
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† 西本博則‡

†ATR人間情報科学研究所

‡北陸先端科学技術大学院大学

kitamura@atr.co.jp

はじめに

目標: 複雑な形状を持つ声道の伝達特性を調べる
ことにより個人性の生成要因を明らかにする.

- 声道は, 左右非対称性, 複雑な断面形状, 分岐管, 屈曲をもつ. → 声質に影響を与えている.
- 声道を再現したモデルの伝達特性を音響計測により求め, これらの影響を調べる.
- 計測手法の精度を確認.
 - 単純な音響管を対象にした計測結果
 - 電気回路モデルで求めた理論値



音響計測に関する理論(1)

- 伝達関数 $H(\omega) = U_{out}(\omega) / U_{in}(\omega)$
- 音響管の**入力端と出力端での体積速度が必要**.
 - 体積速度を直接測定するのは困難.
→ 音圧から求める.
 - 入力端の体積速度を求めるために、断面積関数が既知の音響管を利用.

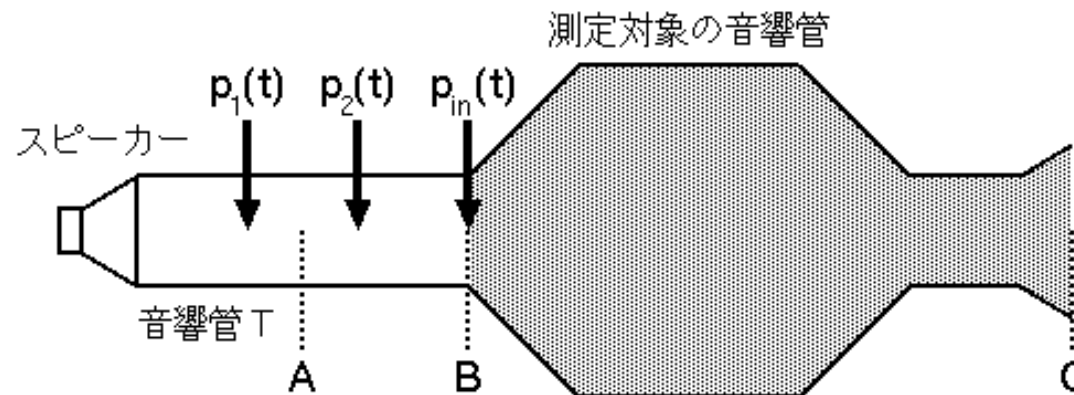


図: 入力端の音圧と体積速度の計測.

音響計測に関する理論(2)

— 入力端の体積速度 —

- 2点で音圧を測定し、その中間位置で粒子速度と音圧を求める。

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

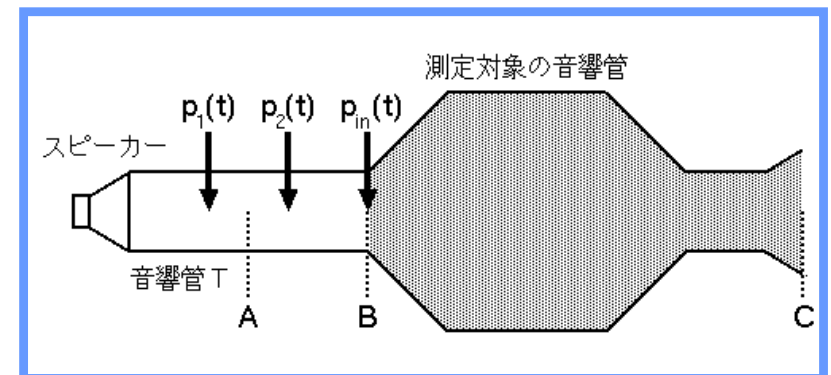
$$p_A = \frac{p_1(\tau) + p_2(\tau)}{2}$$

ρ : 空気の密度 ($1.1733 \text{ kg} / \text{m}^3$)
 δ : マイク間距離

- 入力端における体積速度を求める。

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

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



音響計測に関する理論(3)

— 出力端の体積速度 —

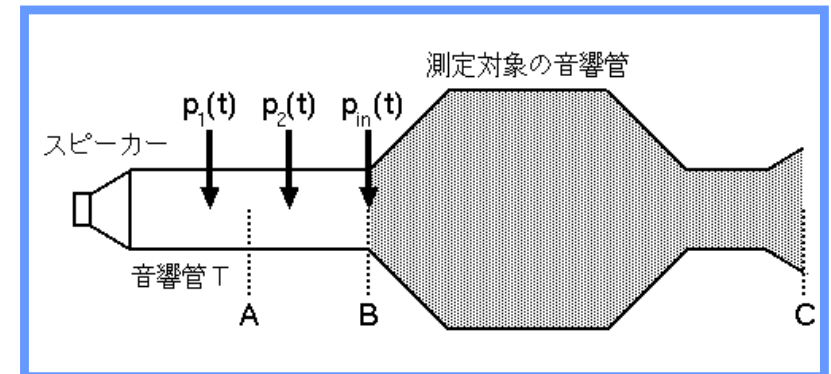
- 出力端の音圧と放射インピーダンスから求める.
- 無限平面上の円形ピストンの放射インピーダンス.

