

非対称分布声帯モデルによる疾患時の発声の数値解析* (第2報, 非対称な声帯振動の数値シミュレーション解析)

青松達哉*¹, 松崎雄嗣*², 池田忠繁*²

Numerical Analysis of Pathological Voice Production Using Asymmetric Distributed-Parameter Model for Vocal Fold (2nd Report, Numerical Simulation and Analysis of Asymmetric Vocal Fold Vibration)

Tatsuya AOMATSU*³, Yuji MATSUZAKI and Tadashige IKEDA

*³ Department of Aerospace Engineering, Nagoya University,
Furou-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Pathological vocal fold vibration is numerically simulated and analyzed using an asymmetric distributed-parameter model, previously proposed by the authors. In the simulations, mass, stiffness, initial glottal half-width at the downstream end and thickness of unilateral vocal fold are chosen as the parameters representative of unilateral vocal fold paralysis, and numerical calculations are carried out for four sets of parameters including one symmetric case. The results show a variety of vibratory patterns such as period-doubling and asymmetries in amplitude and phase, which are comparable with those of patients with paralyzed vocal folds and those observed in model experiments with excised larynges. These dynamical behaviours of great complexity strongly influence speech sound waveforms, and their effects on voice quality are discussed based on spectrum analysis. Furthermore, diversity of vibratory patterns shown by asymmetric vocal folds could be attributable to imbalance in bilateral natural frequencies, made by those parameters.

Key Words: Bio-fluid Mechanics, Flow Induced Vibration, Numerical Analysis, Pathological Voice Production, Asymmetric Vocal Fold Vibration, Vocal Fold Paralysis

1. 緒 言

声は、コミュニケーションの手段であり、さらに、歌手などの職業ではパフォーマンスの道具としても使われているように、我々の日常生活のあらゆる場面において重要な役割を果たしている。したがって、疾患により正常な声を失うことは生活全体の質の低下につながり、生活の安定という福祉的観点からも、疾患時の発声のメカニズムを解析し、音声障害の治療や発話訓練などの医療を支援することが大切である。

声の音源は主に声帯の自励振動であり、その振動特性は音声に強く影響する。実際、喉頭疾患患者の多くに音声の異常が認められるのも、疾患により声帯の特性が変化した結果、声帯が正常時とは異なった動的挙動を示すからである。したがって、疾患時の発声の問題では、声帯のモデリングが本質的に重要である。著者らは、第一報⁽¹⁾において、一対の声帯の特性が喉頭疾患により左右非対称になる場合を考慮できる、非対称分布声帯モデルを提案し、非対称モデルにより、音

声障害を評価するための指標を数値的に解析した。

疾患時の発声の解析をさらに進めるため、第二報では、片側の声帯に病変が認められる喉頭疾患を想定し、非対称分布声帯モデルにより声帯の特性が左右で異なる場合の発声の数値解析を行う。特に、疾患時の特徴である非対称な声帯振動を数値的に再現し、音源である声帯振動が音声波形に及ぼす影響を調べる。

2. 数 学 モ デ ル

肺から口唇までの気道を模擬した数学モデルでは、肺を総圧 P_L の圧力容器、気管支・気管を一定断面の共鳴管、声道を一次元共鳴管で近似し、気管腔と声道の間に位置する喉頭腔を二次元流路に置き換えている。

2・1 非対称分布声帯モデル 第一報で提案した非対称分布声帯モデル⁽¹⁾は、左右の声帯をそれぞれ弾性膜で近似し、その機械的特性と等価な非線形バネと減衰器を弾性膜全体に分布させることにより、声帯全体を模擬している(図1)。したがって、非対称モデルは、片側声帯麻痺により左右全体の特性が異なる場合や声門癌のように硬化病変が局在する場合など、様々な病態に対応することが可能である。

* 原稿受付 2001年8月10日。

*¹ 正員, 名古屋大学(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

*² 正員, 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: aomatsu@smart.nuae.nagoya-u.ac.jp

非対称モデルは第一報ですでに提案したので、ここでは簡単に説明する。第二報では、非対称な声帯が衝突する場合についても考慮している。左右の弾性膜の位置を $B_L(X,T)$, $B_R(X,T)$ とし、声門の流路幅を $2B(X,T)=B_L+B_R$ とする。さらに、 C_L , $F_L(B_L)$, N_L , $P(X,T)$, κ_L , ρ_{mL} を、それぞれ、左側の声帯の減衰係数、声帯の剛性と等価な非線形バネの復元力、弾性膜の長手方向の張力、弾性膜に作用する空気の静圧、弾性膜の曲率、声帯の有効質量とすると、左側の弾性膜の運動方程式は以下ようになる。右側の弾性膜についても添え字 L を R に変えた式が同様に成り立つ。

$$\rho_{mL} \frac{\partial^2 B_L}{\partial T^2} + C_L \frac{\partial B_L}{\partial T} + F_L(B_L) - \kappa_L N_L = P \dots \dots (1)$$

