

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† 西本博則‡† 藤田覚† 本多清志†

†ATR人間情報科学研究所

‡北陸先端科学技術大学院大学

はじめに

- 最終的な目標: 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こと.
- 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.
- 市販のFEMパッケージを用いる場合, 計算方法や処理過程,
結果の精度を知ることが困難.
- 正確な声道形状が得られさえすれば, その話者の実音声の
スペクトルをシミュレートできるのか?
- “音響計測により得られる実模型の伝達関数”と“FEMにより
求める伝達関数”の比較が必要.
- 単純な音響管を対象にした予備的検討.

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直接求めるのは困難.
→ 断面積関数が既知の音響管を利用.

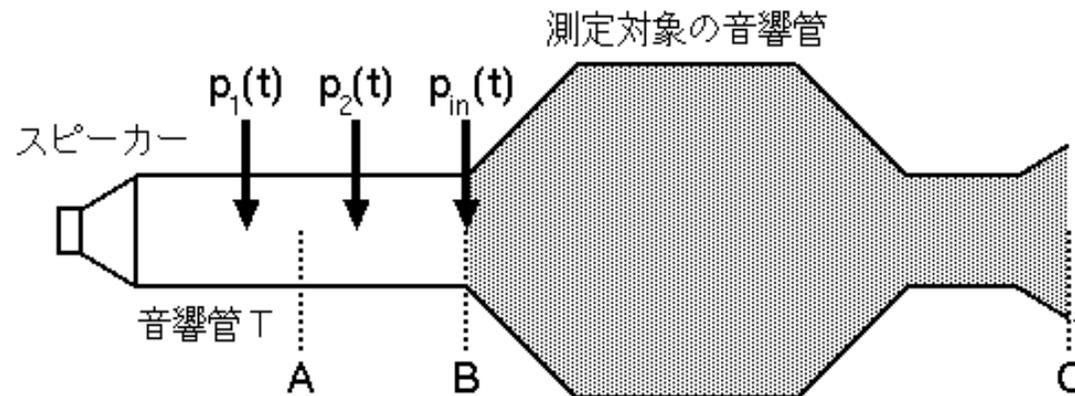


図: 入力端の音圧と体積速度の計測.

音響計測に関する理論(2)

- 入力端の体積速度

- 2点で音圧を測定する.

- 2点の中間位置で粒子速度と音圧を求める.

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

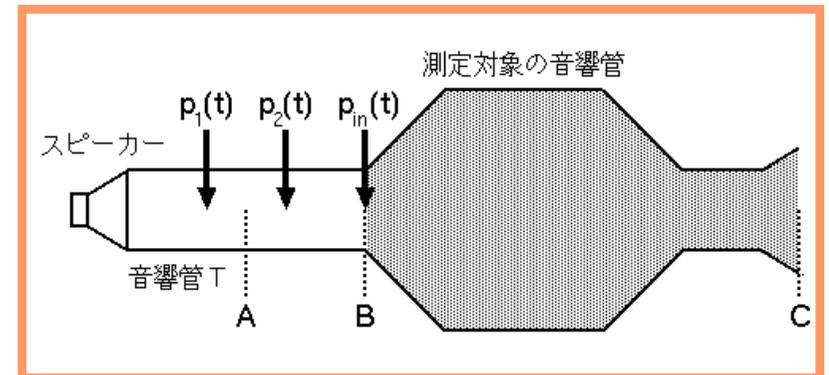
ρ : 空気の密度 ($1.1733 \text{ kg} / \text{m}^3$)
 δ : マイク間距離

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

- Fマトリクスを用いて入力端における体積速度を求める.

$$\begin{bmatrix} P_{in}(\omega) \\ V_{in}(\omega) \end{bmatrix} = [Fmatrix] \begin{bmatrix} P_A(\omega) \\ V_A(\omega) \end{bmatrix}$$

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



音響計測に関する理論(3)

