

声道形状が声帯振動へ及ぼす影響*

○竹本浩典 (千葉工大)

1 はじめに

音声生成過程は、呼気流によって声帯音源波が生成される過程と、その声帯音源波が声道形状に固有の音響特性によってフィルタリングされる過程に分けることができる。これら2つの過程には相互作用がある。すなわち、声帯で発生した声帯音源波は口唇へ向かうだけでなく、声道による反射波が生じて声帯振動に影響を及ぼす[1]。

Titze はシミュレーションにより、基本的に相互作用の程度は喉頭の断面積が小さくなれば大きくなることを示した[2]。また、声帯振動の基本周波数とその倍音の周波数 ($f_0, 2f_0, \dots$) が声道共鳴の周波数 ($fR1, fR2, \dots$) と交差するように声の高さや声道形状を制御すると、声帯振動が不安定になったり停止したりすることをシミュレーションと発声実験で示した[2, 3]。これらを踏まえて、相互作用の程度をレベル1と2に分類した[2]。レベル1とは、「声帯振動そのものはそれほど影響を受けず、主に声帯音源波形が影響を受ける」ものとした。これは、男女問わず、通常の音高での話声で見られる。レベル2とは、「声帯振動そのものが大きな影響を受ける」ものとした。これは、高音の歌唱などで見られる。

音源フィルタ理論は、声帯音源と声道フィルタに相互作用がない、つまり声帯振動に対する声道からの反射波の影響は小さいので無視できるとした理論で、上記のレベル1をさらに単純化したものといえる。この理論は有用で広く用いられているが、レベル1であっても相互作用を考慮するかどうかで音声スペクトルにどのような違いが生じるかについてはあまり議論されていないように思われる。

そこで本稿では、声帯振動モデルと声道モデルを用いた簡単なシミュレーションで、この問題を議論する。そして、声帯音源と声道フィルタの相互作用についての研究に関して留意すべきことについても触れる。

2 声帯振動モデルと声道モデル

2.1 声帯振動モデル

用途に応じて様々な声帯振動モデルが考案されている[4]。レベル2の相互作用を考慮するのであれば、Tokuda *et al.*の4質量モデル[5]などが有効であるが、本稿ではレベル1の相互作用に着目するので、一般的な2質量モデル[6]を用いることにする。Fig. 1はその模式図で A_t, A_{g1}, A_{g2}, A_l と $P_s, P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}, P_{in}$ は各部の断面積と圧力、 d_1, d_2 は下唇と上唇の厚さとする。声門体積流を U_g 、空気の密度を ρ 、声帯長を l_g とすると、以下の式が成り立つ。

$$P_s - P_{11} = 1.37 \frac{\rho}{2} \left(\frac{U_g}{A_{g1}} \right)^2,$$

$$P_{11} - P_{12} = 12 \frac{\mu l_g^2 d_1}{A_{g1}^3} \cdot U_g + \frac{\rho d_1}{A_{g1}} \cdot \frac{dU_g}{dt},$$

$$P_{12} - P_{21} = \frac{\rho}{2} U_g^2 \left(\frac{1}{A_{g2}^2} - \frac{1}{A_{g1}^2} \right),$$

$$P_{21} - P_{22} = 12 \frac{\mu l_g^2 d_2}{A_{g2}^3} \cdot U_g + \frac{\rho d_2}{A_{g2}} \cdot \frac{dU_g}{dt},$$

$$P_{22} - P_{in} = -\frac{\rho}{2} \left(\frac{U_g}{A_{g2}} \right)^2 \cdot 2 \frac{A_{g2}}{A_l} \left(1 - \frac{A_{g2}}{A_l} \right).$$

(式 1)

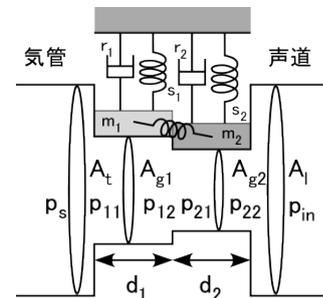


Fig. 1 2質量モデルの模式図

(式 1) の辺々を加え、逆流を考慮して $U_g^2 = |U_g| U_g$ とし、シミュレーションの1ステップ

* Effects of the vocal tract shape on the vocal fold vibration, by TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology).

