

Title	有限要素法による3次元声道伝達特性の推定に関する研究
Author(s)	富山, 慶一
Citation	
Issue Date	2000-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1365
Rights	
Description	Supervisor:赤木 正人, 情報科学研究科, 修士

修士論文

有限要素法による 3 次元声道伝達特性の推定に関する研究

指導教官 赤木正人 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究学科情報処理学専攻

富山 慶一

2000 年 2 月 15 日

要旨

本研究では種々の声道形状から有限要素法 (FEM) によりスペクトルをシミュレートすることで、声道形状と音声スペクトルとの関係を導く手がかりをみつけることを目的とする。声道形状が大きく異なる例として、MRI 撮像法により得られた日本語母音 /i/ 発話時における健常者 (normal) と舌切除症例患者 (abnormal) の声道構造データが得られている。異常例は健常例と比較して複雑な形状をしており、この 3 次元的に複雑な声道構造によるスペクトルへの影響が存在する。有限要素法はそのような問題を扱ううえで、有効なシミュレーションである。

まず最初に、有限要素法を扱うためにモデルの要素分割と計算精度の比較を行った。次に、日本語母音 /i/ を発話する場合には、声門付近での構造よりも舌付近での構造的特徴の違いがスペクトルに影響するものと考え、健常例と異常例での声道長及び声門付近のデータを統一した。最後に、MRI 撮像法より得られた健常例 1 つと異常例 4 つの舌付近だけの声道断面積データと断面形状を用いて、推測した声門付近のデータと合わせて声道近似モデルを作成し、有限要素法での解析を行った。それぞれのモデルでのシミュレーション結果から、実音声分析結果と比較してホルマント周波数の位置の傾向などが近似していた場合に、その声道構造の特徴とスペクトルとを比較することで、舌付近での「せばめの位置」がスペクトルに強く影響することがわかった。ここで断面積変化のみを考慮した 1 次元と同等のモデルでは、シミュレーション結果が実音声分析結果に近似できなかったものに関して、モデルの修正を行った。これにより、声道構造がより複雑な場合には、断面積変化だけではなく、その複雑な断面形状を考慮しなければならないことがわかった。

本研究により、日本語母音 /i/ 発話時における声道近似モデルをシミュレートした結果から、断面積変化だけで音声分析結果に近似するモデルにおいて、その構造的特徴とスペクトルとの関係を一部解明することができた。

目次

1	緒論	1
1.1	研究の背景・目的	1
1.1.1	声道形状と音声スペクトルの関係	1
1.1.2	合成音声の自然性について	1
1.1.3	口腔疾患による異常構音について	2
1.1.4	3次元解析の必要性	2
1.1.5	研究の目的	2
1.2	本研究の特色	3
2	有限要素法による数値実験（理論）	4
2.1	有限要素法の特徴	4
2.2	有限要素法の精度	4
2.3	波動方程式	6
2.4	連立方程式の解法	7
2.5	粒子速度	8
3	有限要素法の要素分割と計算精度	9
3.1	はじめに	9
3.2	音響管理論	9
3.3	有限要素モデル	9
3.4	シミュレーション条件	11
3.5	シミュレーション結果	11
3.6	考察	11
4	声門付近の構造的特徴とスペクトルとの関係	13
4.1	はじめに	13

4.2	声道断面積データから作成したモデル (Raw Data Model)	15
4.3	声道長を一定にしたモデル (Constant Length Model)	15
4.4	声門付近を単純化したモデル (Proposed Model)	16
4.5	声門付近の断面積の違いによるスペクトルへの影響	16
4.6	考察	17
5	舌付近の断面積変化とスペクトルとの関係	31
5.1	はじめに	31
5.2	健常例 (Normal-1)	32
5.3	症例	32
5.3.1	Abnormal-1	32
5.3.2	Abnormal-2	32
5.3.3	Abnormal-3	33
5.3.4	Abnormal-4	33
5.4	構造的特徴が同じで断面積の違う症例	33
5.5	構造的特徴の異なる症例	34
5.6	考察	34
6	モデルの修正	51
6.1	はじめに	51
6.2	声門付近と舌付近での断面積比の修正 (Abnormal-4)	51
6.3	舌付近の断面形状の修正 (Abnormal-2)	52
7	結論	59
7.1	本研究の成果	59
7.2	今後の課題	60

目次

3.1	F.E.Model of Straight tube	10
3.2	Frequency Response of Straight tube	12
4.1	Vocal Tract Shape of Normal and Abnormal	14
4.2	RawData Vocal Tract	18
4.3	F.E.Model of RawData Vocal Tract	19
4.4	Frequency Response of RawDataModel	20
4.5	Constant Length Data ($l = 14[cm]$)	21
4.6	Frequency Response of Constan Length Data (Normal)	22
4.7	Frequency Response of Constant Length Data (Abnormal)	23
4.8	Proposed Model Data	24
4.9	Frequency Response of ProposedModel (Normal)	25
4.10	Frequency Response of ProposedModel (Abnormal)	26
4.11	Proposed Model Data (Normal), $l = 0 \sim 4[cm]$: (1) $r = 1.3[cm]$, (2) $r =$ $1.5[cm]$, (3) $r = 1.1[cm]$	27
4.12	Proposed Model Data (Abnormal), $l = 0 \sim 4[cm]$: (1) $r = 1.3[cm]$, (2) $r = 1.5[cm]$, (3) $r = 1.1[cm]$	28
4.13	Frequency Response of ProposedModel (Normal)	29
4.14	Frequency Response of ProposedModel (Abnormal)	30
5.1	Proposed Model Data of Normal-1	36
5.2	Frequency Response of Normal-1	37
5.3	Proposed Model Data of Abnormal-1	38
5.4	Frequency Response of Abnormal-1	39
5.5	Proposed Model Data of Abnormal-2	40
5.6	Frequency Response of Abnormal-2	41

5.7	Vocal Tract Shape of Abnormal (a:front tongue - d:back tongue)	41
5.8	Proposed Model Data of Abnormal-3	42
5.9	Frequency Response of Abnormal-3	43
5.10	Proposed Model Data of Abnormal-4	44
5.11	Frequency Response of Abnormal-4	45
5.12	Proposed Model Data of Abnormal-3 and Abnormal-4	46
5.13	Frequency Response of Abnormal-3 and Abnormal-4	47
5.14	Proposed Model Data of Abnormal-1 and Abnormal-3	48
5.15	F.E.Model of Abnormal-1 and Abnormal-3	49
5.16	Frequency Response of Abnormal-1 and Abnormal-3	50
6.1	Proposed Model Data of Abnormal-4	54
6.2	Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-4	55
6.3	F.E.Model of ProposedModel at Abnormal-2	56
6.4	Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-2	57
6.5	Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-2	58

第 1 章

緒論

1.1 研究の背景・目的

1.1.1 声道形状と音声スペクトルの関係

同じ音声を発話する場合にも、個人によって、また、口腔障害による構音障害によって、その音声スペクトルはそれぞれに異なった特徴をもっている。このスペクトルを特徴づける要因の一部が声道の構造的特徴にあると考えられていることから、声道形状と音声スペクトルとの関係を調べることは重要である。

音声スペクトルから声道形状を推定するという事を考えると、これは一対多の問題であるので不可である。そこで、それぞれに異なる構造的特徴からスペクトル形状への影響を調べることで、声道形状と音声スペクトルとの関係を導き出すことが重要となる。

1.1.2 合成音声の自然性について

近年音声技術の進歩と多様化により、合成音に対してより人間に近い音声やより自然で聞きやすい音声を求める動きがある。音声生成時の声道形状やそれらに起因する個人性などの情報が無視できなくなっているが、現在の等価音響管で記述されるようなモデルやLPCで得られる情報だけでは不十分であり、音声生成のメカニズムの解明、特に実声道形状と音響的特徴の関連性に関する研究の必要性が高まってきている。

声道は喉頭部で発声された音波が伝搬する管状の空間で、そのときの管の長さや形によって特有の共振現象が起こり、管の共振周波数に近い周波数成分が強められて、様々な音韻となって音声が発せられる。つまり、声道では、舌、下顎、唇などの器官を動かすことにより、特定の声道形状を作り、言語的情報や、人間らしい音声の要素（自然性）発

声者特有の情報（個人性）などの多くの重要な情報が付加されて、音声として唇から放射される。したがって、声道の構造が音声生成時に果たす役割を解明することが重要となってきた。

1.1.3 口腔疾患による異常構音について

口腔領域の疾患あるいはその後遺症によって、しばしば言語障害が生じる。この言語障害に関する研究として高木、林らの研究報告 [1] [2] により構音障害の特徴が明らかになってきた。しかし、構音動態と音響的特徴との関連に関する研究は十分とはいえない。特に口腔癌術後症例においては舌、口底の欠損と運動障害により構音障害を生じ、健常例と比較してその声道形状は舌付近において大きく異なる。また各症例を比較した場合にも一定した傾向はなく、症例毎に違いが大きい。そこで構音障害の診断を明確に行うためには構音器官の形態を明確にし、声道構造と構音に密接に関係のある音響的な特徴との関連性について導き出すことが重要となっている。

1.1.4 3次元解析の必要性

音波は声道内を3次元的に伝搬するので、3次元解析によってのみえられるような音響的特徴量が存在すると思われる。斎藤らにより日本語母音/i/発音時に核磁気共鳴画像（MRI）撮影から得られた断面積データから声道音響管モデル（1次元モデル）の解析結果と実音声分析結果とを比較したものがあある [3]。この結果では健常例のモデルにおいては実音声分析結果と比較して、第1、第2、第3ホルマント周波数（ F_1, F_2, F_3 ）の誤差は数%であった。しかし、症例のモデルにおいては第3ホルマント周波数での誤差は大きい。健常例の声道形状は軸に対して左右対象であるが、症例の声道形状は軸に対して左右非対称であり複雑な構造をしている。このように1次元のモデルを用いて解析した場合は、3次元形状による影響が反映されておらず、3次元の音響効果を調べるためには3次元のモデルを用いて解析を行う必要がある。有限要素法（Finite Element Method, 以下FEM）はそのような問題を扱う上で、有効なシミュレーション手法である。

1.1.5 研究の目的

本研究では種々の声道形状からFEMによりスペクトルをシミュレートすることで、声道形状と音声スペクトルとの関係を導く手がかりをみつけることを目的とする。

1.2 本研究の特色

本研究では、昭和大学において測定された健常例 1 例、症例 4 例の日本語母音 /i/ 発話時における舌付近の声道断面積データ及びその形状データを用いて、このときの声道の構造が音声生成時に及ぼす影響をシミュレートする。健常例と異常例について日本語母音 /i/ の音響分析結果を比較した場合に、異常例は健常例に比べて F2 が低いなどそのスペクトル構造に大きな差が見られる。この原因はどこにあるのかを考えると、大きな特徴として異常例の場合には舌の一部もしくは全体の構造が健常例とは異なる。また、それぞれの異常例を比較しても、そのスペクトル構造及び声道構造は大きな差異がみられる。この声道の構造的特徴がスペクトルに影響しているのではないかと考えられる。そこで、断面積データから断面積変化のみを考慮したモデルで実音声分析結果に近似できたモデルで、そのスペクトルの違いはどのような声道構造に起因するかを考察する。また、舌付近の断面積変化だけでは実音声分析結果に近似できなかったモデルに関して、その原因は声道が 3 次元的に複雑な形状をしているために 1 次元モデルでは表すことができていないのではないかと考える。そこで実際の声道形状に近い近似モデルを作成し、その構造的変化がスペクトルにどのように影響されるかを考察する。

第 2 章

有限要素法による数値実験（理論）

有限要素法とは、領域を要素（element）と呼ばれる有限の大きさを持つ図形の集まりで置き換えて部分方程式の近似解を得る数値計算法の一種である。[4]

2.1 有限要素法の特徴

有限要素法は

- 工学的近似解法である
- 近似のバランスがよい
- 理論と実際の間中間的存在である
- 実際の問題を扱えるのが強み
- 応用範囲がきわめて広い
- コンピュータと密着した計算法である
- データを入れれば即座に答がでる便利な道具である

である。[5]

2.2 有限要素法の精度

有限要素法は一種の数値実験と考えると、完全な精度の保証をされているものではないが、他の手法と比べてバランスのとれた計算法である。その結果がどこまで信用できるか

は、現象を十分良く近似できるモデルを使い、すでに得られている実験値（理論値）と計算値の比較を行うなど、慎重を期して実施するならば、それに見合う成果が得られる。

有限要素法で問題を解析する場合、物理的な単純化が必要である。実際の問題を、適当に理想化、単純化して、有限要素法で扱うことのできる程度の問題になおす。すなわち、個々の問題に許される範囲内で

- 細部構造の省略：2次元化、1次元化
- 影響の少ない要因の省略：対称性の利用

などを行う。有限要素法の場合には、単純化しすぎないように、しかも計算費用をむだにしないように、その間のバランスを考えて、詳しさの程度を決めることが大切である。すでに発表された計算例などを参考にするとよい。代表的なケースについて、いろいろなモデルを使って計算し比較してみるのもよい。物理的モデルができたなら、次に、それを数学的モデル（有限要素モデル）になおす。ここで要素分割に際して注意すべき事項を列挙する。

1. 重要な部分は細かく、他の部分は粗く。
2. 粗さの急変はなるべく避ける。
3. なるべく規則的に。
4. 対称な部分は、分割も対称に。
5. あまり細長い形はよくない。
6. 頂点は頂点に、辺は辺につながる。

分割の細かさを、細かすぎず粗すぎず、適切な程度に選ぶことも、実用上の重要なポイントである。これは個々の問題の性質と要求精度によって左右されるので、一般的に論ずることは困難であるが、要素を細かくするとき、

- 計算時間は急増する
- 精度はそれ程には改善されない

という事情がある。したがって、むやみに高精度を望むのは損である。[6]

2.3 波動方程式

音響問題の速度ポテンシャル ϕ の波動方程式(定常状態)は以下に示される [7]

$$\nabla^2 \phi = -k^2 \phi$$

$$(k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{波数}, \omega : \text{角周波数}, \lambda : \text{波長})$$

速度ポテンシャル ϕ から計算される音圧 p および粒子速度 u はそれぞれ

$$p = j\omega\rho\phi$$

$$u = -\nabla\phi$$

である。ここで ρ は大気密度である。以上の式を FEM シミュレーションに適用する。

声道内の音圧分布を求めるためには、この方程式と境界条件から、ガラーキン法を用いて、この境界値問題を解く。

$$\int_{V\text{内}} (-\omega_i)(\nabla^2 p + k^2 p) dv = 0, \quad i = 1 - n \quad n : \text{総節点数}$$

