

音響計測、電気回路理論および有限要素法により求めた声道模型の 伝達関数の比較

北村 達也[†] 西本 博則^{††} 藤田 覚[†] 本多 清志[†]

[†] ATR 人間情報科学研究所 〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

^{††} 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1

E-mail: †{kitamura,fujita,honda}@atr.co.jp, ††nhiro@jaist.ac.jp

あらまし 有限要素法により得られる声道の伝達関数の精度を調べるために、単純な形状の音響管を対象にして音響計測と電気回路理論と有限要素法 (FEM) により求めた伝達関数の比較を行った。一様音響管を対象とした場合、これらの3つの方法で求めた共鳴周波数がほぼ一致した。Chiba and Kajiyama の声道模型のレプリカを対象とした場合には、理論値と有限要素法により求めた伝達関数はほぼ一致した。従って、本研究で対象とした音響管に関しては、FEM によりほぼ正確な結果が得られることが示された。しかし、音響計測により求めた伝達関数には、3 kHz 以上の帯域でピークがみられず音響計測の方法に何らかの問題があることが示唆された。

キーワード 伝達関数, 共振周波数, 声道模型, 音響計測, 電気回路理論, 有限要素法

Comparison of measured and simulated transfer functions of vocal tract model

Tatsuya KITAMURA[†], Hironori NISHIMOTO^{††}, Satoru FUJITA[†], and Kiyoshi HONDA[†]

[†] 2-2-2 Hikaridai Seika-cho Soraku-gun Kyoto 619-0288

^{††} 1-1 Asahidai Tatsunokuchi-cho Nomi-gun Ishikawa 923-1292

E-mail: †{kitamura,fujita,honda}@atr.co.jp, ††nhiro@jaist.ac.jp

Abstract The aim of this study is to confirm accuracy of simulated transfer functions by using the finite element method (FEM). In this study, transfer functions of a few simple acoustical tubes were examined using three methods: acoustical measurement, electric circuit model, and FEM, and resonance frequencies of these transfer functions were compared. Resonance frequencies obtained by these three methods were almost in agreement for a uniform tube. For the replicas of vocal tract physical models from Chiba and Kajiyama, resonance frequencies simulated by using FEM almost corresponded with those by the electric circuit model. However, resonance peaks of measured transfer functions were not evident in the frequency range over 3 kHz. This implies that the measurement method used in this study has some problems.

Key words transfer function, resonance frequency, vocal tract model, acoustical measurement, electric circuit model, FEM

1. はじめに

核磁気共鳴法 (MRI) は、発話時の発声器官の形態観測に広く用いられている。MRI を用いれば、非侵襲的にかつ被曝の問題なく発声器官の3次元構造を観測することができ、さらに3次元 MR 画像から声道領域を抽出することによって3次元声道形状を得ることが可能である ([1] [2] など)。このようにして得られた3次元声道形状をもとにして、有限要素法 (FEM) により声道の伝達関数を求める研究が行われている ([3] [4] [5] [6] [7]

など)。

声道断面積関数から伝達関数を求める方法としては、電気回路理論 [8] が古くから用いられている。この理論は音響管内を音波が平面波として伝播することを仮定している。しかし、実際の声道では必ずしも音波が平面波として伝播するとは限らない [9]。それに対して、FEM は平面波伝播の仮定を必要としないため、3次元声道形状の伝達関数を求める有効な手法であるといえる。

最近では FEM の解析プログラムが市販され、必ずしもプロ

グラムを自作せずとも FEM を用いた研究ができるようになった。しかし、市販のパッケージを用いる場合、その中身がブラックボックス化されているため計算方法や処理過程、また得られた結果の精度を知ることが困難であるという問題がある。従って、「MRI 等を用いて正確な 3 次元声道形状が得られれば、その人の実音声のスペクトルをシミュレートできるのか」が明確ではない。そのため、MRI から得られた声道模型の伝達関数と FEM によるシミュレーション結果とを比較する必要があると考える。

一方で、3 次元 CAD データからアクリル樹脂などで実模型を作成する光造形技術が普及してきた。光造形技術は、金型を使わず、CAD データから直接模型を造形するため比較的安価な手法である。この技術を用いることによって、MR 画像から抽出した 3 次元声道形状を実模型として作成することができる [10]。従って、光造形技術を用いて声道模型を作成し、音響計測によりその伝達関数を求めることができれば、FEM を用いたシミュレーション結果と比較してその精度を検証することができる。

