

# A constitutive representation on the production of glottal waves

田部, 洋祐

<https://doi.org/10.15017/459601>

---

出版情報 : 九州大学, 2006, 博士 (芸術工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第4章

# 境界層のシミュレーション

### 4.1 はじめに

声帯振動に伴い、声門形状は時々刻々と変動し、声門流の様相は複雑に変化する。このような複雑な流れの変化は、境界層の挙動に着目することで、モデル的に取り扱うことができる。例えば、Pelorsonら [26] や田部ら [42] は、境界層の剥離位置より下流側の噴流を不連続流 [31] として取り扱うことで、声門流のコンパクトなモデル表現を得ている。また、境界層は声帯と直接的に作用する流れの領域である。したがって、剥離位置や排除厚さといった境界層を特徴付ける種々の物理量は、発声現象をパラメトリックに表現する際の有益な情報を有していると推測できる。

本章では、第3章で提案した声門流モデルを用いて、声帯表面に沿って生じる境界層の挙動をシミュレーションする。ここではまず、シミュレーション条件の設定方法について述べる。それから、声門形状や流れの条件と境界層の挙動との対応関係について検討する。次に、声帯表面での圧力分布を求め、Schererら [18-20] の模型実験値を基準値として、本法のシミュレーション精度を検証する。ここでは同時に、流れの剥離位置を固定した声門流モデルに基づく数値シミュレーションを行い、その精度を検証する。これは、声門流の解析において、境界層の挙動に着目することの有効性を明らかにする目的がある。最後に、シミュレーションに基づいて声門を通過する流量の推定を行い、同様に模型実験値を基準値として、その精度を検証する。

### 4.2 シミュレーション条件の設定

本章では、Schererら [18-20] の実験で用いられた声門形状における境界層の挙動をシミュレーションする。本節では、そのためのシミュレーション条件の設定方法について述べる。ここではまず、シミュレーションで使用された声門形状について説明する。形状は2つの自由度を持ち、声門開口幅と声門角度の2変数を利用して、種々の声門形状を表す。次に、流れの条

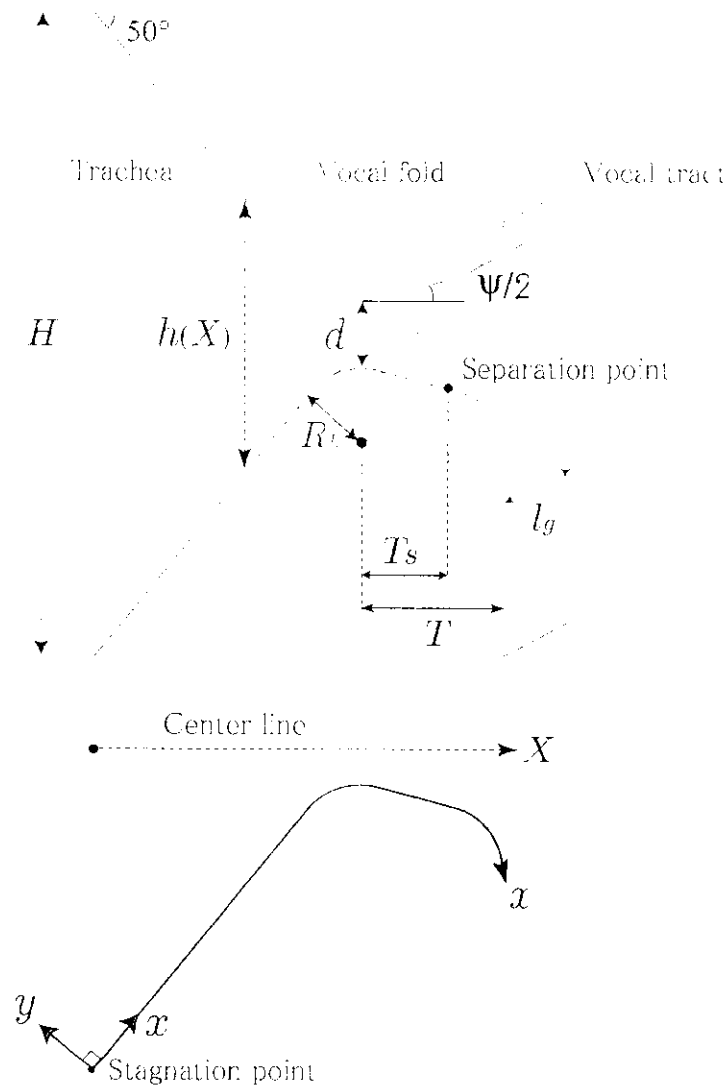


図 4.1 声門形状の幾何的な表現 [19](上段)。下段は本論で用いる座標軸を示しており、 $xy$  軸、 $X$  軸ともによどみ点を原点とする。

件の設定法について述べる。ここでは、Reynolds 数を変数として、声門を通過する流量の調節を行う。以上、声門形状に関する 2 変数、流れの条件に関する 1 変数、これら 3 変数がシミュレーションの条件を決定する。

#### 4.2.1 声門形状と座標軸の設定

ここではまず、声門形状の設定法について述べる。声門形状は声門開口幅と声門角度の 2 変数を自由度に持ち、これらの組合せにより、多様な形状を表現する。また、シミュレーションで利用する座標軸についても示す。

図 4.1 の上段に、声門形状の幾何学的な表現を示す。ここで、声帯表面の形状は、文献 [19] の p. 1618 に与えられた関数を用いて設計する。一方、図 4.1 の下段には本論で用いる座



図 4.2 声門開口幅  $d = 0.04$  cm に対して声門角度  $\Psi$  [deg] を変化させたときの声門形状

標軸を示す。座標  $x$  は声帯表面に沿って取る。また、座標  $X$  は声門形状の中心対称軸であり、座標  $x, X$  とともに、その原点はよどみ点 (stagnation point) と対応している。気管の幅  $H$  [cm]、声門幅  $h(X)$  [cm]、声門開口幅  $d$  [cm] は、 $X$  軸と直交する軸上において定義されている。また、管長は  $T = 0.3$  cm、声門入口の曲率半径は  $R_L = 0.15$  cm、気管と喉頭管の幅は  $H = 13/7.5 \approx 1.73$  cm、図 4.1 の奥行きにあたる声帯長さは  $l_g = 1.2$  cm である。

声門形状を決定する変数は、声門開口幅  $d$  [cm] と声門角度  $\Psi$  [deg] である。 $d, \Psi$  の 2 変数を用いて、図 1.3 に示した、声帯振動における声門形状の変化を表現することができる。例として、声門開口幅  $d$  を一定にして声門角度  $\Psi$  を変化させたときの声門形状を図 4.2 に示す。声門は  $\Psi < 0^\circ$  で収縮形状を、 $\Psi > 0^\circ$  で拡大形状を示す。

#### 4.2.2 流れの条件の設定

次に、流れの条件を設定する変数について述べる。流れの条件は、Reynolds 数を用いて設定する。Reynolds 数は、粘性力に対する慣性力の比という物理的な意味を持つが、本シミュレーションにおいては、その大小は、声門を流れる流量の大小と対応する。