ガラーキン法では、各々の要素に関して区分多項式を、

$$p = \sum_i N_i p_i$$

とすると同時に、重み関数についても同じ関数を採用する。

$$W = \sum_i N_i p_i$$

したがって、領域全体については以下ようになる。

$$\sum_{e_i=1}^n \int_{V_{e_i}} p(\nabla^2 p + k^2 p) dV = 0$$

この場合の i は、1から n の要素(エレメント:element)のナンバー(number)になる。

しかし、未知数 p は内挿関数 N_i の1次式で表されているので、2階微分すると不定になる。これを避けるためグリーン・ガウスの定理で部分積分する。

$$\sum_{e_i=1}^n \left(\int_{V_{e_i}} (\nabla p \nabla p + k^2 p p) dv - \sum_{S_j=1}^4 \int_{S_j} p \nabla p \cdot n ds \right) = 0$$

(n : 法線ベクトル)

この方程式を離散化し変形してまとめると、次のようになる。

$$\sum_{e_i}^n ([S] - k^2[T] + jk \frac{\rho c}{z_R} [G])[p] = \sum_{e_i}^n (-jk\rho c u)[F]$$

ここで $[S]$ 、 $[T]$ 、 $[G]$ は 4×4 のマトリックス (matrix) λ $[p]$ 、 $[F]$ は 4 行のベクトルである。 $\sum_{e_i}^n$ をとるとき、違うエレメントでも同じ節点 (ノード : node) について足し合わされば合計の matrix のサイズを小さくできる。ノードの数が n 個の場合、マトリックス $[S]$ 、 $[T]$ 、 $[G]$ は $n \times n$ で、ベクトル $[p]$ 、 $[F]$ は n 行になる。

$$([S_{all}] - k^2[T_{all}] + jk \frac{\rho c}{z_R} [G_{all}])[p_{all}] = -jk\rho c u [F_{all}]$$

この連立方程式を解くと、各節点の音圧が求まる。

2.4 連立方程式の解法

以上によりできた連立方程式、Gauss の消去法を用いて解くことが可能である。

ただし前説までの説明では、全体マトリックスは $n \times n$ の正方行列であるといっているが、実際そのマトリックスを良く見ると、その要素が $k_{ij} = k_{ji}$ であることは明らかである。

よって計算時に使用するメモリー及び計算回数節約のため、圧縮した形で保存する。

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & 0 & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & 0 & 0 \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & 0 \\ 0 & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ 0 & 0 & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ 0 & 0 & 0 & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}$$

これが以下のように変わる。

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{55} & k_{56} & 0 \\ k_{66} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

この形のマトリックスをバンドマトリックス (band matrix) と呼び、バンドマトリックスの列数をバンド幅 (band width) と呼ぶ。データはこの形で保存され、この形に適応した Gauss の消去法を用いて連立方程式を解き、各節点の音圧を求めることができる。バンド幅は計算時に使用するメモリ量と関係があるため、如何にモデルのバンド幅を小さくするかが重要になる。

2.5 粒子速度

前述のように各節点の音圧が求まった後、この音圧の値を用いて、エレメントの中心点での粒子速度を求めることができる。

粒子速度が角周波数 ω で正弦変化するとして時間項を分離すると

$$U(x, y, z, t) = ue^{j\omega t}$$

となる。

ここで、公式 $\nabla p = -\rho \frac{du}{dt}$ から、

$$u = -\frac{\nabla p}{jk\rho c} = -\frac{1}{jk\rho c} \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

が得られ、音圧から粒子速度が計算できる。

第 3 章

有限要素法の要素分割と計算精度

3.1 はじめに

今回、3次元声道伝達特性を調べるため、NIT (Numerical Intergration Technologies) 社の音響解析プログラム SYSNOISE の有限要素法による解析を使用した。使用したツールによる解析結果の精度を知るために、理論値が算出できる一様音響管での有限要素モデルを作成し、計算結果と理論値を比較する。

3.2 音響管理論

波長に比べて管径の細い断面の管中を伝搬する音波は管壁で反射を起こさない。したがって管軸方向にのみ伝搬する平面波になる。有限長の音響管の中では管端で波が反射を繰り返し、多重に重なって干渉し合い、定在波ができる。[8]

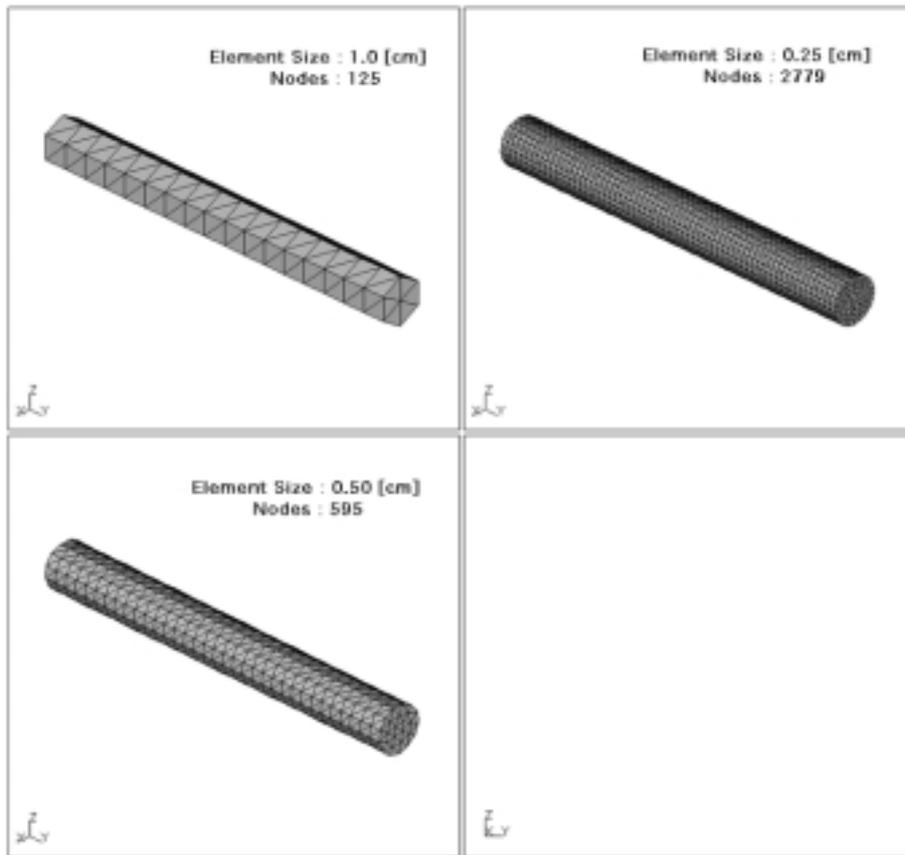
片方閉管一様無損失音響管の共振周波数は以下の式であらわされる。

$$f_n = \frac{c}{2l} \left(n - \frac{1}{2} \right)$$

(c : 音速 [m/s]、 l : 音響管の長さ [m])

3.3 有限要素モデル

有限要素モデルの作成には Altair 社の汎用プリポストシステム HyperMesh を使用した。図 3.1 に示すような、断面半径 $r = 1.0[cm]$ 、長さ $l = 17[cm]$ の一様音響管で、要素サイズの異なる 3 種類の有限要素モデルを作成した。



☒ 3.1: F.E.Model of Straight tube

1. element size : $1.0[cm]$ (number of nodes : 125)
2. element size : $0.50[cm]$ (number of nodes : 595)
3. element size : $0.25[cm]$ (number of nodes : 2779)

3.4 シミュレーション条件

音響管の長さ方向に y 軸をとる。入力端 ($y = 0$) では正弦波振幅が 1.0 の粒子速度で励振させる。また出力となる開放端 ($y = l$) での放射インピーダンスは 0.001 を与えた¹。開放端以外での自由境界面は剛壁 (無損失) である、つまり、 $impedance = \infty$ である。管内では、音速 $c = 340[m/s]$ 、気体密度 $\rho = 1.225[kg/m^3]$ で一定とする。

3.5 シミュレーション結果

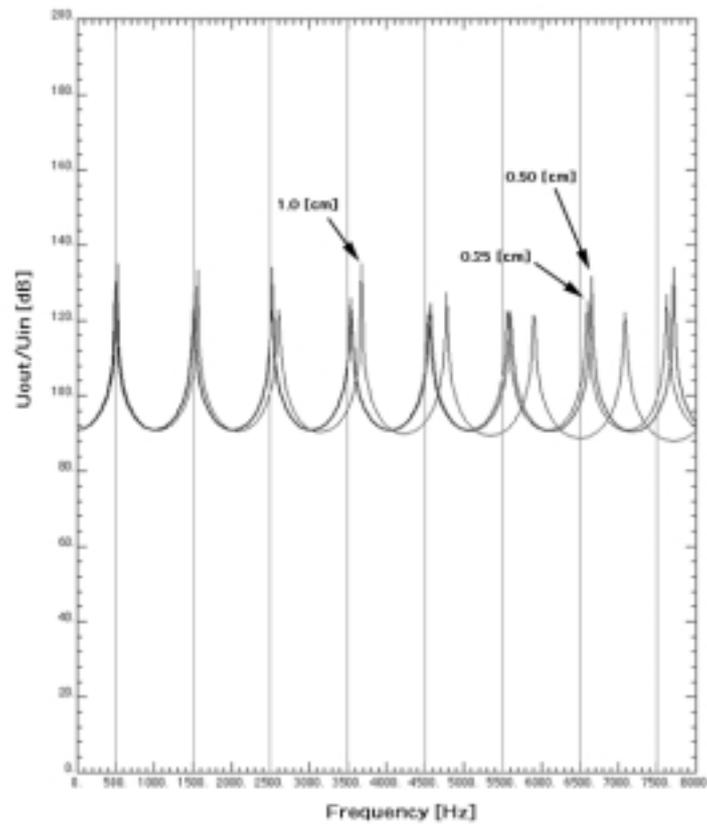
周波数応答として出力端の中心付近の節点の粒子速度 (U_{out}) から入力端の中心付近での粒子速度 (U_{in}) を割った値を、 $20[Hz]$ から $8000[Hz]$ まで $20[Hz]$ きざみで計算した伝達関数の出力を図 3.2 に示す。

3.6 考察

このモデルは波長に比べて管直径が十分小さく、管に曲がりなどの平面波を乱すものがないため、音響管理論が適用できる。ホルマント周波数の理論値は $500, 1500, 2500, \dots [Hz]$ である。理論値と計算値を比較すると、要素サイズが小さいほど誤差が小さくなることがわかる。要素サイズが $0.50[cm]$ と $0.25[cm]$ の 2 つのモデルでは $5000[Hz]$ くらいまでの計算結果ではほぼ一致しており、第 5 ホルマント周波数での理論値 ($4500[Hz]$) での誤差は 2% 未満であった。高周波数領域にいくにしたがって誤差も大きくなるが、これは要素サイズを小さくすれば、その誤差を小さくすることができる。しかし、要素サイズを小さくすることで節点数が多くなり計算時間も長くなる。これをさけるためには、必要とされる周波数範囲と誤差の許容範囲を考慮して要素サイズを変えるべきであると考えられる。

本論文では第 1 ホルマント周波数 (F1) から第 3 ホルマント周波数 (F3) までを対象とする。したがって、モデルをできるだけ正確に表すことも考慮して、以後要素サイズは $0.30[cm]$ で有限要素モデルを作成した。

¹ 計算機上では 0 を入力することができないのでこの値を用いた。



☒ 3.2: Frequency Response of Straight tube

第 4 章

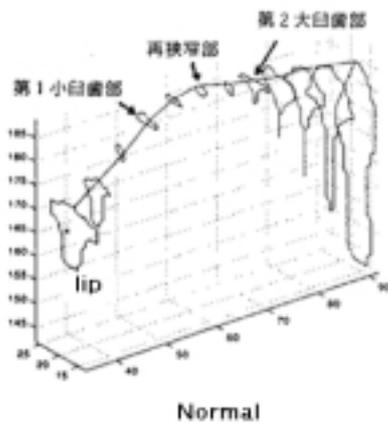
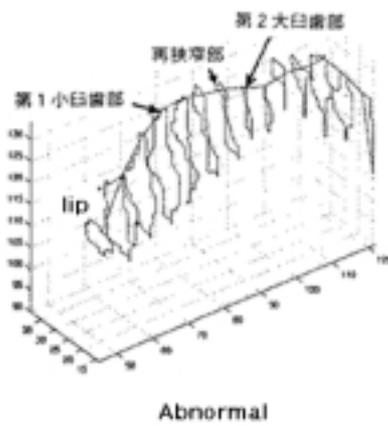
声門付近の構造的特徴とスペクトルとの関係

4.1 はじめに

口腔領域疾患あるいはその術後後遺症によって、しばしば言語障害が生ずる。健常例と異常例について日本語母音 /i/ の音響分析結果を比較した場合に、異常例は健常例に比べて F_2 が低いなどそのスペクトル構造に大きな差がみられる。この原因はどこにあるのかを考えると、声道の構造的特徴として健常例と比較して異常例の場合には、舌付近での断面積及び断面形状が大きく異なっていることがあげられる (図 4.1)[10]。この部分での構音動態がスペクトルへ強く影響されるものと考えられる。

そこで、舌付近での構造的特徴がスペクトルに及ぼす影響として、健常例と症例をより比較しやすくするために、声門付近でのデータを統一させる。また、次章で種々の症例についてのシミュレーションを行うが、その断面積データは舌付近での測定値しか得られていない。そのために声門付近のデータを推測できるように声門付近のデータを適度に変化させた場合のスペクトルへの影響も調べる。

本章では中心軸は直線で断面形状はすべて円で相似なモデルで、断面積変化だけを考慮した有限要素モデルでの解析結果を示す。これらのモデルは 1 次元のモデルと同じであるといえる。したがって、以後、本章でいう声道の構造的特徴とは、断面積変化についてのみ考慮したモデルの特徴のことである。有限要素法でのシミュレーション条件は、3.4 節で示したものと同一である。



☒ 4.1: Vocal Tract Shape of Normal and Abnormal

4.2 声道断面積データから作成したモデル (Raw Data Model)

MRI 撮像法によりもとめられた健常例 (Normal-0) と異常例 (Abnormal-0) における声道断面積が等しくなる円の半径データを図 4.2 に示す。このデータをもとに中心軸は直線で断面形状は円で相似な有限要素モデルを作成したものを図 4.3、シミュレーションを行った結果を図 4.4 に示す。

表 4.1 に母音 /i/, /a/ の平均的ホルマント周波数 [9] を示す。これをみると母音 /i/ では F1 と F2 が離れていることがわかる。健常例のシミュレーション結果も同様に F1 と F2 が離れている。症例のシミュレーション結果では、健常例と比較して F1 は高く、F2 は低くなり、F1 と F2 は近づいている。健常例と異常例での構造的特徴としては、舌付近 ($l = 8 \sim 13[cm]$) での違いが大きい。しかし、2 つのモデルを比較するには声道長および声門 (glottis) 付近での構造的特徴も違うことから、ここでは舌付近の構造的特徴が F1 と F2 に影響したかどうかをいうことはできない。

