

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, [‡]JAIST

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
ことによって, 音声の個人性の生成要因を明らかにすること.

- MRIにより得られた3次元声道形状をもとにして有限要素法(FEM)により伝達関数を求める研究が行われている.
- MRIとFEMは声道形状と声質との関係を調べる有効な手段ではないか.
 - 電気回路理論は音波の平面波伝搬を仮定しているが, 実際の声道内は必ずしもこの仮定が成り立たない.
- 構音障害患者の声道形状と声質との関係の調査(西本2001).
→FEMによる伝達関数と実音声のスペクトルが異なる.

疑問: 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?

FEMの精度検証の必要性

- 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.
- MRIと光造形の組合せ
 - 光造形は比較的安価.
 - MR画像から抽出した3次元声道形状の実模型を作成し音響特性を調査(藤田2001).
- “音響計測により得られる実模型の伝達特性”と“FEMにより求める伝達関数”の比較.
- 音波の平面波伝搬の仮定が成り立つ単純な音響管を対象にした予備的検討.
 - 断面形状が同心円で表される.
 - 曲がりなし
 - 分岐管なし

伝達関数の計測方法

- 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.

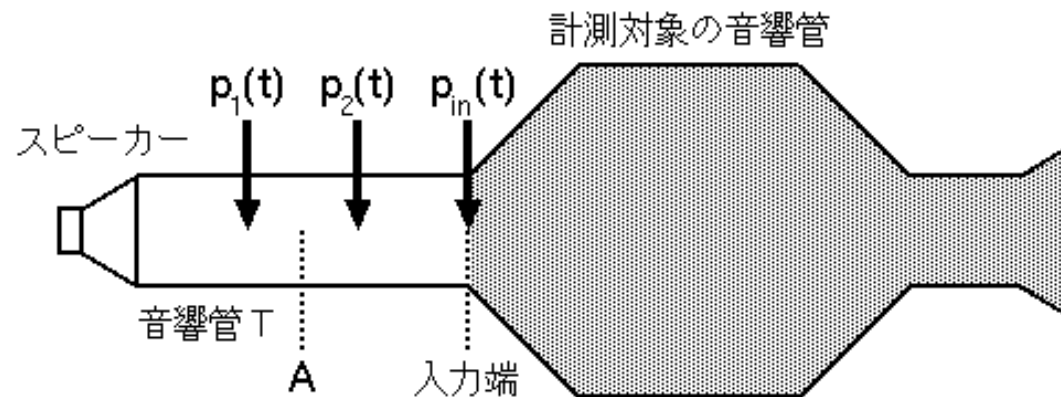


図: 入力端の音圧と粒子速度の計測.

入力端の体積速度

- 2点で音圧を測定し、その中間位置の粒子速度と音圧を算出する.

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

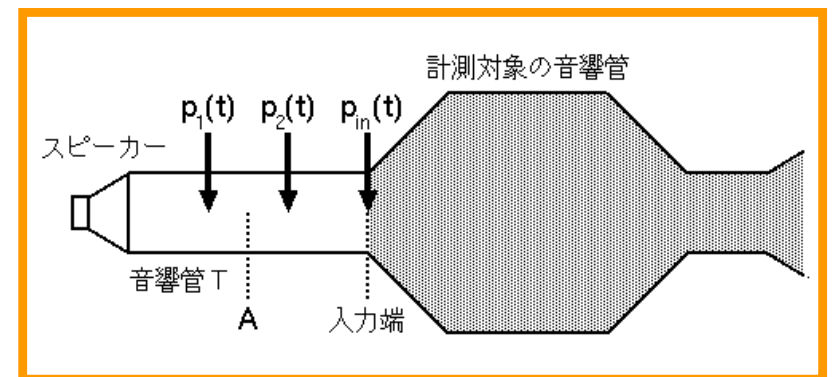
ρ : 空気の密度 ($1.1733 \text{ kg} / \text{m}^3$)
 δ : マイク間距離

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

- transmission matrix を用いて入力端の体積速度を求める.

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

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



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:

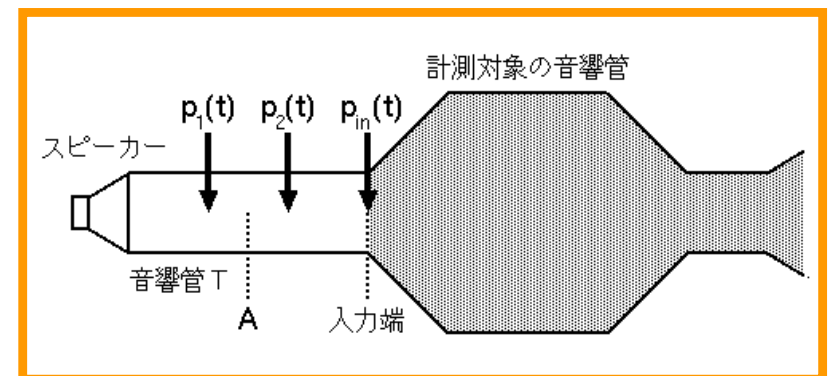
$$Z_r(\omega) = \frac{j\omega L_r R_r}{R_r + j\omega L_r}$$