Reynolds 数を決定するには、流れの代表的な長さ、代表的な速度を決定する必要がある。ここでは流れの代表的な長さを声門開口幅  $d$  [cm]、代表的な速度を  $U_g/(d \cdot l_g)$  [cm/sec] とする。ここで、 $U_g$  [cm<sup>3</sup>/sec] は声門体積流量である。これより、流れの条件を設定する Reynolds 数  $R_e$  は以下で与えることができる [31]。

$$R_e = \frac{U_g}{\nu l_g} \quad (4.11)$$

ここで $\nu$ は空気の動粘性係数である。シミュレーションにおいて、 $\nu$ や $l_g$ は定数である。したがって、Reynolds数 $R_e$ の大小は、声門体積流量 $U_g$ の大小に対応する。

Reynolds数 $R_e$ より、流れの条件に関する様々な物理量を求めることができる。例えば、声門体積流量 $U_g$ はReynolds数の関数として以下で与えられる。

$$U_g = \nu l_g R_e \quad (4.2)$$

また、等角写像の帯領域における一様流の強さ $V$ は、対応する物理領域との流量の保存を考慮して

$$V = \frac{U_g}{2l_g} = \frac{\nu R_e}{2} \quad (4.3)$$

で与えられる。さらに、流れの代表的な圧力 $P_k$  [ $\text{g/cm} \cdot \text{sec}^2$ ] についても

$$P_k = \frac{1}{2} \rho_0 \left( \frac{\nu R_e}{d} \right)^2 \quad (4.4)$$

により表される。ここで $\rho_0$ は空気の密度である。なお、流れの代表的な圧力 $P_k$ は、シミュレーション結果を無次元化する際に用いられる。

### 4.2.3 離散化の条件

最後に、シミュレーションにおける離散化の条件について述べ、その精度に関して検証する。本論では、境界層の挙動をシミュレーションする際に、等角写像の手法を利用する。3.5.4節で述べたように、自由な声門形状に対して等角写像を適用するためには、声門を多角形で近似する必要がある。この近似の程度が、シミュレーションにおける離散化の条件を決定する。

境界層の挙動をシミュレーションするには、式(3.33)を用いて、声帯表面に沿う主流の速度 $U_s$ を求める必要がある。ここで、式(3.33)を評価するには、写像関数 $g(\zeta)$ と、声帯表面に沿う $x$ 曲線を $\zeta$ 平面に写像した曲線 $\zeta_s(x)$ を求める必要がある。まず、写像関数 $g(\zeta)$ の具体的な形を決定するために、図4.1の声門形状を図3.3のような多角形で近似する。ここでは、曲率区間に関しては、20個の節点で近似した。声門形状を多角形で近似した後、3.5.6節の手法に基づいて、写像関数の形を具体的に決定する。次に、 $\zeta_s(x)$ 曲線は以下の手続きにより求めた。まず、多角形の節点付近における流速の発散を回避するために、 $z$ 平面において声帯表面から $0.2d$ だけ内側の地点に離散的な流速の参照点を設定する。ここで $d$ は声門開口幅である。この参照点を式(3.19)の逆写像 $\zeta = g^{-1}(z)$ により $\zeta$ 平面に写像して $\zeta_s(x)$ を求めた。

なお、本法における写像 $g$ 、逆写像 $g^{-1}$ の精度は、誤差関数 $\text{error}(\zeta)$ を

$$\text{error}(\zeta) \equiv \left| \frac{g^{-1}(g(\zeta)) - \zeta}{\zeta} \right| \quad (4.5)$$

により定義し、 $\zeta$ 平面に作成した格子各点において求めることで検証した。式(4.5)は、 $\zeta$ 平面で指定された点を $z$ 平面に写像し、再び $\zeta$ 平面に逆写像したときの絶対誤差を指定点の絶対

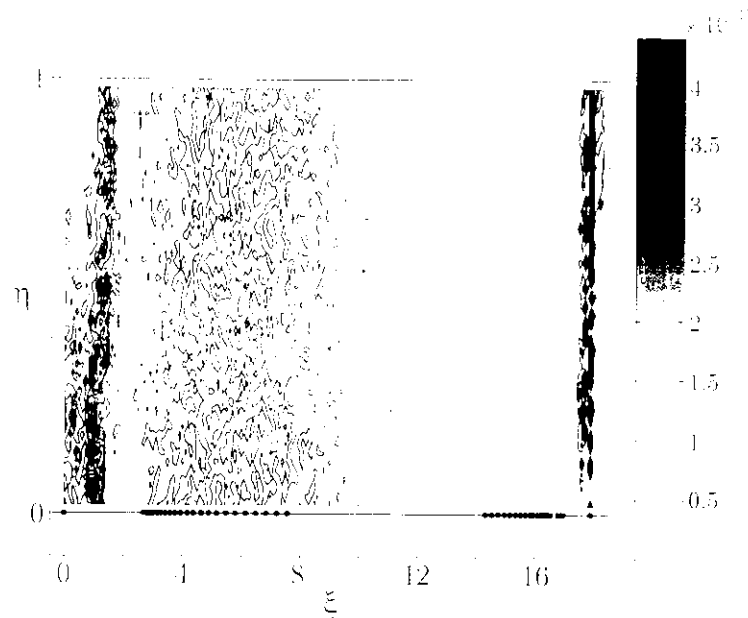


図 4.3 式 (4.5) で定義された  $\text{error}(\zeta)$  による写像の誤差の評価。

値で正規化したものである (ただし  $\neq 0$ )。声門形状を  $d = 0.01 \text{ cm}$ ,  $\Psi = 10^\circ$  とし、実軸に 0 から 18 まで 0.1 の間隔、虚軸に 0 から 1 まで 0.02 の間隔を持つ格子の各点で式 (4.5) の評価を行なった。図 4.3 は式 (4.5) で求めた誤差を  $\zeta$  平面上に等高線として示したものである。これより、誤差の分布にはばらつきが認められるものの、誤差は平均で  $3.03 \times 10^{-16}$ 、最大で  $4.83 \times 10^{-15}$  となり、写像、逆写像がともに十分な精度で行われていることを確認した。

## 4.3 境界層の挙動のシミュレーション

### 4.3.1 はじめに

これより、境界層の挙動を具体的にシミュレーションする。声帯振動に伴い、声門形状は時々刻々と変動し、また、流れの条件も様々に変化する。ここでは、声門形状に関する声門開口幅  $d$  と声門角度  $\Psi$ 、そして流れの条件に関する Reynolds 数  $R$  を種々に変化させたときの、境界層の挙動の変化について検討する。ここではまず、本節のシミュレーションの手順について述べる。次に、具体的にシミュレーションを行い、変数  $d, \Psi, R$  と境界層の挙動の対応関係を調べる。

### 4.3.2 シミュレーションの手順

まず、本節のシミュレーションの手順を示す。境界層の挙動のシミュレーションは、以下の手順に沿って行われる。

## 1. 声門形状・流れの条件の設定

- 声門開口幅  $d$  [cm], 声門角度  $\Psi$  [deg], Reynolds 数  $R_e$  を与えて, 声門形状と流れの条件を設定する。