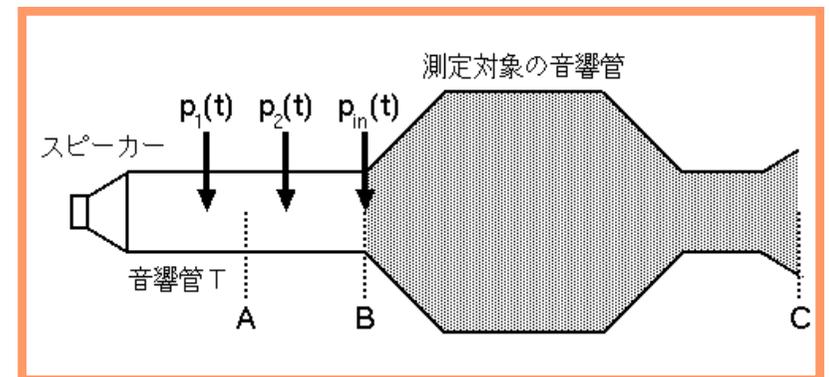
- 出力端の体積速度
 - 出力端の音圧と放射インピーダンスから求める.
 - 無限平面上の円形ピストンの放射インピーダンス.

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

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

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)

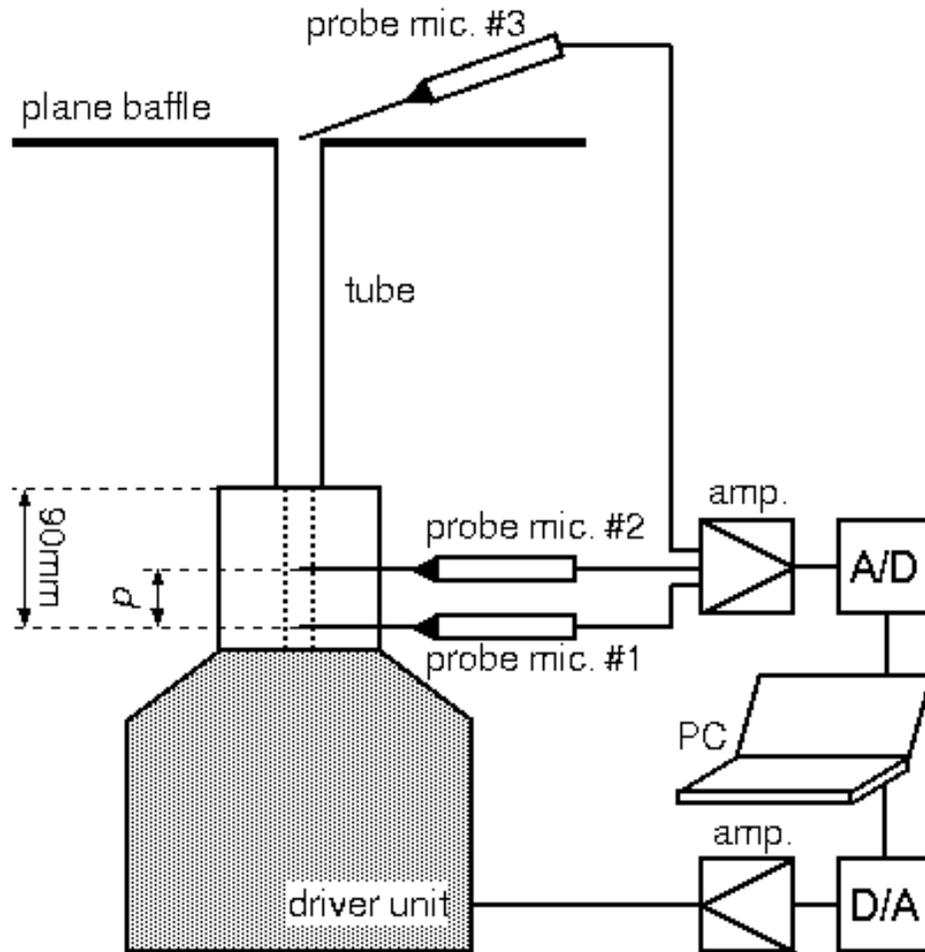


図: 計測機器の構成.