$$R_r = \frac{128}{9\pi^2} \quad L_r = \frac{8a}{3\pi c}$$

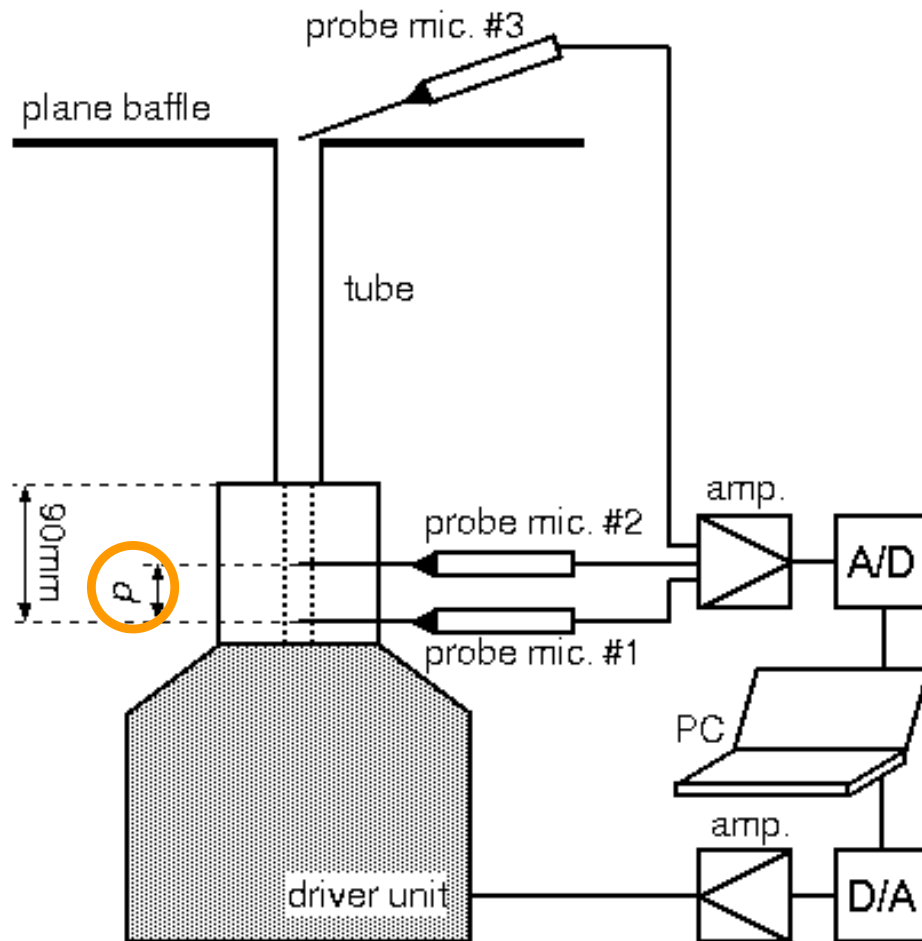
a : 円形ピストンの半径
 c : 音速 (346.37 m / s)

- 出力端の体積速度:

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



計測機器の構成



図：計測機器の構成.

- 信号発生系
 - D/A 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
- 収録系
 - プローブマイク B&K4182
 - マイクアンプ B&K5935, 2609

入力端の粒子速度計測に用いる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.

計測方法

- プローブ間隔(マイク間隔)
 - 正弦波の周波数 ≤ 2 kHz: 23 mm
 - 正弦波の周波数 > 2 kHz: 11 mm
 - 実験により決定.
- 測定条件
 - 気温25度の防音室にて測定.
 - 標本化周波数: 100 kHz, 量子化: 15 bit
 - 音源: 正弦波(周波数を100 Hzから5 kHzまで10 Hzきざみで変化.) 150 msec
 - 波形が安定した100 msecの区間を使用.
 - 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:

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

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

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

- 有限要素モデル作成 Altair社HyperMeshを使用.
 - 有限要素のタイプ: 5面体と6面体の混合.
 - 1辺の長さが3 mm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.
 - 入力端: 正弦波振動 1.0 m/sec
 - 10 Hz~5 kHzまで5 Hzきざみ.
 - 出力端: 放射インピーダンス

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

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

一様音響管に関する検討

- 測定対象
 - 半径8.4 mm, 長さ300 mm, 肉厚1.6 mmの一様管.
 - 母音のフォルマントが現れる帯域を考慮して管長を決定.
 - 管壁の振動を抑えるため, 周囲をパテでおおった.
 - 出力端に400 mm x 400 mmの平面バッフル.
- 有限要素モデル
 - 要素数 3780