## 2. 声門形状の離散化

- 自由な声門形状に対して等角写像を適用するために, 声門形状の多角形近似を行う (4.2.3 節を参照)。

## 3. 等角写像関数の導出

- 3.5.6 節で説明した手続きにより, 等角写像関数の具体的な形を決定する。

## 4. 主流速の算出

- 声帯表面上の主流速  $U_s$  を, 式 (3.33) に基づいて算出する。

## 5. 境界層の運動量方程式の計算

- 主流速  $U_s$  を与えて式 (3.34)(3.35)(3.36) を解き (Newton-Raphson 法 [37]), 未知数  $Z, H, U_{\delta_1}$  を算出する。

5. で得られた  $Z, H, U_{\delta_1}$  より, 声帯表面での粘性応力  $\tau$  は式 (3.41) を用いて求められる。ここで, 境界層の剥離位置は  $\tau = 0$  となる点, すなわち式 (3.41) の  $f_2(H)$  が 0 となる  $H = 4$  の位置で与えられる。また, 境界層内部の速度分布に関しては, 予め式 (3.57) の数値解に基づいて, Falkner-Skan 方程式の速度分布の形状を決定する因子  $\beta$  と  $H$  との対応表を作成する。これより, 5. で得られた  $H$  から, 探索的に  $\beta$  を求め, 速度分布を決定する。

## 4.3.3 声門角度と境界層の関係

ここでは, 声門角度  $\Psi$  に依存した境界層の挙動の変化について検討する。 $d = 0.04$  cm,  $R_e = 1000$  の条件に対して, 声門を収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ ), 拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) としたときの境界層の様子を, それぞれ図 4.4, 4.5 の上段に示す。図の縦軸と横軸は, よどみ点 (stagnation point) を原点とした直角座標系における位置を表しており, ベクトルは境界層の流速分布, 点線は境界層厚さを表している。また, 図中の○印は境界層の剥離位置である。

図 4.4, 4.5 より, 収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ ) では声門の出口, 拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) では声門の入口付近で境界層が剥離することが分かる。また, 剥離位置の下流側では, 渦流による流れの逆流が生じていることを確認できる。

## 4.3.4 声門開口幅と境界層の関係

次に, 声門開口幅  $d$  に依存した境界層の挙動の変化について検討する。図 4.4, 4.5 の上段と下段を見比べると, 声門開口幅  $d$  の変化が境界層の挙動に与える影響について検討することができる。特に図 4.5 の拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) において, 声門開口幅  $d$  の増加に伴う境界層の

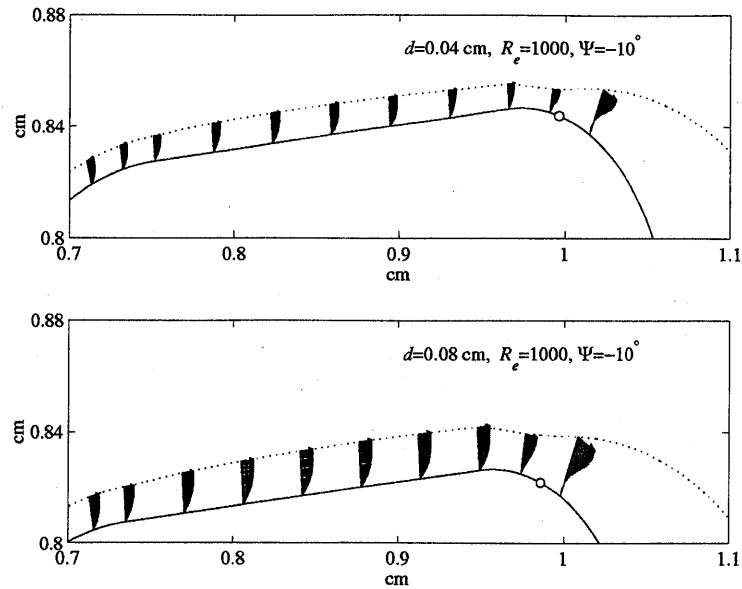


図 4.4  $\Psi = -10^\circ$ ,  $R_e = 1000$  として  $d$  を変化させたときの境界層内部の速度分布と境界層の剥離位置 (○印)。なお、図中の点線は境界層の厚さを表している。

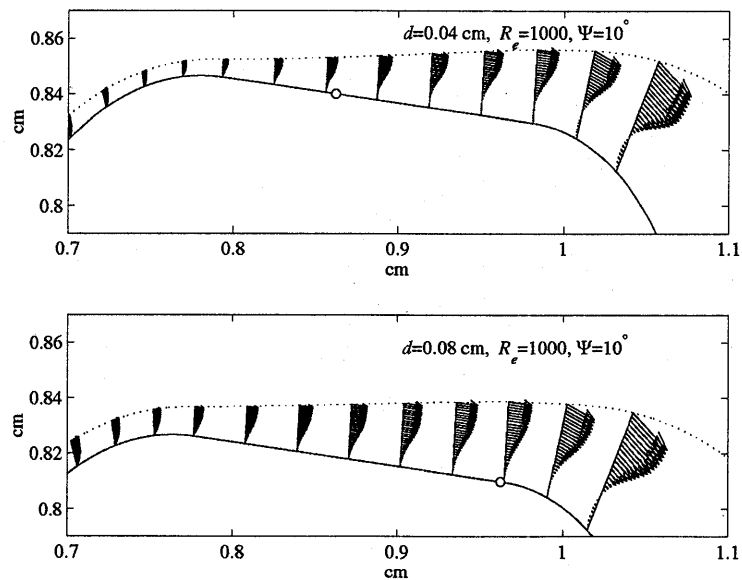


図 4.5  $\Psi = 10^\circ$ ,  $R_e = 1000$  として  $d$  を変化させたときの境界層内部の速度分布と境界層の剥離位置 (○印)。なお、図中の点線は境界層の厚さを表している。

剥離位置 (○印) の下流側への移動が顕著である。これは、主流の速度勾配が声門開口幅の増加とともに緩やかになるためである。それにより、流れを剥離させる圧力の正の勾配がゆるやかになり、結果として剥離位置が下流側に移動する。