前の U_g を U_{gp} , タイムステップを Δt として $dU_g/dt = (U_g - U_{gp})/\Delta t$ で近似すると, 以下の2次式が得られる。

$$A|U_g|U_g + BU_g + C = 0 \quad (\text{式 2})$$

ここで,

$$A = \frac{\rho}{2} \left(\frac{0.37}{A_{g1}^2} + \frac{1}{A_{g2}^2} - \frac{2}{A_{g2}A_l} + \frac{2}{A_l^2} \right),$$

$$B = \frac{12\mu l_g^2 d_1}{A_{g1}^3} + \frac{12\mu l_g^2 d_2}{A_{g2}^3} + \frac{\rho d_1}{\Delta t A_{g1}} + \frac{\rho d_2}{\Delta t A_{g2}},$$

$$C = P_{in} - P_s - \rho \left(\frac{d_1}{A_{g1}} + \frac{d_2}{A_{g2}} \right) \frac{U_{gp}}{\Delta t},$$

である。声帯振動に関する計算は論文通りとし, 主な定数は, $P_s=800$ Pa, $l_g=1.4$ cm, $d_1=2.5$ mm, $d_2=0.5$ mm, $A_l=3.14$ cm², $m_1=0.125$ g, $m_2=0.025$ g, $k_1=80$ kdyn/cm, $k_2=8$ kdyn/cm, $k_c=25$ kdyn/cm とした。

2.2 声道モデル

声帯振動モデルに接続する声道モデルは, 時間領域で声道内の音響伝搬を計算できる必要がある。そこで, Takemoto *et al.*[7]を用いることとした。このモデルは1次元の時間領域差分法に基づいており, 縦続音響管で表現した声道に声門体積速度を入力することで出力される音声だけでなく, 声道内の音圧と体積速度の分布を計算することができる。また, 壁振動も考慮できる。Fig. 2は第n番目の音響管(セクション)を中心に音圧 p と体積速度 U を計算する位置を示す。各セクションの中央で音圧を, 右端で体積速度を計算する。

この声道モデルを声帯振動モデルに接続するためには, 2.1節で述べた A_l を第1セクションの断面積とし, シミュレーションステップごとの P_{in} を第1セクションの音圧 $p[1]$ として U_g を計算し, これを声道モデルに入力すればよい。

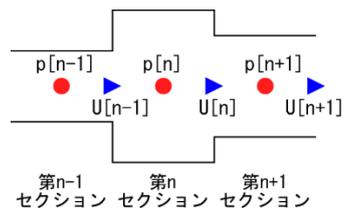


Fig. 2 音圧と体積速度の計算

3 シミュレーション

3.1 声道からの反射波の影響

Fig. 2は単純化した声道形状で, 先行研究

[8]によりモデル化した喉頭(喉頭室:長さ5 mm, 断面積1.2 cm²;喉頭前庭:長さ1.75 cm, 断面積0.5 cm²)に半径1 cm, 長さ14.25 cmの一樣円筒管を接続している。Fig. 3はこの声道の伝達関数である。