4.3 声道長を一定にしたモデル (Constant Length Model)

測定したデータでは、健常例と異常例での声道長が異なる。本節では、舌付近での構造的特徴 (断面積の変化) がスペクトルに及ぼす影響を比較するために、声道長の違う 2 つのモデルを $l = 14.0[cm]$ で統一した。このとき、長さを調整する場合には声門 (glottis) 付近でのデータを修正した。声道長の違うモデルでは、その違いはスペクトルに影響する。しかしながら、両者のスペクトルの違いは舌付近の断面積変化の方が重要であると考えられることから声道長を統一した。データの修正部を声門付近にしたのは、特に舌付近での声道構造とスペクトルとの関係を比較して考察するためであり、舌付近でのデータはそのまま保持したかったからである。4.2 節と同様に半径データを図 4.5 に示す。この声道長を変えたときの健常例と症例それぞれ有限要素法によるシミュレーション結果の比較を

表 4.1: Average Acoustic Mode of Vowel /i/

	F1	F2	F3
Vowel /i/	270	2290	3010
Vowel /a/	730	1090	2440

図 4.6,4.7に示す。

健常例に関しては声道長を短くした影響として、F1 以外のホルマントは全体的に高くなる傾向が見られた。症例に関しては声道長を長くした影響として、F1,F2 以外のホルマントは全体的に低くなる傾向が見られた。声道長を変化させることでホルマント周波数の位置は変化するが、全体的にみるとそれぞれのホルマントの位置関係（離れている、近づいている）に変化はない。

4.4 声門付近を単純化したモデル (Proposed Model)

舌付近での構造的特徴の違いがスペクトルに及ぼす影響を調べるために、健常例と症例の $l = 0[cm] \sim 6.0[cm]$ でのデータを以下に示すように統一した。

- $l = 0[cm] \sim 4.0[cm]$ の範囲は半径 $r = 1.3[cm]$ の円で一定
- $l = 6.0[cm]$ は半径 $r = 0.8[cm]$

4.2節と同様に半径データを図 4.8に示す。シミュレーション結果を図 4.9,4.10に示す。

健常例に関して声門付近を単純化した影響として、F4 が低くなった。症例に関して声門付近を単純化した影響として、F3 が高くなった。これより声門付近のデータを修正することで特定のホルマントに影響されることがわかる。しかし、変化がみられたホルマント以外ではほとんど変化がみられなかったことから、全体的には舌付近での構造的特徴がスペクトルに及ぼす影響の方が強いことがわかる。

4.5 声門付近の断面積の違いによるスペクトルへの影響

日本語母音/i/を発話するときの声道の構造的特徴がスペクトルに及ぼす影響として、声門付近での断面積と舌付近での「せばめ」の断面積との比が影響しているのではないかと検討する。前述した声門付近を単純化させたときのモデルでは、声門から $4.0[cm]$ までの断面の円の半径は $r = 1.3[cm]$ でシミュレーションを行ったが、このデータを変化させたときのスペクトルを計算する。

4.4節で示したモデルを ProposedModel-1 として、声門付近の断面積を大きくした ProposedModel-2、その断面積を小さくした ProposedModel-3 を作成した。

- ProposedModel-1 : $r = 1.3[cm]$ 4.4節のモデル
- ProposedModel-2 : $r = 1.5[cm]$ 断面積：大

- ProposedModel-3 : $r = 1.1[cm]$ 断面積：小

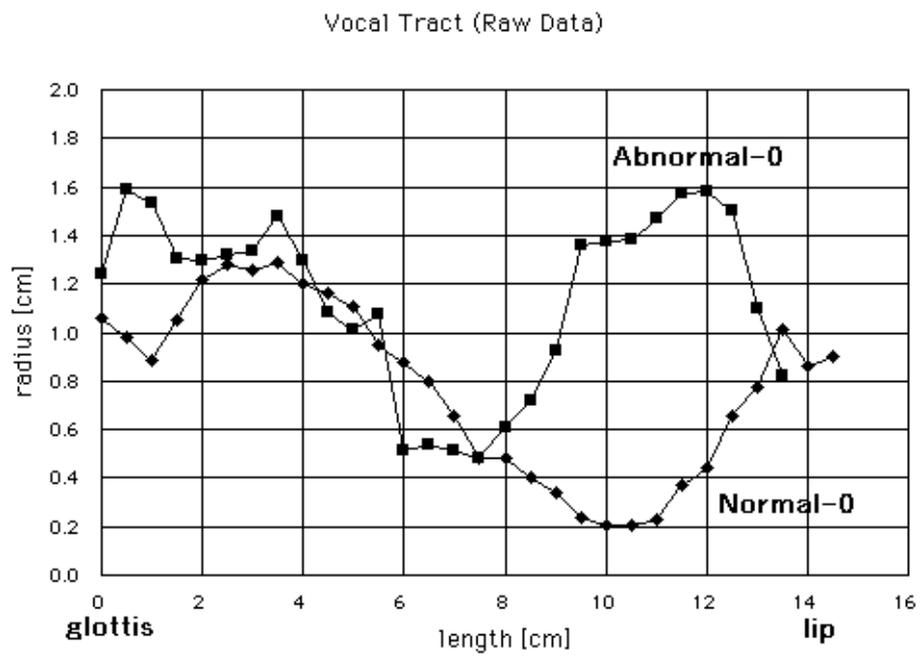
4.2節と同様に半径データを図 4.11,4.12に示す。健常例と症例での計算結果をそれぞれ図 4.13,4.14に示す。

健常例に関して、声門付近の断面積を大きくする (ProposedModel-2) ともとのデータ (ProposedModel-1) と比較して F1,F2 が離れた、また、断面積を小さくする (ProposedModel-3) ともとのデータ (ProposedModel-1) と比較して F1,F2 が近づいた。症例に関しては、断面積を大きくすると F1,F3 が離れ、断面積を小さくすると F1,F3 が近づいた。このことから声門付近での断面積の広さは、舌付近での「せばめ」との断面積比と関係して特定のホルマント同志を離したり、近づけたりすると考えられる。

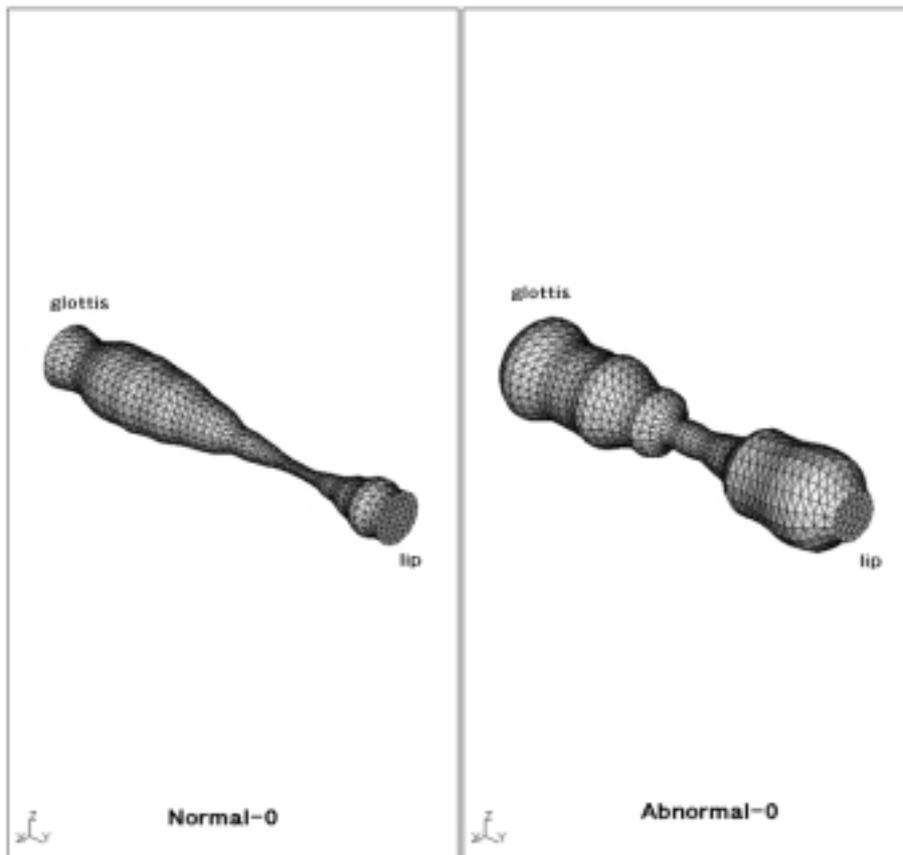
4.6 考察

実測値から声道長を変化させた近似モデルにおいて、声道長を短くすると全体的にホルマントは高くなり、声道長を長くすると全体的にホルマントは低くなる。このことから声道長を変化させてもそのスペクトルは全体的に変化するため、ホルマント同志の位置関係はかわらない。したがって、有限要素法での結果と実音を分析した結果が、全体的に高いか低いかの誤差がでる場合には声道長を修正することにより、その誤差を小さくすることができる。これは、MRI など声道長を測定する方法は種々あるが、その測定方法には完璧な基準がなく、また、実際に空気の流れる中心軸を正確にあらわしているとはいえない。したがって、測定による誤差が考えられるために、声道長については若干の修正は必要に応じてすることができるものと考えられる。

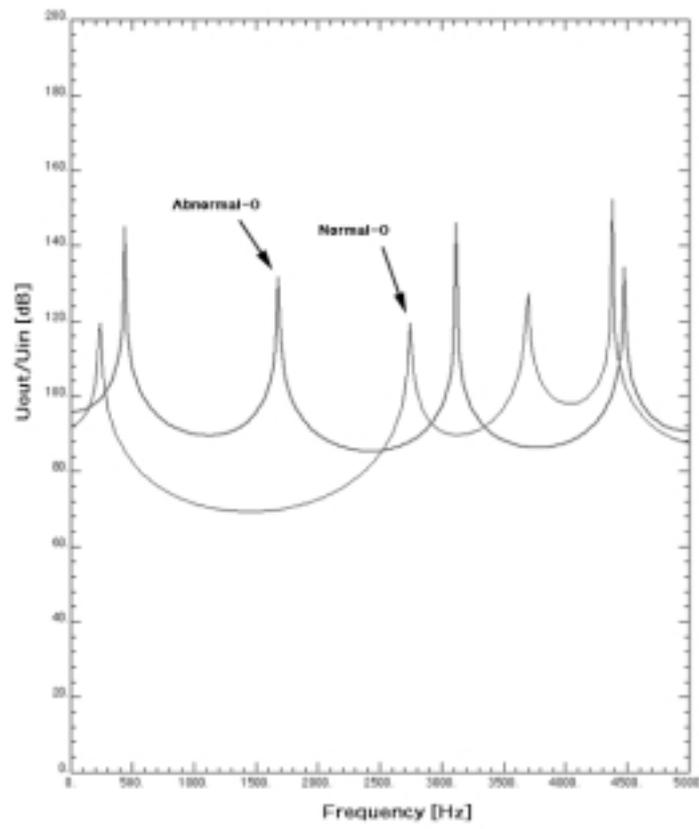
実測値のデータにおいて舌後方から声門付近までの断面積変化を単純化したときの影響は、第3ホルマント以降の特定のホルマント位置を変化させる。また、単純化した部分での断面積を変化させた場合にも、特定のホルマント同志が近づいたり離れたりする影響があらわれた。しかしながら、全体的なホルマント位置の関係を健常例と症例とで比較した場合の方がホルマントのずれが大きい。したがって、舌付近での断面積変化が日本語母音 /i/ を発話する場合に、スペクトルに強く影響しているものと考えられる。