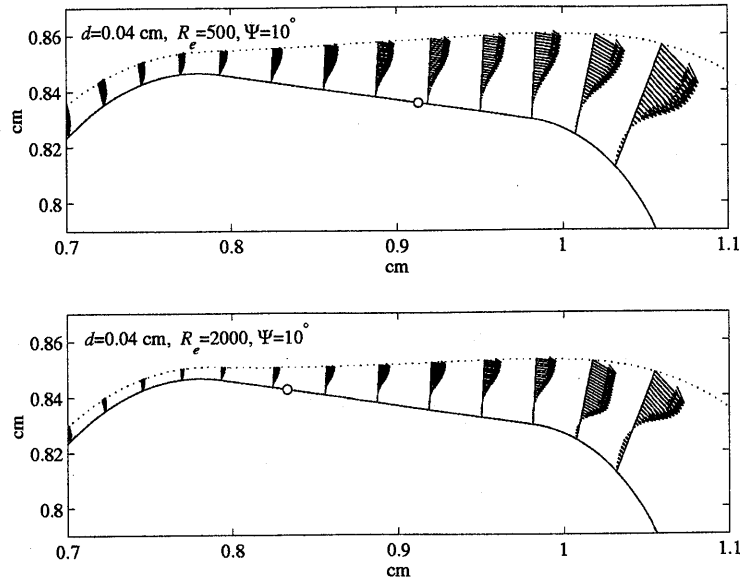


図 4.6  $\Psi = 10^\circ$ ,  $d = 0.04$  cm として Reynolds 数  $R_e$  を変化させたときの境界層内部の速度分布と境界層の剥離位置 (○印)。なお、図中の点線は境界層の厚さを表している。

#### 4.3.5 Reynolds 数と境界層の関係

最後に、Reynolds 数に依存した境界層の挙動の変化について検討する。 $d = 0.04$  cm,  $\Psi = 10^\circ$  として Reynolds 数  $R_e$  を変化させたときの境界層の様子を図 4.6 に示す。図の形式は図 4.4 と同様である。

図 4.6 より、Reynolds 数  $R_e$  の増加に伴い、境界層の剥離位置 (○印) は上流側に移動することが分かる。また、境界層の厚さに関しては減少することが分かる。Reynolds 数は、[慣性力]/[粘性力] の比を表しているため、その増加は流れにおける粘性力の影響を減少させる働きがある。したがって、境界層において粘性の影響力が弱まり、結果として境界層の厚さが減少するのである。

#### 4.3.6 まとめ

4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 節のまとめとして、図 4.7 に声門角度  $\Psi$  と剥離位置の関係を示す。図 4.7 の横軸は声門角度  $\Psi$ 、縦軸は管長  $T$  に対する剥離位置までの長さ  $T_s$  [cm] の比  $T_s/T$  であり、この値が大きいほど声門流は下流側で剥離することを示している。

図 4.7 より、声門の収縮形状 ( $\Psi < 0^\circ$ ) では声門流の下流側、拡大形状 ( $\Psi > 0^\circ$ ) では上流側で剥離を生じることが分かる。また、上段を見ると、声門開口幅  $d$  の増加により曲線が右に移動している。これは声門角度  $\Psi$  を一定とすれば、剥離位置が下流側に移動することを示している。一方、下段を見ると、Reynolds 数  $R_e$  の増加により曲線が左に移動していることが分かる。これは声門角度を一定とすれば、剥離位置が上流側に移動することを示している。

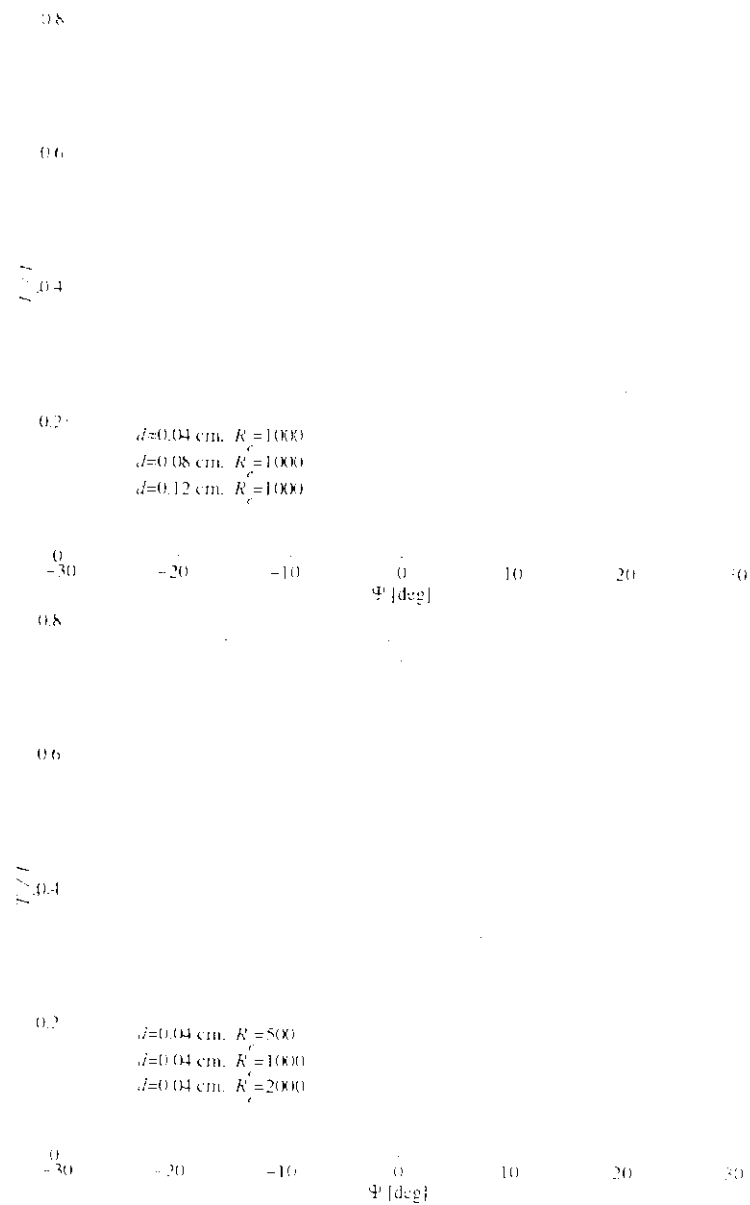


図 4.7 声門角度  $\Psi$  と剥離位置  $T_s/T$  の関係。ここで、 $T_s/T$  は管長  $T$  に対する剥離位置 (separation point) までの長さ  $T_s$  の比である (図 4.1)。なお、上段では声門開口幅  $d$  を、下段では Reynolds 数  $R_c$  を変化させたときの関係を示している。

## 4.4 声帯表面に働く流体力の推定

### 4.4.1 はじめに

本節では、境界層の挙動のシミュレーション結果を元に、声帯表面に働く流体力を算出する。流体力とは、具体的には粘性応力と圧力のことである。粘性応力は声帯の接線方向に働く剪断力であり、一方、圧力は声帯の法線方向に働く力である。特に、圧力に関しては、声帯の

自励振動を持続させる外力としての働きを有することが知られている。したがって、発声現象を理解するには、声帯表面での圧力分布を精度良く推定することが求められる。

ここではまず、本節のシミュレーションの手順を示す。それから、流れの剥離位置を固定した声門流モデルの説明を行う。これは、本法との比較に用いられる。次に、具体的にシミュレーションを行い、声帯表面での粘性応力と圧力の分布を算出する。特に、圧力分布に関しては、先行研究である Scherer ら [18-20] の模型実験値を基準値として、本法の精度を検証する。ここでは同時に、剥離位置固定モデルに基づく数値シミュレーションを行い、その結果との比較を行う。

