

# 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5章

# 声門波の生成シミュレーション

### 5.1 はじめに

本章では、3章で提案した声門流モデルと、声帯の振動モデルを組合せて、声門波の生成シミュレーションを行う。ここでは、声帯の振動モデルとして、2.2節で述べた Ishizaka らの2質量モデル [14] を採用する。すなわち、声帯の振動部分に関して、質量・バネ・ダンパからなる2自由度の機械系としてモデル化する。これは、2質量モデルが、声帯振動の生理学的なデータと良く一致するためである。

本章ではまず、提案する声門波生成モデルの概要について示す。つぎに、声帯の振動部分のモデル化の手法について述べる。本論の声帯振動モデルの大筋は2.2節で述べたモデルに等しいが、ここでは、声帯の表面に曲率を持たせたモデルを構築する。これは、本論の2次元声門流モデルとの連携を考慮してのことである。それから、声門波の生成シミュレーションを行う。ここでは比較のために、4.4.3節で述べた、剥離位置を固定した声門流モデルに基づく声門波の生成シミュレーションを同時に行う。また、本章から、声門流モデルに境界層の剥離によって生じる渦流の表現が組込まれる。その時空間的なパターンについても検討を行なう。最後に、声門流の無次元特徴量の検討を通じて、本論の声門流モデルを構築する際に設定した仮定の妥当性を検証する。

### 5.2 声門波生成モデルの概要

ここでは、本論における声門波の生成モデルの概要について述べる。図 5.1 に、声門波の生成モデルの概要を示す。図 5.1 は、前額面から見た喉頭の断面形状を表しており、左が気管 (trachea) 側に、右は声道 (vocal tract) 側に対応している。ここでは簡単のために、声門形状や流れの挙動は流れの中心軸に関して対称であるとする。また、仮声帯についても、声門流の挙動に影響を与えることが報告されているが [23]、簡単のため考慮していない。

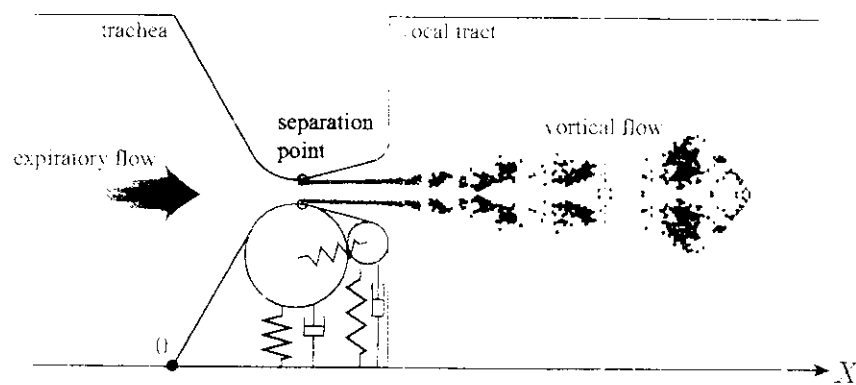


図 5.1 声門波生成モデルの概要

声門波の生成過程は、声帯の振動部分と、声門を通過する呼気に関する部分に分けてモデル化される。声帯の振動部分に関しては、2質量モデル [14] に倣って、質量、バネ、ダンパから成る機械系が連結されたものとして表現する。声帯の質量は、4.4.5 節で述べた、声帯表面に働く圧力を外力として受けて運動する。一方、声門を通過する呼気に関しては、3 章で述べた構成的表現によって表す。すなわち、声門流を、主流・境界層・渦流によって表す。これにより、流れの大部分の領域は非粘性の主流であり、粘性の表れる領域は、声帯表面に沿って生じる境界層と、その剥離によって生じる渦流に限定される。境界層は、声帯表面に働く粘性応力が零となる位置で剥離して、図 5.1 のような渦流 (vortical flow) を生じる。

## 5.3 声帯の振動部分の表現

### 5.3.1 はじめに

本節では、声帯振動部分のモデル化の手法について述べる。本節ではまず、声門形状の表現について述べる。声門形状に関しては、4.2.1 節で述べた形状と同様であるが、ここでは、声帯振動モデルに適合するように、若干の変更を加える。つぎに、声帯振動部分の運動方程式について述べる。運動方程式に関しては、Ishizaka ら [14] の 2 質量モデルと同様である。

### 5.3.2 声門形状の表現

ここでは、声門形状の表現について述べる。本論の声門流モデルは声帯表面に沿って生じる境界層の挙動を推定可能である。したがって、声門形状を表現する際、声帯の表面に沿って流れの不連続が生じないように配慮する必要がある。本論では、声帯の表面に曲率をもたせ、連続的で滑らかな形状となるように設計する。