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

$$R_r = 128 / 9\pi^2 \quad L_r = 8a / 3\pi c$$

a : 円形ピストンの半径
 c : 音速 (346.37 m / s)

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



計測方法(1)

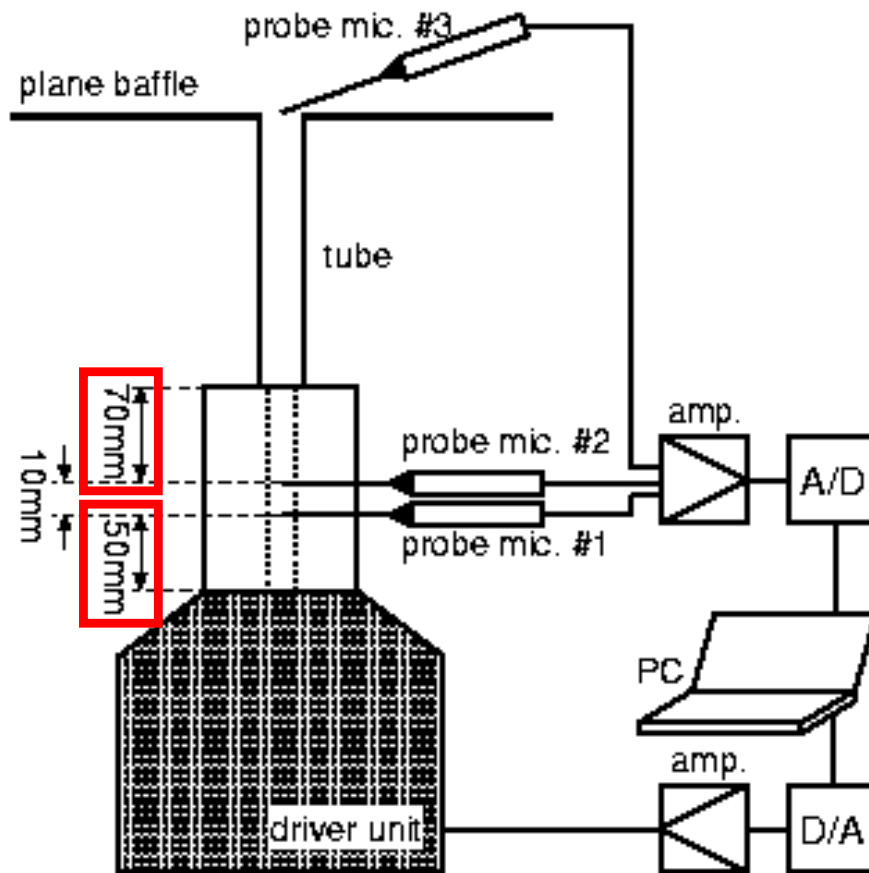
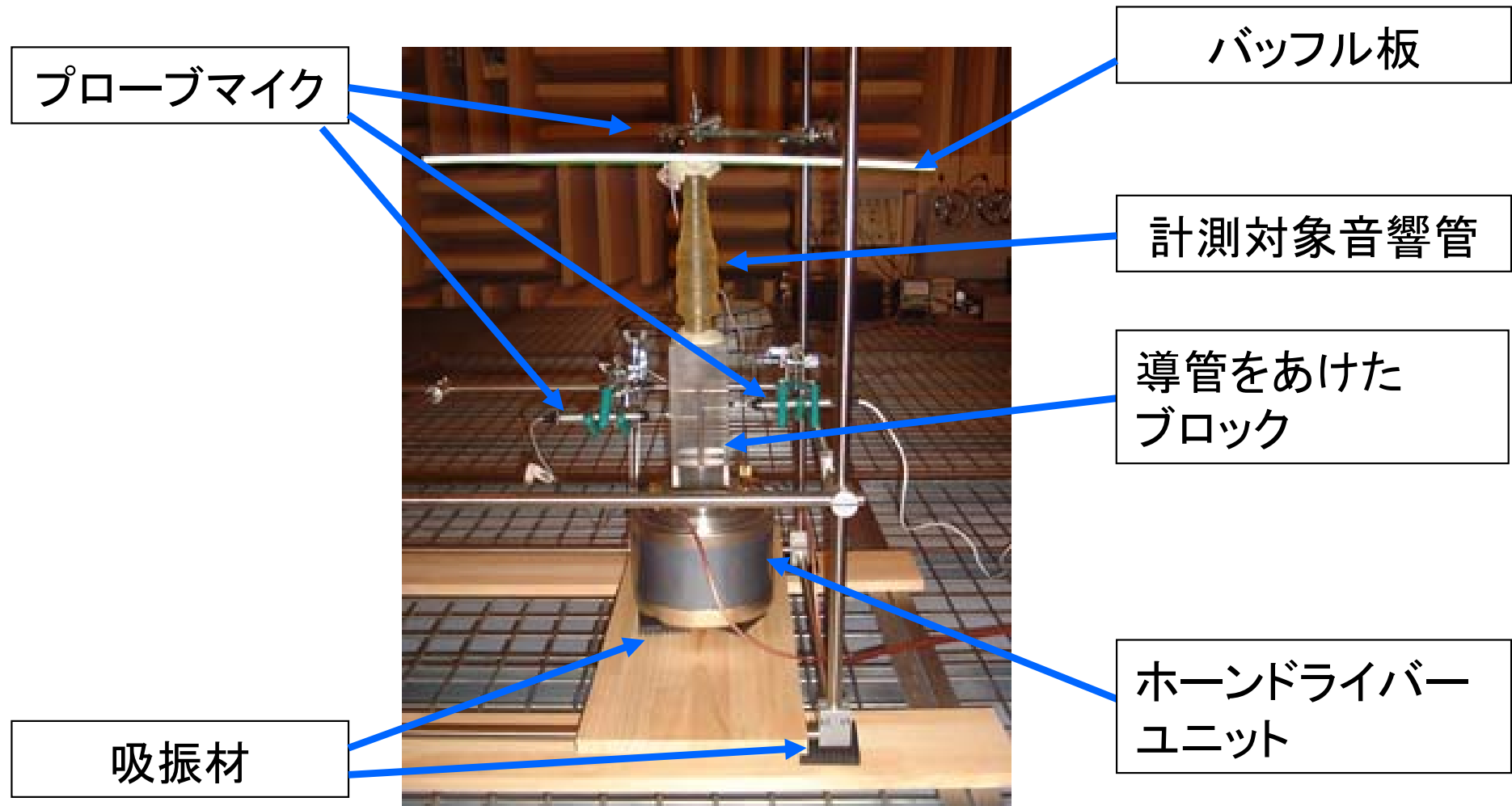