#### 4.4.2 シミュレーションの手順

まず、本節のシミュレーションの手順を示す。声帯表面に働く粘性応力に関しては、4.3.2 節と同様の手順で算出する。はじめに 4.3.2 節の 1. ~ 5. の手続きにより、境界層の運動量方程式における未知数  $Z, H, U_{\delta_1}$  を求める。次に、得られた未知数に基づいて、式 (3.41) より、粘性応力  $\tau$  を算出する。

声帯表面に働く圧力に関しては、Scherer ら [18-20] の模型実験と比較をするために、以下の手続きにより算出する。

##### 1. 声門形状・流れの条件の設定

- 声門開口幅  $d$  [cm], 声門角度  $\Psi$  [deg], 声門上下間の圧力差  $PD$  [cmH<sub>2</sub>O] を与えて、仮の Reynolds 数  $R_e$  を設定する。

##### 2. 声門形状の離散化

- 自由な声門形状に対して等角写像を適用するために、声門形状の多角形近似を行う (4.2.3 節を参照)。

##### 3. 等角写像関数の導出

- 3.5.6 節で説明した手続きにより、等角写像関数の具体的な形を決定する。

##### 4. 主流速の算出

- 声帯表面上の主流速  $U_s$  を、式 (3.33) に基づいて算出する。

##### 5. 境界層の運動量方程式の計算

- 主流速  $U_s$  を与えて式 (3.34)(3.35)(3.36) を解き (Newton-Raphson 法 [37]), 未知数  $Z, H, U_{\delta_1}$  を算出する。

##### 6. 圧力の算出

- 境界層の影響により加速した主流速  $U = U_s + U_{\delta_1}$  を以下に示す式 (4.6) に代入して、肺圧からの差分として見た声帯表面での圧力  $\Delta P$  を算出する。

##### 7. Reynolds 数 $R_e$ の調節

- 与えられた声門上下間の圧力差  $PD$  に一致するように, Reynolds 数  $R_e$  の調節を行う。

4. ~ 7. の手続きを繰り返し行うことで, シミュレーション結果における声門上下間の圧力差が実験条件の  $PD$  に一致するように, Reynolds 数  $R_e$  を探索的に求める。なお, 6. において  $\Delta P$  を算出する方程式は, 式 (2.10) の Bernoulli の定理より, 次式で与えられる。

$$\Delta P(x) \equiv \frac{1}{2} \rho_0 (U_0^2 - U(x)^2) \quad (4.6)$$

ここで添え字 0 は, よどみ点での物理量を表す。また, 声門出口の座標を  $x = x_0$  とおくと,

$$PD = -\Delta P(x_0)$$

の関係がある。

#### 4.4.3 剥離位置を固定した声門流モデル

ここでは, 剥離位置を固定した声門流モデルについて説明を行う。2.3 節で述べたように, 代表的な声門波の生成モデルである 2 質量モデル [14] では, 流れの剥離位置を固定して, 声帯表面での圧力分布を求める。本節で説明する声門流モデルは, 2 質量モデルにおける流れのモデル表現を模擬したものである。これに基づいて声帯表面での圧力分布を算出し, 本法や Scherer ら [18-20] の模型実験との比較検討を行う。

今後, 本節で用いる声門流モデルを, 剥離位置固定法 (fixed separation point method) と呼ぶ。剥離位置固定法では, 流れのモデル化に際して, 以下の仮定を置く。

1. 流れを 1 次元的と仮定する
2. 流れの剥離位置は, 声門出口の曲率の開始地点に固定する
3. 圧力抵抗を生じる要因として, Bernoulli 圧と粘性摩擦による損失を考える
4. 剥離位置より下流側では, 圧力の回復を無視する

剥離位置固定法と 2.3.2 節で示した 2 質量モデルの声門流モデルとの違いは, 声門入口での流れのくびれの影響と, 剥離位置より下流側の圧力回復を無視している点であり, それ以外は同様である。

#### 4.4.4 声帯表面での粘性応力

$d = 0.04 \text{ cm}$  として  $\Psi$  と  $R_e$  を変化させたときの粘性応力  $\tau$  の推定値を図 4.8 に示す。図 4.8 の横軸は, よどみ点を原点とした位置を表しており, 縦軸は粘性応力  $\tau [\text{g/cm} \cdot \text{sec}^2]$  である。ここで, 粘性応力  $\tau$  は Reynolds 数の平方根に逆比例するため, 流れの代表的な圧力  $P_k$

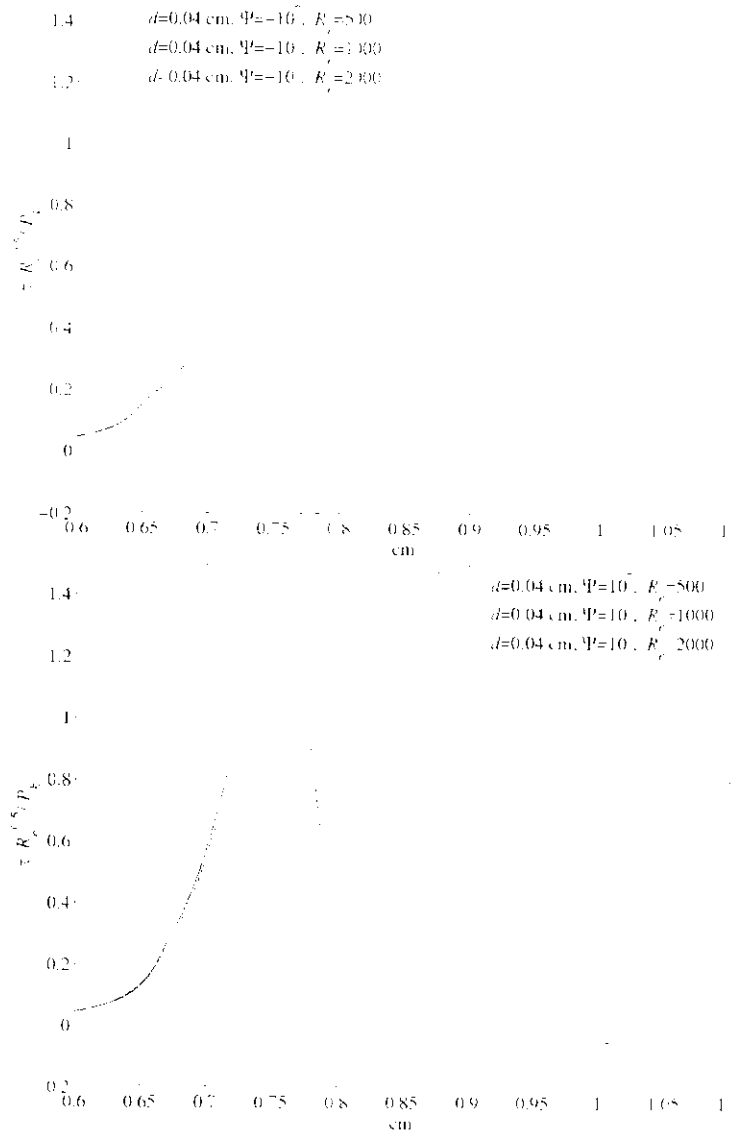


図 4.8  $d = 0.04$  cm における声帯表面に働く粘性応力  $\tau$  (点線は声門形状)