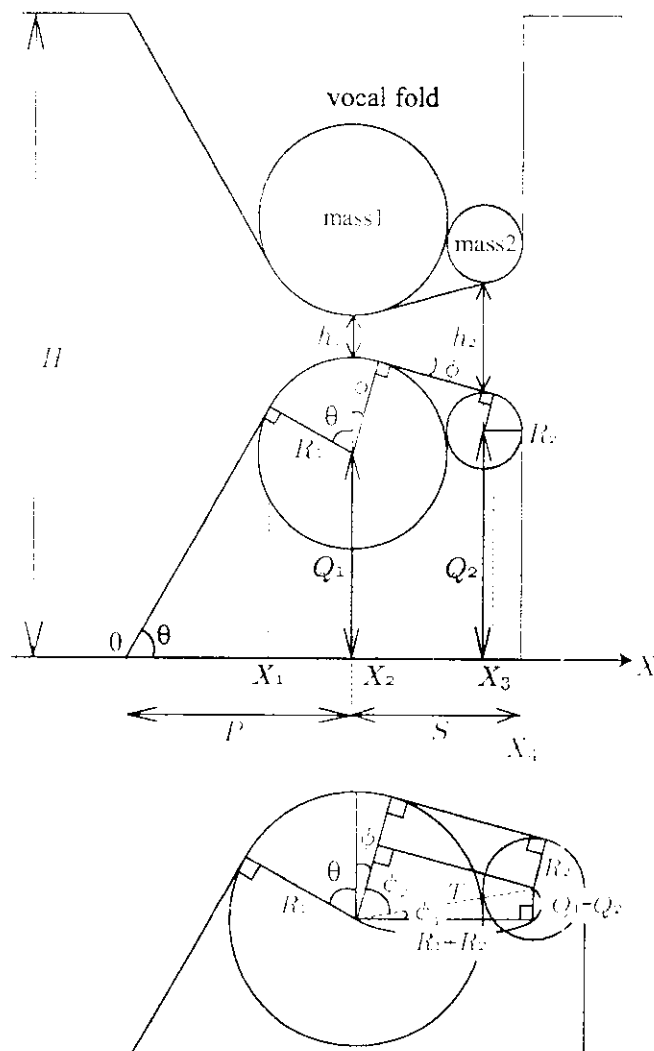


図5.2 声門形状の表現

図5.2に声門形状の表現を示す[13]。この表現は、図4.1における声門形状と同様であるが、声帯の質量1( $mass1$ )および質量2( $mass2$ )の変位が $Q_1$ 、 $Q_2$ に反映され、この2つの値により声門の形状が決定されるように設計されている。なお、図中のパラメータは、以下の式で与

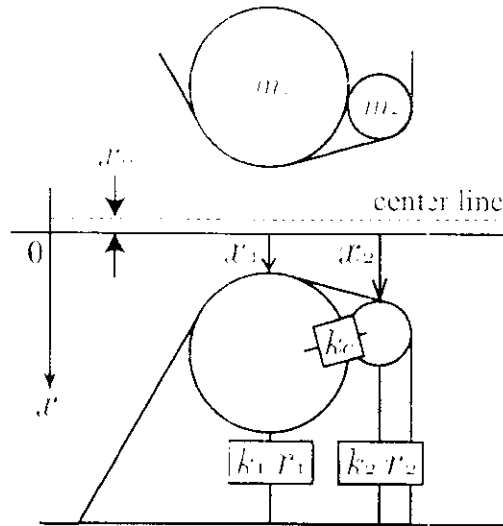


図5.3 声帯の機械的モデル表現

えられる

$$H = 13/7.5 \text{ cm}, \quad R_1 = 0.15 \text{ cm}, \quad R_2 = 0.0987 \text{ cm}, \quad P = 0.7804 \text{ cm}, \quad S = 0.3 \text{ cm}$$

$$T = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (Q_1 - Q_2)^2}$$

$$c_1 = \arcsin \frac{Q_1 - Q_2}{T}, \quad c_2 = \arccos \frac{R_1 - R_2}{T}$$

$$\phi = c_1 + c_2$$

$$h_1 = H - 2(Q_1 + R_1), \quad h_2 = H - 2(Q_2 - R_2) \cos \phi \quad (Q_1 - R_1 > Q_2 + R_2)$$

$$h_1 = H - 2(Q_1 + R_1 / \cos \phi), \quad h_2 = H - 2(Q_2 - R_2) \quad (Q_1 - R_1 \leq Q_2 + R_2)$$

$$\theta = \arctan \frac{Q_1}{P} + \arcsin \frac{R_1}{\sqrt{P^2 + Q_1^2}}$$

$$X_1 = P - R_1 \sin \theta, \quad X_2 = P - R_2 \sin \phi$$

$$X_3 = P + S - R_2(1 - \sin \phi), \quad X_4 = P - S$$

### 5.3.3 声帯振動のモデル化

前節では、本論の声門波生成モデルにおける声門形状の表現について述べた。本節では、図5.2で示した声帯の質量1(mass1)、質量2(mass2)の運動方程式について述べる。ここでは、声帯の機械的な振動特性は、質量・バネ・ダンパから成る機械系が連結されたものとしてモデル化する。質量、バネ係数、抵抗などの声帯の諸特性は、基本的にはIshizakaら[14]が用いたものを参考にする。

図5.3に、本論で用いる声帯の機械的モデル表現を示す。図5.3の破線は、声門形状の中心線(center line)を表している。声帯の質量に接続されるバネは、質量と声帯のボディ部をつなぐバネと、質量同士を連結するバネの2種類がある。Ishizakaらの2質量モデルでは前者の

バネを非線形バネとしてモデル化するが、ここでは文献 [44] に従い、線形バネでモデル化する。これは、本論の声帯振動シミュレーションが、線形バネの範囲で十分にモデル化できるためである。質量の初期変位は中心線から  $x_0$  の位置に取る。 $x_1, x_2$  をこの初期変位からの変位とすると、声門閉鎖は、 $x_{1,2} + x_0 \leq 0$  において生じる。

質量  $m_{1,2}$  に関する運動方程式は

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + r_1 \frac{dx_1}{dt} + s_1 + k_c(x_1 - x_2) = F_1 \quad (5.1)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + r_2 \frac{dx_2}{dt} + s_2 + k_c(x_2 - x_1) = 0 \quad (5.2)$$

で与える [26]。添え字 1,2 は、それぞれ気管側の質量と声道側の質量を表している。また、 $m$  は質量、 $r$  はダンパの抵抗係数、 $s$  はバネの応力、 $k_c$  は質量同士を接続する線形バネのバネ係数、 $F$  は声門流から及ぼされる外力である。

バネの応力  $s_{1,2}$  に関しては、声帯の接触に応じた評価を行う。

$$s_i = \begin{cases} k_i x_i, & (x_i + x_0 > 0) \\ k_i x_i + h_i(x_i + x_0), & (x_i + x_0 \leq 0) \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (5.3)$$

ここで、 $k_i$  は声門が開いているときの声帯のステイフネス、 $h_i$  は声門が閉鎖したときの付加的な声帯のステイフネスを表している。また、声帯質量に働く外力  $F_1$  は次式で与える。

$$F_1 = \begin{cases} \int_{X_1}^{X_4} P l_g dX, & x_1 + x_0 > 0 \text{ and } x_2 + x_0 > 0 \\ P_s l_g d_1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.4)$$