以上のことから、本研究では音響計測、電気回路理論および FEM により求めた音響管の伝達関数の比較を行う。本稿では、その予備検討として、曲がりや分岐管を持たず、断面形状が円で表される単純な形状の音響管を対象にして行った実験結果について報告する。

2. 音響計測に関する理論

音響管の伝達関数 $H(\omega)$ は、入力端と出力端の体積速度の比 $U_{out}(\omega)/U_{in}(\omega)$ で与えられる。ここで ω は周波数である。体積速度を直接計測することは困難であるため、音圧から求めることを考える。

まず、入力端の体積速度 $U_{in}(\omega)$ について考える。図 1 に示すように、伝達関数の計測対象である音響管の入力端に半径が既知の音響管 T を接続して音を入力する。そして、この音響管 T の中で近接した 2 点の音圧 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ を計測する。

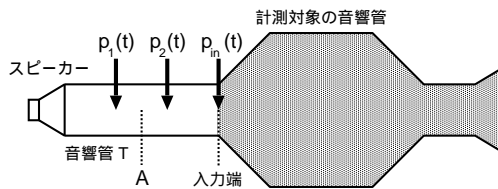


図 1 入力端の音圧と粒子速度の計測。

音波が音響管内を平面波として伝播すると仮定すれば、この 2 点の間地点（図 1 中の A 点）における粒子速度 $v_A(t)$ と音圧 $p_A(t)$ を次式により近似的に求めることができる [11] [12]。

$$v_A(t) = -\frac{1}{\rho d} \int_{-\infty}^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau \quad (1)$$

$$p_A(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (2)$$

ここで ρ は空気の密度、 d は 2 つの測定点間の距離である。

図 1 中の A 点から入力端までの長さおよび断面積が既知であれば、その区間の transmission matrix を用いることによって、入力端における音圧 $P_{in}(\omega)$ および粒子速度 $V_{in}(\omega)$ を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} P_{in}(\omega) \\ V_{in}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} transmission \\ matrix \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_A(\omega) \\ V_A(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで $P_A(\omega)$ と $V_A(\omega)$ はそれぞれ $p_A(t)$ と $v_A(t)$ の周波数領域での表現である。そして、入力端の体積速度 $U_{in}(\omega)$ は粒子速度 $V_{in}(\omega)$ と断面積 $Area_{in}$ との積で求められる。

$$U_{in}(\omega) = Area_{in} \times V_{in}(\omega) \quad (4)$$

次に、出力端の体積速度 $U_{out}(\omega)$ について考える。無限平面上の半径 a の円形ピストンの放射インピーダンス $Z_r(\omega)$ は次式で与えられる [15]。

$$Z_r(\omega) = \frac{j\omega L_r R_r}{R_r + j\omega L_r} \quad (5)$$

$$R_r = \frac{128}{9\pi^2} \quad (6)$$

$$L_r = \frac{8a}{3\pi c} \quad (7)$$

ここで、 c は音速である。出力端の体積速度 $U_{out}(\omega)$ は、この放射インピーダンス $Z_r(\omega)$ と出力端の音圧 $P_{out}(\omega)$ から求める。

$$U_{out}(\omega) = \frac{P_{out}(\omega)}{Z_r(\omega)} \quad (8)$$

以上により求めた $U_{in}(\omega)$ と $U_{out}(\omega)$ から伝達関数 $H(\omega)$ を求める。

3. 計測方法

計測に用いた機器を表 1 に、計測機器の構成を図 2 に示す。ホンドライバユニットの上端には半径 5 mm の導管を開けたアクリル製ブロックが取り付けられている。先の報告 [13] ではこのブロックの長さを 40 mm としていたが、測定対象の音響管の入力端とのつなぎ目において波面が乱れる可能性を考慮して 90 mm に変更した。ドライバユニットから出力された信号はこの導管を通して計測対象の音響管に伝わる。プローブマイクはこの穴と垂直の方向に開けた細い導管から挿入した。その際、プローブの先端が音響管の中心にくるようにした。