で正規化し、更に  $R_c^{-1/2}$  を乗じている。また、図中の点線は声門形状を表しており、これにより粘性応力の働く位置が分かる。

図 4.8 より、収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ ) では流れの下流側にあった粘性応力のヒークが、拡大形状 ( $\Psi = +10^\circ$ ) では上流側に移動することが分かる。粘性応力のヒーク値は流れの条件により異なるが、約 1.3 の程度である。これより、声門流の Reynolds 数を 1000 と仮定すると、粘性応力のヒーク値は、流れの代表的な圧力  $P_k$  の  $100 \times 1.3 / \sqrt{1000} \approx 4\%$  の程度であることが分かる。 $P_k$  は、声門下圧にほぼ等しいと考えられ、声門下圧を  $8 \text{ cmH}_2\text{O}$  と仮定すると、声帯表面に働く粘性応力は約  $0.32 \text{ cmH}_2\text{O}$  と推定される。この大きさは圧力に比べて微小ではあるが、声帯振動の複雑なモードの形成に寄与している可能性がある。また、Reynolds 数の増加に関しては、それに伴い声帯表面に働く粘性応力が小さくなることが分かる。これは 4.3.5

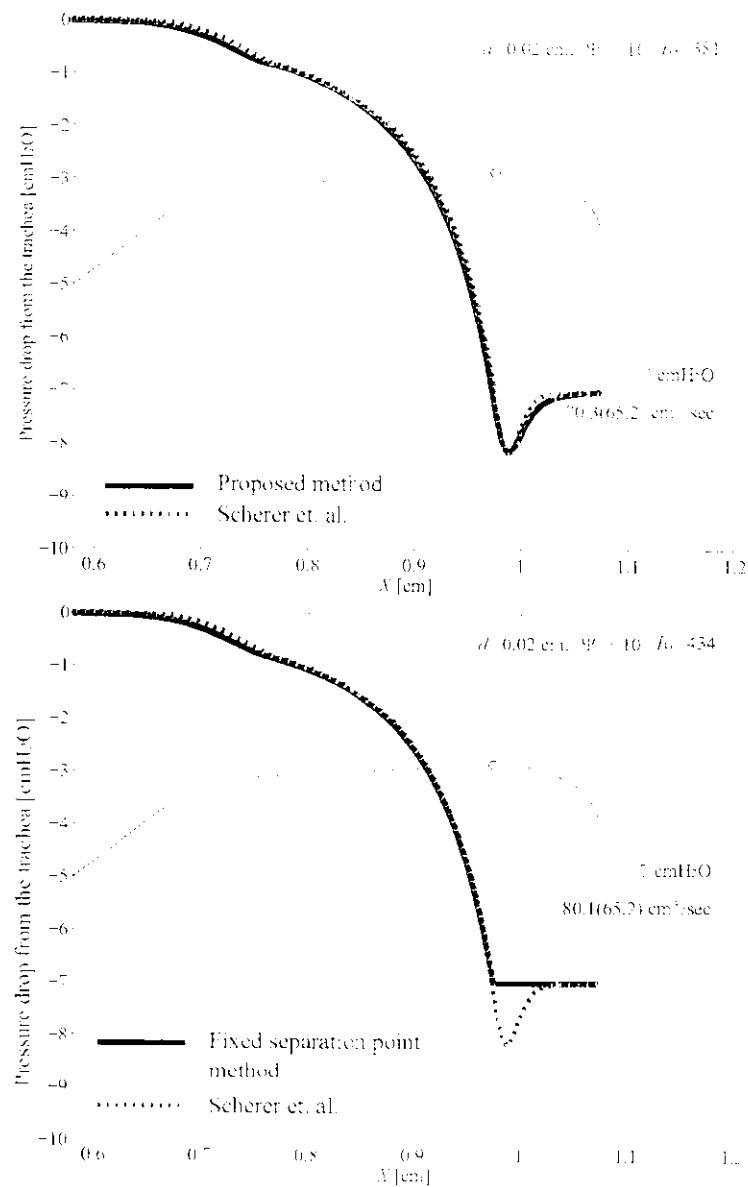


図 4.9  $d = 0.02 \text{ cm}$ ,  $\Psi = -10^\circ$  における声帯表面での圧力分布の推定値と模型実験値の比較。上段は本手法 (proposed method) と Scherer ら [18-20] の計測実験結果との比較である。一方、下段は 4.4.3 節の剥離位置判定法 (fixed separation point method) との比較である。

節で述べたように、Reynolds 数の増加は粘性力の影響を弱める効果があるからである。

#### 4.4.5 声帯表面での圧力分布

収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ )、平行な形状 ( $\Psi = 0^\circ$ )、拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) における声帯表面での圧力分布を、それぞれ図 4.9、4.10、4.11 に示す。図の横軸は図 4.1 に示した  $X$  座標、縦軸は肺圧を基準とした圧力 (単位は  $\text{cmH}_2\text{O}$ ) である。また、図中の点線は声門形状を、印は境界層の剥離位置を表している。なお、赤の破線は Scherer ら [18-20] の模型実験値を示してい