ただし、

$$\kappa_L = \frac{\partial^2 B_L}{\partial X^2},$$

$$N_L = E_L h_L \varepsilon_L,$$

$$\varepsilon_L = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial B_L}{\partial X}\right)^2\right] / \left[1 + \left(\frac{\partial B_{0L}}{\partial X}\right)^2\right]} - 1$$

ここで、 T , X は時間、流路中央を通る流れ方向の座標である。また、 $B_{0L}(X)$, E_L , h_L , ε_L は、それぞれ、左側の弾性膜の初期位置、声帯のヤング率、弾性膜の厚さ、弾性膜の長手方向の歪である。

式(1)の復元力 F_L と減衰係数 C_L については、声帯の衝突状態を表す閾値 B_p と B_w を境に変化させる⁽²⁾。 $B > B_p$ のとき左右の声帯は衝突しておらず、 $B = B_p$ のとき声帯の奥行き方向 (図1で紙面に垂直な方向) の一部で衝突し始める。同一方向で衝突がさらに進行し最終的に声門は閉じるが、このとき、声帯の後端にある左右の披裂軟骨の間に隙間ができるので、この隙間の

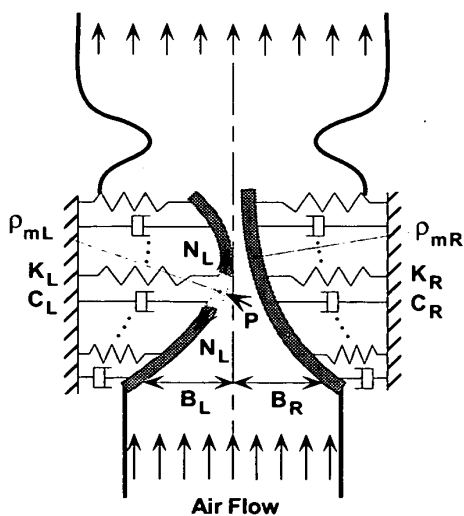


Fig.1 Asymmetric distributed-parameter model for vocal fold

平均的な幅の半分を B_w とする。 K_L , K_p , K_w , η_L , η_p , η_w , ζ_L を、それぞれ、各衝突状態での線形バネ定数と復元力の非線形性を表す係数、比減衰係数とすると、 F_L と C_L は以下ようになる。ただし、 $B \leq B_w$ のとき、次節で示す声門流れの式(2)において $B = B_w$ とする。

$B > B_p$ のとき

$$F_L(B_L) = K_L (B_L - B_{0L}) \left\{ 1 + \eta_L (B_L - B_{0L})^2 \right\}$$

$$C_L = 2\zeta_L \sqrt{\rho_{mL} K_L}$$

$B_w < B \leq B_p$ のとき

$$F_L(B_L) = K_L (B_L - B_{0L}) \left\{ 1 + \eta_L (B_L - B_{0L})^2 \right\}$$

$$+ K_p (B - B_p) \left\{ 1 + \eta_p (B - B_p)^2 \right\}$$

$$C_L = 2(1 + \zeta_L) \sqrt{\rho_{mL} K_L}$$

$B \leq B_w$ のとき

$$F_L(B_L) = K_L (B_L - B_{0L}) \left\{ 1 + \eta_L (B_L - B_{0L})^2 \right\}$$

$$+ K_p (B - B_p) \left\{ 1 + \eta_p (B - B_p)^2 \right\}$$

$$+ K_w (B - B_w) \left\{ 1 + \eta_w (B - B_w)^2 \right\}$$

$$C_L = 2(1 + \zeta_L) \sqrt{\rho_{mL} K_L}$$

2・2 流体モデル 気道の空気流れについては第一報⁽¹⁾と同じ次元流れのモデルを用いる。したがって、ここではその概要を説明する。気道を気管腔、声門、仮声帯に挟まれた声門上腔、声道に分ける。 $A(X)$, $B(X,T)$, c , $Q(X,T)$, W , ρ , ν を、それぞれ、気道の断面積、声門上腔で剥離した流れの幅の半分⁽³⁾、空気中の音速、空気の流量、喉頭腔の奥行き、空気の密度と動粘性係数とすると、各領域の流れの式は以下のようになる。

声門流れ

$$\frac{\partial B}{\partial T} + \frac{1}{2W} \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \dots \dots (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{Q^2}{2WB} \right) = - \frac{2WB}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} - 3\nu \frac{Q}{B^2} \dots (2.2)$$

声門上腔流れ

$$\frac{\partial B}{\partial T} + \frac{1}{2W} \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{Q^2}{2WB_j} \right) = - \frac{2WB}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} \dots \dots (3.2)$$

気管腔流れと声道流れ

$$A \frac{\partial P}{\partial T} + \rho c^2 \frac{\partial Q}{\partial X} + Q \frac{\partial P}{\partial X} = 0 \dots \dots (4.1)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} - 8\pi\nu \frac{Q}{A^2} \dots (4.2)$$

2・3 境界条件と初期条件 気道の開口端である口唇での境界条件は、平板内に設けられた振動するピストンに作用する空気力に基づき、口唇での圧力 P_m 、流量 Q_m 、断面積 A_m を用いて以下の式で与える。

$$P_m = \rho \frac{8}{3\sqrt{\pi^3 A_m}} \frac{\partial Q_m}{\partial T} \dots\dots\dots (5)$$