ここで  $X_1, X_4$  は図 5.2 に示した  $X$  軸上の位置、 $l_g$  は声帯の長さ、 $P$  は声帯表面での圧力である。圧力  $P$  は、式 (4.6) の肺圧からの差分として見た圧力  $\Delta P$  に、声門下圧  $P_s$  を加えたものである。式 (5.4) の上段は声門が開いている場合、下段は声門が閉じている場合に質量 1 に働く駆動力を表している。ここでは、Pelorson ら [26] の声帯振動計算に従い、2 番目の質量に働く外力を零としている。

なお、シミュレーションで用いたパラメータは以下のように与えた [14]。これは、男性が地

声を発声しているときのパラメータに対応する。

|                      |   |
|----------------------|---|
| 声帯の長さ                | $l_g = 1.2 \text{ cm}$                                    |
| 質量 1                 | $m_1 = 0.125 \text{ g}$                                   |
| 質量 2                 | $m_2 = 0.025 \text{ g}$                                   |
| 質量 1 のバネ係数           | $k_1 = 80000 \text{ dyn/cm}$                              |
| 質量 2 のバネ係数           | $k_2 = 8000 \text{ dyn/cm}$                               |
| 質量 1 と質量 2 をつなぐバネの係数 | $k_c = 25000 \text{ dyn/cm}$                              |
| 質量 1 の衝突時の反発係数       | $h_1 = 3k_1 \text{ dyn/cm}$                               |
| 質量 2 の衝突時の反発係数       | $h_2 = 3k_2 \text{ dyn/cm}$                               |
| 質量 1 の減衰定数           | $r_1 = 0.2\sqrt{m_1 k_1}$                                 |
| 質量 2 の減衰定数           | $r_2 = 1.2\sqrt{m_2 k_2}$                                 |
| 質量 1 の実効長            | $d_1 = 0.25 \text{ cm}$                                   |
| 質量 1 と質量 2 の初期変位     | $x_0 = 0.0025 \text{ cm}$                                 |
| 声門下圧                 | $P_s = 8 \text{ cmH}_2\text{O}$                           |
| 空気の粘性係数              | $\mu = 1.82 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ |
| 空気の密度                | $\rho = 1.184 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$              |

## 5.4 声門波の生成シミュレーション

### 5.4.1 はじめに

これより、声門波の生成過程を具体的にシミュレーションする。ここでは比較のために、4.4.3 節で述べた、剥離位置を固定した声門流モデルに基づく声門波の生成シミュレーションを同時に行う。

まず、声門波の生成シミュレーションの手順について述べる。つぎに、シミュレーションの結果として、声帯質量の開口面積と、境界層の剥離位置、それから、声帯表面に働く圧力分布の時間変化について示す。つぎに、声門体積流量の時間波形 (声門波) に関して検討を行う。最後に、境界層の剥離によって生じる渦流の時空間パターンを示し、それが声門波に与える影響について検討する。

### 5.4.2 シミュレーションの手順

まず、声門波の生成過程のシミュレーション手順を示す。声門波の生成過程のシミュレーションは、以下の手順で行われる。

#### 1. 初期条件の設定

- 声帯質量の初期変位  $x_{1,2} = 0$ 、声門下圧  $P_s = 8 \text{ cmH}_2\text{O}$  として、発声の初期条件を与える。

#### 2. 境界層の解析

- 4.4.2 節で述べた手順に基づいて、声門上下間の圧力差が声門下圧  $P_0$  に一致するように、声門流量を探索的に求める。これにより、声帯表面に働く圧力と、境界層の剥離位置が求まる。
3. 渦糸の放出
    - 3.7.3 節で述べた手法により、境界層の剥離位置から渦糸を放出して、境界層の剥離を表現する。
  4. 渦糸群の運動
    - 3.7.4 節で述べた手法により、渦糸群を渦度方程式 (3.80) に従って運動させる。
  5. 声帯質量の変位を更新
    - 5.3.3 節で述べた声帯質量の運動方程式 (5.1)(5.2) を時間積分して、声門形状を更新する。

上の 2. ~ 5. のステップを繰り返し計算することで、声門波の生成シミュレーションを行うことができる。また、3. と 4. のステップは、2. の境界層の解析結果に影響を与えない。よって、渦流に関する検討をしない場合は、3. と 4. のステップを飛ばして計算を行う。

#### 5.4.3 声帯の開口面積と境界層の剥離位置の時間変化

ここでは、声門波の生成シミュレーションの結果に基づいて、声門の開口面積と境界層の剥離位置の時間変化について検討する。なお、本節のシミュレーションの時間刻み幅は  $\Delta t = 0.0001 \text{ sec}$  とした。

図 5.4 は、声門波の生成シミュレーションに基づく、声帯質量の開口面積と、境界層の剥離位置の時間変化を示している。図 5.4 の 1 段目と 2 段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3 段目と 4 段目は、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、図 5.4 の横軸は時間 (time) を表し、縦軸は、上段がそれぞれの質量 (mass) における声門の開口面積 (opening area) を、下段が図 5.1 の  $X$  軸からみた境界層の剥離位置を表している。なお、声門の開口面積が負となっているのは、声帯質量同士が衝突して、変位が負となる場合があるためである。

まず、図 5.4 の 1 段目と 2 段目に示す本論の声門流モデルを用いた結果について考察する。図 5.4 の 1 段目の声帯質量の開口面積より、質量 1 が質量 2 に先行して振動をすることが分かる。これは、声帯振動の生理学的なデータ [12] と一致する。また、図 5.4 の 2 段目の境界層の剥離位置より、声帯の閉運動区間 (質量 1 が閉鎖運動をする領域) で、剥離位置が声門入口側に移動することが分かる。これは、文献 [26] や文献 [27] で指摘されている結果と一致する。なお、途中で線が途切れているのは、その領域では声門が閉鎖していることを意味している。