- 収録機器
 - プロブマイク B&K4182
 - マイクアンプ B&K5935, 2609
- 信号発生機器
 - D/A コンバータ Roland 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

計測方法(2)

- 測定対象

- 半径8.4mm, 長さ170mm, 肉厚1.6mmの一様管.
- 管壁の振動を抑えるため, 周囲をパテでおおった.
- 400mm x 400mmの平面バッフル.

- 測定条件

- 気温25度の防音室にて測定.
- 標本化周波数: 100kHz, 量子化: 15bit
- 音源: 正弦波(周波数を100Hzから5kHzまで10Hzきざみで変化.)
- 校正器を基準にして音圧 [Pa] に変換.

伝達関数の理論値

- 電気回路モデルにもとづいて算出.
- 粘性および熱による損失を考慮.
- 管壁振動による損失はないものとする.
- 放射インピーダンス

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

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

a : 円形ピストンの半径

c : 音速 (346.37 m / s)

FEMによるシミュレーション

- 有限要素モデル Altair社HyperMesh
 - 有限要素のタイプ: 5面体と6面体の混合. (要素数 3078)
 - 1辺の長さが3mmを越えないように.
 - 管壁は剛壁.
- シミュレーション LMS社SYSNOISEを使用.
 - 放射インピーダンスは(5)式.
 - 10Hz~5kHzまで5Hzきざみ.

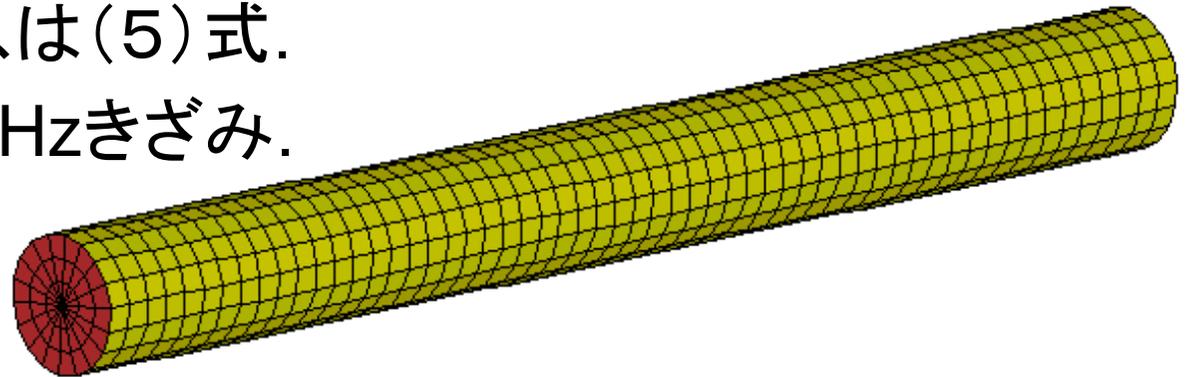


図: 一様音響管の有限要素モデル.

実験結果(1) 一様音響管

表: 各方法で求めた共振周波数(Hz).

	音響計測	電気回路 モデル	FEM
F1	490	502	515
F2	1490	1513	1540
F3	2460	2525	2570
F4	3420	3538	3605
F5	4420	4552	4635

