

3次元声道モデルにおける伝達特性の評価方法について*

元木邦俊, 松崎博季 (北海学園大・工)

1 はじめに

MRI などにより得られた声道の3次元形状データに基づいた数値計算が行なわれている [1-3]。3次元声道モデルでは、非平面波動的な音波伝搬や鼻孔放射の干渉により口唇近傍の音場が複雑なものとなり、声道の共鳴特性を評価する出力点を明確に定めることが容易ではない。本稿では、放射される音響パワーに着目して、特定の放射位置を仮定することなく声道の伝達特性を求める方法とその適用結果を報告する。

2 出力信号と伝達特性

2.1 1次元モデルの伝達関数

1次元音響管モデルの伝達関数 H_1 は、図1のように声門体積速度源 U_G と口唇端での体積速度 U_L を用いて $H_1 = U_L/U_G$ として定義される。 H_1 は、声道部を表現する縦続行列を \mathbf{F} (要素 A_1, B_1, C_1, D_1)、放射インピーダンス Z_L を境界条件として $H_1 = 1/(C_1 Z_L + D_1)$ として定まる。また、遠方点での音圧 P_R は U_L を用いて

$$P_R = U_L Z_T = U_G H_1 Z_T \quad (1)$$

として考えることができ、ピストン音源による放射過程からの類推により Z_T として1階微分特性 (6dB/oct.) を有するコイルを仮定することが多い。

2.2 3次元モデルの放射音場

図2(a)は、MRIデータに基づいて作成された有限要素モデルの例である [3]。3次元声道モデルは、放射域が連続的に広がるためにモデルの物理的形状から終端位置を明確に定めることは困難である。また、鼻腔結合を考慮する場合には、放射空間では口唇と鼻孔からの放射音が重畳する。このため、特定の位置、周波数において音圧の極めて低い領域が放射空間に発生することがある (図2(b))。さらに、平面波伝搬の仮定が成立しない高い周波数域では、高次モードの放射 [4] も生じ、開口形状が同一であっても放射域に生じる音場はさらに複雑なものとなる。開口部付近での音圧、または粒子速度の空間的な平均値には平面波以外の成分が反映されないため、高域での伝達特性を評価する場合には適当ではない。

2.3 放射パワー

図3のように3次元声道モデル (放射空間を含む) の位置 \mathbf{r} における音圧 $p(\mathbf{r})$ 、粒子速度 $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ とする。声道内部の断面 S 、開口部 (口唇と鼻孔) を覆う曲面 C とす

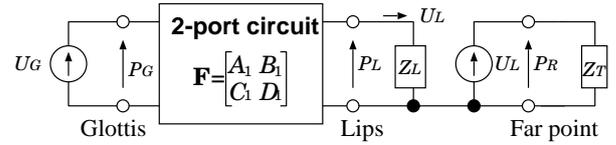


Fig. 1 Electrical equivalent representation of 1D speech production model.

るとき、 S と C を通過する音響パワー W_S, W_C は、アクティブ音響インテンシティ $\mathbf{I}(\mathbf{r}) = \text{Re}\{p(\mathbf{r})\mathbf{v}^*(\mathbf{r})/2\}$ ($\text{Re}\{\cdot\}$ は実部を、 $*$ は複素共役を表す) を用いて、

$$W_S = \iint_S \mathbf{I}(\mathbf{r}) d\mathbf{s} \geq \iint_C \mathbf{I}(\mathbf{r}) d\mathbf{s} = W_C \quad (2)$$

となる。ここで等号は声道内部を無損失とした場合に成立する。 W_C は、放射される全音響パワーを表す。 W_S は、音源が声門にのみ存在する場合には、声道内損失に応じて音源側で評価するほど大きくなるが、無損失の場合には声道内部のどの面で評価しても同じであり、音源が供給するパワーと放射されるパワーが等しいことを表す。

2.4 伝達インピーダンスによる評価

遠方点 R では、遠方点の音圧 P_R を用いて、 $P_R = p(R) \approx \rho c v(R)$ (ρc は空気特性インピーダンス、 v は \mathbf{v} の成分) となるので、自由空間における無損失を仮定すると、

$$W_C = \iint_C \mathbf{I}(\mathbf{r}) d\mathbf{s} \approx \frac{1}{2\rho c} \iint_C |P_R|^2 d\mathbf{s} \quad (3)$$

となる。遠方点での速度ポテンシャルを ϕ_R 、口唇正面前方での値を $\phi_{R,0}$ とすると、放射の指向特性 D は

$$D = \left| \frac{\phi_R}{\phi_{R,0}} \right| \quad (4)$$

と書ける。口唇正面前方での音圧を $P_{R,0}$ とすると、 $|P_R| = |P_{R,0} D|$ なので、

$$|P_{R,0}| = K \sqrt{W_C} \quad (5)$$

となる。ここで、

$$K = \sqrt{\frac{2\rho c}{\iint_C D^2 d\mathbf{s}}} \quad (6)$$

とおいた。一般に、振動板の指向性は周波数の増加とともに鋭くなることから、 K は高域強調特性と思われる。 W_C は放射部近傍のインテンシティ分布から、あるいは、無損失の場合には音源が供給する

* Evaluation of the transfer characteristics of 3-dimensional vocal-tract models. by Kunitoshi MOTOKI and Hiroki MATSUZAKI (Hokkai-Gakuen University)