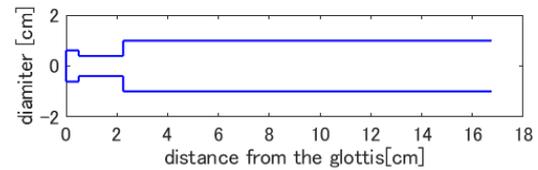


Fig. 2 単純化した声道形状

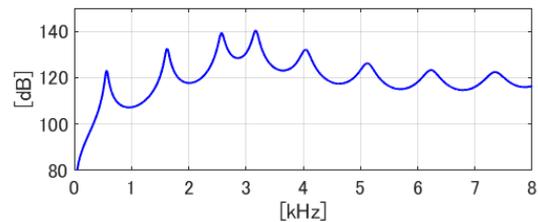


Fig. 3 伝達関数

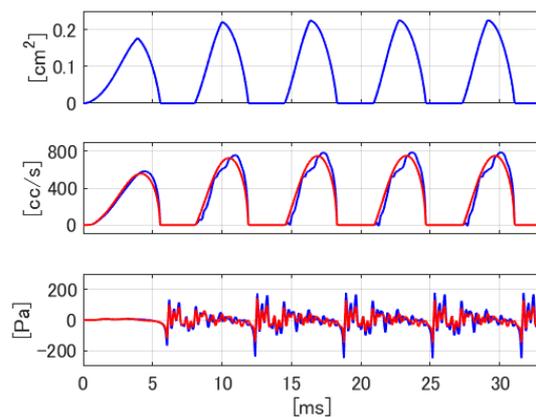


Fig. 4 上段: 声門面積, 中段: 声門体積流, 下段: 出力音声, 声道からの反射波を考慮した場合(青), 考慮しない場合(赤)

このモデル化した声道に2質量モデルを接続して, 声門面積(A_g), 声門体積流(U_g), 出力音声(p_{out})を計算した(Fig. 4各段の青線)。ここで, A_{g1} , A_{g2} はそれぞれ上唇, 上唇の面積で(Fig. 1参照), $A_g = \min(A_{g1}, A_{g2})$ である。この条件で得られる声門体積流は, 声道からの反射波を考慮した場合となる。

ここで, 同一の A_{g1} , A_{g2} パターンをもつモデルが摘出喉頭のように空中に開口しているという条件を設定すれば, 声道の反射波を考慮しない声門体積流が得られる。具体的には, A_{g2} を放射端の面積としてMaedaの放射インピーダンスの式[9]に従って大気圧の変動成分を求めて P_{in} とし, 式2で $1/A_l = 0$ とするこ

とで声門体積流を計算した。そして、この声門体積流に声道のインパルス応答を畳み込むことで出力音声を求めた。

Fig. 4 中段は声道からの反射波を考慮した場合（青）としない場合（赤）の声門体積流である。声道からの反射波を考慮すると声門体積流の波形に複雑な凹凸が生じた。Fig 5 はその2つのスペクトルである。同一の声門面積から声門体積流を計算したので、2つのスペクトルのハーモニクスは完全に一致しているが（基本周波数 $f_0=156.4$ Hz）、声道からの反射波を考慮すると広い帯域で不均一にレベルが上昇した。これは声門体積流に生じた複雑な凹凸の影響と考えられる。

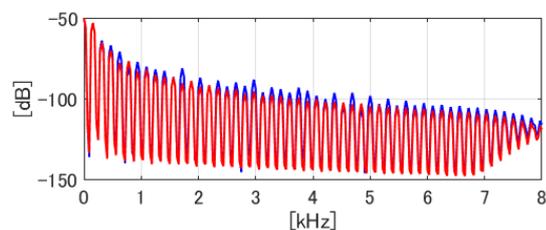


Fig. 5 U_g のスペクトル：声道からの反射波を考慮した場合（青）、考慮しない場合（赤）

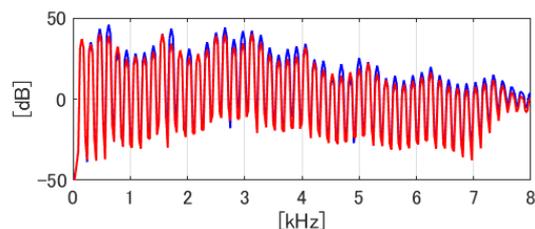


Fig. 6 p_{out} のスペクトル：声道からの反射波を考慮した場合（青）、考慮しない場合（赤）

Fig. 4 の下段は声道からの反射波を考慮した場合（青）としない場合（赤）の出力音声である。声道からの反射波を考慮すると出力音声の振幅が増加した。これは、声道からの反射波の影響により、声門体積流の波形の後方への傾斜が大きくなり、出力音声の振幅に影響を与える MFDR（Maximum Flow Declination Rate）[10]が 3.80 cc/ms^2 から 5.50 cc/ms^2 へと増加したためと考えられる。事実、声道からの反射波を考慮すると出力音声の振幅は 1.69 倍となった。