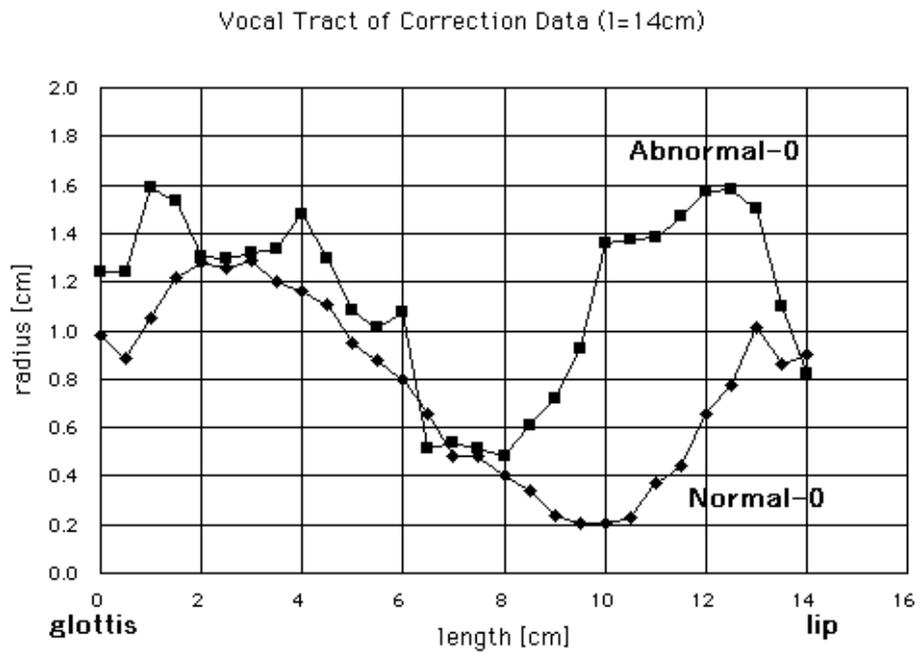
⊗ 4.2: RawData Vocal Tract



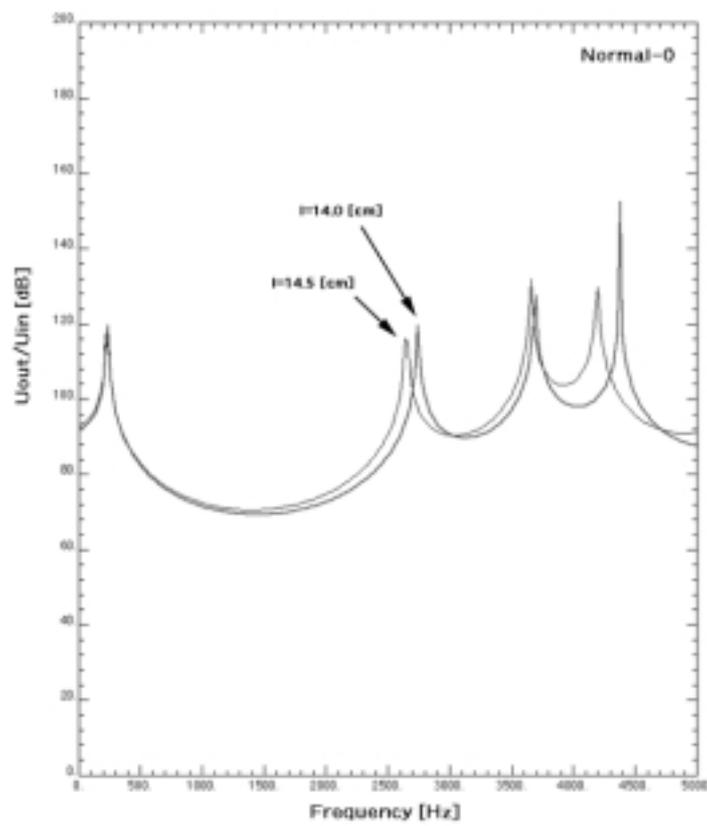
☒ 4.3: F.E.Model of RawData Vocal Tract



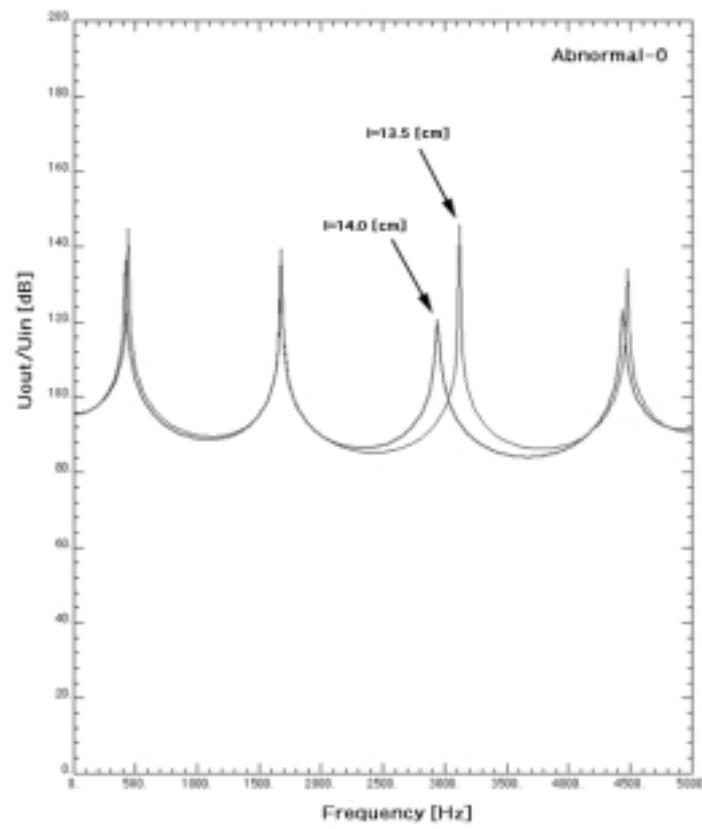
☒ 4.4: Frequency Response of RawDataModel



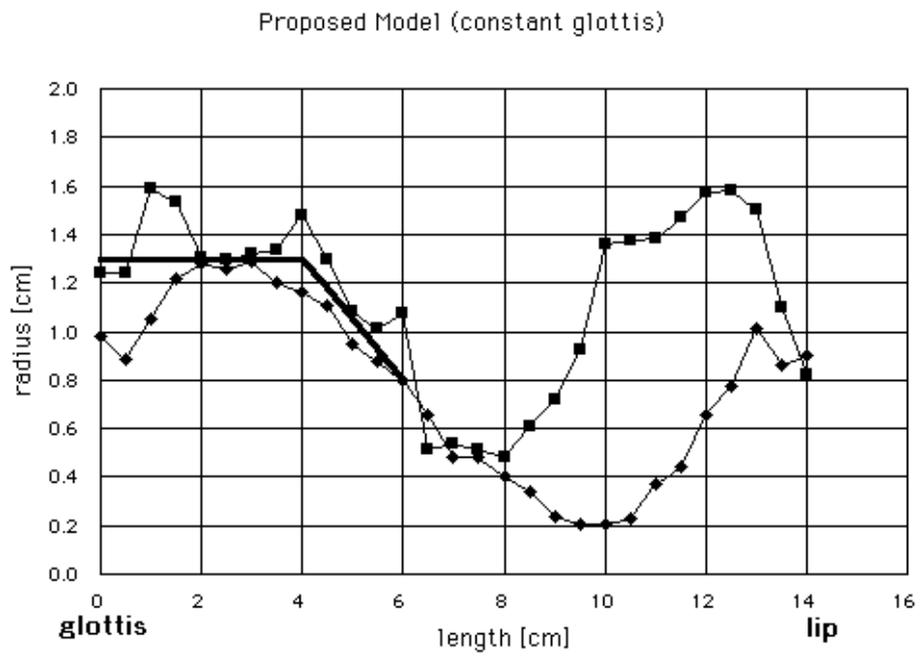
⊗ 4.5: Constant Length Data ($l = 14\text{cm}$)



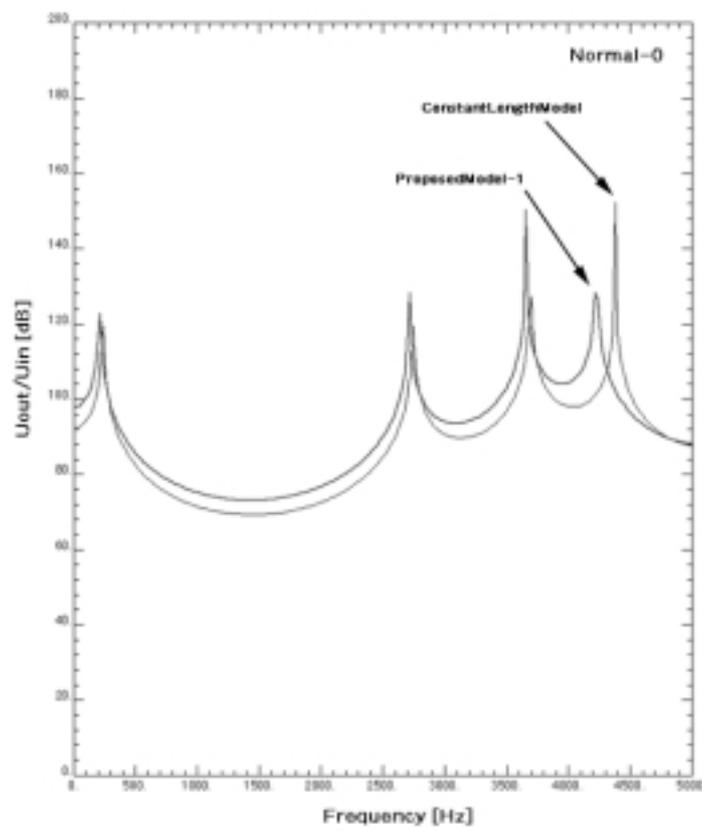
⊗ 4.6: Frequency Response of Constan Length Data (Normal)



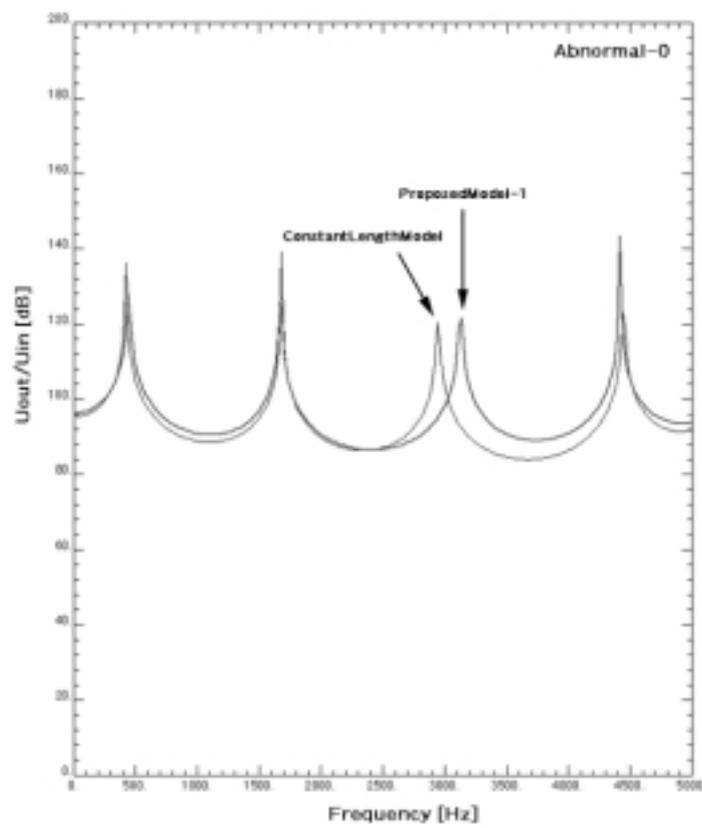
⊗ 4.7: Frequency Response of Constant Length Data (Abnormal)



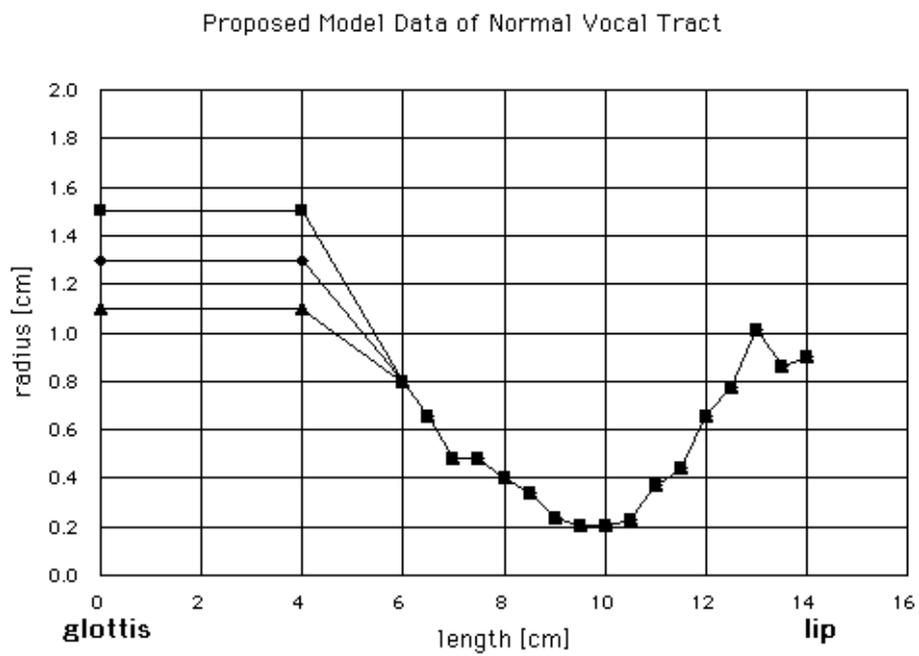
⊗ 4.8: Proposed Model Data



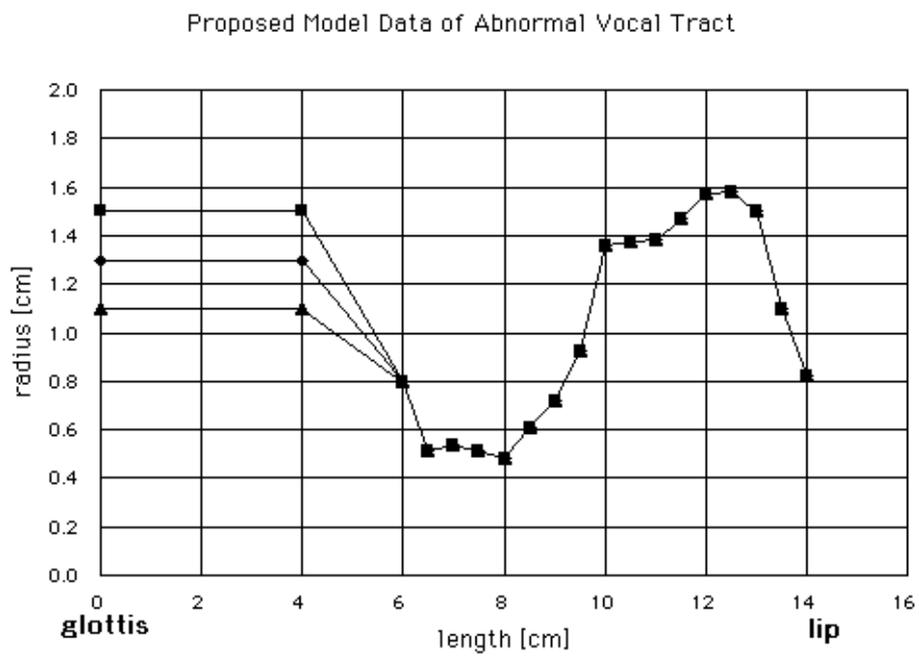
☒ 4.9: Frequency Response of ProposedModel (Normal)



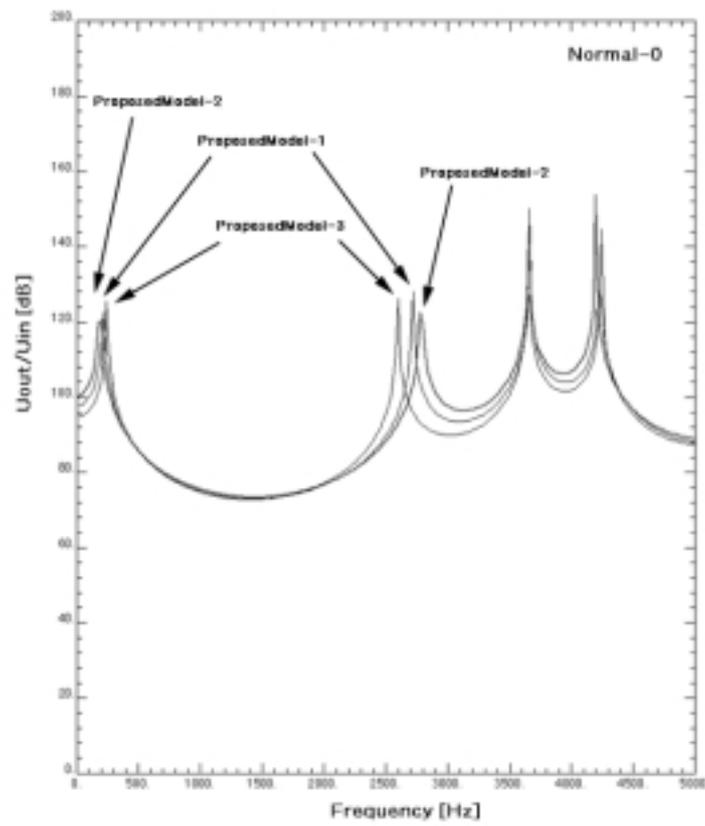
⊗ 4.10: Frequency Response of ProposedModel (Abnormal)