図: 計測機器の構成.

- 収録系
 - プローブマイク B&K4182
 - マイクアンプ B&K5935, 2609
- 信号発生系
 - D/A コンバータ Roland 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
- プローブマイク間隔: 10 mm固定
 - 実験により決定.

計測の様子



粒子速度の計測に用いるマイクの位相特性

- 2本の位相特性がそろっている必要がある.
- TSP信号により計測.

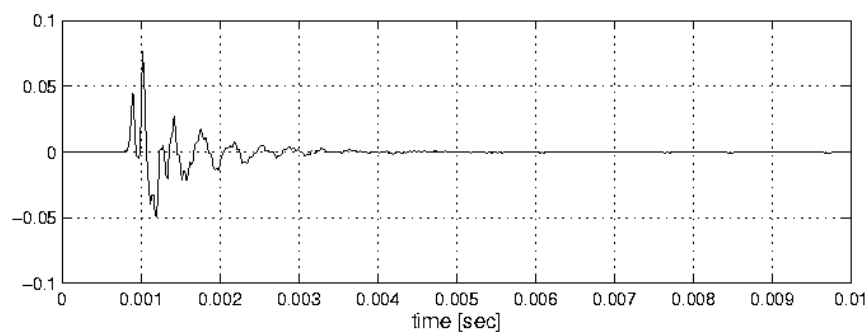
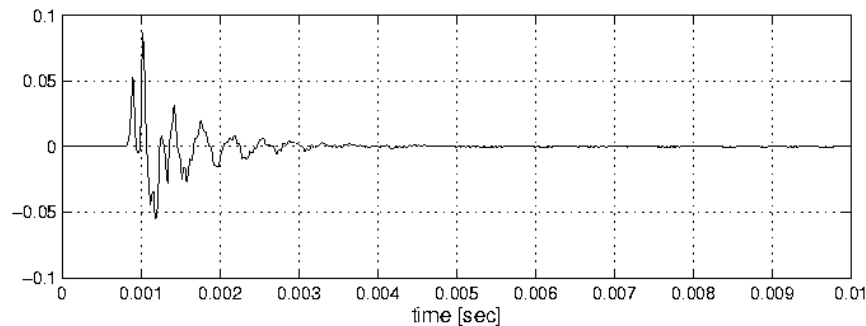


図: インパルス応答.

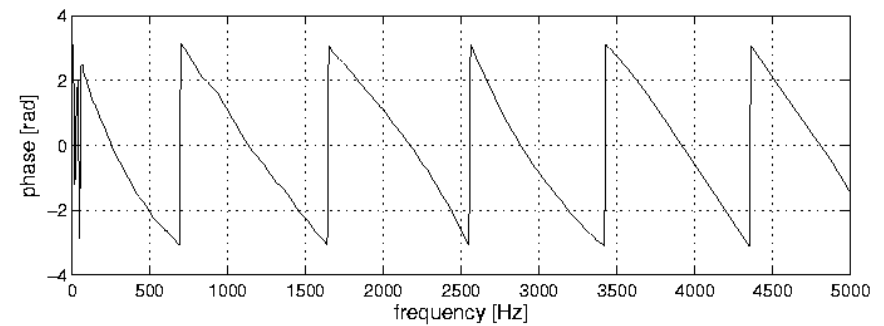
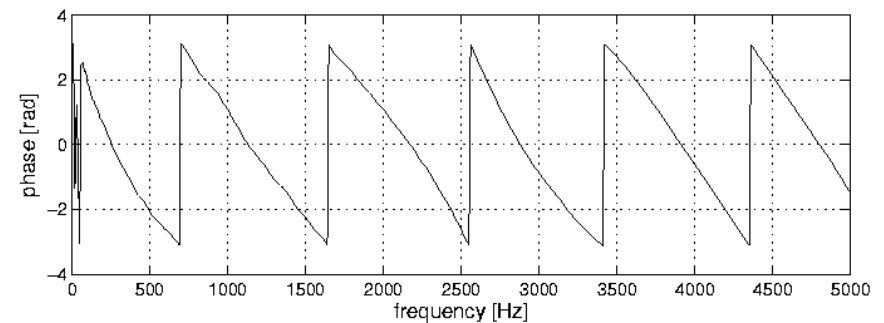


図: 位相特性.