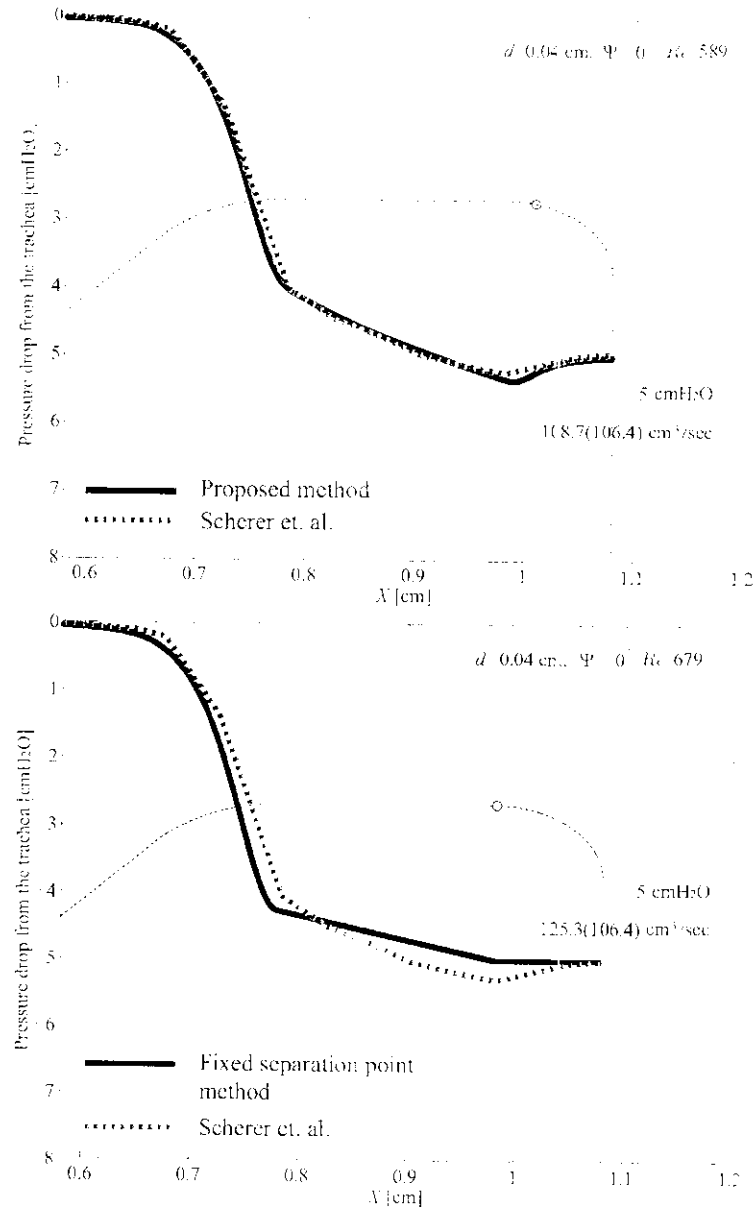


図 4.10  $d = 0.04 \text{ cm}$ ,  $\Psi = 0^\circ$  における声帯表面での圧力分布の推定値と模型実験値の比較。上段は本手法 (proposed method) と Scherer ら [18-20] の計測実験結果との比較である。一方、下段は 4.4.3 節の剥離位置固定法 (fixed separation point method) との比較である。

る。図の上段では、本手法 (proposed method) と模型実験値を比較しており、一方、下段では、4.4.3 節の剥離位置固定法 (fixed separation point method) との比較を示している。

図 4.9 の声門の収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ ) では、高い圧力が声帯の全体に渡って働くことが分かる。図 4.10 の平行な流路 ( $\Psi = 0^\circ$ ) になると、その圧力が減少し、なだらかな分布になる。図 4.11 の拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) では、声門の入口付近に圧力の谷が生じている。谷の位置は、主流の運動エネルギーが最大値となる、声門の流路が最も狭まる場所に一致する。声帯振動においては、声門の開運動区間において収縮形状を、閉運動区間において拡大形状をとる (図 1.3

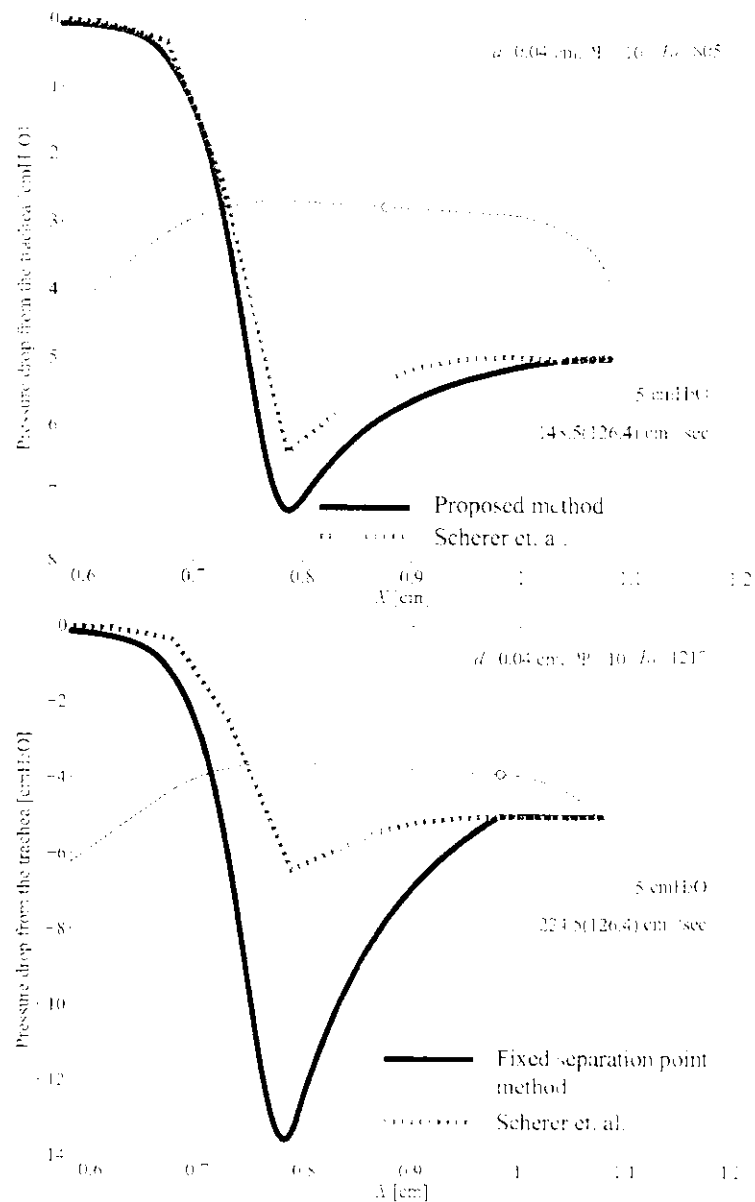


図 4.11  $d = 0.04 \text{ cm}, \Psi = 10^\circ$  における声帯表面での圧力分布の推定値と模型実験値の比較。上段は本手法 (proposed method) と Scherer ら [18-20] の計測実験結果との比較である。一方、下段は 4.4.3 節の剥離位置測定法 (fixed separation point method) との比較である。

参照)。収縮形状では声帯の全体に強い圧力が働くため、声門は押し開かれる。また、拡大形状では、圧力の谷による負圧が生じるため、声門は閉じる方向に引き寄せられる。これより、本節で観察された圧力分布の特徴は、声帯の振動を維持するのに適合したものであると考えられる。

次に、本手法による結果を Scherer らの模型実験値と比較すると、 $\Psi = -10.0^\circ$  の条件では、非常に良い推定結果が得られていることが分かる。一方、 $\Psi = 10^\circ$  の条件では、圧力分布は実測値との間に差を生じていることが分かる。 $\Psi = 10^\circ$  のような拡大形状では、流れの



剥離位置は上流側にある。そのため、剥離位置より下流側における流れは、渦流のために乱流的であると考えられる。乱流はその運動によってエネルギーの散逸を生じるため、圧力の低下が流路の中で表れるはずである。しかしながら、本法では、層流的な境界層を仮定しているため、そのような散逸構造による圧力降下を再現できない。そのことが、実測値との不一致にれているのだと考えられる。一方、 $\Psi = -10, 0^\circ$  の条件では、流れは声門の出口付近で剥離するため、層流的な境界層の解析で十分に実験結果をトレースする結果となったと考えられる。

最後に、剥離位置固定法による結果を Scherer らの模型実験値と比較すると、特に、拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) において、実験値との誤差を生じることが分かる。これは、実際には移動する境界層の剥離位置を固定したことに起因する。剥離位置の固定は、拡大形状における圧力抵抗を過少評価し、それ故に、圧力の推定における誤差を生じると考えられる。