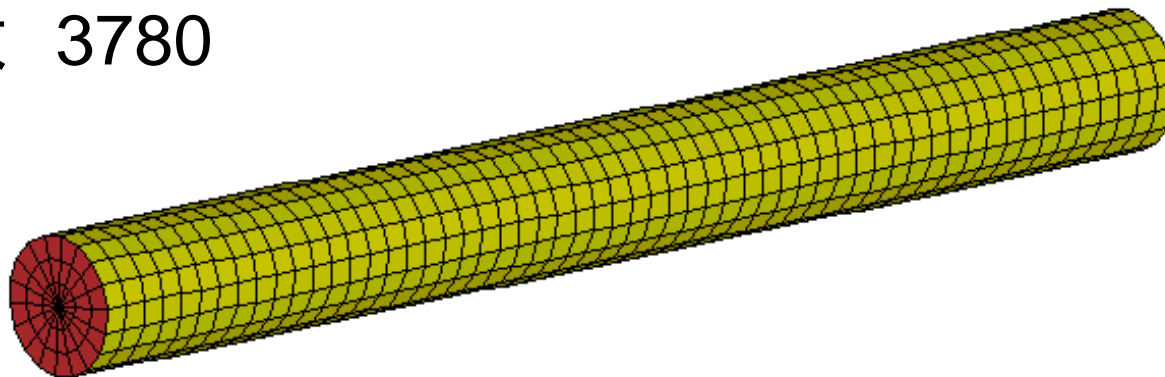


図: 一様音響管の有限要素モデル.

実験結果

表: 伝達関数から得られた共振周波数 [Hz].

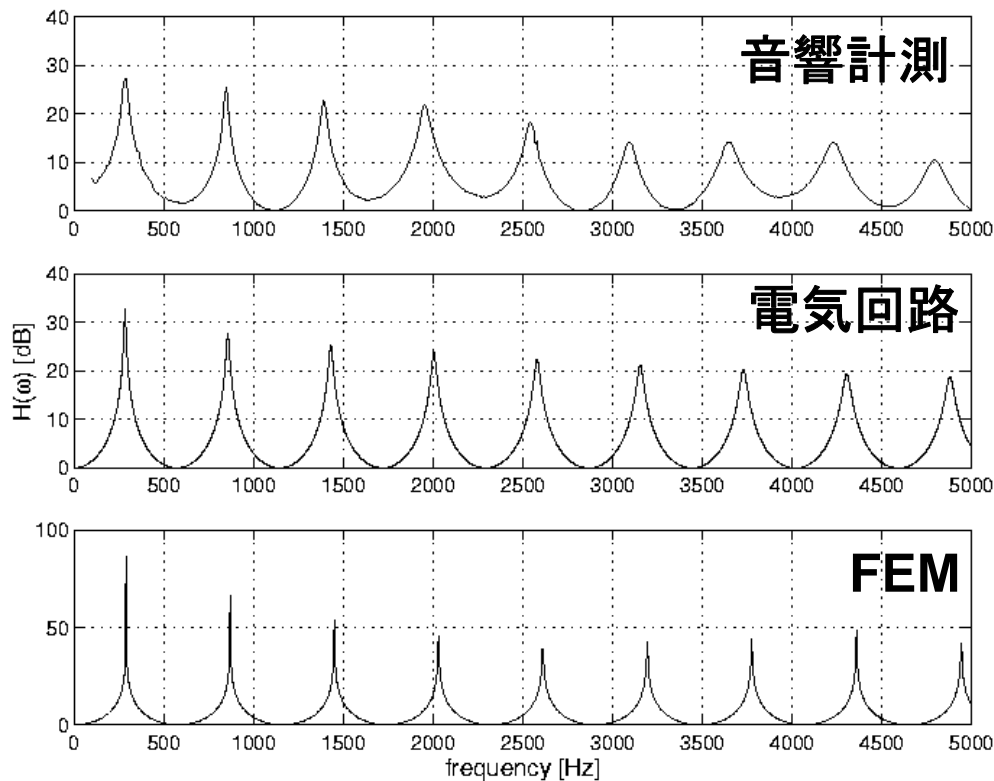


図: 各方法で求めた伝達関数.

	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

差2.9%未満 差1.6%未満¹²

一様音響管の結果に関する考察

- 音響計測と電気回路理論により得られた共振周波数の差は2.9 %未満.
- ほぼ正確に計測できたといえる.
- FEMと電気回路理論により得られた共振周波数の差は1.6 %未満.
- ほぼ正確にシミュレートできたといえる.