計測方法(2)

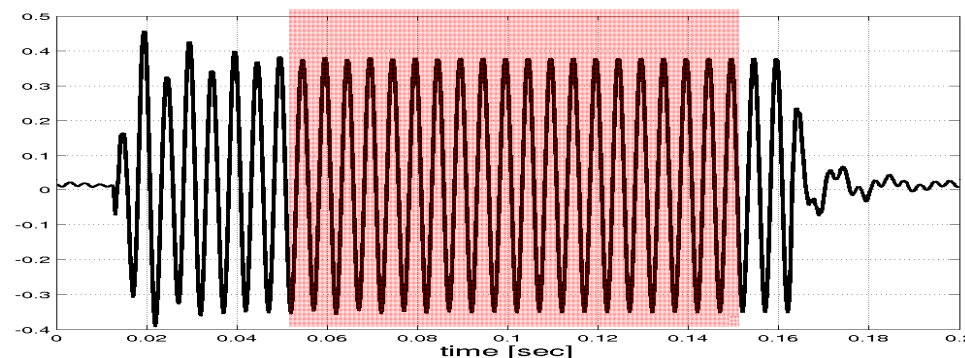
- 計測用信号

- 150 msecの正弦波 + 50 msecの無音.
- 100 Hzから5 kHzまで10 Hzきざみ.

300 msecの正弦波
+ 200 msecの無音

- 伝達関数の計算

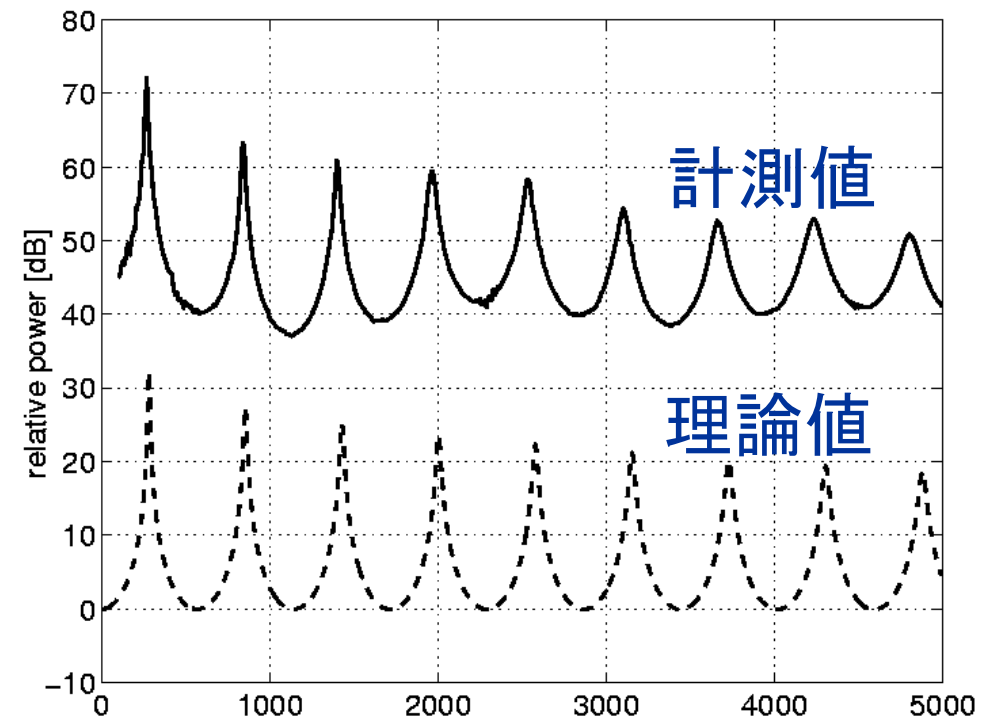
- 波形の安定した100 msecを切り出して伝達関数を求める.
- 粒子速度計測用マイクの出力にカットオフ80 HzのHPFをかけ、直流成分を除去してある.



図：観測された波形.

