

円筒管の連結で表される声道模型の伝達関数の 音響計測*

北村達也 藤田覚 本多清志 (ATR 人間情報科学研究所) 西本博則 (北陸先端科学技術大学院大学)

1. はじめに

核磁気共鳴法 (MRI) を用いた発声時の声道の形態観測から、声道は左右非対称性、複雑な断面形状、分岐管、屈曲を持つことが明らかになっている。声道が持つこれらの特徴は、音声の音質に様々な影響を与えていると考えられる。

そこで、我々は、声道を忠実に再現した模型を作り、音響計測でその伝達特性を求めることにより、声道が持つ複雑な形状の影響を調べる方法について検討している^[1]。

本研究では、その予備的検討として、伝達関数の計測方法の精度を確認する。測定対象は、電気回路モデルで伝達関数の理論値を求めることができる、円筒管の連結で表される音響管である。このような音響管の伝達関数を音響計測により求め、電気回路モデルで求めた理論値との比較を行う。

2. 音響計測に関する理論^[1]

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。 ω は周波数である。体積速度を直接計測することは困難なため、音圧を介して求める。

まず、入力端の体積速度について考える。計測対象である音響管の入力端に、直径が既知の音響管 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。

音波が音響管内を平面波伝播すると仮定すれば、この 2 点の間地点 A における粒子速度 $v_A(t)$ と音圧 $p_A(t)$ は次式により近似的に求められる^{[2][3]}。

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

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

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。

上記 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 を用いて、入力端の音圧 $P_{in}(\omega)$ および粒子速度 $V_{in}(\omega)$ を得ることができる。

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

$P_A(\omega)$ 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。入力端の体積速度 $U_{in}(\omega)$ は粒子速度 $V_{in}(\omega)$ と断面積との積で求められる。

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^[4]。

$$Z_r(\omega) = \frac{j\omega L_r R_r}{R_r + j\omega L_r} \quad (4)$$

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。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。

$$U_{out}(\omega) = \frac{P_{out}(\omega)}{Z_r(\omega)} \quad (5)$$

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

表 1 に計測に用いた機器、図 1 に計測機器の構成を示す。ホーンドライバーユニットの上端には直径 5.0 mm の導管を持つアクリル製ブロックが取り付けられている。プローブマイクはこの導管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ブロックの上に固定し、その出力端には 400 mm × 400 mm の平面バッフルを取り付けた。

計測は気温 25 度の防音室にて行った。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ーユニットから出力し、図 1 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。なお、粒子速度の計測に用いる 2 本のプローブマイクの位相特性がそろっていることは確認済である^[1]。

音圧は標準化周波数 100 kHz、量子化 15 bit 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。

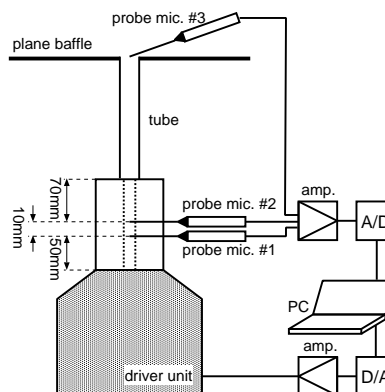


図 1. 計測機器の構成。

* Measurement of transfer functions of cylindrical tubes

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-3D
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

4. 計測結果

4.1 一様音響管

一様音響管として直径 16.8 mm, 長さ 170 mm, 壁厚 1.6 mm のアルミ製のパイプを用いた. 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.

音響計測により求めた伝達関数と電気回路モデルにより求めた伝達関数の理論値を図 2 に示す. 理論値の共振周波数に対する計測値の共振周波数の差は 5.0 % 以内である. 第 1 共振周波数を除けば, 理論値と計測値との差は 2.2 % 以内である.

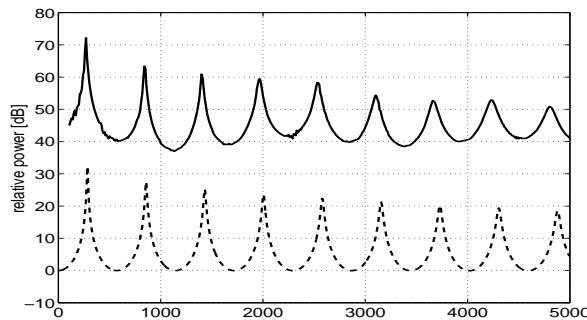


図 2. 一様音響管の伝達関数. 実線: 計測値. 破線: 理論値.