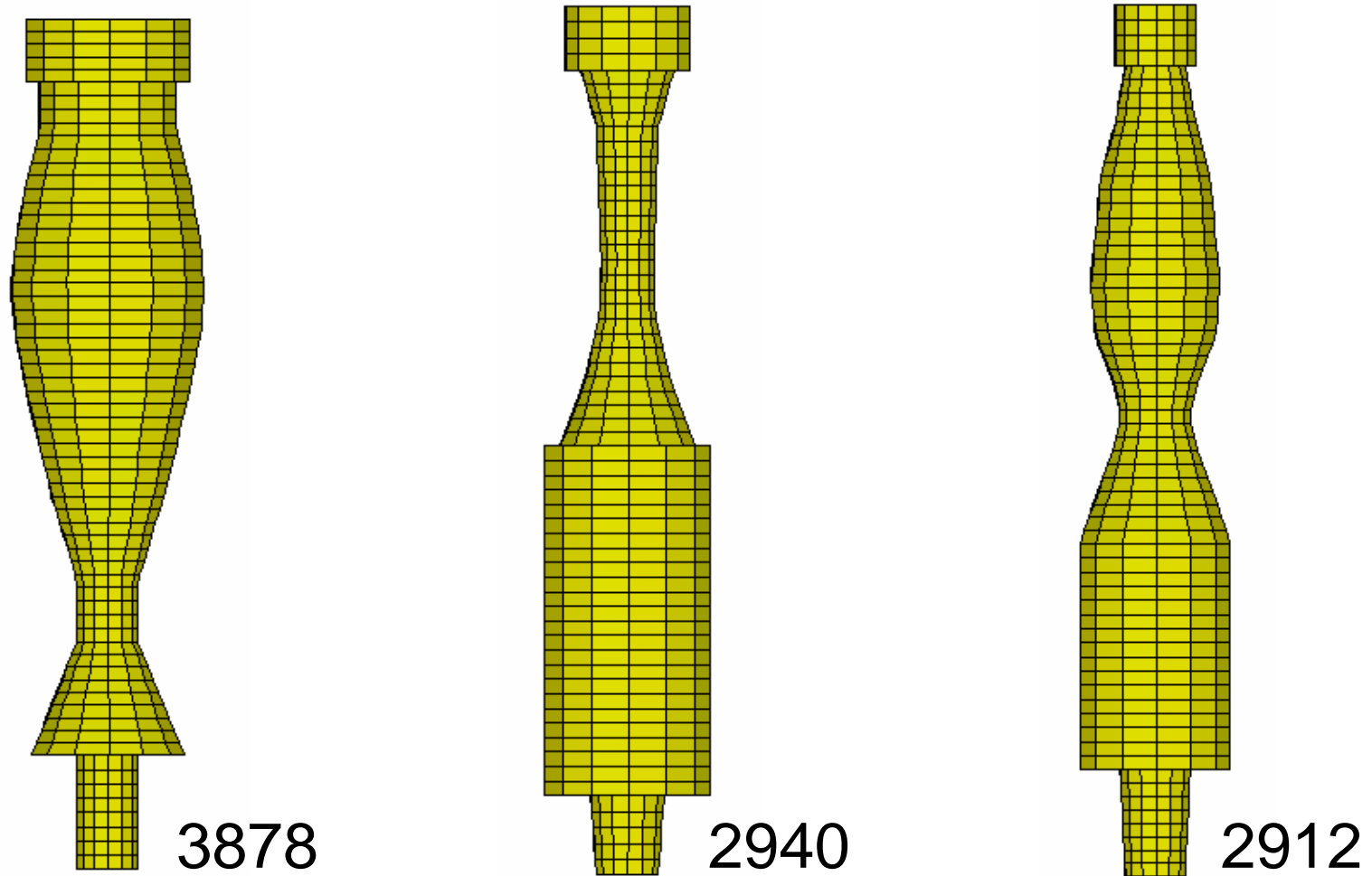
Chiba & Kajiyamaの声道模型に関する検討

- Chiba & Kajiyama (1941) の声道模型のレプリカ (Arai 2001).
- 計測には /a/, /i/, /u/ を使用.
- 出力端に400 mm x 400 mmの平面バッフル.



図: 左から/a/, /i/, /u/ の声道模型.

有限要素モデル



図：左から/a/, /i/, /u/ の有限要素モデル. 数字は要素数.

/a/ の声道模型に関する結果

表: 伝達関数から得られた共振周波数 [Hz].