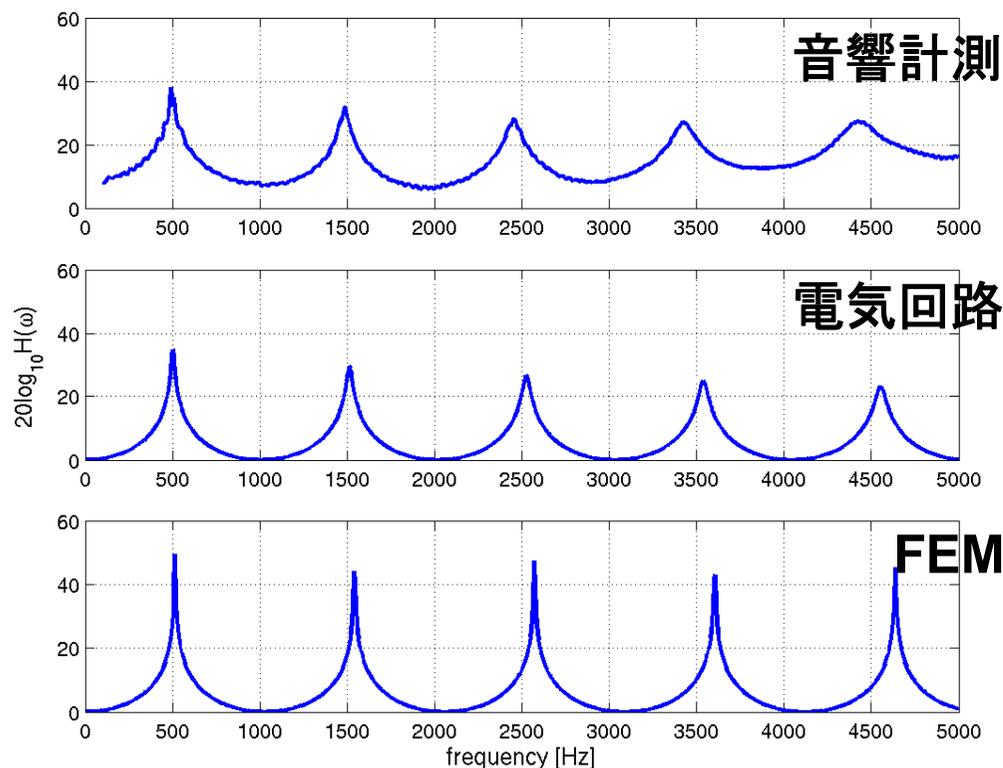


図: 各方法で求めた伝達関数.

差3.3%未満 差2.6%未満

声道模型を用いた実験

- Chiba&Kajiyama(1941)の声道模型のレプリカ.
(Arai 2001)
- /u/ の声道模型. 全長171mm.
- 有限要素モデルの要素数2912.

