

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*

北村達也 (ATR) 西本博則 (北陸先端大 / ATR) 藤田覚 本多清志 (ATR)

1. はじめに

近年、声道の伝達特性を調べるために有限要素法 (FEM) が利用されている。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。本研究ではその予備検討として一様音響管を対象に音響計測、理論値および FEM による伝達特性の比較を行う。

2. 音響計測

2.1 音響計測に関する理論

音響管の伝達特性 $H(\omega)$ は、入力端と出力端の粒子速度の比 $U_{out}(\omega)/U_{in}(\omega)$ で与えられる。ここで ω は周波数である。粒子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、入力端の粒子速度について考える。図 1 に示すように、伝達特性の測定対象である音響管の入力端 B 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。

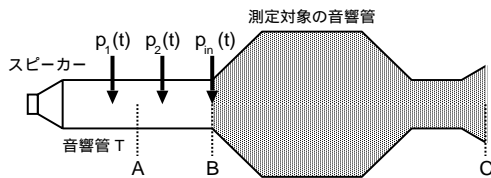


図 1. 入力端の音圧と粒子速度の計測。

そして、この 2 点の間地点 (図 1 中 A 点) における粒子速度 $u_A(t)$ と音圧 $p_A(t)$ を以下の式により近似的に求める [1]。

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

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

ここで ρ は空気の密度、 δ はマイク間距離である。

図 1 中 A 点から B 点までの長さおよび半径が既知であれば、その区間の F マトリクス M_{AB} を用いることによって、B 点における音圧 $P_{in}(\omega)$ および粒子速度 $U_{in}(\omega)$ を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} P_{in}(\omega) \\ U_{in}(\omega) \end{bmatrix} = M_{AB} \begin{bmatrix} P_A(\omega) \\ U_A(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで $P_A(\omega)$ と $U_A(\omega)$ はそれぞれ $p_A(t)$ と $u_A(t)$ の周波数領域での表現である。

次に、出力端 C の粒子速度について考える。平面上の半径 a の円形ピストンが粒子速度 u を発生しているとき、そこから垂直に距離 r だけ離れた点での音圧 p は以下の式で近似できる [2]。

$$p \approx j\omega\rho u a^2 \left(\frac{e^{-j\frac{c}{r}}}{r} \right) \quad (4)$$

ここで、 c は音速である。この式を用いて、出力端から距離 r だけ離れた点での音圧から出力端での粒子速度 $U_{out}(\omega)$ を求める。

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。

2.2 計測方法

表 1 に計測に用いた機器、図 2 に計測機器の構成を示す。ホンドドライバーユニットの上端には半径 5mm 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。ドライバーユニットから出力された信号はこの導管を通して音響管に伝わる。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。

測定対象の音響管は半径 8.4mm、長さ 170mm、肉厚 1.6mm のアルミ製のパイプである。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 400mm × 400mm の平面バツルを取り付けた。

計測は気温 20 度の無響室にて行った。パーソナルコンピュータ (PC) で生成したインパルス系列をドライバー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。このドライバーユニットの再生周波数範囲は 100 ~ 10kHz である。音圧は標準化周波数 96kHz、量子化 16bit にて PC に保存した。図 2 中のプローブマイク #1 および #2 を計測の途中で交換し、同じ位置での音圧を加算平均することにより、プローブマイクおよび収録系のチャネル間の特性差を相殺した [3]。

計測した音圧データは、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。10 回の加算平均を行った後、2.1 節に示した理論にもとづいて伝達特性を計算した。

表 1. 音響計測に用いた機器。

信号発生機器	
D/A コンバータ	ONKYO SE-U33HUB
アンプ	Accuphase E-305
ドライバーユニット	エール音響研究所 7550DE
収録機器	
プローブマイク	B&K 4182 (プローブ 50mm)
マイクアンプ	B&K 5935
A/D コンバータ	Roland EDIROL UA-5

* Comparison of measured and simulated transfer functions of vocal tract model

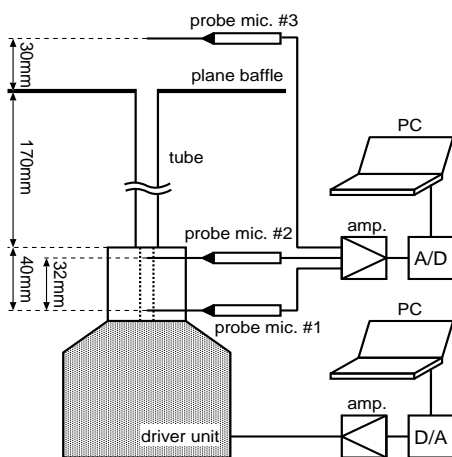


図 2. 計測機器の構成.