つぎに、図 5.4 の 3 段目と 4 段目に示す 4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果と、本論の声門流モデルを用いた結果とを比較する。図 5.4 の 1 段目と 3 段目より、3 段目において、質



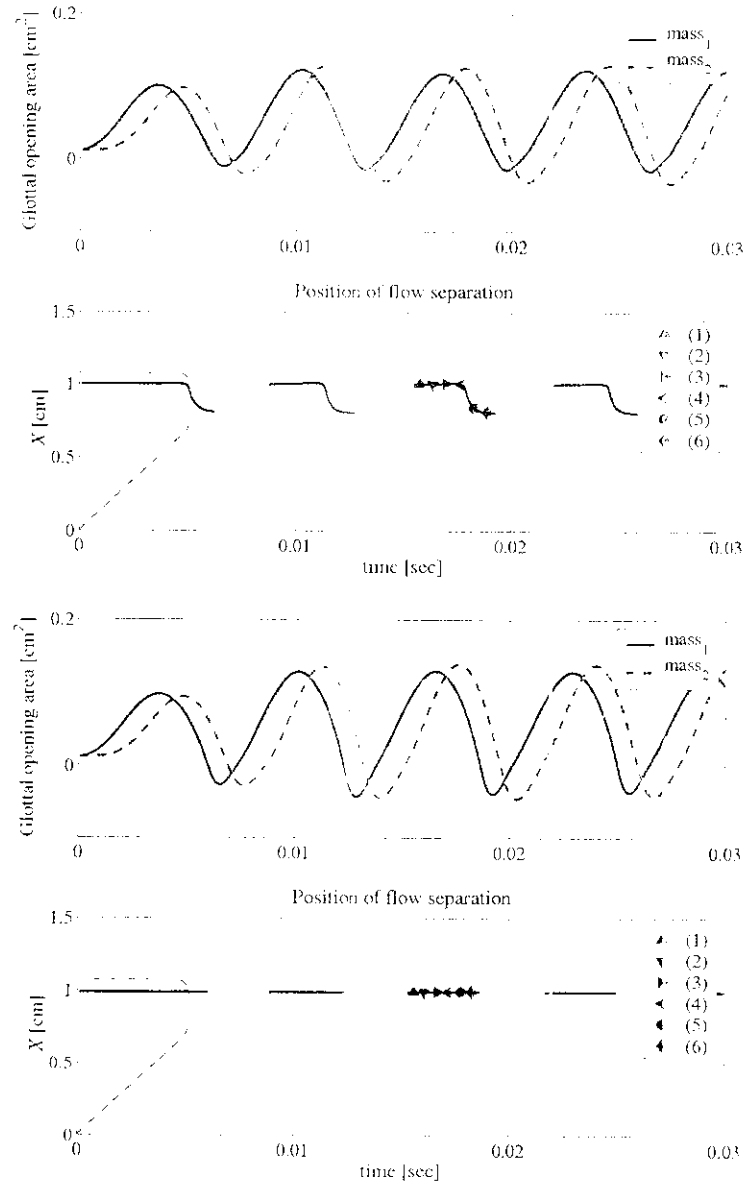


図 5.4 声帯振動シミュレーションの結果 図の 1 段目と 2 段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3 段目と 4 段目は、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、上段は質量 1(青実線)と質量 2(赤破線)の開口面積の変化を表している。また、下段の実線は図 5.1 の  $X$  軸からみた境界層の剥離位置の時間変化を、破線は声門形状を表している。

質量 1 が急激に閉鎖していることが分かる。これに関しては図 5.5 に示す、声帯振動の位相軌道を見ると分かり易い。図 5.5 の横軸と縦軸は、それぞれ質量 1 と質量 2 の開口面積 (opening area) を表している。○印で示された初期位置から、質量 1 の開運動が始まる。本論の声門流モデルによる青線の軌跡と、剥離位置固定法による赤線の軌跡は、はじめはほぼ同じ軌跡を描いている。しかし、質量 1 の閉運動区間において、赤線の軌跡は青線の軌跡と異なる運動を示す。この理由に関しては、次節で、声帯表面に働く圧力を検討する際に述べる。

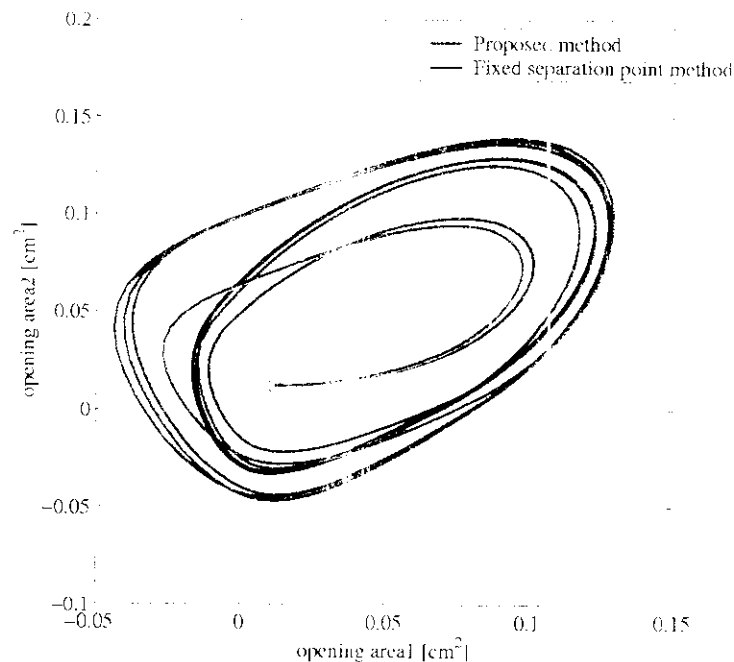


図 5.5 声帯振動の位相軌道。横軸は質量 1 の開口面積 (opening area) を、縦軸は質量 2 の開口面積を表している。また、青線は本法 (proposed method) による軌道、赤線は 4.4.3 節の剥離位置固定法 (fixed separation point method) による軌道を示している。なお、○印は、声門の初期位置を表している。