また、発声は以下の式に従う肺圧を与えて行う。

$$P_L = \begin{cases} \frac{P_{LN}}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\pi T}{T_p}\right) \right\} & (0 \leq T < T_p) \\ P_{LN} & (T_p \leq T) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

肺圧は立ち上がり時間 T_p を経て設定肺圧 P_{LN} まで上昇し、その後一定に保たれる。

3. 数値解析

声帯の特性が左右非対称である場合の数値計算は喉頭疾患を想定しているため、その比較対象としての正常時の発声について理解しておく必要がある。そこで、まず、対称な場合について声帯振動や音声を解析し、続いて非対称な場合の解析を行うことにする。

3・1 計算に用いる定数の値 声帯や空気に関する定数は以下の通りである^{(4)~(7)}。

$$\begin{aligned} \rho_m &= 0.5 \text{ g/cm}^2, \quad \zeta = 0.3, \quad K = 100 \text{ kdyn/cm}^3, \\ \eta &= 100 \text{ cm}^2, \quad K_p = K_w = 1.5K, \quad \eta_p = \eta_w = 5\eta, \\ B_p &= 0.015 \text{ cm}, \quad B_w = 0.01 \text{ cm}, \quad W = 1.5 \text{ cm}, \\ Eh &= 200 \text{ kdyn/cm}, \quad P_{LN} = 5 \text{ kdyn/cm}^2, \\ T_p &= 0.01 \text{ s}, \quad \rho = 0.0011 \text{ g/cm}^3, \quad \nu = 0.17 \text{ cm}^2/\text{s}, \\ c &= 35 \text{ 000 cm/s} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

声帯と仮声帯の初期形状を片側のみ図 2 に示す。流路の中心は一点鎖線で表されている。声帯の形状を台形で近似する。流れ方向の長さは 1.04 cm、声門上流端 ($X=0$) での流路半幅は 0.82 cm であり、下流には、流路半幅 (B_g) が 0.02 cm、声帯の厚み (T_g) が 0.312 cm の狭窄流路がある。また、仮声帯の形状を流路半幅の五次関数で与える。ただし、これらは Scherer ら⁽⁸⁾の喉頭模型を参考にしている。

声道、気管支・気管をそれぞれ、長さ 16 cm、母音

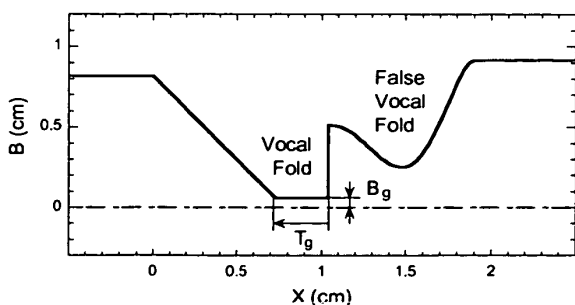
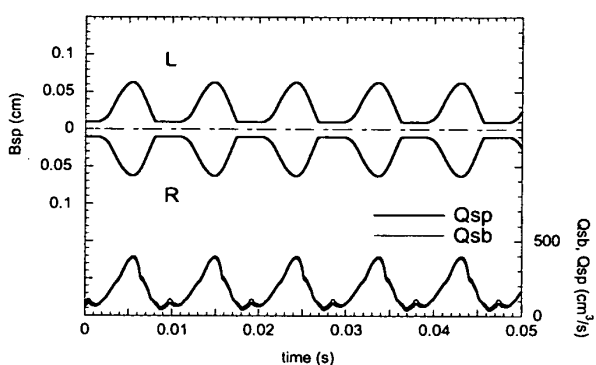


Fig.2 Prephonatory shapes of vocal fold and false vocal fold

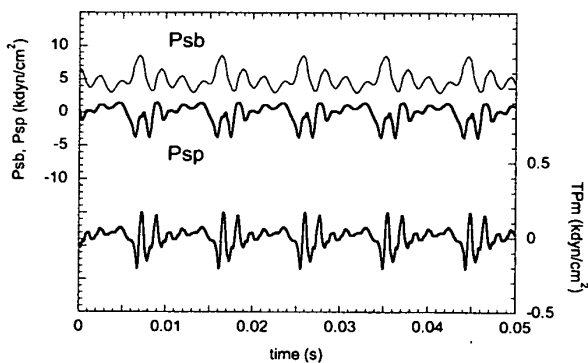
/a/の断面積分布⁽⁹⁾の一次元共鳴管、長さ 23 cm、断面積 2.46 cm²の一定断面の共鳴管で近似する。

声帯の運動方程式(1)と気道の流れの方程式(2), (3), (4)を、境界条件(5)と初期条件(6)を考慮して、差分陰解法により解いた。ただし、気管支・気管、声帯、声道の分割数をそれぞれ 10, 10, 17, 時間の刻み幅を 10⁻⁵sとしている。