3. 理論値

Caussé らの方法 [4] に従い, 半径 8.4mm, 長さ 170mm の音響管の伝達特性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. また, 放射インピーダンスは無有限平面上の円形ピストンのインピーダンス $Z_r(\omega)$ を用いた [5].

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

ここで, $R_r = 128/9\pi^2$, $L_r = 8a/3\pi c$, a は円形ピストンの半径である.

4. FEM によるシミュレーション

半径 8.4mm, 長さ 170mm の管の 3 次元形状データに対して, Altair 社の HyperMesh を用いてメッシュを生成した. メッシュ形状は 4 面体とし, 4 面体の 1 辺の長さが 3 mm を越えないようにした [6]. 生成されたメッシュの要素数は 16896 である.

FEM の解析プログラムそして LMS 社の SYS-NOISE を用い, 5 ~ 5kHz までを 5Hz きざみで計算した. 音響管の壁は剛壁とし, 放射インピーダンスは (5) 式を用いた.

5. 実験結果および考察

図 3 に対象となる音響管の入力端の粒子速度 $U_{in}(\omega)$ と出力端の粒子速度 $U_{out}(\omega)$ を示す. 図 4 に $U_{in}(\omega)$ と $U_{out}(\omega)$ から得られた伝達関数を示す. 伝達関数の約 300Hz 以下の帯域には暗騒音の影響と考えられる乱れがみられるが, それ以上の帯域ではスペクトルピークが観察できる.

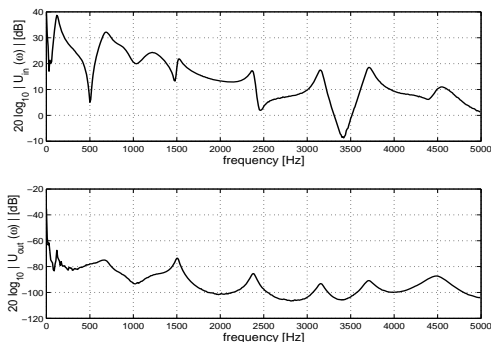


図 3. 入力端 (上) および出力端 (下) の粒子速度.

表 2 に音響計測, 理論値および FEM のシミュレーションにより得られた共振周波数を示す. 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理論値との差は 3% 以下である. これにより, 本研究の計測方法が妥当であることが示されたといえる.

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 2% 以下である. 従って, 本研究で対象とした音響管に関しては, 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いえる.

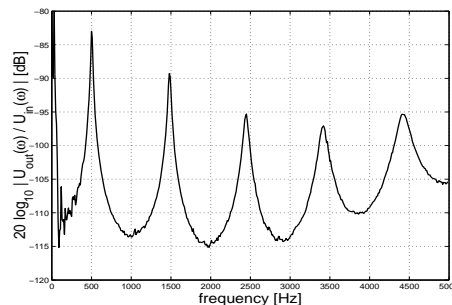


図 4. 音響計測により得られた伝達関数.

表 2. 音響計測, 理論値および 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	理論値	FEM
F1	500	498	505
F2	1480	1500	1525
F3	2450	2503	2545
F4	3420	3508	3565
F5	4410	4513	4585

6. おわりに

一様音響管を対象にして, 音響計測, 理論値および FEM による伝達特性の比較を行った. その結果, 音響計測により得られた共振周波数と理論値はほぼ一致し, FEM により求めた共振周波数と理論値もほぼ一致した. 今後, 計測精度を高めた上で, 断面積変化のある音響管に関しても同様の検討を行う予定である.

謝辞 本研究は通信・放送機構の研究委託により実施したものである. 本研究にご助言いただいた九州産業大学情報科学部一ノ瀬裕教授および当研究所の諸氏に感謝する.

参考文献

- [1] 矢野, 橋, “音響インテンシティ計測法の応用,” 音響誌 49(2) 129-135 (1993)
- [2] Fletcher and Rossing, “The physics of musical instruments 2nd ed.,” Springer-Verlag (1998)
- [3] Chung and Blaser, “Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. theory,” JASA 68(3) 907-913 (1980)
- [4] Caussé et al., “Imput impedance of brass musical instruments - Comparison between experiment and numerical models,” JASA 75(1) 241-254 (1984)
- [5] Rabiner and Schafer, “Digital processing of speech signals,” Prentice-Hall (1978)
- [6] 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,” 静大院電子科研報告 18 41-44 (1996)