パーソナルコンピュータ (PC) で生成した 150 msec の正弦波をドライバユニットから出力し、図 2 に示す 3ヶ所のプローブマイクで音圧を計測した。出力する正弦波の周波数を 100 Hz から 5 kHz まで 10 Hz きざみで変化させ、それぞれの周波数における音圧を計測した。このドライバユニットの再生周波数範囲は 100 Hz ~ 10 kHz である。

プローブの間隔は、2 kHz 以下の周波数帯域の測定の際には 23 mm に、2 kHz を越える周波数帯域の測定の際には 11 mm に設定した。理論的には、プローブ間距離を音響管に入力する正弦波の波長の 1/4 以下に設定すればよい。しかし、波長に対してプローブ間距離が小さ過ぎると 2 点の音圧差が小さくなり、粒子速度を正しく求めることができなくなる可能性がある。そ

ここで、プローブ間距離を数段階に変化させた実験を行い、上記のプローブ間距離を決定した。

計測は気温 25 度の防音室にて行った。音圧は標準化周波数 100 kHz、量子化 15bit にて PC に保存した。計測した音圧データは、波形が安定した 100 msec の区間を切り出す。そして、ピストンホン (B&K 4228) を用いてプローブマイクごとに校正し圧力 [Pa] に変換した後、2. 節に示した理論にもとづいて伝達関数を計算した。

表 1 音響計測に用いた機器。

信号発生系	
D/A コンバータ	Roland EDIROL UA-5
アンプ	Accuphase E-305
ドライバーユニット	エール音響研究所 7550DE
収録系	
プローブマイク	B&K 4182 (プローブ 50 mm)
マイクアンプ	B&K 5935, 2609

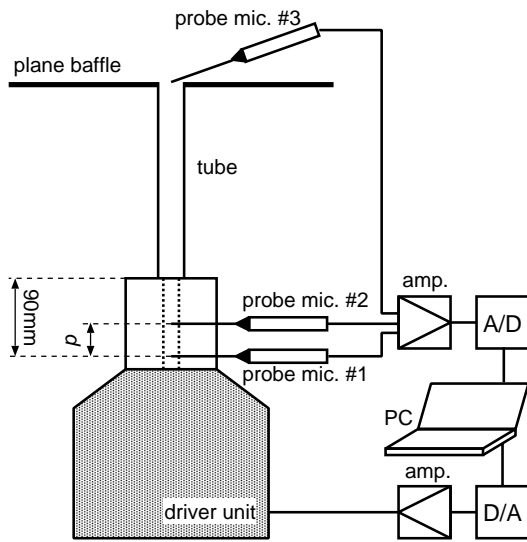


図 2 計測機器の構成。図中 d で示したプローブ間隔は、2 kHz 以下の周波数帯域の測定の際には 23 mm に、2 kHz を越える周波数帯域の測定の際には 11 mm に設定した。

4. FEM によるシミュレーション

FEM の解析プログラムとして LMS 社の SYSNOISE を用いた。入力端では正弦波振幅 1.0 m/sec の体積速度で励振させ、出力端における放射インピーダンスは (6) 式を用いた。それら以外の境界面は剛壁とした。この条件で音圧に関する波動方程式を解き、5 Hz から 5 kHz ままで 5 Hz きざみで伝達関数を計算した [16] [17] [18]。音速 c および空気密度 ρ はそれぞれ $c = 346.37 \text{ m/sec}$ 、 $\rho = 1.1733 \text{ Kg/m}^3$ を用いた。

有限要素モデルは Altair 社の HyperMesh を用いて作成した。有限要素は 1 次要素の 5 面体および 6 面体とし、要素の 1 辺の長さが 3 mm を越えないようにした [17]。

5. 計測に用いたプローブマイクの位相特性

(2) 式を用いて粒子速度を求めるためには、音圧を計測する

マイクロフォンの位相特性がそろっている必要がある。そのことを確認するために、OATSP 信号 [19] を用いて本研究で計測に用いる 2 本のプローブマイクの位相特性を求めた。

表 1 に示した信号発生系を用いて OATSP 信号を発生させ、収録した 10 回分の信号を同期加算しインパルス応答を求めた。インパルス応答を図 3 に、位相特性を図 4 に示す。これらの結果から、本研究で計測に用いる 2 本のプローブマイクの位相特性は十分にそろっているといえる。