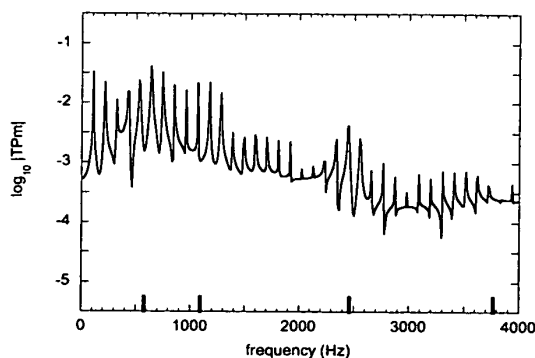
3・2 対称な場合 図 3 は、左右の弾性膜の特性がともに式(7)で与えられる、対称な場合の結果を表す。上から順に、声門下流端での流路半幅 (B_{sp})、声門上流端と下流端での流量 (Q_{sb} , Q_{sp}) と静圧 (P_{sb} , P_{sp})、口唇での総圧 (TP_m) とそのスペクトル ($\log_{10} |TP_m|$, $|TP_m|$ は各周波数成分の振幅を表す) である。



(a) Glottal half-width at the downstream end (B_{sp}), sub- and supra-glottal flow rate (Q_{sb} , Q_{sp})



(b) Sub- and supra-glottal pressure (P_{sb} , P_{sp}), total pressure at the mouth (TP_m)



(c) Spectrum of TP_m

Fig.3 Results of simulation for the vowel /a/ in the case of symmetric vocal folds

左右の弾性膜の振動波形は流路中央の時間軸に関して対称であり、お互いに同期して規則正しく 106 Hz で振動している。ただし、L, R はそれぞれ左右を表し、右側に関しては縦軸の下向きを正としている。振動の基本サイクルにおいて流路幅が一定となる区間では、両側の声帯が完全に衝突し、声門が閉鎖している。

声門下流端の流路幅の変化に対応して、流量は声門が最も拡大するときに最大となり、衝突が起きている区間では少ない。また、 Q_{sb} と Q_{sp} の波形は共にほぼ一致しているが、これは声門において流路幅の変化が最も大きい狭窄部が短いからである。

声門上流端での静圧 P_{sb} の波形には基本周期あたり高調波の山が約四個認められる。声帯の振動数が 106 Hz であることから、この高調波の振動数は 400 Hz 前後であると推定される。数学モデルにおいて、気管支・気管は、一端が開放し他端が閉じている閉管に相当し、最も低い共鳴周波数は、音速と管長に依存する波長から算出され、380 Hz である。したがって、高調波は気管支・気管での共鳴によるものと考えられる。

声門下流端での静圧 P_{sp} の波形は、我々が聴取する音声である TP_m の波形に類似している。さらに、スペクトルにおいて、母音/a/を特徴づける一次から四次までの共鳴周波数 (579, 1091, 2461, 3769 Hz) の近傍で、レベルの上昇が顕著であることから、 TP_m は、 P_{sp} が声道での共鳴により修飾された結果、生成されることが分かる。ただし、最初のピークは声帯の振動数 (基本振動数) の成分であり、基本振動数の整数倍の位置にあるピークは倍音成分である。

基本振動数、OQ (open quotient; 基本周期あたりの声門が開放している期間の割合)、平均流量といった声帯振動の特性に関して、シミュレーション結果と正常な発声での実測データ⁽¹⁰⁾はそれぞれ 106 Hz (115), 0.69 (0.61), 181 cm³/s (185) であり両者は良く一致する。ただし、括弧内の数値は実測データである。また、音声波形も母音/a/に特有の音響特性を示している。したがって、対称な場合のシミュレーションは正常時の発声の基本的な特徴を良く再現していると考えられ、以降、病的な声帯振動を想定した非対称な場合のシミュレーションでは、対称な場合の結果を基準とする。

3・3 非対称な場合 左右の声帯の特性が異なり非対称である場合の結果を図4, 5, 6に示す。ただし、軸、記号等の意味は前述の図3と同じである。

便宜上、右側の声帯を健側、左側の声帯を患側とする。健側のパラメーターを対称な場合の計算で用いた値に固定し、患側のみパラメーターを変化させて、喉頭疾患の特徴である特性の非対称性を模擬した。その尺度として非対称性パラメーター α を導入し、今回は片側声帯麻痺による機械的・幾何学的特性の変化⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を考慮して、 α により患側の質量 ρ_{ml} 、線形バネ定

数 K_L 、初期流路半幅 B_{gl} 、厚み T_{gl} を変えた。ただし、各パラメーターについて α は以下の通りである。

$$\alpha_p = \rho_{ml} / \rho_{mr}, \quad \alpha_k = K_L / K_R, \quad \alpha_B = B_{gl} / B_{gr}, \\ \alpha_T = T_{gl} / T_{gr} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 ρ_{ml} 、 K_L は患側の運動方程式(1)の慣性力、非線型バネの復元力に寄与し、 ρ_{mr} 、 K_R は健側の運動方程式 ((1)式の添え字LをRに変えた式)においてそれぞれ ρ_{ml} 、 K_L と同様に作用する。また、 B_{gl} 、 B_{gr} 、 T_{gl} 、 T_{gr} は患側と健側に挟まれた声門の流路形状を定めるパラメーターであり (図2)、(2)式で支配される声門流れの圧力分布に影響を及ぼす。