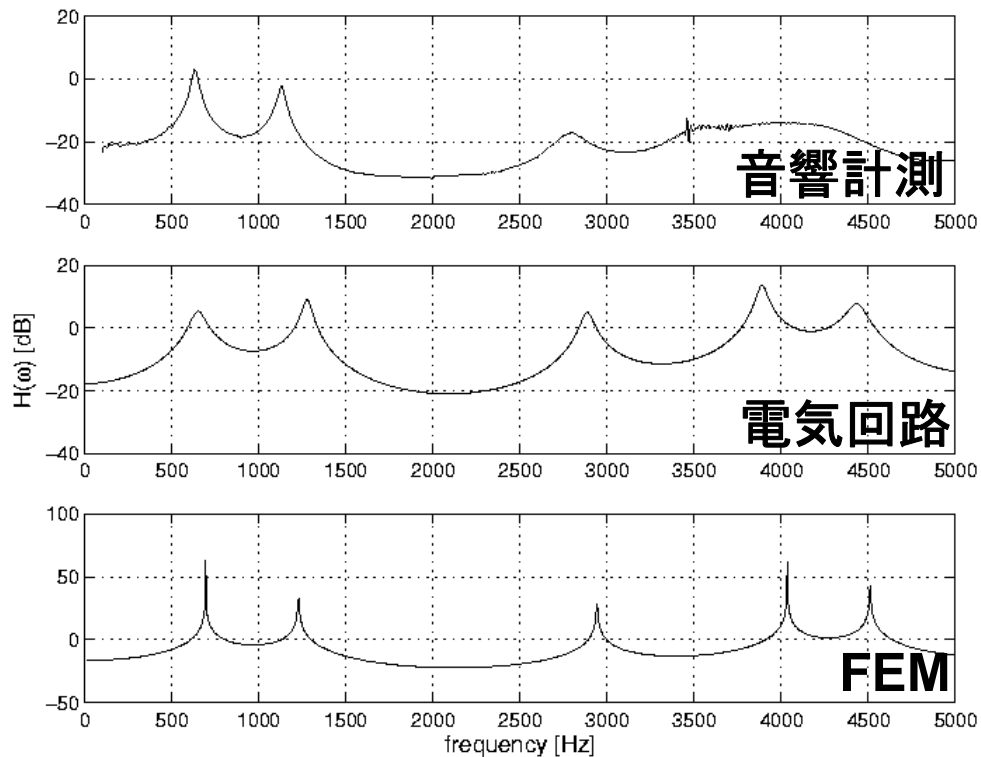
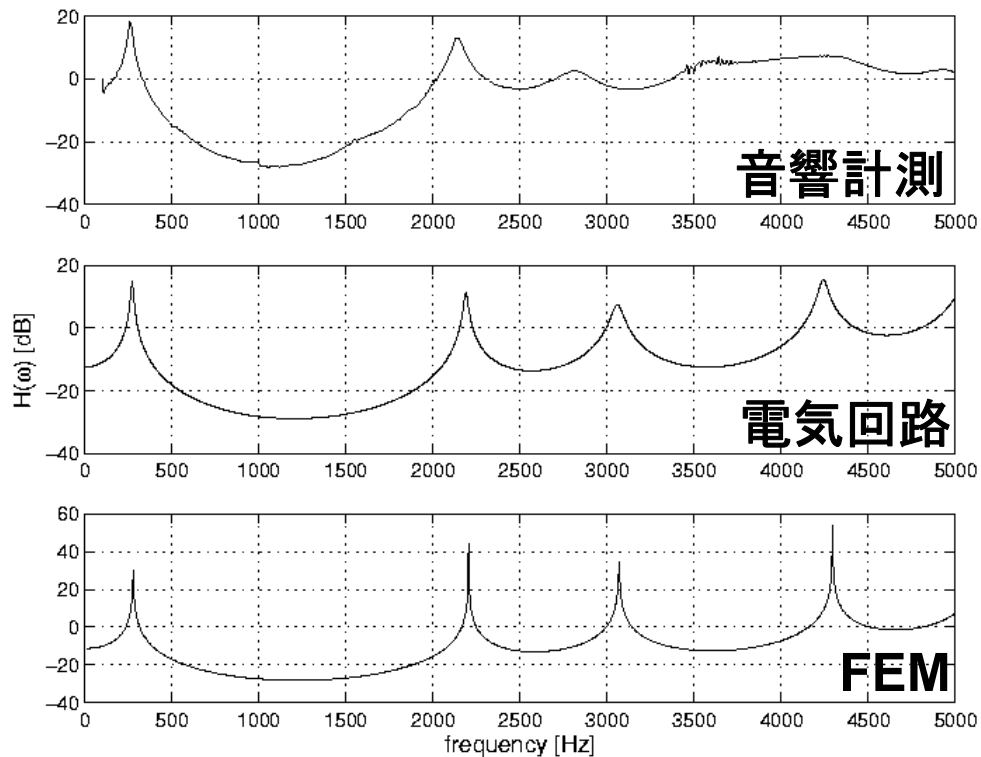


図: 各方法で求めた伝達関数.

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

/i/ の声道模型に関する結果

表: 伝達関数から得られた共振周波数 [Hz].