計測結果 一様音響管

- 直径 16.8 mm
- 長さ 300 mm (予稿誤り)
- 壁厚 1.6 mm
- アルミ製
- 周囲をパテでおおい、管壁振動を抑制。

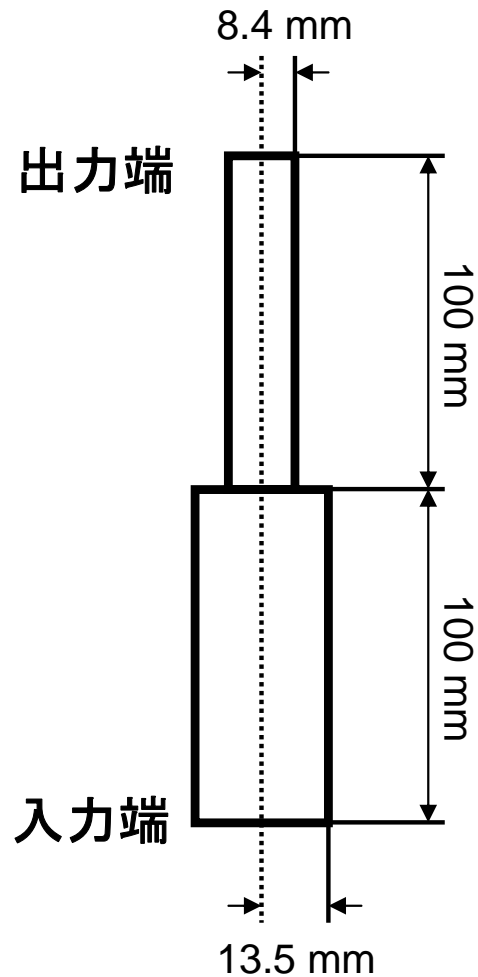


図：伝達関数.

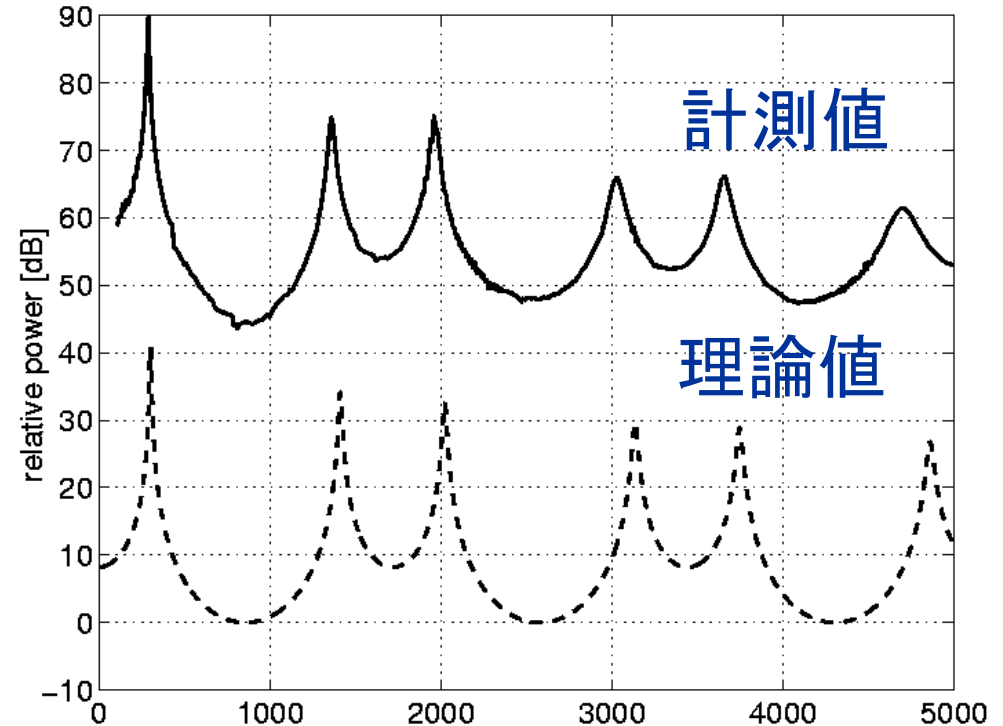
$$\text{差}(\%) = \frac{\text{理論値} - \text{計測値}}{\text{理論値}} \times 100$$

計測値と理論値の共振周波数の差は5.0%以内。(第1共振周波数を除けば2.2%以内)

計測結果 二段音響管



図：測定に用いた2段音響管.



図：伝達関数.

計測値と理論値の共振周波数の差は5.0%以内.

母音 /i/ の断面積関数を持つ声道模型

光造形により作成

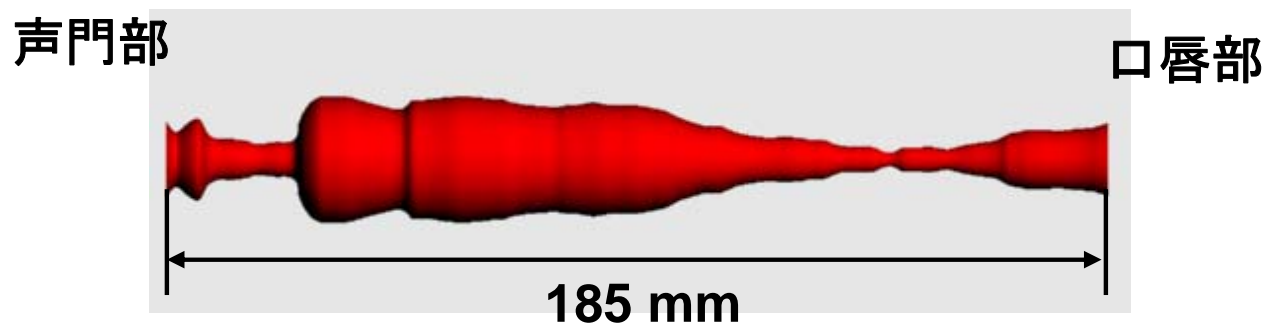


図: 測定に用いた声道模型 (3次元).