今回の解析では、式(1)において、 ρ_{ml} 、 K_L 、 $B_{gl}(X)$ (B_{gr} と T_{gl} を含む)を除いて、物理量の左右の区別はなくなるので、以降、それらの添え字Lを取り除くことにする。

式(8)の非対称性パラメーターの組み合わせとして次の三通りについて計算を行った。

$$\text{Case1: } \alpha_p = 2, \quad \alpha_k = 0.5, \quad \alpha_B = 1, \quad \alpha_T = 1$$

$$\text{Case2: } \alpha_p = 2, \quad \alpha_k = 0.5, \quad \alpha_B = 3, \quad \alpha_T = 1$$

$$\text{Case3: } \alpha_p = 2, \quad \alpha_k = 0.5, \quad \alpha_B = 3, \quad \alpha_T = 0.3$$

声帯麻痺は、声帯内外の筋組織を支配する喉頭神経が損傷した結果起こり、その病態は損傷の部位や程度により異なる。Case1では、声帯の主構造である声帯筋の麻痺を想定している。この場合、麻痺側全体の剛性が低下し、さらに、柔らかくなることで声帯組織内の振動する範囲は広がると考えられるため、患側の K_L 、 ρ_{ml} をそれぞれ健側に比べて減少、増加させている。

神経の損傷による影響が、声帯筋だけでなく周辺の筋組織 (特に、輪状披裂筋などの内転筋) にも及ぶ場合が Case2 である。内転筋は両側の声帯を互いに近づけて声門を閉鎖する働きがあり、内転筋が麻痺した声帯は健側から離れた位置に固定されるので、患側の B_{gl} を健側に比べて増加させている。

Case3は、Case2の病態を示す麻痺が一過性ではなく継続する場合を表す。時間の経過とともに筋組織の変性・萎縮が進行し、麻痺側の形状が全体的に変化する。特に、厚みは減少する傾向にあるため、患側の T_{gl} を健側に比べて減少させている。

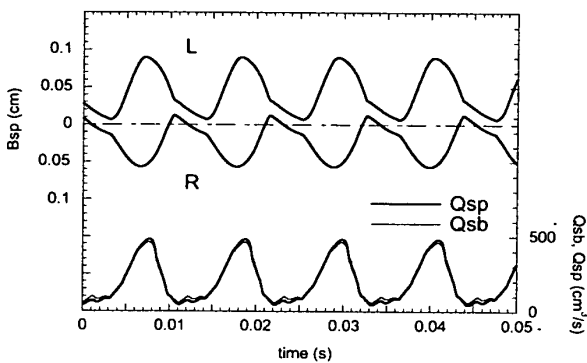
図4はCase1の結果である。左右の弾性膜は規則正しく振動し、位相差は19°で右側が先行している。 B_{sp} (mean \pm RMS) は左右それぞれ 0.046 \pm 0.029 cm, 0.023 \pm 0.023 cm であり、左側は右側よりも流路中央から離れて振動し、その振幅は右側より大きい。また、衝突は、流路中央より左側に隔たった位置で開始し、その位置は右側に向かって移動し、流路中央付近で終了する。このように位相、振幅が左右で異なり、振動波形は非対称である。一方、振動数は左右等しく 90 Hz であり、対称な場合より 16 Hz 減少している。

P_{sb} , P_{sp} , TP_m の波形全体の特徴は対称な場合と似ているが、対称な場合には目立たなかった高調波が認められる。スペクトルにおいて、2 kHz 以上で全体的に高調波成分のレベルが上昇し、さらに倍音成分の間に比較的レベルの小さい成分が認められる。これは音声波形の振幅が時間と共に僅かに変動していることに起因すると考えられる。この場合の音声は、振動数の低下と併せて考えると、声が低く多少粗い感じの声質であると言える。

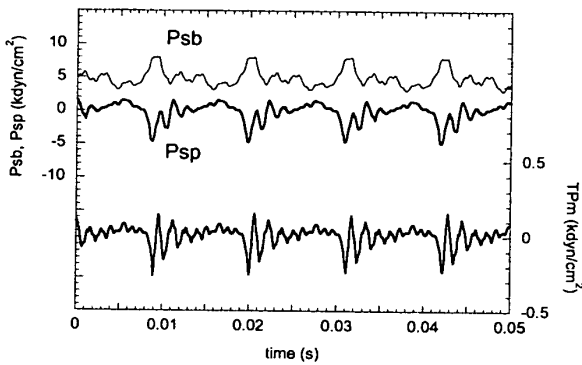
図5はCase2の結果である。振幅の異なる二つの波が交互に現れる倍周期振動が起こり、基本振動数(98 Hz)の二分の一にあたる49 Hzの分周波が存在する。 B_{sp} (mean \pm RMS) は左右それぞれ 0.074 ± 0.034 cm,

0.022 ± 0.029 cm であり、初期流路半幅が 0.06 cm, 0.02 cm であるから、初期位置からの変位、振幅ともに左側の方が大きい。位相に関してはCase1の結果と同様に健側が先行し、位相差は、振幅の大きい波で 39° 、小さい波で 74° であり、時間と共に増加し、衝突により差の拡大は抑えられている。振幅と位相の非対称性に加えて、基本振動数の成分と分周波が共存する多重周期性がCase2の特徴である。