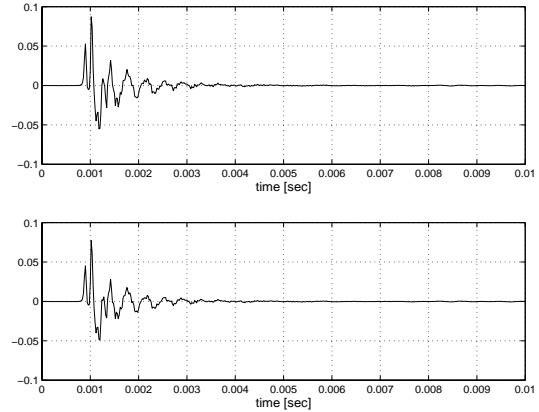


図 3 計測に用いる 2 本のプローブマイクのインパルス応答。

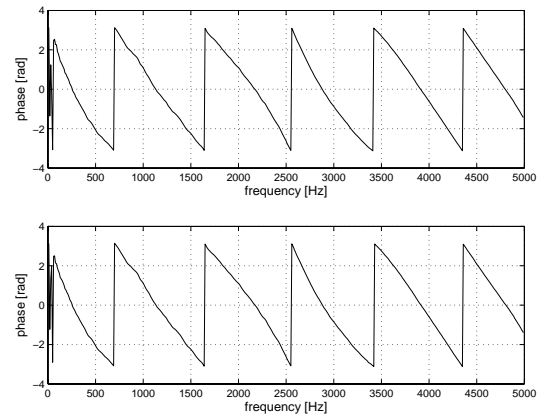


図 4 計測に用いる 2 本のプローブマイクの位相特性。

6. 一様音響管に関する検討

6.1 計測対象

計測対象の音響管は半径 8.4 mm、長さ 300 mm、肉厚 1.6 mm のアルミ製のパイプである。音響管の長さは、母音のフォルマントが現れる周波数帯域 (約 300 Hz 以上 [14]) にもとづいて決定した。管壁の振動を抑えるため、音響管の周囲を不乾性パテ (因幡電機産業 AP-1000-I) でおおった。音響管の出力端には 400 mm × 400 mm の平面パツフルを取り付けた。

6.2 理論値

半径 8.4 mm、長さ 300 mm の音響管の伝達関数の理論値を計算した。粘性および熱による損失を考慮したが、管壁振動による損失はないものとした。放射インピーダンスとしては (6) 式を用いた。音速 c および空気密度 ρ はそれぞれ $c = 346.37 \text{ m/sec}$ 、 $\rho = 1.1733 \text{ Kg/m}^3$ を用いた。

6.3 有限要素モデル

半径 8.4 mm, 長さ 300 mm の管の 3 次元形状データに対してメッシュを生成した, 生成された要素数は 3780 である.

6.4 実験結果および考察

音響計測, 理論値および FEM のシミュレーションにより得られた伝達関数を図 5 に示す. 図中, 音響計測による伝達関数のグラフでは, 電気回路理論による伝達関数と同じ範囲になるようレベルを補正している. FEM のシミュレーションにおいては粘性および熱による損失が考慮されていないため, 他の方法によって得られた伝達関数と比較して共振周波数におけるピークが鋭くなっている.

また, これら 3 つの方法により得られた共振周波数を表 2 に示す. 便宜上, 第 n 共振周波数を F_n と表す. 音響計測により得られた共振周波数と電気回路理論による理論値との差は 2.9 %未満であり, ほぼ理論値通りの結果が得られたといえる. 一方, FEM によるシミュレーションで得られた共振周波数と理論値との差は 1.6 %未満である. 従って, 一様音響管に関しては, FEM を用いたシミュレーションによりほぼ正確な結果が得られると考えられる.