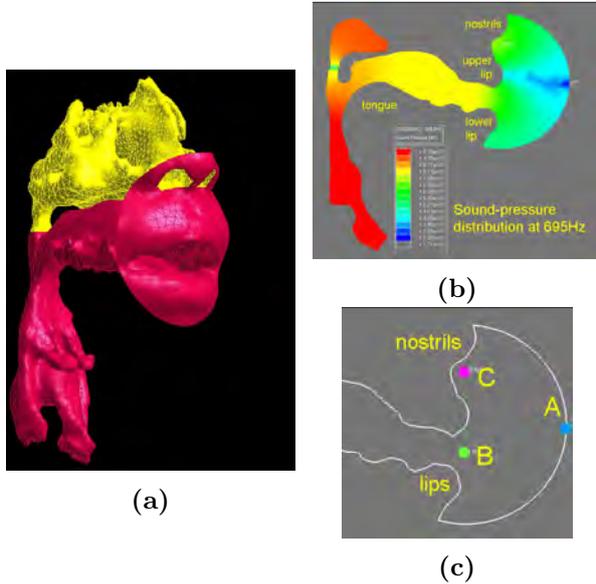


Fig. 2 (a) 3D vocal-tract model with nasal cavity, (b) sound-pressure distribution on the mid-sagittal plane at 695 Hz, (c) A,B and C indicate positions of sound-pressure computation.

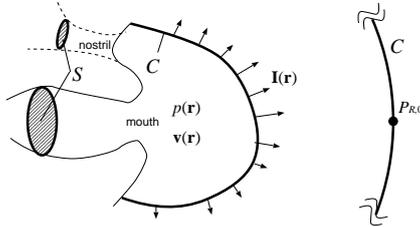


Fig. 3 Arbitrary section S in vocal-tract and closed surface C in free space.

パワーとして求めることができるから、音源体積速度 U_G から $P_{R,0}$ への伝達インピーダンスを Z_P とすると、その大きさは次のようになる。

$$|Z_P| = \left| \frac{P_{R,0}}{U_G} \right| = K \frac{\sqrt{W_C}}{|U_G|} \quad (7)$$

$|Z_P|$ により、放射端を特定することなく 3 次元モデルの伝達特性を評価することが可能である。なお、図 1 の 1 次元モデルでは、

$$W_C = \text{Re}\{P_L U_L^*\}/2 = |U_L|^2 \text{Re}\{Z_L\}/2 \quad (8)$$

となるので、1 次元モデルの伝達関数 $|H_1|$ に K と放射インピーダンスの実部の平方根を乗じたものが $|Z_P|$ の周波数特性となる。放射インピーダンスの実部は、低域では周波数にほぼ比例して増加し、高域では一定値となる。従って、伝達特性の評価として重要なピークと零点の位置は、 $|H_1|$ と $|Z_P|$ でほぼ同じになる。

3 伝達特性の評価

図 4 の実線は、図 2(a) の 3 次元声道のモデル (声道内部を無損失として計算) において、放射空間の境

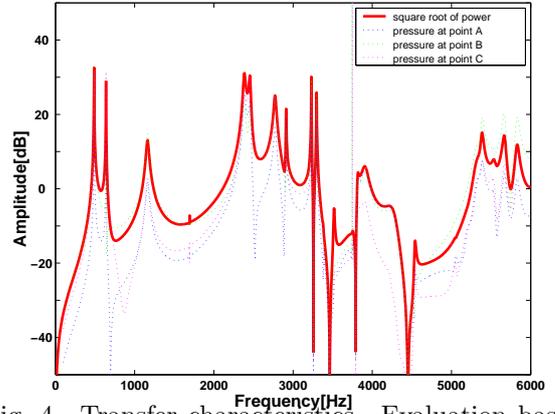


Fig. 4 Transfer characteristics. Evaluation based on radiated power (solid line), and sound-pressures at specific positions A, B and C in Fig.2(c) (dashed lines).

界面 (図 2(c) の点 A を通る半球) 上での音響インテンシティの積分値から、式 (7) により伝達特性を評価したものである。ただし、ここで K は周波数によらない定数とした。また、点線は、図 2(c) の A,B,C の各位置で音圧 $p(r)$ を求め、音源 U_G から各点への伝達インピーダンス $|p(r)/U_G|$ の周波数特性を示したものである。点 A では、700 Hz 付近で急峻な低下がみられる。図 2(b) の音圧分布から分かるように、695 Hz では口唇と鼻孔放射の干渉により音圧が極めて低くなるので、点 A の伝達特性上では零点のようにみえる。実効的な放射パワーによる式 (7) に基づく評価では、この周波数では急峻な零点とはならない。外部への音響パワーの放射が小さくなる複数の零点が 3 ~ 4.5 kHz に生じることが分る。

4 おわりに

本稿では、放射パワーに基づいて 3 次元声道モデルの伝達特性を評価する方法を述べた。極や零点の位置については、従来から用いられている声門と口唇での体積速度の比として定義される伝達関数とほぼ同等に評価することができる。放射パワーを用いることで、口唇付近の複雑な形状とは無関係に伝達特性を評価できることを示した。

謝辞 本研究の一部は、北海学園大学ハイテクリサーチセンタープロジェクト、及び、科学研究費補助金 (18300069) の助成により行なわれたものである。

参考文献

- [1] Matsuzaki, H. *et al.*, 音講論 (秋), 2-4-15 (2007).
- [2] Matsuzaki, H. and Motoki, K., *Acoust. Sci. Tech.*, 28 (2), 124-127 (2007).
- [3] 松崎, 元木, 信学技報, SP2005-47 (2005).
- [4] Motoki, K. and Miki, N., *Proc. 3rd Joint Meeting ASA and ASJ*, 2pSC42, 895-898 (1996).