声時の三次元声道形状を図1に示す。

3. 有限要素法による三次元声道内音圧分布の推定

三次元声道の音圧分布、音響特性を推定するために、音響空間(声道)を有限個数の要素の集合体として近似し、波動方程式の数値解を計算する。

音場における速度ポテンシャルを ϕ とすると、波動方程式は式(1)のように表現される。

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



図1 MRIで計測した三次元声道形状
Fig.1 Three-dimensional vocal tract shape.

ここで、 $k = \omega / c$ で、 ω は角周波数、 c は音速である。 ϕ を求めることにより音圧 p および粒子速度 v が式(2)、(3)で求めることができる。ただし、 ρ は大気密度である。

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

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

三次元声道形状に対応する音響空間の境界条件は、声門は完全閉鎖、声道壁には壁面インピーダンスを与える。なお、口唇での放射インピーダンス Z は無限大バツフル内の等価ピストン円からの放射として、式(4)を適用する。

$$Z = \frac{\rho c}{A_l} \left(\frac{(ka)^2}{2} + j\frac{8ka}{3\pi} \right) \quad (4)$$

ここで、 $a = \sqrt{A_l / \pi}$ で、 A_l は口唇における放射断面積である。また、声門を駆動面とし、その面に平面波を入力音源として与える。

推定した三次元声道形状を四面体で分割し、節点数3185で有限要素モデルを構築する。要素分割した三次元声道モデルを図2に示す。この有限要素モデルに基づき、波動方程式の数値解を計算することにより、三次元声道内音圧分布が求まり、駆動面での入力音源の周波数を変えることにより、声道伝達関数が推定できる。

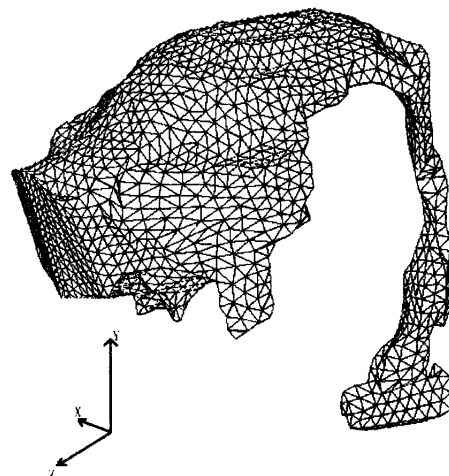


図2 三次元声道の有限要素モデル(/a/)
Fig.2 Finite Element Model of vocal tract.

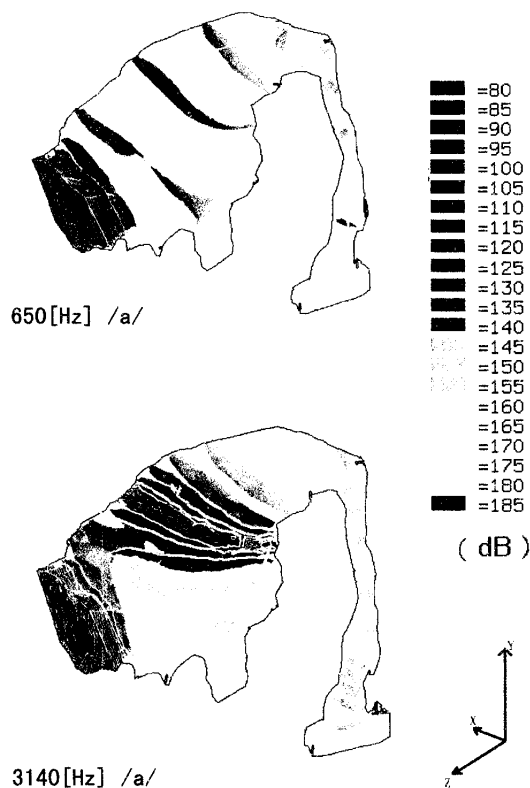


図3 三次元声道内音圧境界面の推定結果(/a/)
Fig.3 Sound pressure distribution in three-dimensional vocal tract(vowel:/a/).