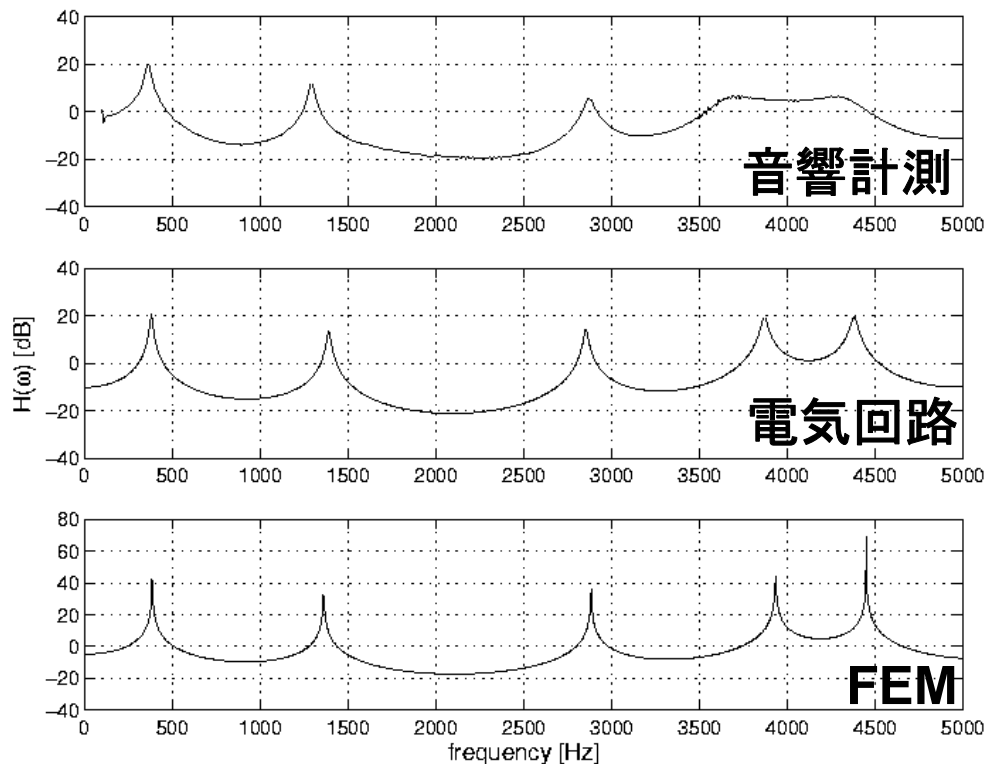


	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	260	273	270
F2	2140	2190	2205
F3	2810	3059	3070
F4	---	4242	4295

図: 各方法で求めた伝達関数.

/u/ の声道模型に関する結果

表: 伝達関数から得られた共振周波数 [Hz].



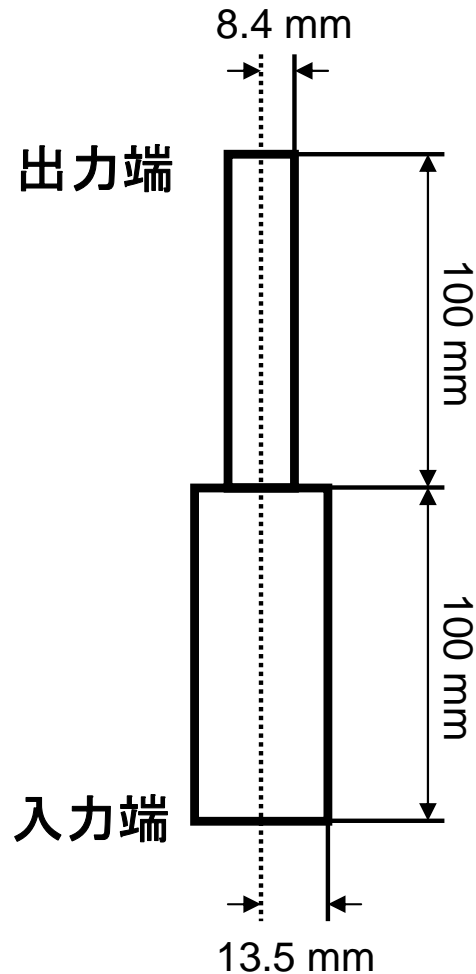
	音響計測	電気回路理論	FEM
F1	360	381	385
F2	1290	1391	1360
F3	2870	2854	2885
F4	---	3869	3935
F5	---	4380	4450

図: 各方法で求めた伝達関数.

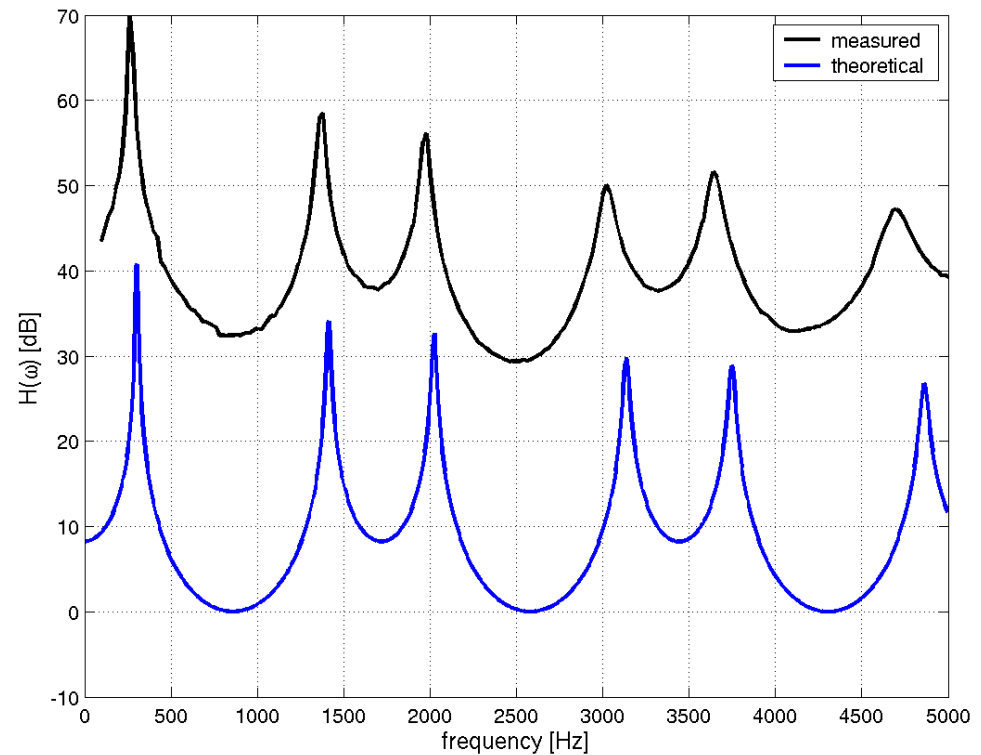
声道模型の結果に関する考察

- FEMにより得られた共振周波数
 - /a/ の F1 で理論値とのずれが大きいが、それ以外では差が3.7 %以下.
 - ほぼ正確な結果が得られる.
- 音響計測
 - 約3 kHz以上の帯域でピークがはっきりしない.
 - 計測手法に問題があるのか？
 - 別の音響管を対象にした計測.