#### 5.4.4 声帯表面に働く圧力の時間変化

つぎに、声門波の生成シミュレーションの結果に基づいて、声帯表面に働く圧力の時間変化について検討する。なお、本節のシミュレーション条件は、前節と同様である。

図 5.6 は、声門波の生成シミュレーションに基づく、声帯表面に働く圧力の時間変化を示している。図 5.6 の 1 段目と 2 段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3 段目と 4 段目は、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、図 5.6 の横軸は図 5.1 の  $X$  軸、縦軸は圧力を表しており、赤い太線は圧力を、細線は声帯表面の形状を示している。これにより、声帯表面での圧力分布の様子が分かる。また、それぞれの図のタイトルの番号は、図 5.4 のマーカー位置と対応している。

まず、図 5.6 の 1 段目と 2 段目に示す本論の声門流モデルを用いた結果について考察する。まず、図の (1) をみると、声帯全体に渡って高い圧力が作用している。このような圧力によって、質量 1 が押し開けられて、声門の開運動が始まる。質量 2 は質量 1 とバネで連結されていることから、質量 1 の運動に遅れてこれに追従する。つぎに、(2) では、声門の開大とともに、声帯表面に働く圧力の低下が生じている。このことと、バネの復元力が働くことにより、声門の開く勢いは衰えて行く。そのため、声門形状は、(1)(2) の流路の拡大する形状から、(3) の流路が平行な形状へと移行する。そして、(4) の収縮形状になると、圧力の谷によって、声帯表

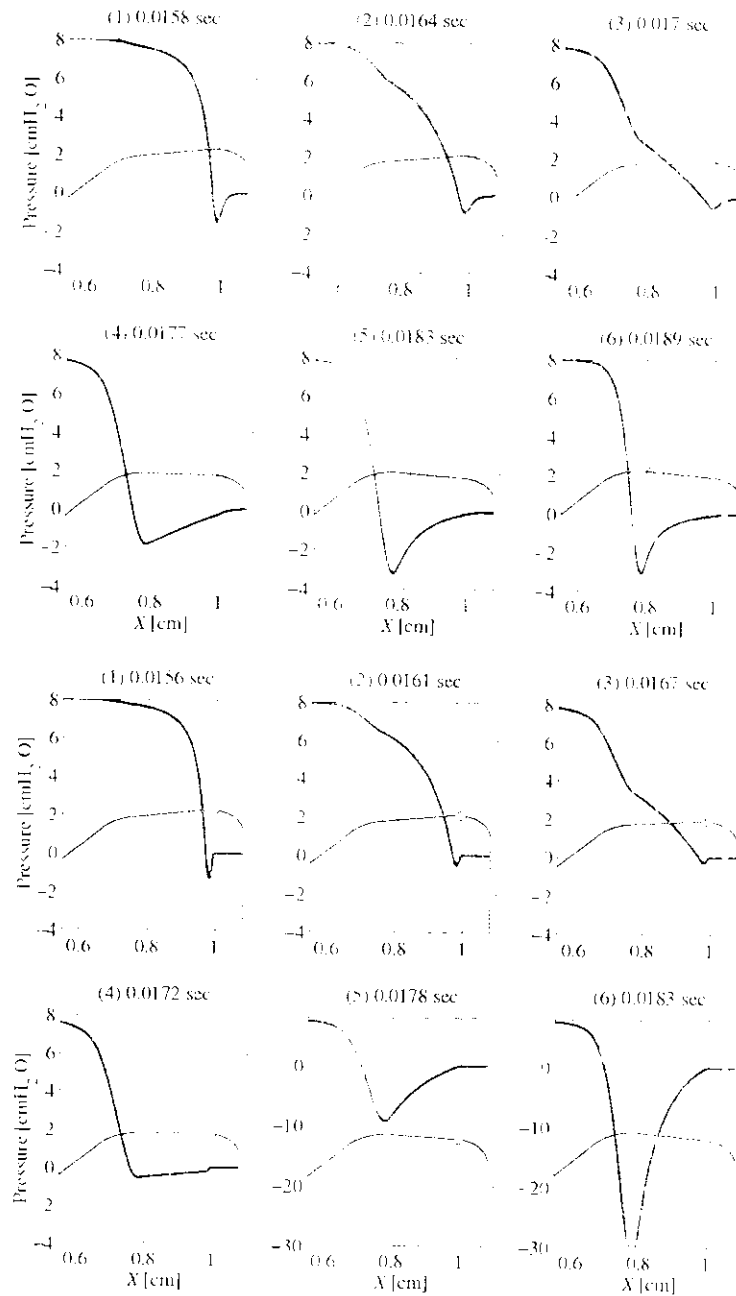


図 5.6 声門が開いているときに声帯表面に働く圧力の様子。図の1段目と2段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3段目と4段目は、4.4.3節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、赤線は圧力分布を、○印は剥離位置を表している。また、それぞれの図のタイトルの番号は、図5.4のマーカー位置と対応している。

面に負圧が生じる。この負圧の影響と、バネの復元力によって声門は閉運動を始める。(5)(6)から分かるように、声門の閉鎖が近づくにつれて、負圧の谷は鋭く、そして深くなる。また、負圧が生じる(4)(5)(6)の声門の収縮形状において、○印で示す境界層の剥離位置は、声門入口側へと移動する。

つぎに、図5.6の3段目と4段目に示す4.4.3節の剥離位置固定法を用いた結果と、本論の

声門流モデルを用いた結果とを比較する。剥離位置固定法によっていちぢるしく変化する部分は、剥離位置が変動する、声門の閉運動区間においてである。図 5.6 の 2 段目と 4 段目の (5) と (6) を比較すると、4 段目の剥離位置固定法において、非常に大きな負圧が生じていることが分かる。これは、4.4.5 節で述べたように、本来移動する境界層の剥離位置を固定したために、拡大形状における圧力抵抗が過小評価されてしまうからである。そのため、圧力の誤推定を生じることは、4.4.5 節で見た通りである。この誤推定された負圧に引き寄せられて、質量 1 は急激に閉鎖する。これが図 5.4 の 3 段目において観測された、質量 1 の挙動の変化の理由である。