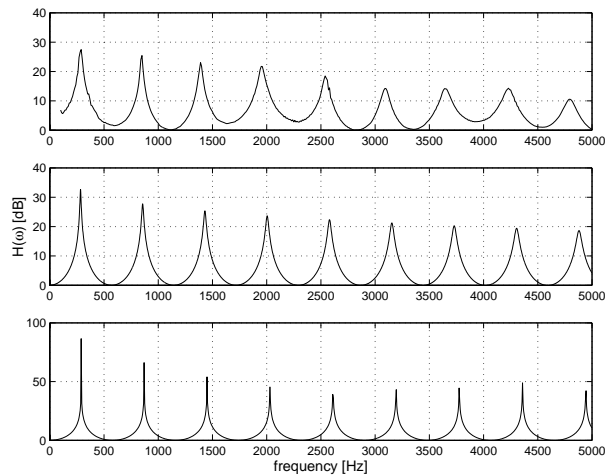


図 5 音響計測 (上), 電気回路理論 (中) および FEM によるシミュレーション (下) により得られた伝達関数.

表 2 音響計測, 電気回路理論および FEM によるシミュレーションにより得られた音響管の共振周波数 (Hz).

	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	280	284	285
F2	850	857	870
F3	1390	1431	1450
F4	1960	2005	2030
F5	2540	2580	2610
F6	3100	3155	3195
F7	3640	3730	3775
F8	4230	4305	4360
F9	4790	4880	4945

7. Chiba and Kajiyama [20] の声道模型に関する検討

7.1 計測対象

計測対象の音響管は Chiba and Kajiyama [20] の声道模型のレプリカ [21] [22] である. この声道模型は日本語 5 母音発声時の声道形状を模擬したもので, アクリル樹脂の円柱を母音発声時の声道形状と同じ断面の同心円状にくりぬいてある. 本研究では /a/, /i/, /u/ の声道模型を計測対象とした. これらの写真を図 6 に示す.

音響計測の際には出力端に 400 mm × 400 mm の平面パツフルを取り付けた. なお, この声道模型は管壁が十分に厚いので管壁振動はしないものと考え, 周囲をパテでおおうことはしなかった.



図 6 写真左から /a/, /i/, /u/ の声道模型 [21] [22].

7.2 理論値

計測対象とした声道模型には, 円錐状に断面が変化する区間がある. その区間に関しては, Caussé らの近似的方法 [23] により理論値を求めた. 粘性および熱による損失を考慮したが, 管壁振動による損失はないものとした. 放射インピーダンスとしては (6) 式を用いた. 音速 c および空気密度 ρ はそれぞれ $c = 346.37 \text{ m/sec}$, $\rho = 1.1733 \text{ Kg/m}^3$ を用いた.

7.3 有限要素モデル

文献 [21] [22] にもとづき作成した 3 次元形状データに対してメッシュを生成した, 生成された要素数は /a/ の声道模型で 3878, /i/ の声道模型で 2940, /u/ の声道模型で 2912 である.

7.4 実験結果および考察

/a/, /i/, /u/ の声道模型に関して, 音響計測, 電気回路理論および FEM のシミュレーションにより得られた伝達関数を図 7, 8, 9 に示す. これらの図の中で, 音響計測による伝達関数のグラフでは, 電気回路理論による伝達関数と同じ範囲になるようレベルを補正している.

また, これら 3 つの方法により得られた共振周波数を表 3, 4, 5 に示す. 音響計測による伝達特性は 3 kHz 付近以上の帯域においてピークがはっきりしなくなっているため, 共振周波数の特定が不可能であった.

音響計測による伝達特性は, 3 kHz 未満の帯域では電気回路理論によるものと同様概形をしているが, 3 kHz 以上の帯

域ではピークがみられない．これは本研究の音響計測手法に何らかの問題があることを示唆している．問題点を明らかにした上で改めて計測を行う必要がある．

一方，FEM によるシミュレーションで得られた共振周波数は， $/a/$ の F1 でやや差が大きい，それ以外の共振周波数では理論値との差が 3.7 % 以下である．従って，一様音響管と同様に，これらの声道模型に関しても FEM によりほぼ正確な結果が得られるといえる．

表 3 $/a/$ の声道模型に関する音響計測，電気回路理論，FEM によるシミュレーションにより得られた音響管の共振周波数 (Hz) ．

	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	630	652	695
F2	1130	1277	1230
F3	2800	2886	2940
F4	—	3890	4035
F5	—	4433	4510

表 4 $/i/$ の声道模型に関する音響計測，電気回路理論，FEM によるシミュレーションにより得られた音響管の共振周波数 (Hz) ．

	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	260	273	270
F2	2140	2190	2205
F3	2810	3059	3070
F4	—	4242	4295