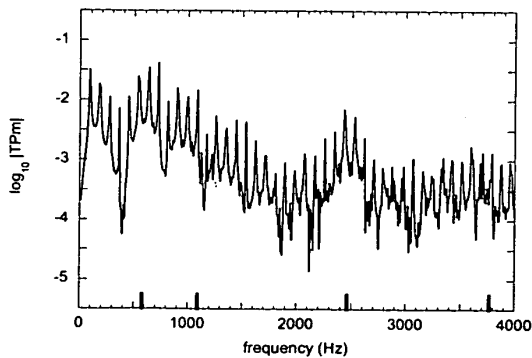
声帯振動が示す倍周期性は流量波形と圧力波形にも認められる。対称な場合と比べて、スペクトル全体に渡り、隣り合うピークの間隔が非常に狭く、倍音成分が高密度に分布している。これは基本振動数の倍音成分の間にさらに分周波の倍音成分が存在するためであり、



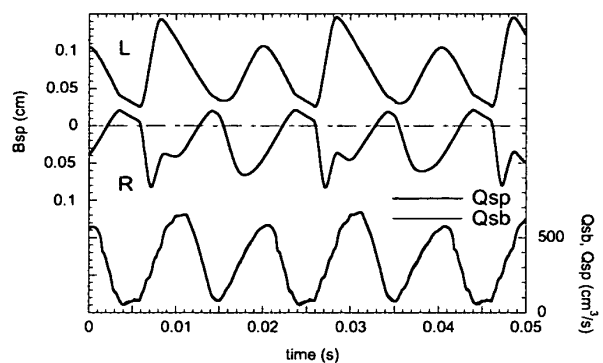
(a) Glottal half-width at the downstream end (B_{sp}), sub- and supra-glottal flow rate (Q_{sb} , Q_{sp})



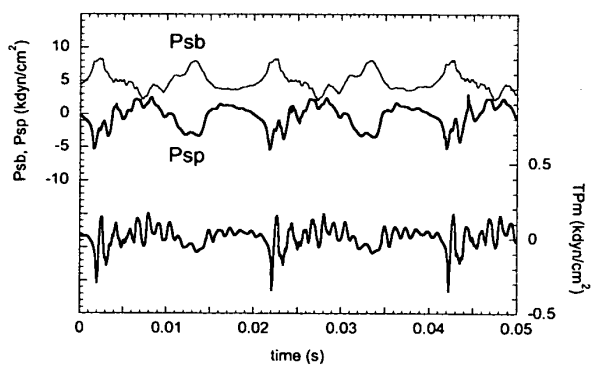
(b) Sub- and supra-glottal pressure (P_{sb} , P_{sp}), total pressure at the mouth (TP_m)



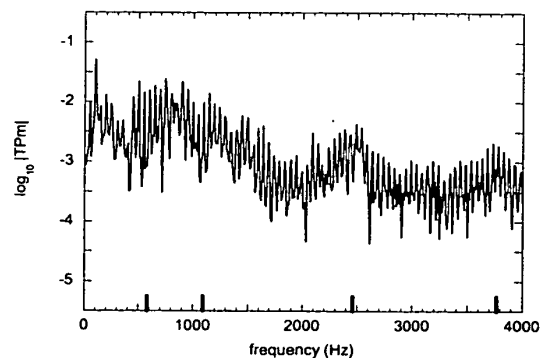
(c) Spectrum of TP_m



(a) Glottal half-width at the downstream end (B_{sp}), sub- and supra-glottal flow rate (Q_{sb} , Q_{sp})



(b) Sub- and supra-glottal pressure (P_{sb} , P_{sp}), total pressure at the mouth (TP_m)



(c) Spectrum of TP_m

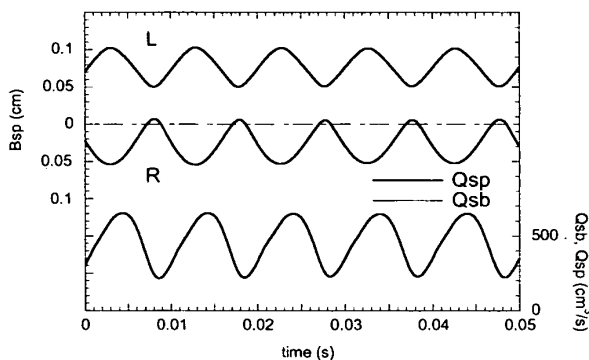
Fig.4 Results of simulation for the vowel /a/ in Case1

Fig.5 Results of simulation for the vowel /a/ in Case2

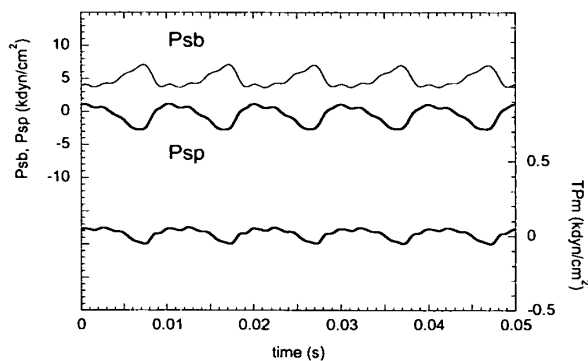
ピークのレベルが最も高い基本振動数の成分より低い振動数に分周波の成分を表すピークがある. このような音響特性を示す音声は, 二つの異なる高さを持ち, 聴覚的に非常に粗い印象を与える.