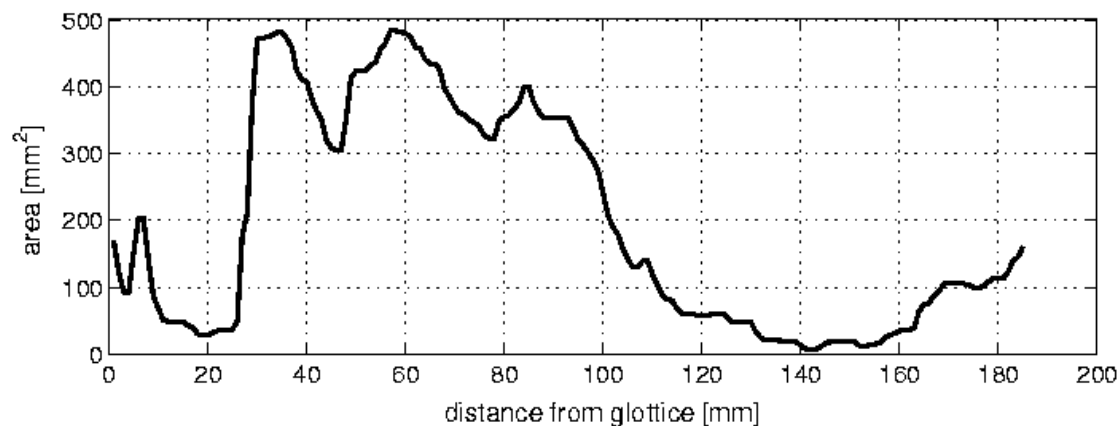
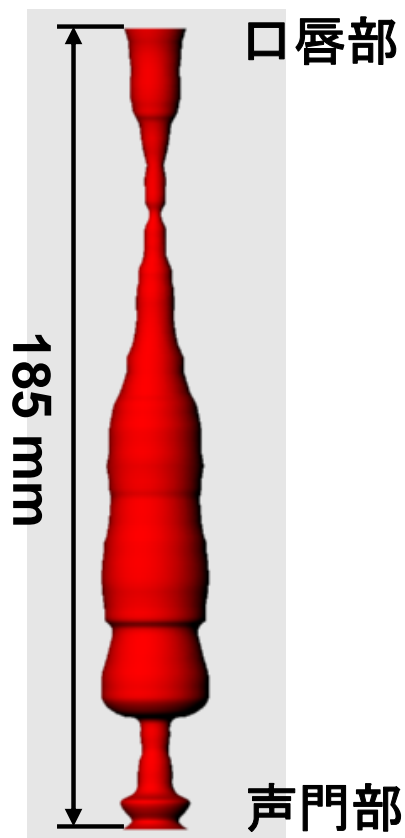
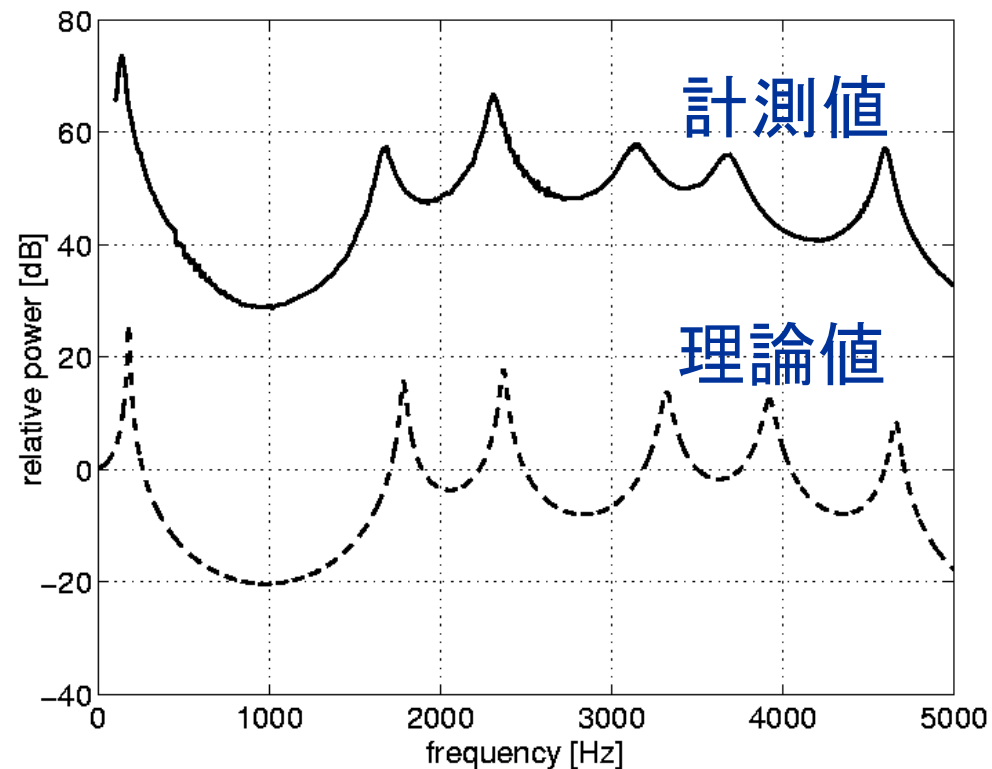


図: 声道模型の断面積関数.