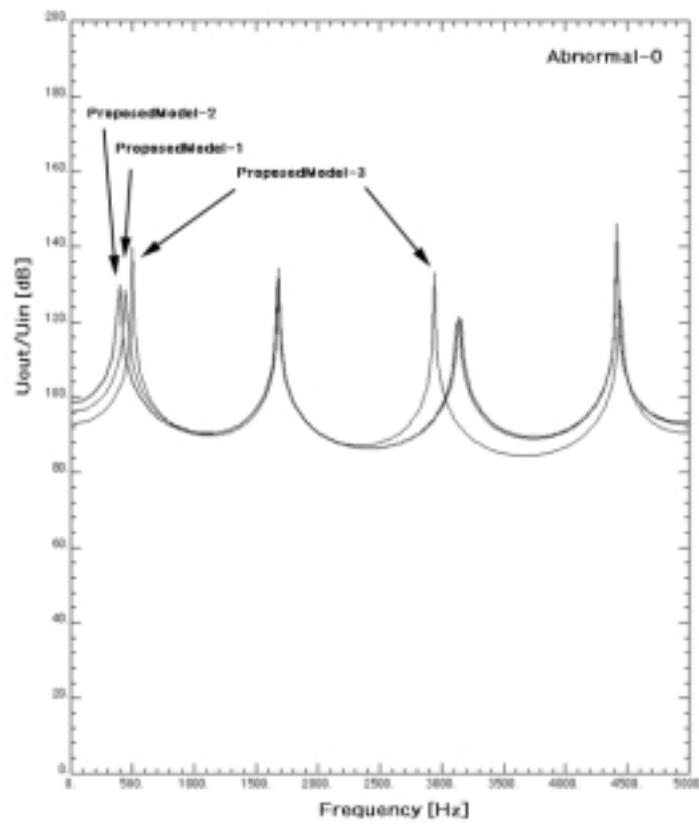
⊠ 4.11: Proposed Model Data (Normal), $l = 0 \sim 4[cm]$: (1) $r = 1.3[cm]$, (2) $r = 1.5[cm]$, (3) $r = 1.1[cm]$



⊠ 4.12: Proposed Model Data (Abnormal), $l = 0 \sim 4[cm]$: (1) $r = 1.3[cm]$, (2) $r = 1.5[cm]$, (3) $r = 1.1[cm]$



⊗ 4.13: Frequency Response of ProposedModel (Normal)



⊗ 4.14: Frequency Response of ProposedModel (Abnormal)

第 5 章

舌付近の断面積変化とスペクトルとの関係

5.1 はじめに

健常者 (Normal) および舌口底切除症例 (Abnormal) における中切歯歯頸部から PNS¹ までの断面積データとそれぞれの音声分析結果 (表 5.1) がある。そこで前章での結果から声門付近のデータを推測して声道近似モデルを作成し、有限要素法での解析を行った。このときのシミュレーション結果と音声分析結果とを比較し考察する。さらに断面積変化の違いによるスペクトルへの影響も考察する。

本章で近似モデルの軸は直線で曲がりがなく、断面形状は円ですべて相似である。これらのモデルは 1 次元のモデルと同じである。したがって、以後、本章でいう声道の構造的な特徴とは、断面積変化についてのみ考慮したモデルの特徴のことである。有限要素法でのシミュレーション条件は、3.4 節で示したものと同一である。

本章では全体の声道長および舌後方から声門付近の断面積のデータがないために、4 章

¹PNS:Posterior Nasal Spine(後鼻棘)、口腔の上壁で、口蓋骨部のもっとも後方に突出している棘突起の先端 [11]

表 5.1: Speech Analysis

	F1	F2	F3
Normal-1	312	2421	3398
Abnormal-1	312	1992	2343
Abnormal-2	351	2304	3281
Abnormal-3	312	1640	2734
Abnormal-4	312	1953	2578

の結果から推測したものであり、音響分析結果と比較して誤差を修正するものではない。あくまでも舌付近での断面積データからそれぞれの声道近似モデルを作成した結果をみて、舌付近での構造的特徴が有限要素法での解析結果にどのように影響しているかを調べる。

5.2 健常例 (Normal-1)

舌口底切除症例での断面構造の特徴(断面積変化)を健常例と比較するために、健常者のデータをシミュレートする。断面積を同じにする円の半径データを図 5.1 に示す。このデータから声道近似有限要素モデルを作成し、シミュレートした結果を図 5.2 に示す。

声道の構造的特徴としては舌後方から舌前方まで十分にせばめが形成されており、実音声分析結果では F_1 は低く、 F_2 は高く、 F_1 と F_2 は離れている特徴がある。このモデルでの有限要素法シミュレーション結果は、声門付近のデータ及び声道長のデータがないために多少の誤差はみられるが、 F_1 と F_2 が離れている傾向などは実音声分析結果によく近似できている。

5.3 症例

5.3.1 Abnormal-1

断面積を同じにする円の半径データを図 5.3 に示す。このデータから声道近似有限要素モデルを作成し、シミュレートした結果を図 5.4 に示す。

Abnormal-1 の声道の構造的特徴としては舌後方にせばめがみられるが、舌前方ではせばめが形成されておらず、健常者と比べて断面積が広がっている。実音声分析結果では F_2, F_3 が健常者に比べて低く、 F_2 と F_3 が近づいており、シミュレーション結果でもこの傾向に近似していた。

5.3.2 Abnormal-2

断面積を同じにする円の半径データを図 5.5 に示す。このデータから声道近似有限要素モデルを作成し、シミュレートした結果を図 5.6 に示す。

Abnormal-2 でのシミュレーション結果は、音声分析結果と比べて F_2, F_3 が低く、あまりうまく近似できていなかった。この原因として考えられるのは、(1) 声門付近での声道データ及び声道長の実測値がないために、それを推測して作成したモデルと実形状との差

が大きい、(2) 舌付近での声道断面形状が複雑 (図 5.7) であり、その 3 次元の構造的特徴が影響している可能性がある。

5.3.3 Abnormal-3

断面積を同じにする円の半径データを図 5.8 に示す。このデータから声道近似有限要素モデルを作成し、シミュレートした結果を図 5.9 に示す。

Abnormal-3 の声道の構造的特徴としては舌前方にせばめがみられるが、舌後方ではせばめが形成されておらず、健常者と比べて断面積が広がっている。音響分析結果と比較すると F1 と F2 はよく近似できているが、F3 の誤差が多少大きい。しかし、F2 と F3 の位置関係では Abnormal-1 とは逆に離れており、シミュレーション結果でもこの傾向に近似していた。

5.3.4 Abnormal-4

断面積を同じにする円の半径データを図 5.10 に示す。このデータから声道近似有限要素モデルを作成し、シミュレートした結果を図 5.11 に示す。

実音分析結果と比較すると、音響分析結果では F2 と F3 が近いのに比べて、シミュレーション結果では逆に F2 と F3 は離れている。この例で近似できなかった原因も Abnormal-2 と同じことが考えられるが、特に舌後方でのデータから推測すると、声門付近での実形状が推測したデータでは大きく差がある影響があるということも考えられる。

5.4 構造的特徴が同じで断面積の違う症例

構造的傾向として口腔前方から後方にかけて断面積が増加するモデル (Abnormal-3, Abnormal-4) で、その断面積の大きさの違いによるスペクトルの比較を検討した。断面積を同じにする円の半径データでの比較を図 5.12 に示す。有限要素法でシミュレートした結果での比較を図 5.13 に示す。

異常例では日本語母音 /i/ 発話時における声道の構造的特徴として、健常例のように舌付近全体に十分に「せばめ」ができていない。Abnormal-3,4 のように「せばめの位置」が舌後方にある場合に、これを同軸の断面積のみを考慮したモデル (1 次元モデルと同等) では、有限要素法でのシミュレーション結果では F2 と F3 が離れる傾向を示していた。しかし、前述したように Abnormal-4 の実音声分析結果では、シミュレーション結果とは逆

に F2 と F3 が接近している。このことから断面面積変化だけでは音声分析結果にまったく近似させることはできないようなモデルも存在することがみうけられた。

5.5 構造的特徴の異なる症例

口腔前方から後方にかけて減少するモデル(Abnormal-1)と増加するモデル(Abnormal-3)での有限要素法の解析結果を比較する。断面面積を同じにする円の半径データでの比較を図 5.14 に示し、有限要素モデルを図 5.15 に示す。有限要素法でシミュレートした結果での比較を図 5.16, に示す。

Abnormal-1 と Abnormal-3 での舌付近の構造的特徴の違いとして、せばめが形成されている位置の違いがあげられる。音声分析結果では、Abnormal-1 では F2 と F3 が近づいており、Abnormal-3 では F2 と F3 が離れている、といった異なる特徴を示していた。有限要素法でのシミュレーション結果でも、音声分析結果同様のホルマント位置の傾向があらわれていたことから、この「せばめの位置」がスペクトルに強く影響していることが考えられる。

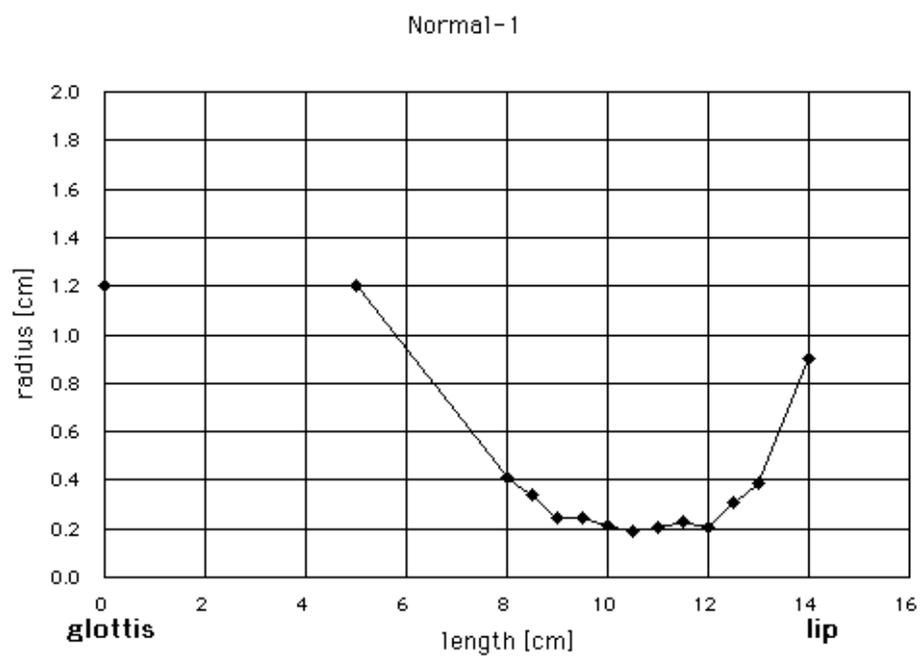
5.6 考察

今回示した近似モデルでは舌後方から声門付近までのデータがないために、前章で推測されるような形状を健常例にあわせて全体的なモデルを作成した。したがって、声道長や断面面積比の違いなどから多少誤差がでてきている。しかしながら F1, F2, F3 の位置が、近い、離れているなどの傾向は一部を除いて近似できている。このことからホルマントの位置関係は舌付近でのせばめの位置及び断面面積の大きさによる影響が大きいものと考えられる。これはせばめの位置が違う Abnormal-1 と Abnormal-3 を比較した結果からいえる。

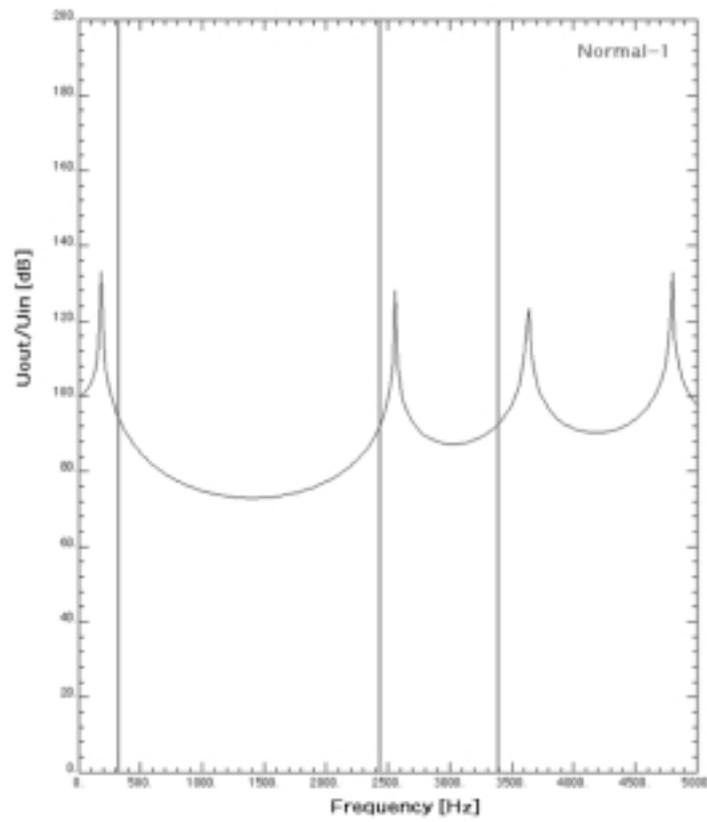
Abnormal-4 のシミュレーションにおいては、実音声分析結果とはまったく逆の傾向をしめしている。しかしながら Abnormal-3 と比較することで、舌後方から声門付近までのデータを統一した場合において、舌前方にせばめを形成し、舌後方で広くなるモデルにおけるホルマント位置の関係は似ている。このことから舌付近だけのデータをモデル化した場合には、今回得られた結果が音声分析結果にもでてくるはずであるが、そのようにならないのは舌後方から声門付近までを推測したデータと実際の声道構造との誤差があるからであると考えられる。

また、Abnormal-2 に関しては図 5.7 の B ~ D の範囲で、舌を上顎に無理に押し上げてせばめを形成しているため、空洞がはっきりと表れていない。したがって、シミュレーショ