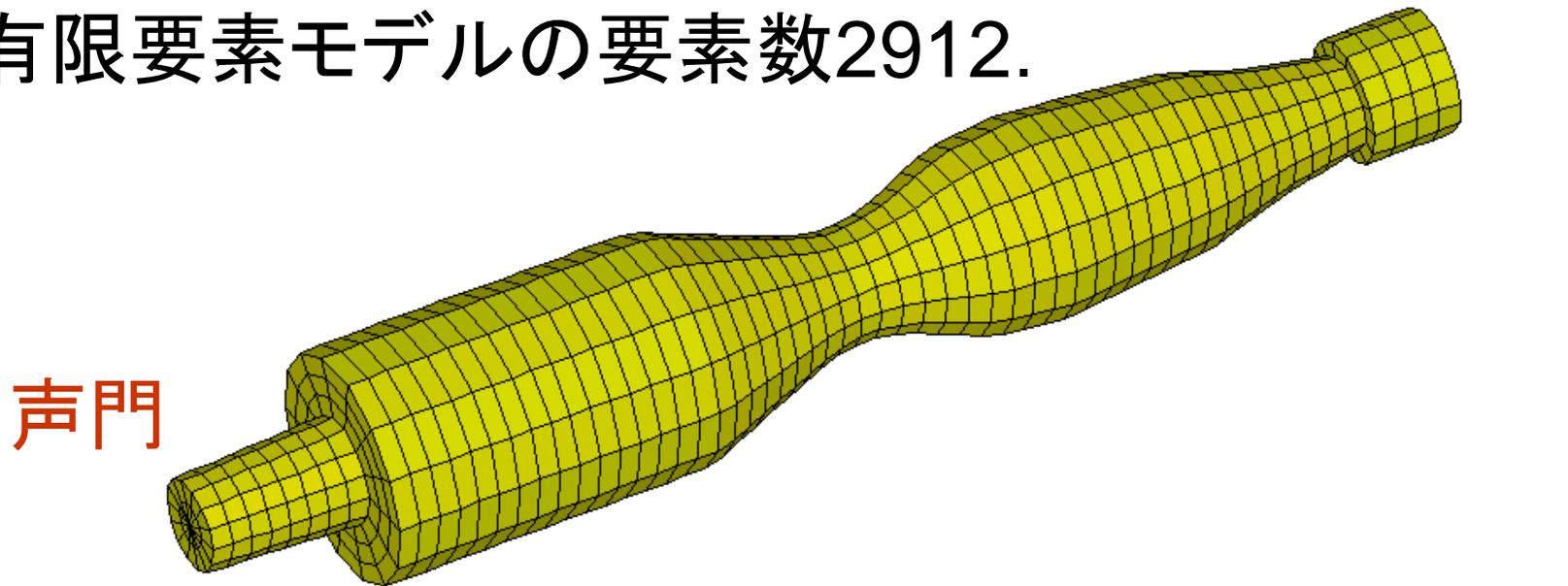


図:/u/ の声道模型の有限要素モデル.

実験結果(2) 声道模型/u/

表:各方法で求めた共振周波数(Hz).

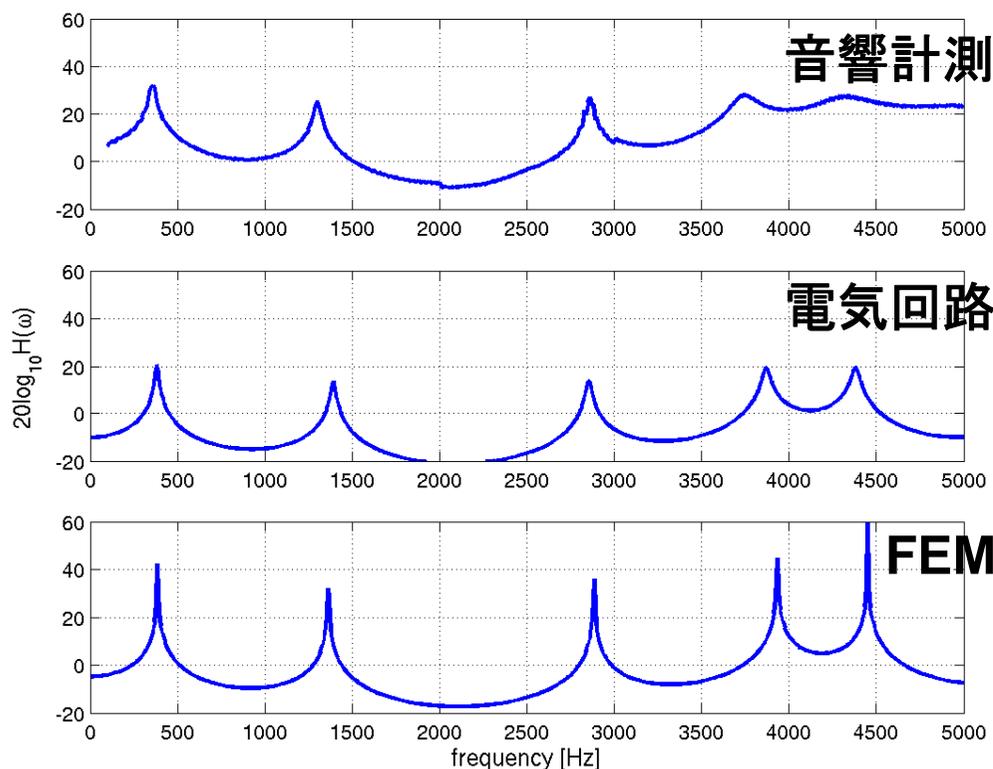


図:各方法で求めた伝達関数.