表 5 $/u/$ の声道模型に関する音響計測，電気回路理論，FEM によるシミュレーションにより得られた音響管の共振周波数 (Hz) ．

	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	360	381	385
F2	1290	1391	1360
F3	2870	2854	2885
F4	—	3869	3935
F5	—	4380	4450

8. おわりに

本研究では，一様音響管と Chiba and Kajiyama [20] の声道模型のレプリカを対象にして，音響計測と電気回路理論および FEM により得られる伝達関数の比較を行った．本研究では，曲がりがなく，断面形状が円で表される音響管を対象にしたため，電気回路理論により得られる共振周波数を基準にして比較した．

一様音響管を対象にした場合には，これら 3 つの方法で得られた共振周波数はほぼ一致した．しかし，声道模型を対象にした場合には，音響計測により得られた伝達関数の 3 kHz 以上の帯域でピークがはっきり観測できず，計測方法に問題があることが示唆された．今後，問題点を明らかにした上で改めて計測を行う必要がある．

一方，FEM に関しては一様音響管と声道模型のいずれも電気回路理論の共振周波数とほぼ一致した．従って，本研究で対象とした音響管に関しては，FEM でほぼ正確な共振周波数が得られるといえる．

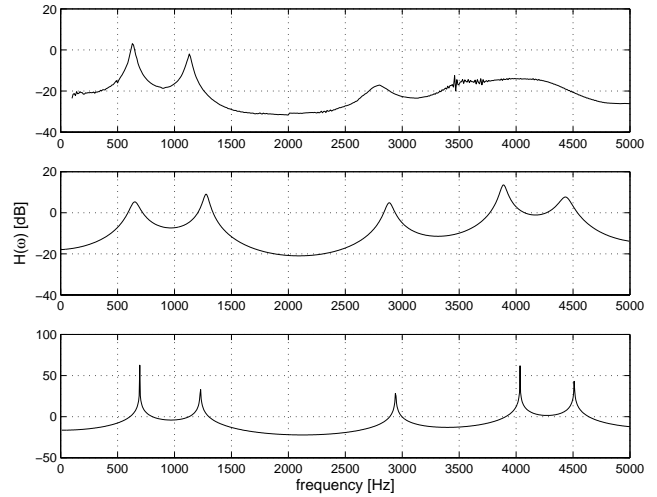


図 7 $/a/$ の声道模型に関する音響計測 (上)，電気回路理論 (中)，FEM によるシミュレーション (下) により得られた伝達関数．

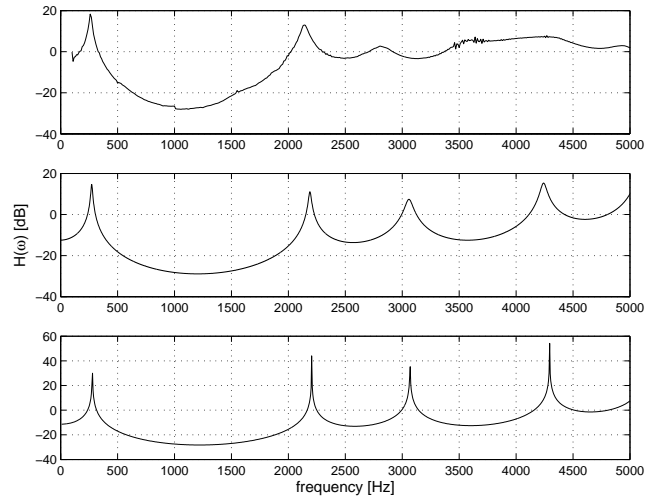


図 8 $/i/$ の声道模型に関する音響計測 (上)，電気回路理論 (中)，FEM によるシミュレーション (下) により得られた伝達関数．

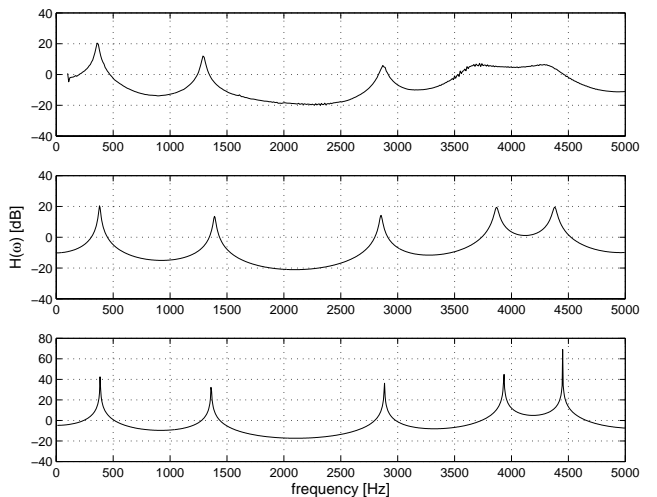


図 9 $/u/$ の声道模型に関する音響計測 (上)，電気回路理論 (中)，FEM によるシミュレーション (下) により得られた伝達関数．

本研究は通信・放送機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」により実施したものである。

文 献

- [1] Baer, Gore, Gracco and Nye, "Analysis of vocal tract shape and dimensions using magnetic resonance imaging: Vowels," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 2, pp. 799–828 (1991).
- [2] Story, Titze and Hoffman, "Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 1, pp. 537–554 (1996).
- [3] 松崎, 元木, 三木, "3次元有限要素法による分岐および口唇形状を考慮した声道モデルの音響解析," *日本音響学会講演論文集(春)* pp. 285–286 (2003).
- [4] Niikawa, Ando and Matsumura, "Frequency dependence of vocal-tract length", *Proc. of ICSLP2002*, pp. 1525–1528 (2002).
- [5] 榑原, 中井, 鈴木, "鼻腔の音響伝達特性のシミュレーションモデルによる検討," *信学技報 SP95-112* pp. 25–32 (1996).
- [6] Dedouch, Jaromir, Tomáĭ and Libor, "Finite element modeling of male vocal tract with consideration of cleft palate," *Proc. of Forum Acousticum Sevilla 2002*, SPE-01-005 (2002).