Fig. 6 は声道からの反射波を考慮した場合としない場合の音声スペクトルである。これらのスペクトルは、Fig. 5 と Fig. 3 の和と一致することを確認した。

すなわち、声道からの反射波は、声門体積

流の後方への傾きを増大させて MFDR を上昇させ、声門体積流に複雑な凹凸を付加して音源波形のスペクトルのレベルを広い帯域で不均一に上昇させるといえる。

3.2 声道形状の変化と音声スペクトルの変化

次に、声帯振動モデルのパラメータは一切変更せず、声道形状のみを変化させた場合を考える。Fig. 7 は2つの声道形状を示す。青は Fig. 2 の単純化した声道形状（声道1）で、赤は喉頭腔の断面積だけ50%に縮小した声道（声道2）である。Fig. 8 はその伝達関数である。喉頭腔の縮小によって $fR3$, $fR4$ 周辺のスペクトル形状がわずかに変化した。

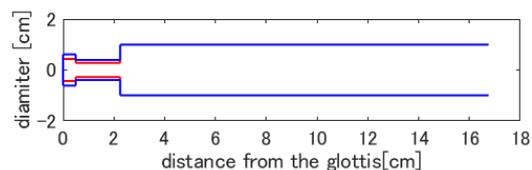


Fig. 7 声道1：Fig 2 と同一（青）、声道2：声道1の喉頭腔の断面積を50%に縮小（赤）

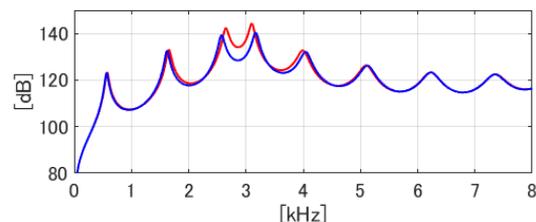


Fig. 8 伝達関数：声道1（青）、声道2（赤）

声帯振動の基本周波数は声道1で 156.4 Hz 、声道2で 154.0 Hz とわずかに減少した。しかし、MFDRは 5.50 cc/ms^2 から 8.30 cc/ms^2 と増加し、出力音声の振幅は 1.51 倍に増加した。

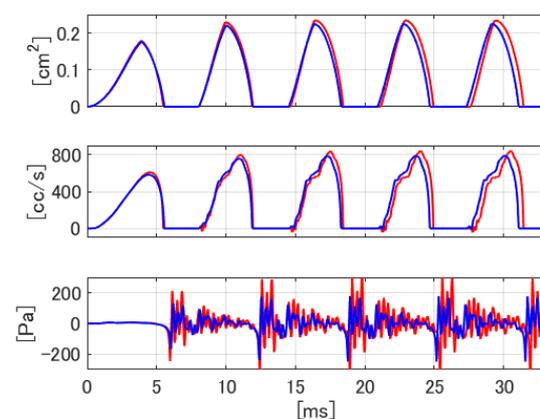


Fig. 8 上段：声門面積、中段：声門体積流、下段：出力音声、声道1の場合（青）、声道2の場合（赤）

Fig. 9 は出力音声のスペクトルの上側包絡線である。声道 1, 2 の伝達関数では, $fR3$, $fR4$ 周辺で相違が見られるのみであった。しかし出力音声の包絡線では, 声道 1 に比べて声道 2 では第 1~第 4 フォルマンのピークがそれぞれ 2.47, 3.90, 5.01, 4.00 dB 増加した。また, 声道 1 と声道 2 の伝達関数では 5~7 kHz の帯域ではほとんど変化が見られなかったが, 包絡線では声道 2 で平均 3.78 dB レベルが上昇した。すなわち, 声道形状の変化による伝達関数の変化がわずかであっても, 声道からの反射波が声帯音源に影響し, 出力される音声ではこれらが重畳するため, 振幅やスペクトルが大きく変化する場合があります。