2段音響管に関する音響計測



図：測定に用いた2段音響管.



図：音響計測(黒)および電気回路理論(青)により求めた伝達関数.

音響計測は20 Hz きざみ, プローブ間距離は11 mm固定, パテ未使用.

別の声道模型に関する音響計測

- 成人男性の /i/ 発声時の声道断面積関数(竹本ら 2001)から光造形により作成.

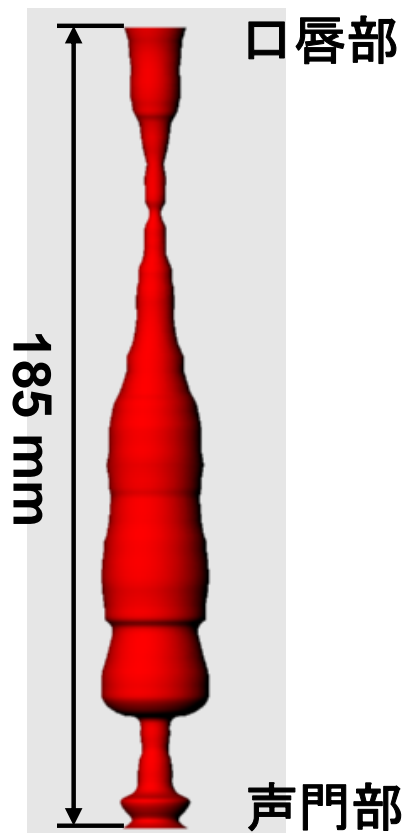


図: 測定に用いた声道模型のCG.

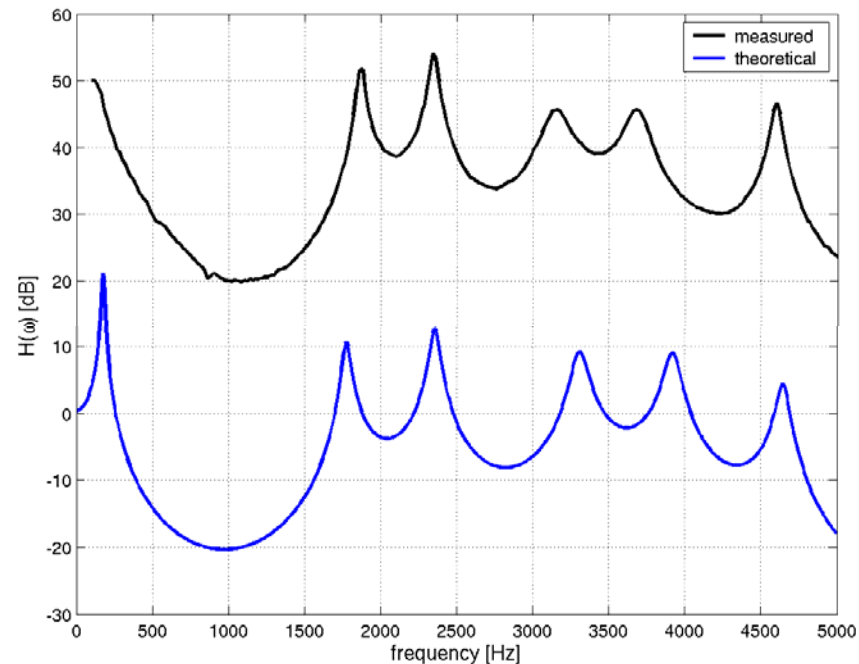


図: 音響計測(黒)および電気回路理論(青)により求めた伝達関数.

音響計測は20 Hz きざみ, プローブ間距離は11 mm固定.

おわりに

- 一様音響管と声道模型を対象として、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。
- FEMと電気回路理論により得られた共振周波数はほぼ一致した。
- 音響計測に関しては引き続き検討が必要。
- 今後、より複雑な声道形状を対象にした検討を行う。
 - 分岐管
 - 非対称
 - 曲がり } これらの影響を調査する。

プローブ間距離と共振周波数の関係

測定対象：一様音響管(管長300mm)

表：プローブ間距離 d と共振周波数 [Hz].