- [7] 西本, 赤木, 北村, 鈴木, "舌・口底切除患者の声道モデルを変形させたモデルの声道伝達特性の分析," *信学技報 SP2002-58* pp. 5–10 (2002).
- [8] Flanagan, "Speech analysis synthesis and perception," Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1972).
- [9] Motoki, Miki and Nagai, "Measurement of sound-pressure distribution in replicas of the oral cavity," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 2577–2585 (1992).
- [10] 藤田, 本多, 党, "母音発声時の音声スペクトルに対する歯列間隙の影響," *日本音響学会講演論文集(秋)*, pp. 335–335 (2001).
- [11] 矢野, 橋, "音響インテンシティ計測法の応用," *日本音響学会誌*, Vol. 49, No. 2, pp. 129–135 (1993).
- [12] 党, 本多, "音響管内音圧と放射音圧による音響管の伝達特性の測定方法の検討," *日本音響学会講演論文集(秋)*, pp. 375–376 (1994).
- [13] 北村, 西本, 藤田, 本多, "音響計測およびシミュレーションによる声道模型の伝達特性の比較," *日本音響学会講演論文集(春)* pp. 283–284 (2003).
- [14] 古井, "デジタル音声処理", 東海大学出版会 (1985).
- [15] Rabiner and Schafer, "Digital processing of speech signals," Prentice-Hall (1978).
- [16] "Modeling principles and theoretical basis," LMS International.
- [17] 高橋, 中井, 鈴木, "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*, Vol. 18 pp. 41–44 (1996).
- [18] 西本, "口腔疾患を有する複雑な声道形状と音声スペクトルの関係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* (2001).
- [19] Suzuki, Asano, Kim and Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 1119–1123 (1995).
- [20] Chiba and Kajiyama, "The Vowel: Its Nature and Structure," Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd., Tokyo (1941).
- [21] Arai, "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *Journal of the Phonetic Society of Japan*, Vol. 5, No. 2, pp. 31–38 (2001).
- [22] "声道模型教材 VTM-10 取扱説明書," NTT アドバンステクノロジー(株) (2002).
- [23] Caussé, Kergomard and Lurton, "Input impedance of brass musical instruments – Comparison between experiment and numerical models," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75, No. 1, pp. 241–254 (1984).