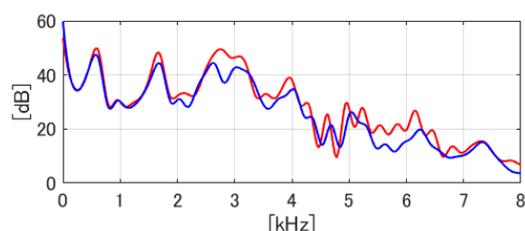


Fig. 9 出力音声の上側包絡線：声道 1 (青), 声道 2 (赤)

4 おわりに

本稿では, 声帯振動の 2 質量モデルと 1 次元の時間領域差分法に基づく声道モデルを用いて, 声帯音源と声道フィルタのレベル 1 の相互作用について検討した。

まず, 声道からの反射波の有無が声帯音源波形とそのスペクトルに与える影響を検討した。その結果, 声道からの反射波により, 声帯音源波形の後方への傾きが大きくなり, 波形に細かな凹凸が生じた。これらは音源スペクトルのレベルを広い帯域にわたって不規則に増大させることが明らかになった。

次に, 声道形状の変化が音声スペクトルへ与える影響を検討した。声帯振動モデルの各種パラメータを固定して声道形状のみを変化させると, 声道伝達関数が変化するだけでなく声道からの反射波も変化して, 声帯振動パターンや声帯音源スペクトルに影響を与えた。つまり, 音声スペクトルには声道伝達関数の変化と声帯音源スペクトルの変化が重畳した。すなわち, 音声生成研究において, 声道形状の変化のみを分析しても, 音声スペクトルの変化の一部しか検討することができない。

しかし, 声帯音源と声道フィルタの相互作用についての研究には留意すべきことがある。声帯振動モデルでは, 考慮している相互作用の種類や程度がモデルによって異なる。例えば, 本稿で用いた 2 質量モデルでは, 声門下の圧力降下や声門上の圧力回復は考慮しているが, 声門下の圧力変動は考慮していない。一方, Body-cover model [11]では逆である。そのため, 声道形状が声帯振動に与える影響にも差が生じ, 同じ条件であってもモデルによって相互作用の効果が異なる。その上, これを発声実験で検証することは容易ではない。例えば, レベル 2 の相互作用が生じる f_0 を $fR1$ と交差させる発声実験でも, 必ずしもすべての実験参加者で f_0 の不連続な変化が見られなかった[3]。これは, 不安定さを回避するための何らかの生理的な機能[12]が存在することを示唆する。以上のように, 声帯音源と声道フィルタの相互作用に関する研究によって得られた結果の一般性には常に留意する必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K11172 の支援を受けました。また, 本論文の執筆にあたり, 天津大学教授の足立整治先生と重要な議論ができましたことを深謝します。

参考文献

- [1] Titze, JASA. 75, 570–580, 1984.
- [2] Titze, JASA. 123, 2733–2749, 2008.
- [3] Titze, JASA. 123, 1902–1915, 2008.
- [4] Birkholz, In: Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung. TUDpress, Dresden, 47–58, 2011.
- [5] Tokuda *et al.*, JASA 127, 1528–1536, 2010.
- [6] Ishizaka and Flanagan, Bell Syst. Tech. J. 51, 1233–1268, 1972.
- [7] Takemoto *et al.*, Acoust. Sci. & Tech. 44, 9–16, 2023.
- [8] Takemoto *et al.*, JASA. 120, 2228–2238, 2006.
- [9] Maeda, Speech Commun. 1, 199–229, 1982.
- [10] Titze, J. Speech Lang. Hear. Res. 49, 448–59, 2006.
- [11] Story and Titze, JASA. 97, 1249–1260, 1995.
- [12] 徳田, 日本音響学会誌, 78, 512–518, 2014.