#### 5.4.5 声門体積流量の時間変化

つぎに、声門波の生成シミュレーションより計算される声門体積流量の時間変化について考察する。声門体積流量の時間変化は、声門波と直接的に対応する。ここでは、声門体積流量の時間波形のスペクトルについて検討を行う。なお、本節のシミュレーション条件は、前節・前々節と同様である。

図 5.7 は、声門波の生成シミュレーションに基づく、声門体積流量の時間波形と、その対数振幅スペクトルを示している。図 5.7 の 1 段目と 2 段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3 段目と 4 段目は、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、図 5.7 の 1 段目と 3 段目の横軸は時間 (time)、縦軸は体積流量 (volume flow rate) を表している。また、2 段目と 4 段目の横軸は周波数 (frequency)、縦軸はスペクトルの対数振幅 (amplitude) である。なお、スペクトルは、定常とみなせる波形の 3 周期分を切り出して、 $2^{16}$  点の FFT により得たものである。

図 5.7 より、本論の声門流モデルを用いた結果と、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果とを比較する。図 5.7 の 1 段目と 2 段目は、本論の声門流モデルによる結果である。2 段目の声門体積流量の時間波形の対数振幅スペクトルより、基本周波数は 148.8 Hz であることが分かった。また、図 5.7 の 2 段目の赤線は、-13dB/oct. のスペクトル傾斜を表している。一般に体積流波形のスペクトル傾斜は -12dB/oct. であるとされており、それに比べると若干高域の減衰が強いことが分かる。

一方、図 5.7 の 3 段目と 4 段目は、4.4.3 節の剥離位置固定法を用いた結果である。図 5.7 の 3 段目の声門体積流量のピーク値は  $496.3 \text{ cm}^3/\text{sec}$  であり、本論の声門流モデルによるピーク値の  $404.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$  に比べて大きい。これは、4.5 節で述べたように、本来移動する境界層の剥離位置を固定したために、拡大形状における圧力抵抗が過小評価されてしまうからである。そのため、流量が実際よりも大きく推定されてしまうのである。また、図 5.7 の 3 段目の剥離位置固定法において、波形の傾きが強いことが観察できる。波形の 1 周期分を切り出して検討を行うと、波形の立ち上がりから最大値に到達するまでの時間は、図 5.7 の 1 段目の本

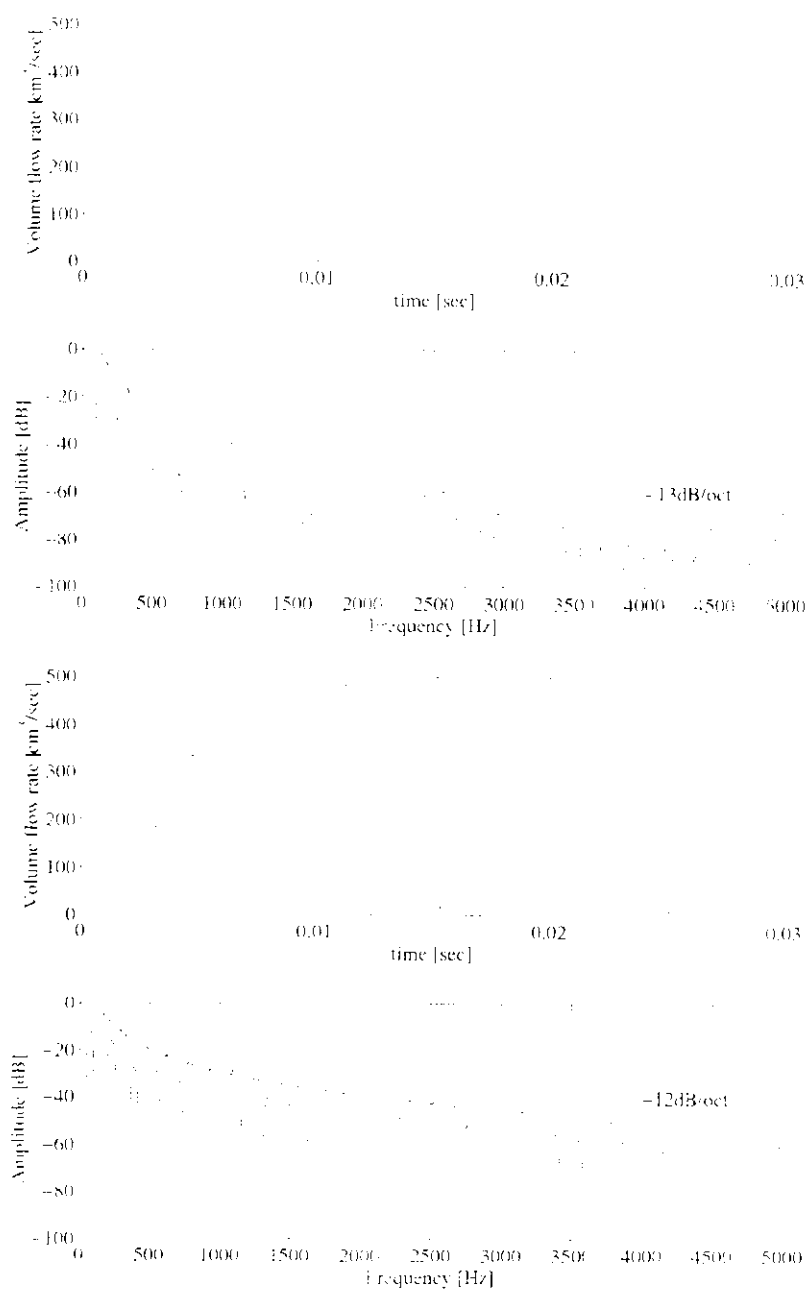


図5.7 声門体積流量の時間波形とその対数振幅スペクトル。図の1段目と2段目は、本論の声門流モデルを用いた結果であり、3段目と4段目は、4.4.3節の剥離位置固定法を用いた結果である。ここで、上段は声門体積流量 (volume flow rate) の時間波形を表している。また、下段は声門体積流の時間波形の対数振幅スペクトルを表している。