	電気回路理論	d=35mm	d=23mm	d=11mm
F1	284	270	280	280
F2	857	850	850	840
F3	1431	1390	1390	1390
F4	2005	1950	1960	1960
F5	2580	2530	2540	2540
F6	3155	3100	3100	3100
F7	3730	3670	3660	3640
F8	4304	4230	4230	4230
F9	4880	4790	4800	4790

2段音響管の共振周波数(参考)

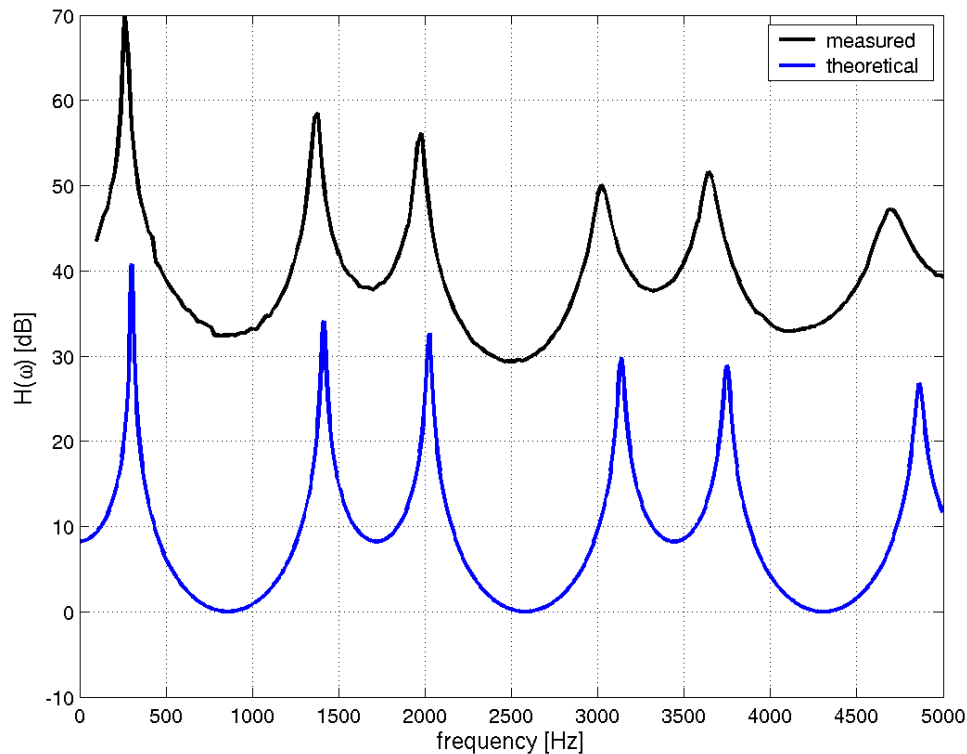


図: 音響計測(黒)および電気回路理論(青)により求めた伝達関数.

表: 音響計測および電気回路理論により求めた共振周波数 [Hz].

	音響計測	電気回路理論
F1	260	305
F2	1380	1415
F3	2025	1980
F4	3135	3020
F5	3745	3640
F6	4860	4700

音響計測は20 Hz きざみ, プローブ間距離は11 mm固定, パテ未使用.

声道模型の共振周波数(参考)

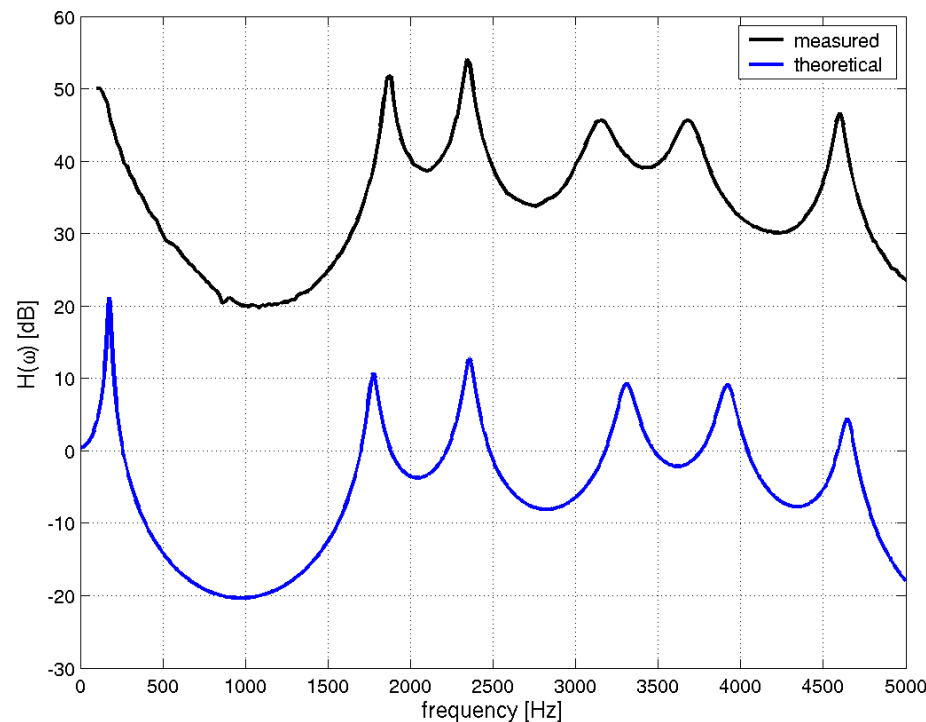


図: 音響計測(黒)および電気回路理論(青)により求めた伝達関数.

表: 音響計測および電気回路理論により求めた共振周波数 [Hz].

	音響計測	電気回路理論
F1	175	---
F2	1775	1880
F3	2355	2340
F4	3310	3160
F5	3920	3680
F6	4645	4600

音響計測は20 Hz きざみ, プローブ間距離は11 mm固定.