計測結果 声道模型



図：測定に用いた声道模型.

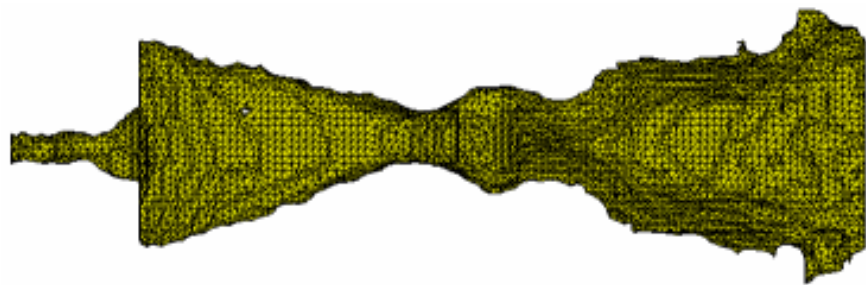


図：伝達関数.

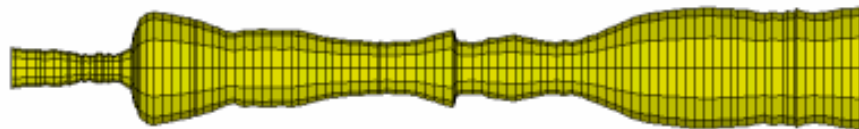
第1共振周波数を除いた計測値と理論値の共振周波数の差は6.0%未満。(第1共振周波数の差は40 Hz)

おわりに

- 一様音響管，二段音響管の伝達関数を音響計測により求め，ほぼ正確に伝達関数を求められることを示した。
- 声道模型に関しては理論値と計測値の概形は一致した。
- 今後，声道の実形状にもとづく模型の伝達関数測定を行う。



成人男性母音/a/発声時の声道(分岐管を除く)を中心線にそってまっすぐにしたもの。



上の声道の断面積を保ちつつ断面形状を円にしたもの。

※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。

共振周波数 一様音響管

表: 計測値と理論値の共振周波数 (Hz)

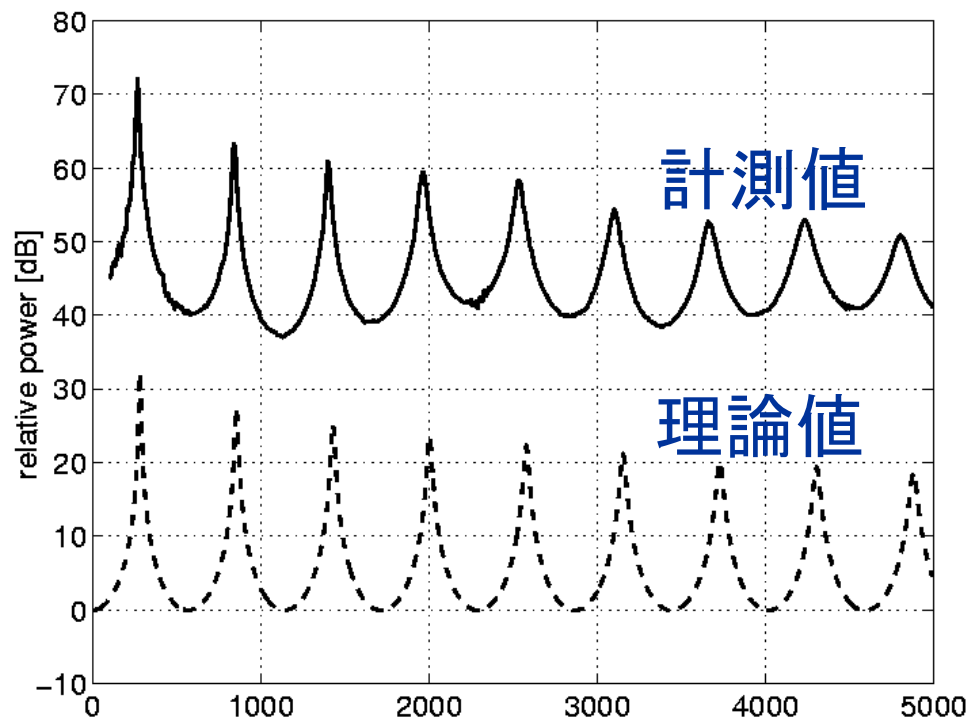
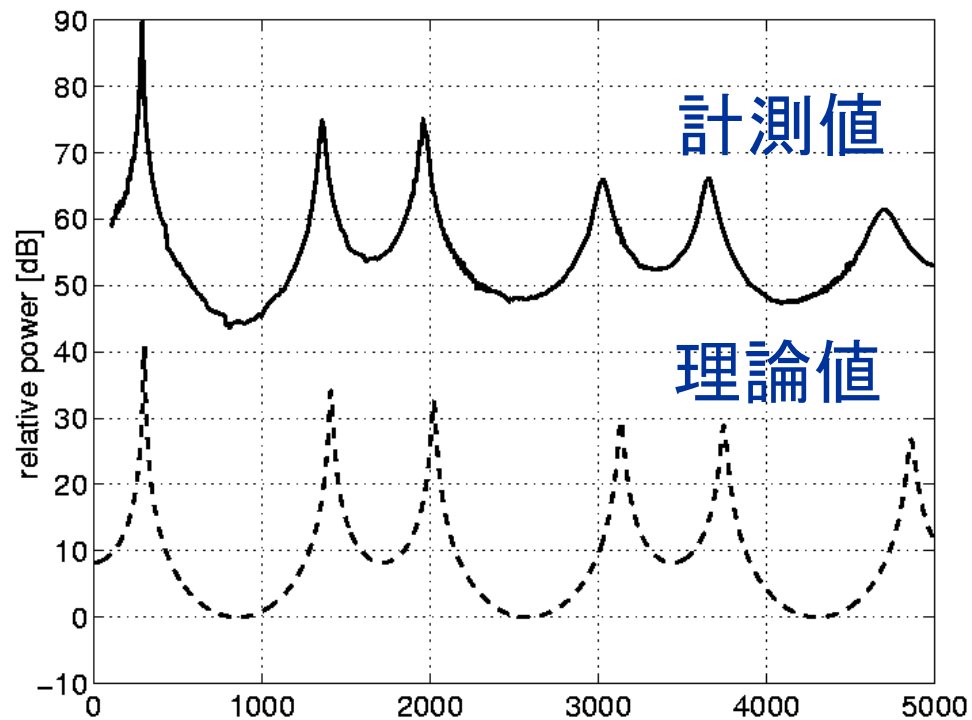