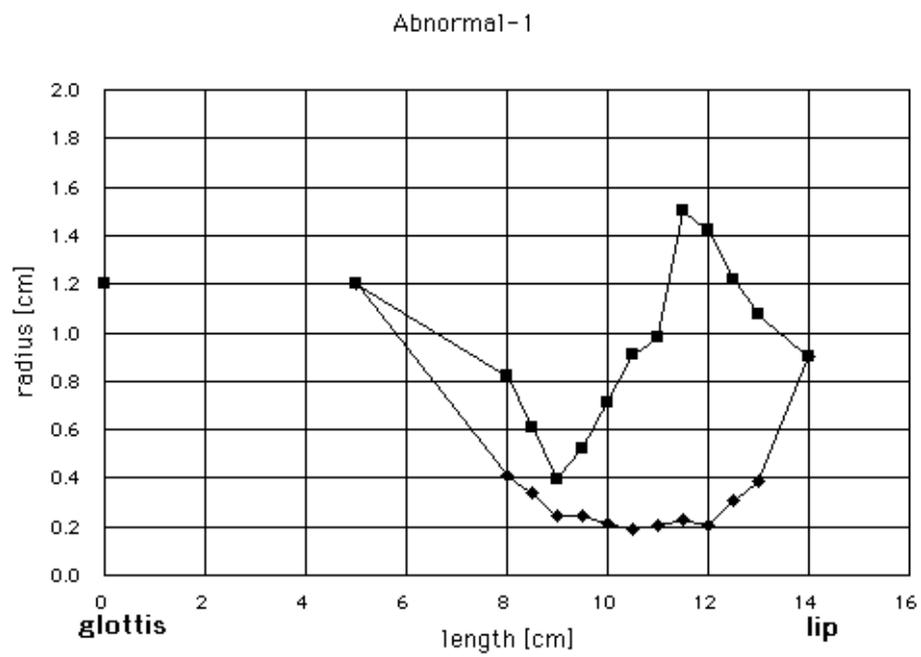
ン結果と実音声分析結果との相違は、上述のような声道断面形状の複雑さが影響しているために、断面積変化だけでは表れない影響があることも考えられる。



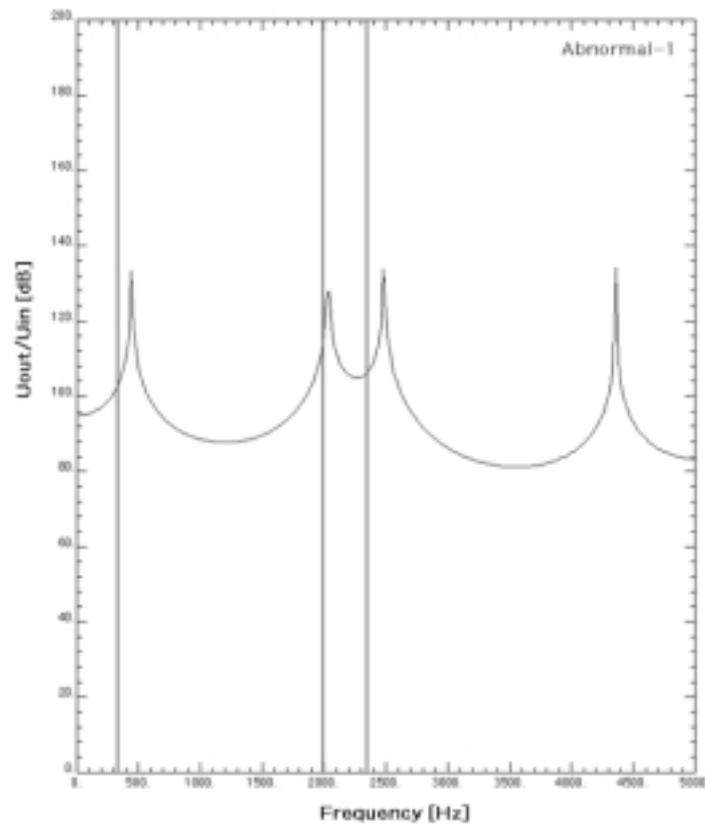
⊠ 5.1: Proposed Model Data of Normal-1



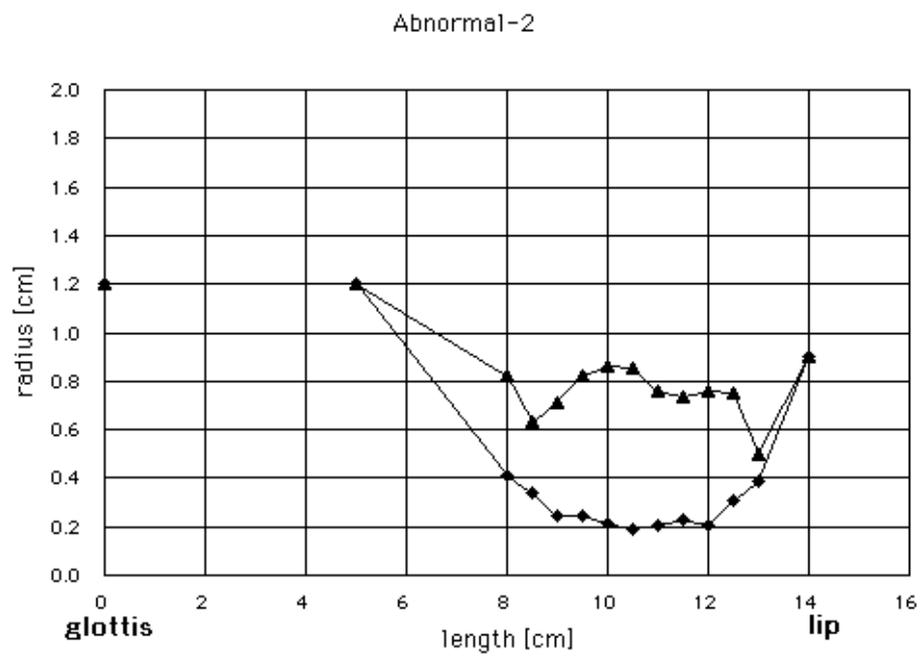
⊠ 5.2: Frequency Response of Normal-1



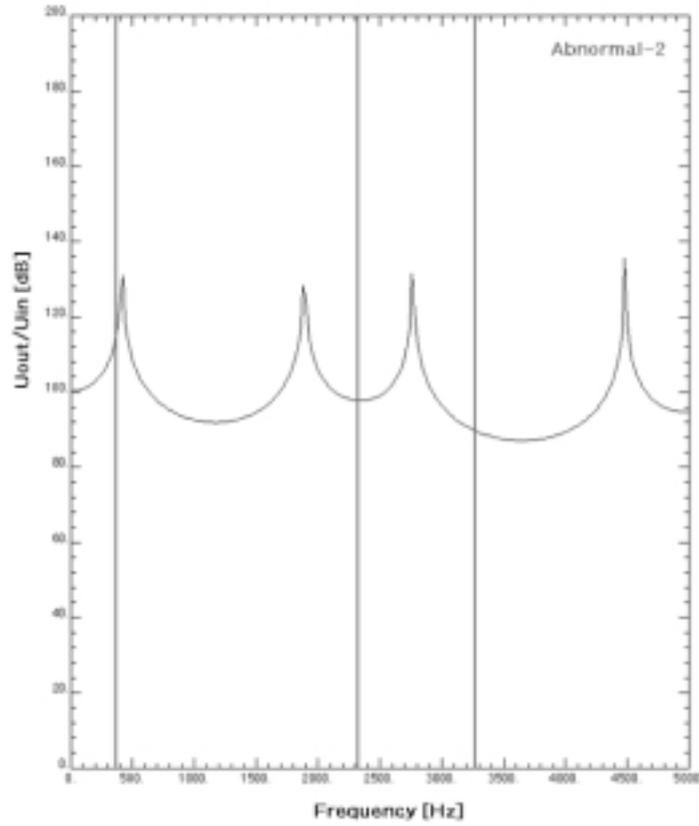
⊗ 5.3: Proposed Model Data of Abnormal-1



☒ 5.4: Frequency Response of Abnormal-1



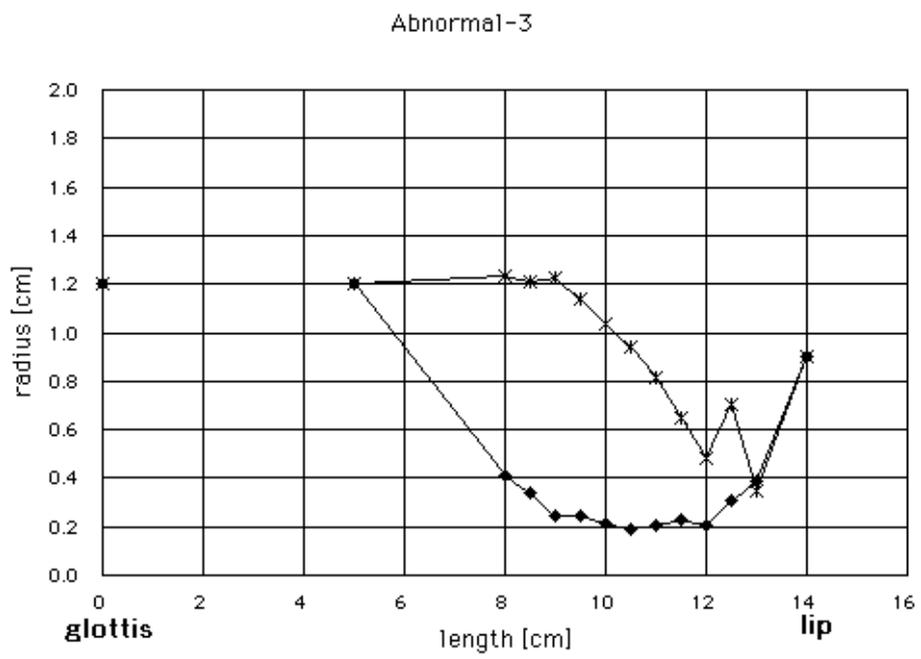
⊠ 5.5: Proposed Model Data of Abnormal-2



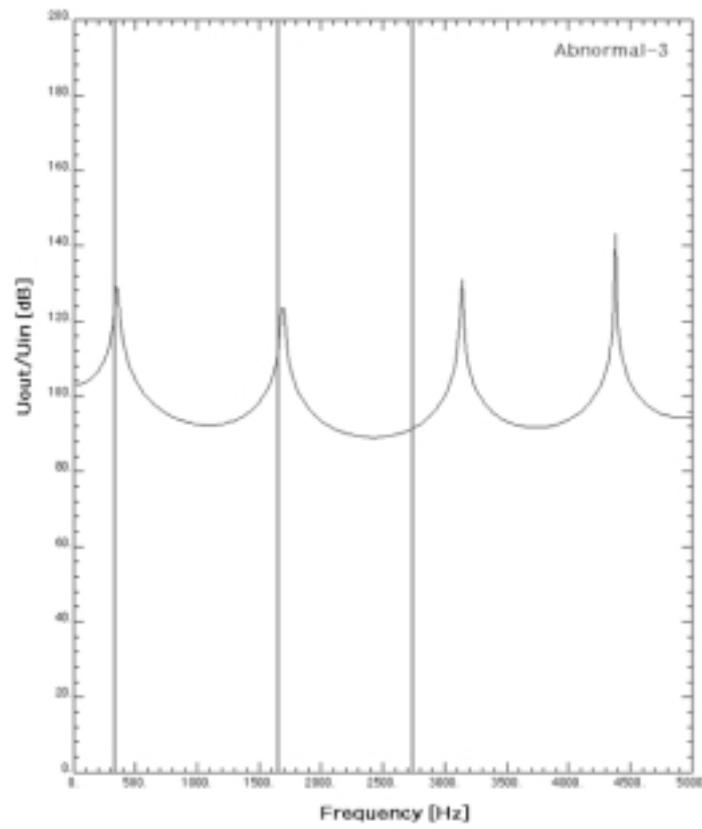
☒ 5.6: Frequency Response of Abnormal-2

	a	b	c	d	e
Abnormal-1					
Abnormal-2					
Abnormal-3					
Abnormal-4					

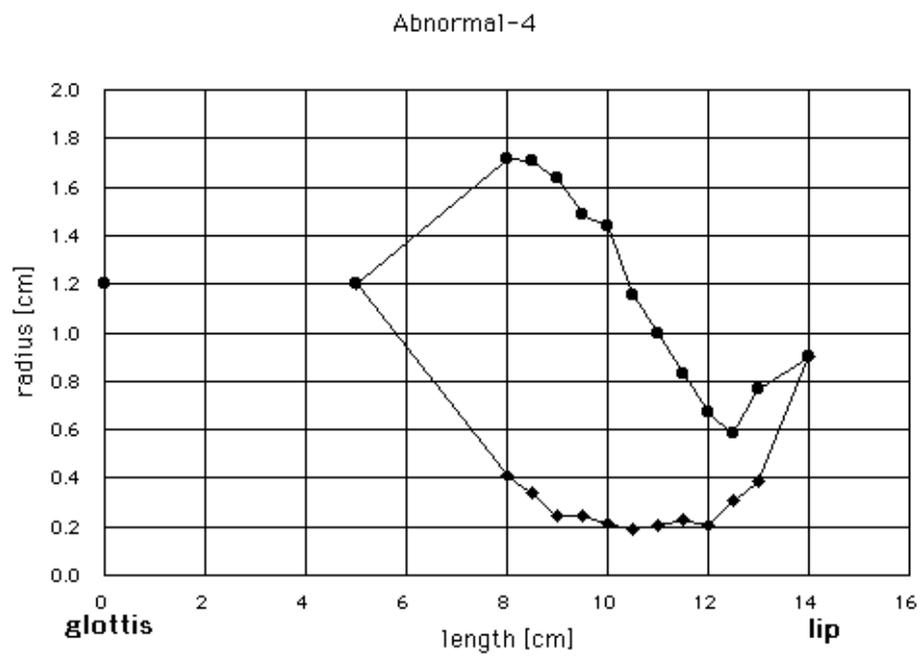
☒ 5.7: Vocal Tract Shape of Abnormal (a:front tongue - d:back tongue)



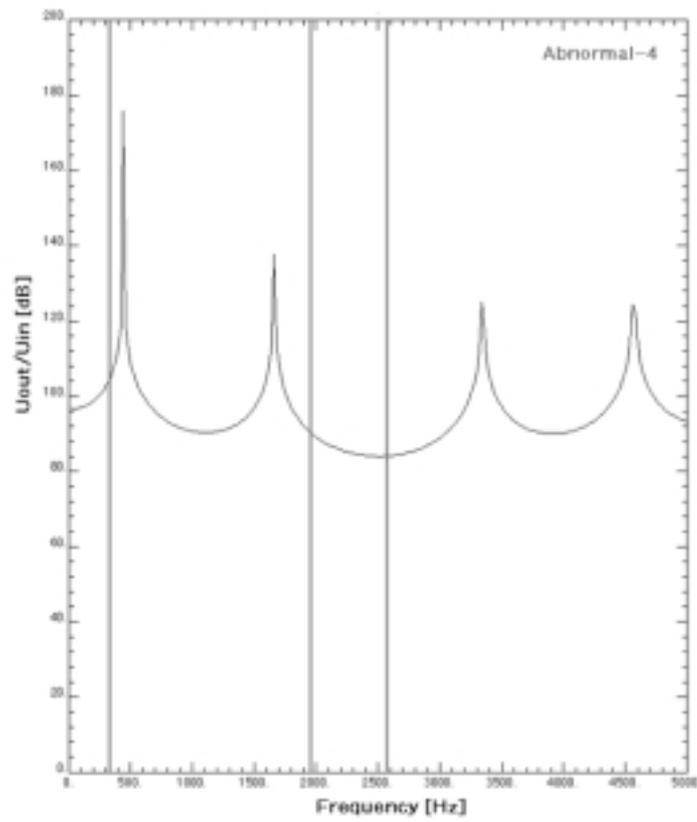
⊠ 5.8: Proposed Model Data of Abnormal-3