	音響計測	電気回路 モデル	FEM
F1	360	381	385
		5.5%	
F2	1300	1391	1360
		6.5%	
F3	2860	2854	2885
		0.02%	
F4	3740	3869	3935
		3.3%	
F5	4340	4380	4450
		0.9%	

差2.2%未満

考察

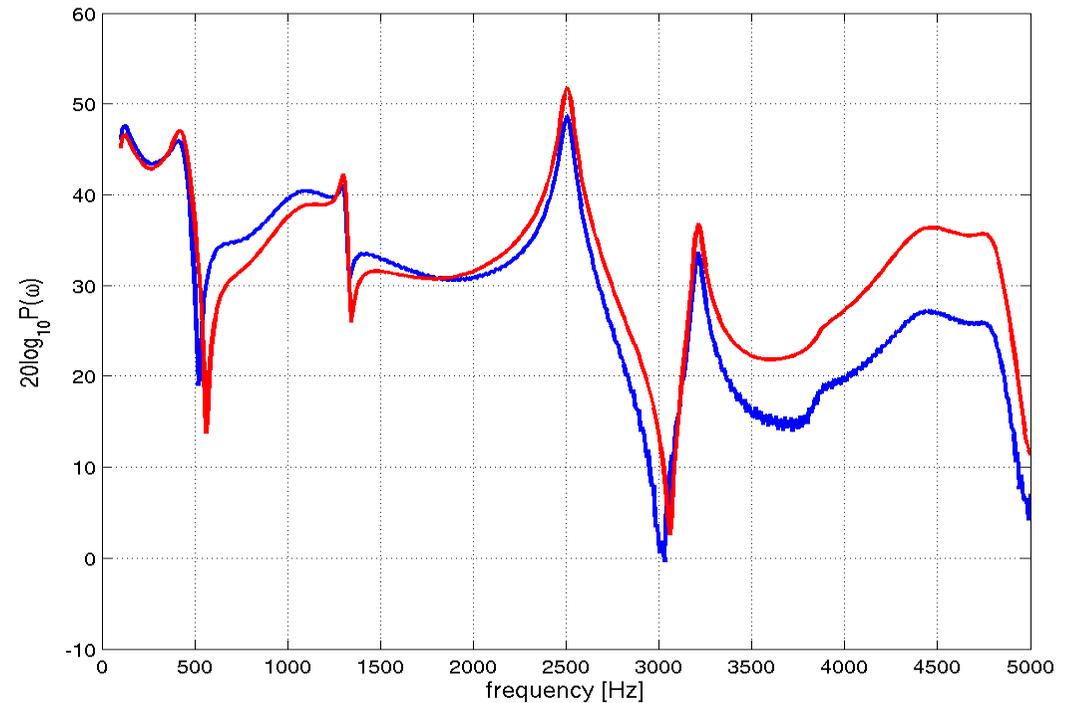
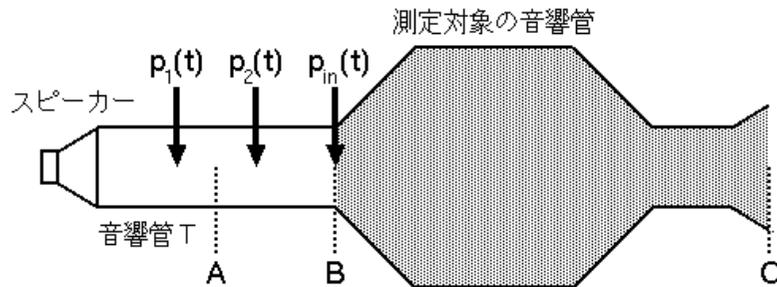
- 一様音響管を対象にした実験
 - 音響計測により求めた共振周波数と理論値がほぼ一致したので、計測方法が妥当であることが示されたといえる。
 - FEMにより求めた共振周波数と理論値がほぼ一致した。
- /u/の声道模型を対象にした実験
 - 音響計測により求めた共振周波数と理論値の間に差の大きい部分が存在する。
 - FEMにより求めた共振周波数と理論値はほぼ一致した。

おわりに

- 単純な音響管を対象にして、音響計測、電気回路理論、FEMにより求めた伝達関数を比較した。
- 一様音響管を対象にした場合には、3つの方法で求めた共振周波数はほぼ一致した。
- /u/の声道模型を用いた場合には、音響計測により求めた共振周波数がそれ以外の方法で求めたものと若干差がある。
- 今後、より複雑な形状の音響管を対象にして同様の検討を行う予定。

Fマトリクスにより求めた音圧と 実測した音圧のスペクトル

- /u/ の声道模型.