4. 推定結果

4.1 音圧分布

駆動音源の周波数が、650[Hz]と3140[Hz]の音圧境界面を推定した結果を図3に示す。高い周波数では、音圧境界面は平面になっておらず、声道内を平面波伝搬していないことが示された。

また、650[Hz]と3140[Hz]では境界面の形状が異なり、音波の伝搬経路の違いが示された。特に高い周波数では、舌下部の空間形状が音波の伝搬に強く影響する可能性が示された。

4.2 声道伝達特性

有限要素モデルから周波数解析を行って得られた声道伝達特性と、MRI計測時に同時に録音した音声データを10次の線形予測分析により推定したスペクトル包絡線を図4に示す。

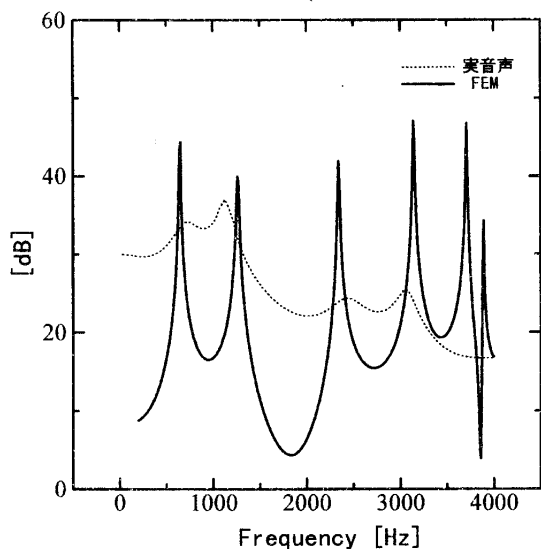


図4 声道伝達特性(/a/)
Fig.4 Vocal tract transfer characteristics (vowel:/a/).

スペクトル形状は、実音声と比較して大局的に一致した結果となった。実音声から推定したホルマント周波数と三次元声道形状の有限要素解析から推定した結果と比較した。その結果、/a/において誤差は第2ホルマントを除いて8%以内であり、概ね良好な結果が得られた。よって本手法の有効性が示された。

5. あとがき

本研究では、MR画像より再構成した三次元声道モデルから、有限要素法を用いて音圧分布の可視化を行った。その結果、音波は高い周波数では平面波伝搬していないことが示された。また、声道伝達特性の推定を行った。推定結果と実音声のスペクトルを比較し、本研究の有効性を示した。

今回、音源を定速度運動で駆動インピーダンスを無限大と仮定したが、実際は完全な定速度運動ではない。今後はこれらを課題として解析を行う必要がある。

本研究は、実際の声道形状の複雑さ、左右非対称性を考慮して声道内の音圧分布および伝達特性を推定している点に特徴がある。現在、他の言語でも同様にデータ収集を行い、解析を進めている。

参考文献

- [1] K. Aoyama, H. Matsuzaki, N. Miki, and Y. Ogawa: "FEM Analysis of Three-Dimensional Vocal Tract Model with Branches", Third Joint Meeting of Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2PSC10, pp851-854. (1996.12)
- [2] 鈴木久喜, 中井孝芳, 高橋信之, 石田彰: "声道の音響管モデルの3次元有限要素法によるシミュレーション", 信学技報, EA93-8, (1993.5)
- [3] 石田彰, 高橋信之, 中井孝芳, 鈴木久喜: "声道音響管モデルの三次元有限要素法によるシミュレーション (唇からの放射空間の効果)", 日本音響学会講演論文集, 3-P-30, pp341-342. (1993.10)
- [4] 松崎博季, 三木信弘, 小川吉彦, : "3-DFEMによる声道の放射空間付き楕円近似音響管モデルに関する一考察", 信学技報, SP95-113, pp33-38. (1996.1)
- [5] 松村雅史, 新川拓也, 清水公治, 橋本泰嗣, 森田龍彌: "MRIによる歯冠部を含む声道と鼻腔の三次元形状の計測", 電気学会論文誌C, 114巻11号, pp1067-1072. (1994)
- [6] 横山徹, 三木信弘, 小川吉彦: "3次元声道形状モデルの構築法", 日本音響学会講演論文集, 2-P-18, pp337-338. (1995.9)
- [7] 堤一男, 加川幸雄: "声道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, pp101-110. (1998)