論の声門流モデルにおいて約58%であり、一方、3段目の剥離位置固定法において約71%である。このような波形の違いが、結果として図5.7の4段目の対数振幅スペクトルにも影響を与える。剥離位置固定法における基本周波数は154.0 Hzであり、本論の声門流モデルにおける基本周波数148.8 Hzに比べて高くなる。また、剥離位置固定法におけるスペクトル傾斜は $-12\text{dB/oct}$ となった。

剥離位置固定法は、Ishizaka らの声帯の 2 質量モデル [14] のシミュレーションを模擬したものである。本節のシミュレーションでは、声門波の生成系と声道管との音響的なカップリングを無視している。Rothenberg [45] によれば、声道管との音響的なカップリングは、声門波に傾斜を与える働きをする。しかし、剥離位置固定法による声門波の生成シミュレーションでは、声道管の影響を無視したにも係らず、声門波の傾斜が生じた。これより、剥離位置を固定する手法で音声の生成メカニズムを研究する場合は、十分に注意した方が良いと云える。

#### 5.4.6 下流側に生じる渦流の考察

つぎに、境界層の剥離によって生じる渦流の時空間パターンについて考察する。本節では、シミュレーションの時間の刻み幅は、 $\Delta t = 10^{-6}$  sec に設定した。また、計算量の削減のために、5.4.2 節の 3. で述べた渦糸の放出は、 $10\Delta t$  の間隔で行った。

図 5.8 は、境界層の剥離によって生じる渦糸群の分布の時間発展を示している。ここで、図 5.8 の横軸と縦軸は、図 5.2 の  $X = 0$  を原点とした直交座標系における位置を表している。また、図中の○印は、境界層の剥離位置を表している。図 5.8 の 0.006 sec の時点において、剥離位置は声門入口側に移動していることが分かる。0.007 sec や 0.008 sec の時点では、声門は閉鎖している。これによって、呼気流は遮断されるが、渦自身の誘起する流速場によって、渦糸が対流していることが分かる。

図 5.9 は、図 5.8 の  $X = 2$  cm に設定した参照点において流速を積分して得られた声門体積流量の時間波形と、その対数振幅スペクトルを示している。ここでは比較のために、赤線で呼気流量に基づく声門体積流量の時間波形と、その対数振幅スペクトルを示している。ここで、図 5.9 の上段の横軸は時間 (time)、縦軸は体積流量 (volume flow rate) を表している。また、下段の横軸は周波数 (frequency)、縦軸はスペクトルの対数振幅 (amplitude) である。なお、スペクトルは、定常とみなせる波形の 2 周期分を切り出して、 $2^{16}$  点の FFT により得たものである。

図 5.9 の上段の青線より、渦流の影響によって、波形が乱れていることが分かる。この影響は、声門が閉鎖している箇所にも表れている。赤線では、流量が零となる部分でも、青線では、渦の影響により、波形の乱れが生じている。図 5.9 の下段の青線より、この波形の乱れは、2 kHz 以上の帯域におけるノイズとして表れることが分かった。Miki [23] によれば、渦流は、流速場に広帯域のノイズを生じる。図 5.9 に示した結果は、この報告に適合するものである。

#### 5.4.7 声門流モデルの仮定の検証

3.2 節で述べたように、本論の声門流モデルを構築する際、声門流の無次元特徴量の考察を行った。そこでは、声門の形状比に関しては  $O(10^{-1})$  として 2 次元流の仮定を、Mach 数に関しては  $O(10^{-1})$  として非圧縮性の仮定を、Reynolds 数に関しては  $O(10^3)$  として境界層近似