☒ 5.9: Frequency Response of Abnormal-3

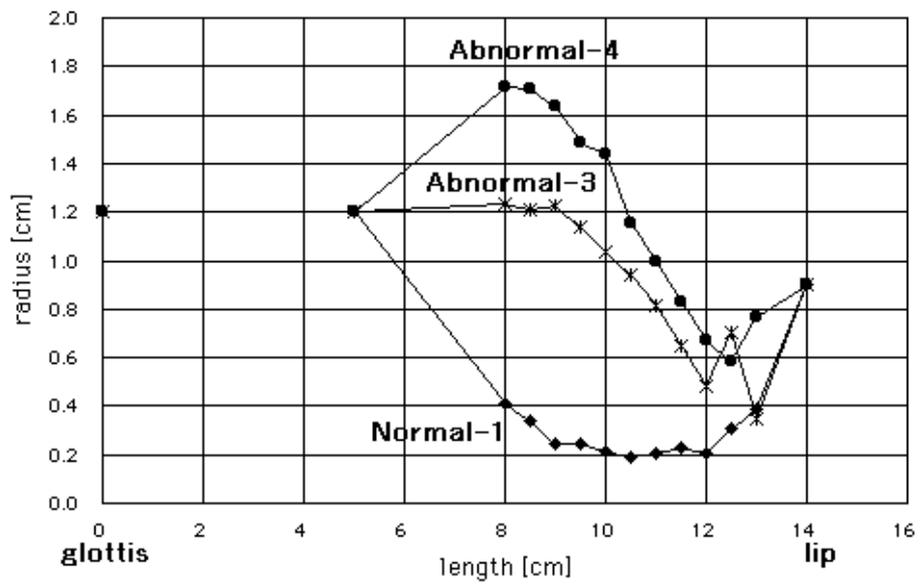


⊗ 5.10: Proposed Model Data of Abnormal-4

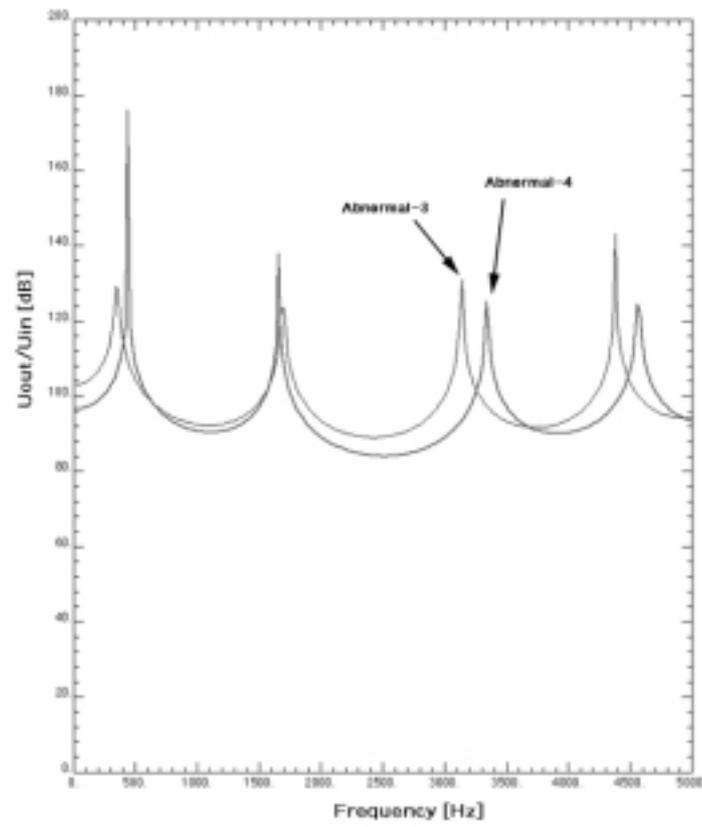


⊠ 5.11: Frequency Response of Abnormal-4

Abnormal-3 and Abnormal-4

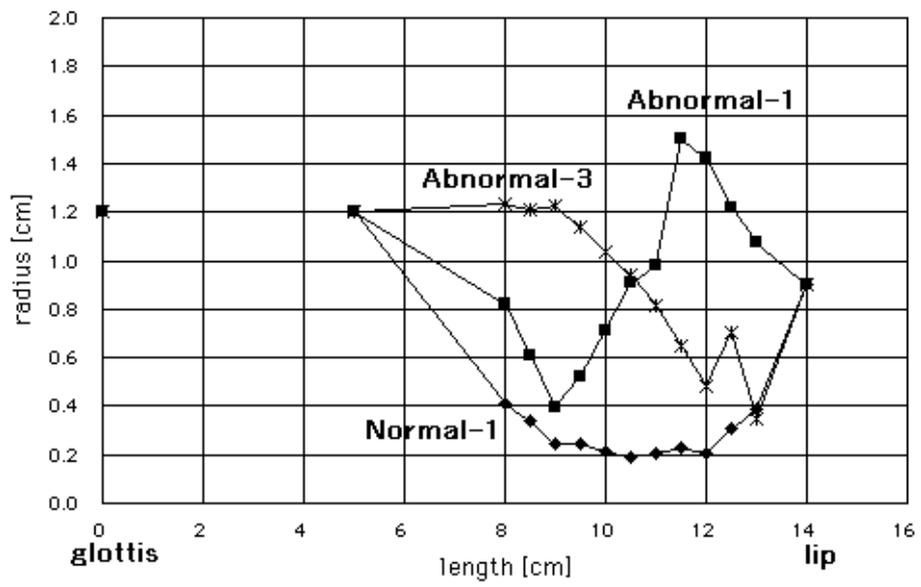


⊠ 5.12: Proposed Model Data of Abnormal-3 and Abnormal-4

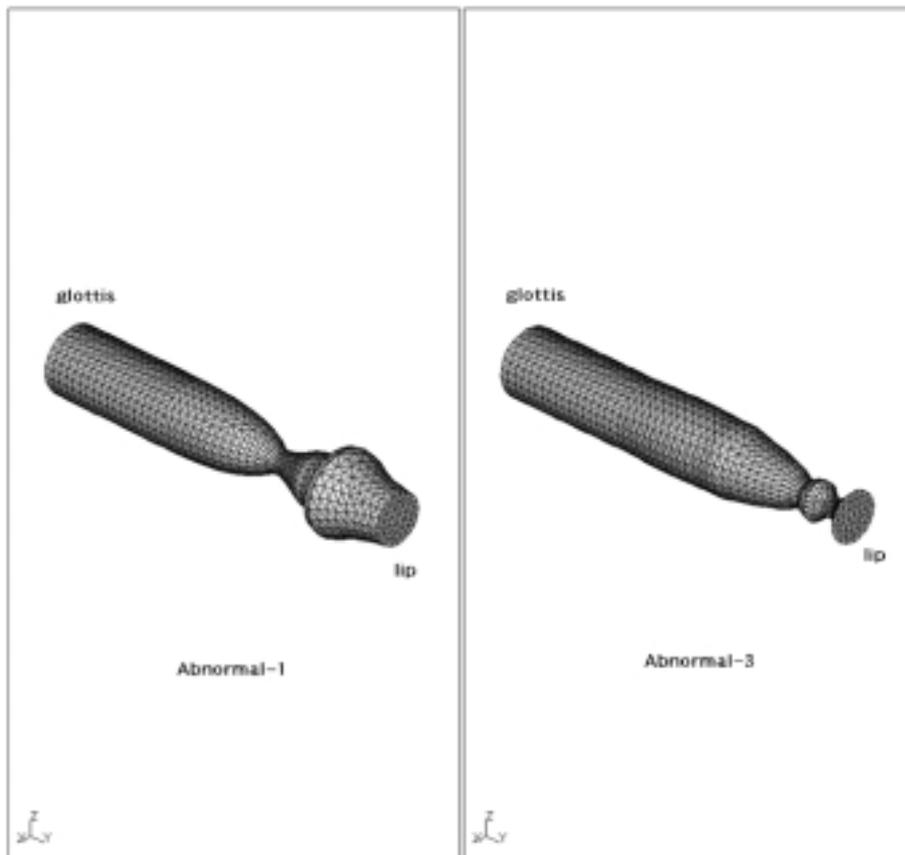


☒ 5.13: Frequency Response of Abnormal-3 and Abnormal-4

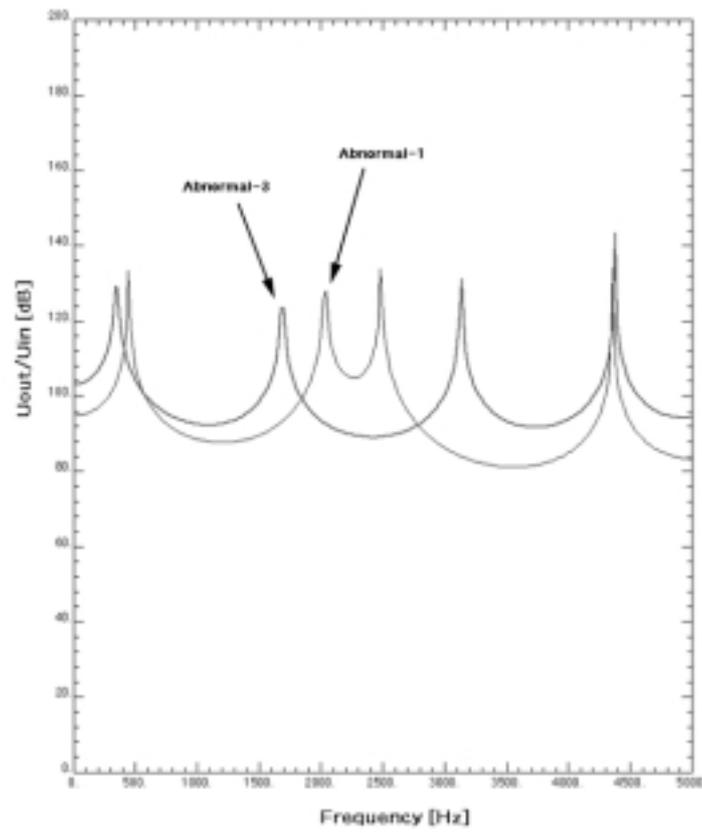
Abnormal-1 and Abnormal-3



⊠ 5.14: Proposed Model Data of Abnormal-1 and Abnormal-3



☒ 5.15: F.E.Model of Abnormal-1 and Abnormal-3



☒ 5.16: Frequency Response of Abnormal-1 and Abnormal-3

第 6 章

モデルの修正

6.1 はじめに

前章のモデルは舌付近の断面積変化のみを考慮した解析を行ったが、それでは音声分析結果との誤差をうめることができない。そこで、声門付近と舌付近の「せばめ」の断面積比に着目し、データを修正したモデルと音声分析結果との比較を行う。

さらに、舌口底切除患者の断面形状は健常者のものと比較して複雑な構造になっている。断面形状及び、軸の変化がスペクトルに及ぼす影響も考えられる。そこで、断面形状と軸を変化させたモデルを作成し、そのときのスペクトルへの影響を見る。

6.2 声門付近と舌付近での断面積比の修正 (Abnormal-4)

Abnormal-4 において、PNS 付近のデータから推測すると、声門付近でのデータが他のモデルと比較して大きいのではないかと考えられる。そこで声門付近のデータを変えることにより、「せばめ」との断面積比を変えたときのスペクトルの変化をみる。

- ProposedModel-1 : $r = 1.2[cm]$
- ProposedModel-2 : $r = 1.5[cm]$
- ProposedModel-3 : $r = 1.7[cm]$

断面積を同じにする円の半径データでの比較を図 6.1 に示す。有限要素法でシミュレートした結果での比較を図 5.16, に示す。

これにより実音分析結果に若干近づく傾向は示したものの、全体的にみると誤差はまだ大きい。

この結果から Abnormal-4 に関しては、断面積変化だけでは近似できない軸に対して左右非対称であるような 3 次元的にも複雑な形状をしているためにおこるスペクトルへの影響が大きいのではないかと考えられる。

6.3 舌付近の断面形状の修正 (Abnormal-2)

Abnormal-2 に関して実音声分析結果として、舌付近の断面積データは健常例と大きく異なるものの、F1, F2 は健常例に近いホルマントを示している。しかしながら断面積変化のみを考慮したモデルにおいては、シミュレーション結果では F2 の値が低くなっていた。このことについて、3 次元的に複雑な形状をしている (図 5.7) ためにおこる影響であると考え、実際の声道形状に近いモデルを作成する。Abnormal-2 において、実声道の構造的な特徴として、犬歯近心部から第二大臼歯遠心部において舌を無理に上顎に押し上げている。これに近いモデルを作成した場合におこるスペクトルへの影響をみる。

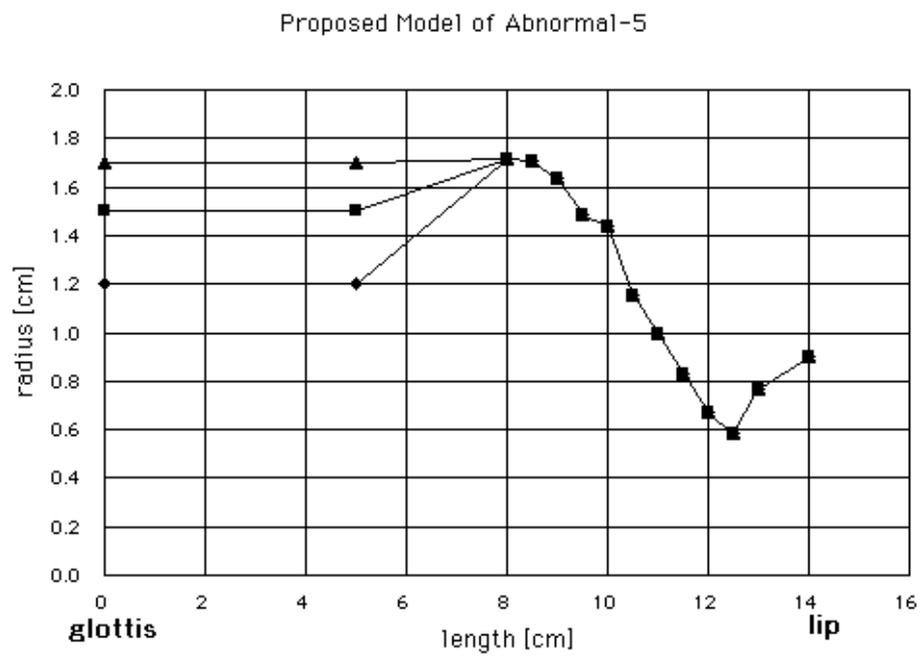
- ProposedModel-1 : 5.3.2節で示したモデル
- ProposedModel-2 : 舌付近の軸を 1[cm] ずらしたモデル
- ProposedModel-3 : 舌付近の断面形状を楕円にしたモデル
- ProposedModel-4 : 軸をずらして断面形状を楕円にしたモデル