図: 伝達関数.

	計測値	理論値
F1	270	284
F2	840	857
F3	1400	1431
F4	1970	2005
F5	2530	2580
F6	3100	3155
F7	3660	3730
F8	4230	4305
F9	4800	4880

共振周波数 二段音響管

表: 計測値と理論値の共振周波数 (Hz)

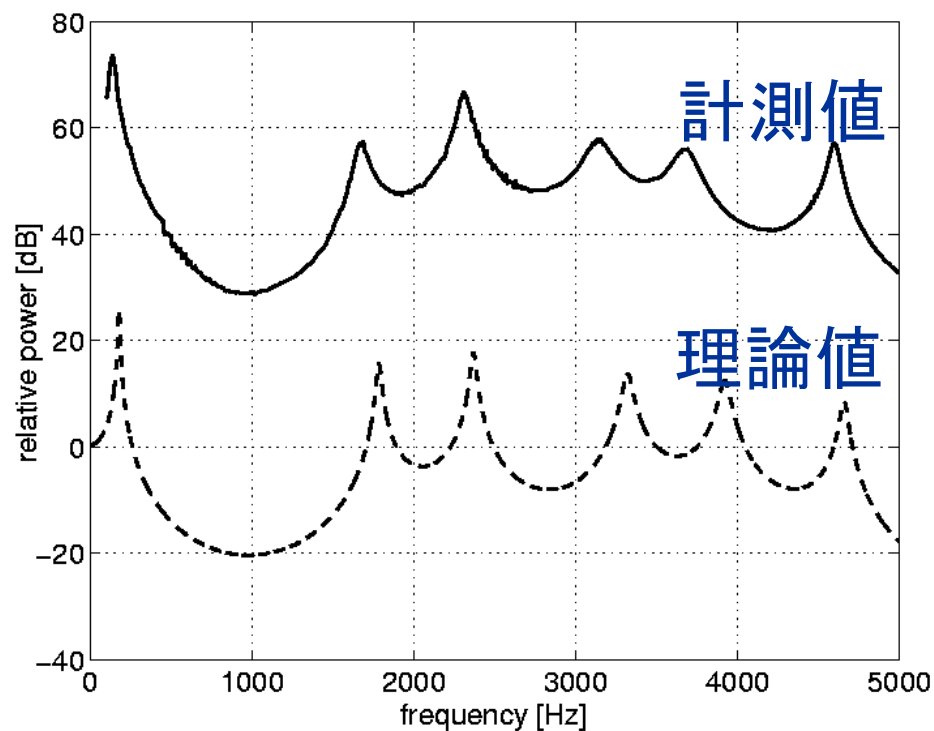


	計測値	理論値
F1	290	303
F2	1360	1413
F3	1960	2021
F4	3030	3136
F5	3660	3747
F6	4700	4861

図: 伝達関数.

共振周波数 声道模型

表: 計測値と理論値の共振周波数 (Hz)



	計測値	理論値
F1	140	180
F2	1690	1786
F3	2310	2369
F4	3130	3322
F5	3690	3923
F6	4600	4660

図: 伝達関数.