4.2 二段音響管

直径 16.8 mm, 長さ 100 mm, 壁厚 1.6 mm のアルミ製のパイプと直径 27.0 mm, 長さ 100 mm, 壁厚 2.0 mm のアルミ製のパイプを接続させ二段音響管を作成した. 直径 16.8 mm の側が出力端である. 一様音響管と同様に, 音響管の周囲を不乾性パテでおおった.

音響計測により求めた伝達関数と伝達関数の理論値を図 3 に示す. 理論値の共振周波数に対する計測値の共振周波数の差は 4.3 % 以内である.

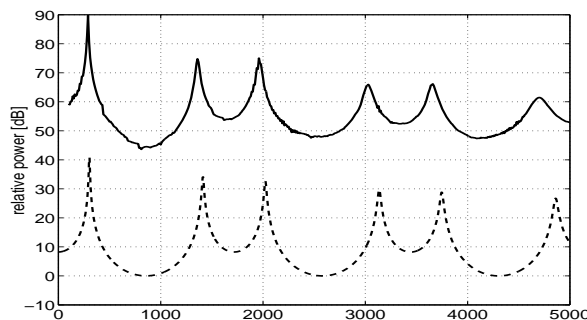


図 3. 二段音響管の伝達関数. 実線: 計測値. 破線: 理論値.

4.3 母音 /i/ の断面積関数を持つ声道模型

成人男性の /i/ 発声時の声道断面積関数 [5] を持ち, 円筒管の連結で表された声道模型を光造形により作

成した. アクリル樹脂製で, 全長は 185 mm, 壁厚は 10 mm である. 断面積関数を図 4 に示す. この断面積関数に梨状窩の断面積は含まれていない.

音響計測により求めた伝達関数と伝達関数の理論値を図 5 に示す. 第 1 共振周波数を除けば, 理論値の共振周波数に対する計測値の共振周波数の差は 6.0 % 以内である. 理論値と計測値の第 1 共振周波数の差は 40 Hz である.

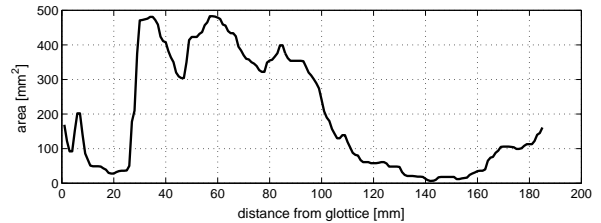


図 4. 声道模型の断面積関数.

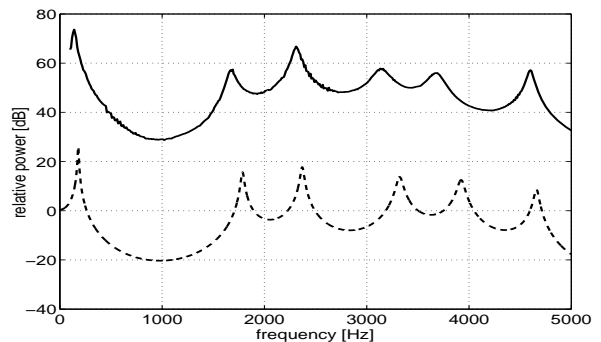


図 5. 声道模型の伝達関数. 実線: 計測値. 破線: 理論値.

5. 考察

一様音響管と二段音響管を対象にした計測において, 計測値と理論値の伝達関数の共振周波数および形状が概ね一致した. これは, 本研究で用いた方法ではほぼ正確に音響管の伝達関数を計測できることを示している. また, 複雑な断面積変化を持つ母音 /i/ の声道模型に関しても計測値と理論値の伝達関数がほぼ一致した. これにより, 光造形により声道模型を作成し, その伝達関数を音響計測により求めるといった手法の有効性が示されたと考える.

6. おわりに

円筒管の連結で表される音響管を対象にして, 伝達特性の音響計測を行った. 今後, MRI により観測した声道の実形状を持つ音響管に関して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.

参考文献

- [1] 北村ら, “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,” 信学技報 SP2003-7 (2003).
- [2] 長松編, “音・振動のモード解析と制御,” コロナ社 (1996).
- [3] 党ら, “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,” 音響講論 (秋), 375-376 (1994).
- [4] Rabiner et al., “Digital processing of speech signals,” Prentice-Hall (1978)
- [5] 竹本ら, “3D MRI movie による声道断面積関数の時間パタンの抽出,” 信学技報 SP2001-24 (2001).