有限要素モデルを図 6.3 に示す。ProposedModel-1, 2, 4 のシミュレーション結果を比較したものを図 6.4 に示す。ProposedModel-1, 3, 4 のシミュレーション結果を比較したものを図 6.5 に示す。

まずは舌を上顎に押し上げている影響について軸を変化させたモデル (ProposedModel-2) を作成しスペクトルへの影響をみた結果 (図 6.4)、ホルマント周波数は全体的に低くなり、これは 3 章で示した声道長を長くしたときの影響と同じである。しかし、この場合では F2 は逆に低くなってしまい、実音成分分析結果には近づかなかった。

また舌を押し上げることで空気の流れる空洞が左右に大きく広げ、上下方向にはせばめを形成していることによるスペクトルへの影響が実音声分析結果のような傾向がでているものと考え、断面形状を楕円で大きくつづしたモデル (ProposedModel-3) を作成した。スペクトルへの影響をみた結果 (図 6.5)、軸をずらした影響と同様にホルマントは全体的に低くなる傾向を示した。

そして実際の形状に近いと思われるモデルとして、軸をずらして断面楕円につぶしたモデル (ProposedModel-4) については、上述した 2 つの影響が増幅されさらにホルマントは低くなる傾向を示した。したがって、このモデルに関しては実際の声道形状において、3 次元的な構造がスペクトルに影響を及ぼしていることも考えられるが、それよりも舌を押し上げることによりせばめを無理に形成していることから、実際に空気が流れている空洞と断面積測定値との誤差があるのではないかと考えられる。



⊠ 6.1: Proposed Model Data of Abnormal-4

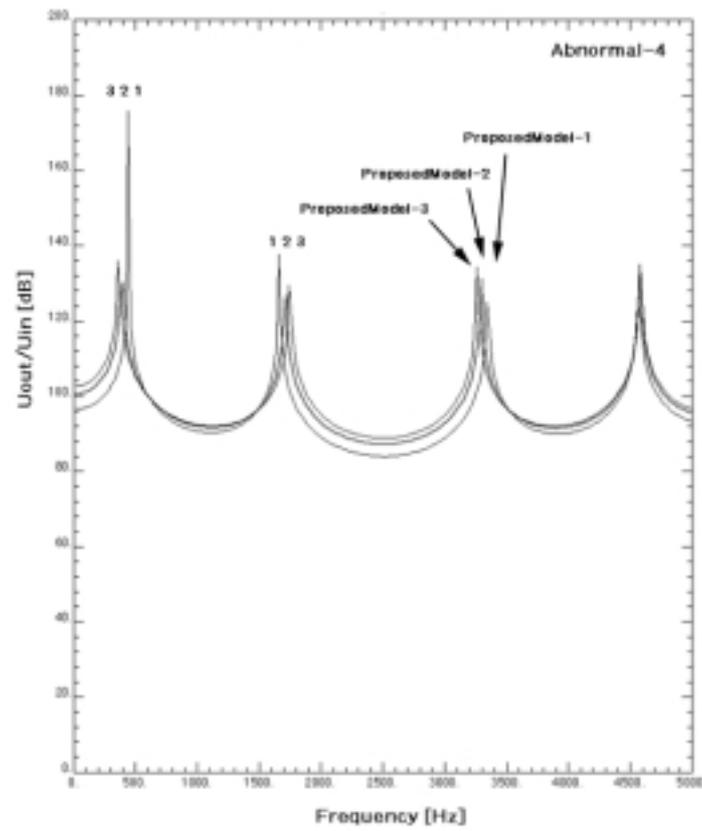
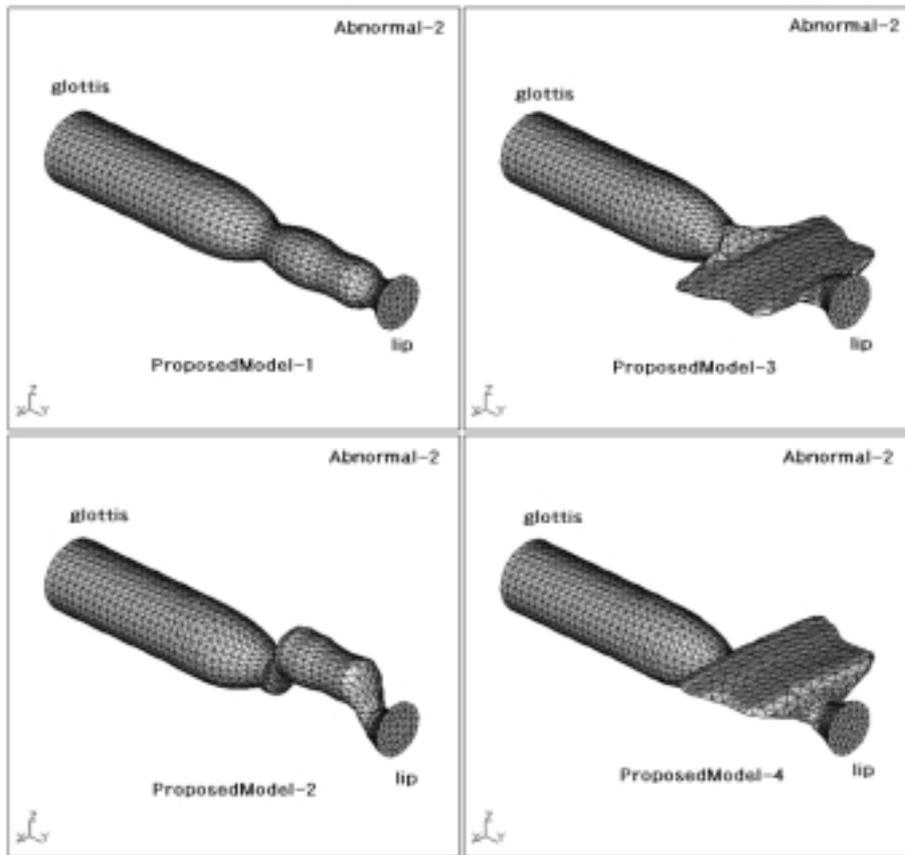
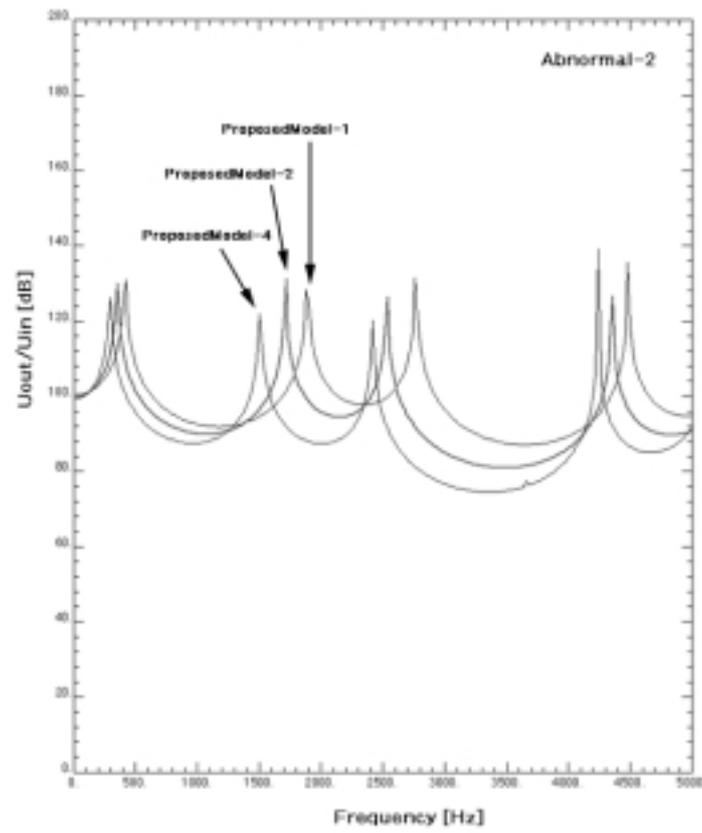


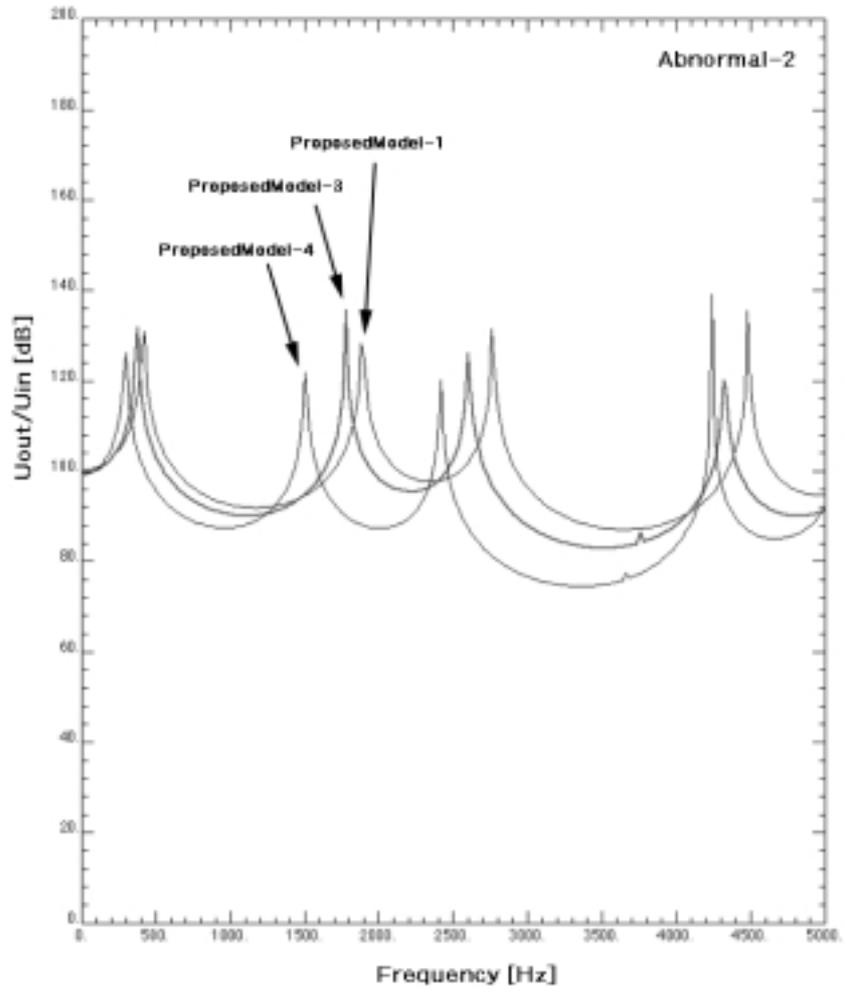
图 6.2: Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-4



⊗ 6.3: F.E.Model of ProposedModel at Abnormal-2



⊗ 6.4: Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-2



⊗ 6.5: Frequency Response of ProposedModel at Abnormal-2

第 7 章

結論

7.1 本研究の成果

本研究で得られた結果より以下のことがいえる。

- 声道長の違いはスペクトル領域で全体的に影響する。
- 日本語母音 /i/ に関しては舌後方から声門までの構造よりも、舌付近でのせばめによる構造的特徴の方がスペクトルに強く影響する。
- 日本語母音 /i/ 発話においては舌付近でのせばめの長さ、その位置が重要なポイントである。
- 日本語母音 /i/ 発話においては口腔後方の断面積と舌付近でのせばめの断面積との比がスペクトルに影響する。
- 舌付近の声道断面積データだけの 1 次元の声道近似モデルでホルマント周波数をある程度シミュレートできるものもあるが、断面形状が複雑である場合には 3 次元的影响を考慮したモデルで近似する必要がある。

本研究により、日本語母音 /i/ 発話時における声道近似モデルからホルマント周波数をシミュレートした結果を示した。これより、断面積変化だけで音声分析結果に近似するモデルにおいて、その構造的特徴とスペクトルとの関係を一部解明することができた。

7.2 今後の課題

本研究で作成した声道近似モデルにおいて、舌付近での断面積とその断面形状の一部の実測値しか得られていなかったため、声門付近から舌後方までの形状、ボリューム及び、口唇から声門までの声道長は、これまでのモデルから推測したモデルである。したがって、実音声分析結果との比較は、そのホルマント同志の位置関係の傾向しかみていない。今後全てのデータがそろえば、ホルマント周波数の誤差をうめることができると考えられる。

また、シミュレーション条件においては、全て剛壁、放射特性を考慮していない声道近似モデルでの結果を示した。今後はこれらのパラメータを付加したときのスペクトルへの影響をみる必要がある。

謝辞

常日頃から数多くの有益な御助言、御指導を頂きました赤木正人教授、ならびに本学の教官の皆様に深く感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたって、声道断面積データおよびMRI画像を提供していただき、貴重な助言もしていただきました昭和大学歯学部鈴木規子助教授ならびに博士課程3年の齋藤浩人氏、静岡大学北村達也助手に感謝いたします。

最後に、2年間の研究生生活を支えて下さった家族、友人、ほか全ての皆様に厚く感謝いたします。

参考文献

- [1] 高木直子, 側音化構音の知覚と音響特性に関する基礎的研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文,1996.
- [2] 林勝己, 側音化構音の音色知覚と音響特性に関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文,1997.
- [3] 斎藤浩人、赤木正人, 口腔疾患に伴う構音障害の音響的特徴に関する研究, JAIST Reserch Report,IS-RR-98-0011P,1998.
- [4] 高橋信之、中井孝芳、鈴木久喜, 有限要素法による音響管の要素分割と計算精度, 静岡大学大学院電子科学研究科研究報告第 18 号, Vol. 18,pp41-44,1996.
- [5] 戸川隼人, 有限要素法へのガイド, 1 章,p.3, サイエンス社,1979.
- [6] 戸川隼人, 有限要素法へのガイド, 5 章,pp.143-148, サイエンス社,1979.
- [7] 松崎博季, 三木信弘, 小川吉彦, 音響管内の 3 次元の音響的特徴量の有限要素法による解析, 電子情報通信学会論文誌,vol.J80-A,No.9,pp.1351-1359,1997.
- [8] 三井田惇郎, 音響工学 (Acoustic Engineering), 2 章,p.26, 昭晃堂,1987.
- [9] 鈴木久喜, 音声のデジタル信号処理 (上), 3 章,p.48, コロナ社,1983.
- [10] 北村達也, MRI による舌・口底切除患者の 3 次元声道形状の計測の試み, 日本音響学会秋期研究発表会講演論文集,2-Q-13,pp305-306,1999.
- [11] 上條雅彦, 図説口腔解剖学1 骨学 (頭蓋学),p282, アナトーム社 (東京).