図6はCase3の結果である. B_{sp} (mean \pm RMS) は左右それぞれ 0.078 ± 0.017 cm, 0.027 ± 0.020 cm であり, 初期位置からの変位に関しては左側が大きく, 振幅に関しては右側が大きい. しかしながら, 位相差は 4° しかなく, 衝突も起こらないため, 振動波形は比較的対称である.

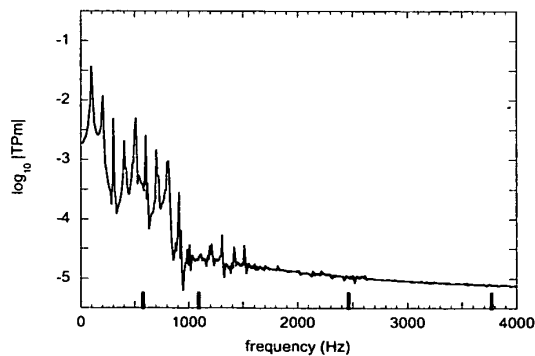
P_{sb} , P_{sp} , TP_m の全てにおいて高調波成分が抑えられている. スペクトルから, 三次, 四次の共鳴周波数成分を含む 2kHz 以上の高調波が完全に消失し, さらに,



(a) Glottal half-width at the downstream end (B_{sp}), sub- and supra-glottal flow rate (Q_{sb} , Q_{sp})



(b) Sub- and supra-glottal pressure (P_{sb} , P_{sp}), total pressure at the mouth (TP_m)



(c) Spectrum of TP_m

Fig.6 Results of simulation for the vowel /a/ in Case3

一次, 二次の共鳴周波数付近ではレベルが全体的に著しく低下しているのが分かる. すなわち, 音声波形には声道での共鳴の効果が十分に現れていない. 声質の観点からは, 母音/a/の音色が欠如した, 明瞭度の低い音声と言える.

片側声帯麻痺患者のうち声門の間隔が大きい症例において, 健側が患側よりも先行し時間と共に位相差が大きくなることもある⁽¹³⁾. また, 摘出喉頭の実験⁽¹⁴⁾では, 声門に隙間が認められる場合に, 倍周期や三倍周期などの複雑な振動パターンが観察されている. これらの振動パターンの特徴はCase2の結果にも認められる. 同じ摘出喉頭の実験⁽¹⁴⁾において, 声門の閉鎖が全く起こらない場合には, 周期的で比較的対称な振動パターンを示し, Case3の結果とよく似ている. さらに, 成犬を用いた実験⁽¹⁵⁾において, 神経を切断し片側の声帯だけ麻痺させた場合の振動パターンはCase1と同じ特徴を示している. このように, 今回のシミュレーションにより得られた非対称声帯振動のパターンは, 声帯麻痺の模擬実験や臨床で観察された波形の特徴を良く捉えている.

3・4 非対称振動のパターンに関する考察 非対称な場合の数値シミュレーションにより得られた声帯振動のパターンの成因について, Case2, Case1, Case3の順に考える. Case2ではCase1と比べて初期流路幅が広いので, 衝突が起こりにくい. 実際, Case1とCase2のOQはそれぞれ0.67, 0.86であり, 全く衝突しない場合にOQ=1となるから, Case2では衝突時間の割合が小さくなっていることが分かる. 衝突により左右の声帯の運動は制限されるが, Case2の場合, その影響は比較的小さいため, 左右それぞれの特徴に基づいた振動パターンが形成されやすいと考えられる. したがって, $\alpha_p = 2$, $\alpha_k = 0.5$ のとき, 健側に対する患側の固有振動数 $(1/2\pi)\sqrt{K/\rho_m}$ の比 $\sqrt{(\alpha_k/\alpha_p)}$ が0.5であることから, 初期流路幅の広いCase2では左右の声帯の固有振動数の関係が強く影響し, 倍周期振動につながったものと推察される.

一方, 初期流路幅が狭いCase1の場合, 逆に衝突により患側が健側に強く干渉し, 全体として基本振動数が低下する. さらに, 健側の固有振動数は患側よりも高いため, 倍周期振動に至らないまでも, 健側が先行する, 位相が非対称な振動が起こると考えられる.

第一報において, 声帯の厚みが小さいとき, 発声開始肺圧での基本振動数は高いことが明らかになった⁽¹⁾. 発声開始肺圧付近では, 振幅が微小であるため振動は線形的であり, 基本振動数は固有振動数に近いと考えられる. したがって, Case3の患側では, 機械的な特性の変化に伴う固有振動数の低下と, 厚みの減少による固有振動数の増加が互いに相殺し, 結果的に左右の声帯の間には固有振動数の違いがそれほど生じないため, 振動は対称になると考えられる.