図：Fマトリクスにより求めた音圧（赤）と実測した音圧のスペクトル（青）。

約3.3kHz以上の帯域でずれがみられる。

A点からの伝達関数

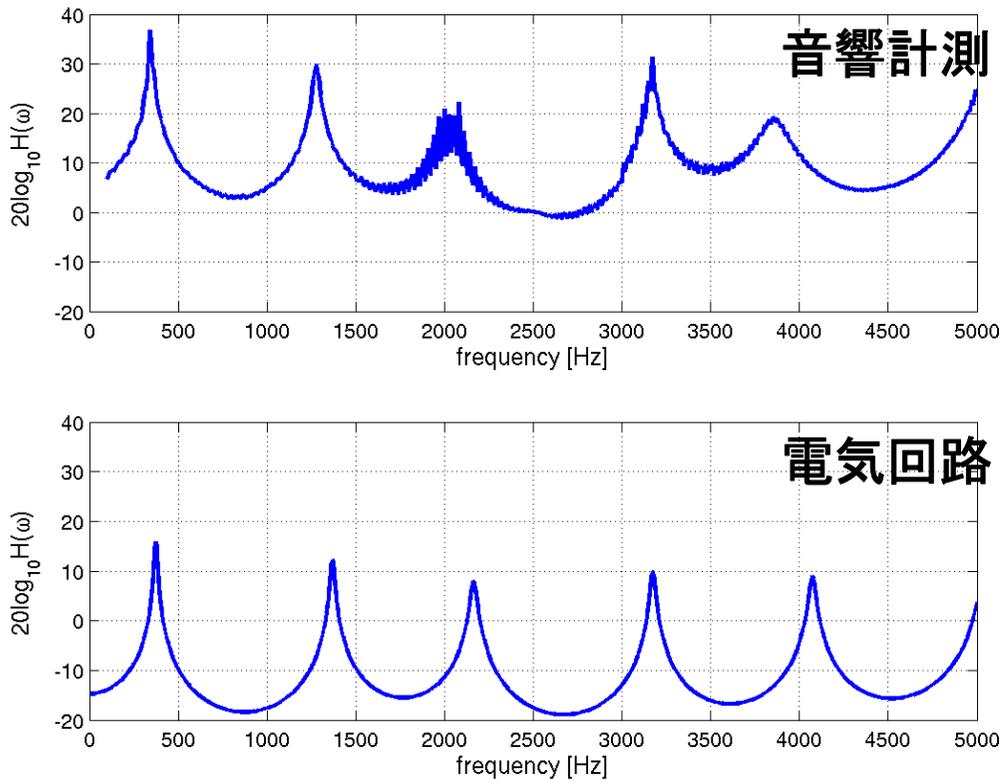


図: 各方法で求めた伝達関数.

表: 各方法で求めた共振周波数(Hz).

	音響計測	電気回路 モデル
F1	340	373
		8.8%
F2	1280	1368
		6.4%
F3	2080	2164
		3.8%
F4	3170	3173
		0.1%
F4	3850	4072
		5.5%

約3.5kHz以上のピークのゲインが小さい.

他の測定結果

- Arai(2001)

- 音響測定

- F1 499Hz

- F2 1276Hz

- Chiba&Kajiyama(1941)

- 二重共鳴器の式より

- F1 415Hz

- F2 1380Hz

表: 各方法で求めた共振周波数(Hz).

	音響計測	電気回路 モデル	FEM
F1	360	381	385
F2	1300	1391	1360
F3	2860	2854	2885
F4	3740	3869	3935
F5	4340	4380	4450