#### 4.5 声門流量に関する検討

前節では、声帯表面での圧力分布のシミュレーションを行い、模型計測実験値との比較を行った。その際、計測実験値との対応を取るために、シミュレーションでは、Reynolds 数の調節を行った。最終的に得られた Reynolds 数から、シミュレーションにおける声門流量を得ることができる。本節では、シミュレーションより得られた声門流量を推定値、計測実験値における声門流量を真値とし、その比較を通じて、本法の精度を検証する。

収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ )、平行な流路 ( $\Psi = 0^\circ$ )、拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) における声門流量の推定値を、Scherer ら [18-20] の計測実験値に対して比較した結果を図 4.12 に示す。声門上下間の圧力差  $PD$  は、収縮形状 ( $\phi = -10^\circ$ ) に関しては、 $PD = 7 \text{ cmH}_2\text{O}$  の 1 条件、平行な流路 ( $\phi = 0^\circ$ ) と拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) に関しては、 $PD = 3, 5, 10 \text{ cmH}_2\text{O}$  の 3 条件で比較を行った。

本手法による結果を Scherer らの模型実験値と比較すると、平行な流路 ( $\phi = 0^\circ$ ) の条件で例外が認められるが、殆どは流量を多く推定することが分かる。この理由として次の 2 点が考えられる。まず、1 点目は、3.2.1 節で述べたように、本法が 2 次元流れの仮定を採用しているためだと考えられる。Miki ら [33] の指摘より、3 次元の効果は、流れの粘性抵抗を増大させる。これは、一定の圧力差を与える流量を抑える働きをする。2 点目は、4.4.5 節で述べたように、本法が乱流による圧力降下の影響を考慮していないためだと考えられる。これも同様に、一定の圧力差を与える流量を抑える働きをする。

ここで、計測実験値を真値として、計測値とモデルによる推定値との相対的な誤差を評価する。計測値を  $U_g$ 、推定値  $\hat{U}_g$  として、両者の間の相対的な誤差  $|U_g - \hat{U}_g|/U_g$  を計算した。その結果、図 4.12 の 7 つの条件下での平均的な相対誤差は、本法では約 8.8% となった。これが本法の声門流モデルとしての精度に対応すると考えられる。一方、剥離位置固定法による推定値と計測値との相対誤差は約 42.7% となった。剥離位置固定法では、拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) において、特に大きな誤差を生じる。これは、本来移動するべき剥離位置を固定したために、

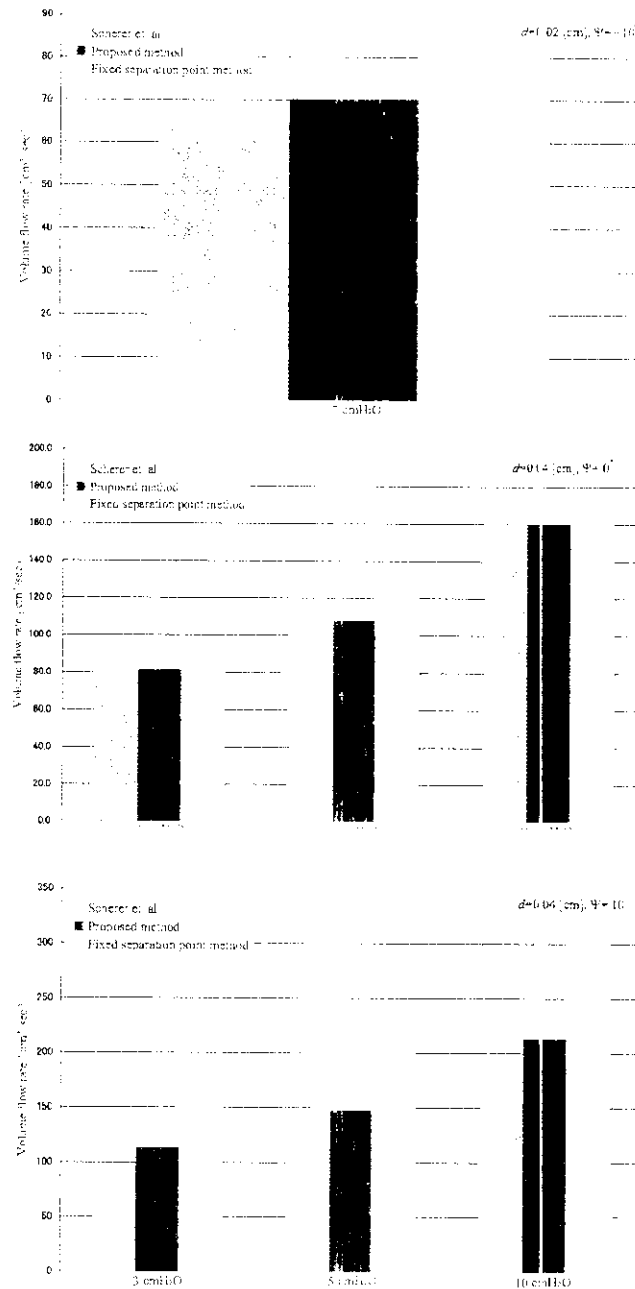


図 4.12 収縮形状 ( $\Psi = -10^\circ$ )、平行な流路 ( $\Psi = 0^\circ$ )、拡大形状 ( $\Psi = 10^\circ$ ) における声門体積流量の推定値と模型実験値の比較。Scherer ら [18-20] の計測実験値は青色、本手法 (proposed method) の推定値は赤色、4.4.3 節の剥離位置固定法 (fixed separation point method) の推定値は黄色で示している。

圧力抵抗が過少評価されてしまうからである。そのため、流量が実験値よりも大きく推定されるのである。

## 4.6 まとめ

本章では、声帯表面に沿って生じる境界層の挙動をシミュレーションし、声帯表面に働く流体力を算出した結果について述べた。また、本法の推定精度を検証するために、声帯表面での圧力分布と声門流量を、模型実験の計測値と比較した。以下に、本章で得られた結果の要約を示す。

1. 声帯間の流路が下流ほど狭まる収縮形状では声門の下流側、逆に広がる拡大形状では声門の上流側で境界層の剥離が生じ、更に声門開口幅の増加、もしくは Reynolds 数の減少に伴って剥離位置は下流側に移動することが示された。
2. 声帯表面に働く粘性応力については、声門形状が収縮形状から拡大形状に移行するに従って、応力のピーク位置が声門の下流側から上流側に移動することが示された。
3. 境界層の影響による主流の加速を考慮して、声帯表面に沿う圧力分布を検討した。その結果、声門の最小開口幅を一定とした場合において、収縮形状では声帯のより広い範囲にわたって圧力が作用するのに対して、拡大形状では主として声門の入口付近に圧力が働くことが示された。
4. 声門形状や声門上下間の圧力差を一定として流量を推定した場合、実験値と推定値の誤差は約 8% であった。また、剥離位置を固定した声門流モデルを導入し、同様に実験値と比較した結果、特に拡大形状において、実験値との推定誤差が生じることを示した。