3・5 嗄声に関する検討 嗄声は、喉頭疾患時に生じる異常な音声の総称であり、ここでは、代表的な疾患の嗄声について声の質と大きさの点から検討する。

嗄声の質は、粗糙性、氣息性などの聴覚心理的尺度に基づいて評価される⁽¹⁶⁾。粗糙性は、病的声帯振動に見られる特異な周期性(例えば、図5の倍周期性や非周期性)に起因し、うがいのように発するガラガラ声に似た粗い印象である。また、氣息性は、発声中に声門が閉じない(声門閉鎖不全)場合に生じる空気力学的雑音に起因し、息が洩れた感じのかすれた印象である。

麻痺の場合、その影響は患側全体に及び、病変が局在する癌やポリープと比べて、声帯の機械的・幾何学的特性の非対称性は大きくなる。このことを反映して、特異な周期性や声門閉鎖不全が著明に認められることが多く、嗄声は粗糙性、氣息性が比較的強い。また、ポリープでは、その局在性のため声門閉鎖不全は声門の限られた領域でしか起こらない。したがって、麻痺と比べて氣息性の弱い嗄声である。さらに、癌の場合、患部組織の硬化に伴って声帯振動は困難になり、発声には比較的負担がかかる。その結果、粗糙性、氣息性だけでなく、いきんだ印象も受ける。

一方、声の大きさには肺圧と喉頭調節の両者が関係し、疾患時に正常な喉頭調節が阻害されても、肺圧を代償的に変化させてある程度は大きさを調節できるので、各疾患の間で違いは現れにくいと考えられる。実際、楽な発声(話者にとって楽な高さで大きさでの発声)では疾患の間で大きな差は認められない⁽¹⁶⁾。

結 言

著者らが提案した非対称分布声帯モデルを用いて、喉頭疾患により声帯の機械的・幾何学的特性が左右で異なる場合の発声の数値解析を行った。解析では片側声帯麻痺を想定し、声帯の質量、線形バネ定数、初期流路半幅、厚みの四個のパラメーターを片側だけ変化させることにより病態を模擬した。

その結果、非対称モデルは、パラメーターの組み合わせにより、振幅や位相が左右で異なる非対称振動や倍周期振動などの、臨床や模擬実験で観察されている振動パターンを数値的に再現できることを示した。また、音声波形のスペクトル解析により、非対称な声帯振動が声の高さや音色といった声質に及ぼす影響を明らかにした。さらに、非対称振動のパターンの形成には、左右の声帯の固有振動数のバランスが重要な役割を果たすことが分かった。

しかしながら、今回の解析ではパラメーターの組み合わせに限られている。実際には麻痺の部位、程度、発症してからの期間により病態は様々であり、特に、臨床的見地からは、個々の症例に対処すべく、病態ご

とに対応するパラメーターの組み合わせを決定することが重要であると考えられる。したがって、今後、パラメーターを広範囲に変えて声帯振動のパターンを分類し、音声を評価することが課題である。

謝 辞

藤田保健衛生大学病院前病院長、故岩田重信先生には、声帯に各種病変が認められる場合の音声について、いろいろご教示を頂いた。ここに深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) 青松・松崎・池田. 機論. 印刷中.
- (2) Ikeda, T., Matsuzaki, Y. and Aomatsu, T., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **123**(2001), 571-579.
- (3) 池田・松崎・佐々木. 機論. **60-571, B**(1994), 750-757.
- (4) Ishizaka, K. and Flanagan, J. L., *Bell Syst. Tech. J.*, **51**(1972), 1233-1268.
- (5) Story, B. H. and Titze, I. R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**(1995), 1249-1260.
- (6) Kakita, Y., Hirano, M. and Ohmaru, K., *Local Fold Physiology*, (1981), 377-396. University of Tokyo Press.
- (7) Hirano, M., Kurita, S. and Nakashima, T., *Local Fold Physiology*, (1981), 33-43. University of Tokyo Press.
- (8) Scherer, R. C., Titze, I. R. and Curtis, J. F., *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**(1983), 668-676.
- (9) Baer, T., Gore, J. C., Gracco, L. C. and Nye, P. W., *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**(1991), 799-828.
- (10) Holmberg, E. B., Hillman, R. E. and Perkell, J. S., *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**(1988), 511-529.
- (11) 平野, 耳鼻と臨床, **21**(1975), 239-440.
- (12) Yumoto, E., Sanuki, T. and Hyodo, M., *Arch. Otolaryngol. Head Neck Surg.*, **125**(1999), 883-890.
- (13) 平野・川崎・松下・吉田・小池. 日耳鼻, **76**(1973), 721-728.
- (14) Isshiki, N., Tanabe, M., Ishizaka, K. and Broad, D., *Ann. Otol.*, **86**(1977), 58-66.
- (15) Tanabe, M., Isshiki, N. and Kitajima, K., *Acta Otolaryngol.*, **74**(1972), 339-345.
- (16) 廣瀬. 音声障害の臨床. (1998). インテルナ出版.