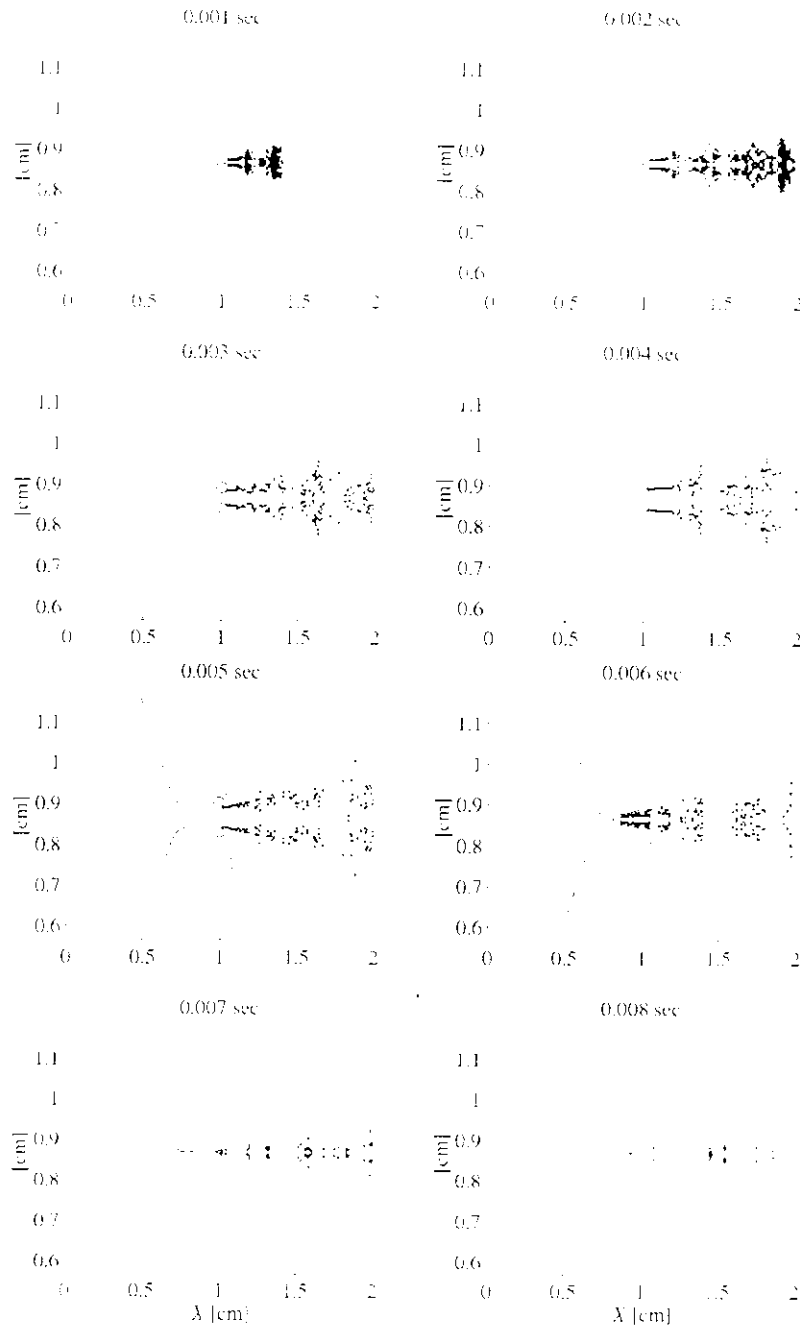


図5.8 声門下流側の渦糸群の分布。図中の点は、渦糸を表す。また、印は境界層の剥離位置を表している。

を、Strouhal 数に関しては  $O(10^{-2})$  として疑似定常の仮定を採用した。本節では、声門波の生成シミュレーションにおける、これらの無次元特微量について示し、本論の声門流モデルの仮定の妥当性について検証する。なお、本節のシミュレーション条件は、前節と同様である。

図5.10は、声門波の生成シミュレーションにおける、声門流の無次元特微量の時間変化を示している。ここで、図5.10の横軸は時間 (time)、縦軸はそれぞれの無次元特微量を表している。まず、図5.10の1段目の声門形状比  $d/l_g$  より、声帯振動に伴いその値が変動してい

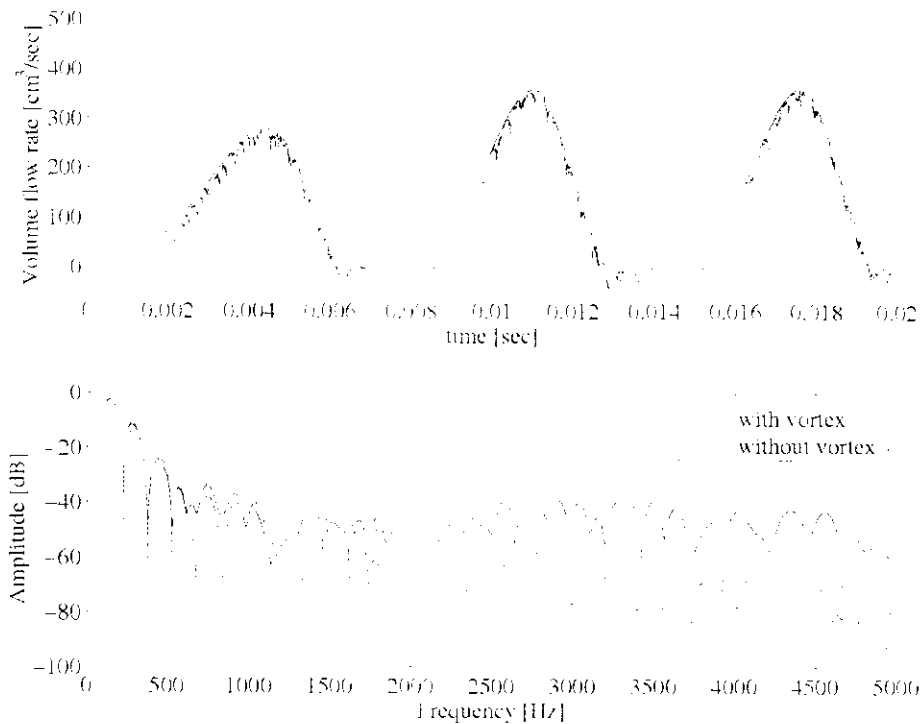


図 5.9 声門体積流量の時間波形 (上段) とその対数振幅スペクトル (下段)。上段の青線は、図 5.8 の  $X = 2$  cm に設定した流速の参照点を通過する体積流量 (volume flow rate) を表す。また、赤線は呼気の体積流量を表す。下段の青線は、上段の青線で示した時間波形の対数振幅スペクトルを表している。また、赤線は、上段の赤線の対数振幅スペクトルである。なお、図中の点線は、 $-13$  dB/oct. のスペクトル傾斜を表している。

るが、その平均値は約 0.03 であり、仮定していた  $O(10^{-1})$  の範囲内であることが分かった。つぎに、図 5.10 の 2 段目の Mach 数  $M$  より、その平均値は約 0.12 であり、仮定していた  $O(10^{-1})$  の程度であることが分かった。また、Mach 数  $M$  の時間波形をみると、声門の開き始めと、声門の閉鎖直前で大きな値を取ることが分かる。これは、境界層の排除する厚さによって主流速が加速するためである。それから、図 5.10 の 3 段目の Reynolds 数  $R_l$  より、その平均値は約 915.8 であり、仮定していた  $O(10^3)$  の程度であることが分かった。ただし、Reynolds 数  $R_l$  の時間波形を見ると、声門の開き始めと、声門の閉鎖区間で、 $R_l$  の低下が見られる。このような領域では、境界層近似はもはや成立しない可能性がある。しかし、大局的に見た場合には、境界層近似は有効に働いていると考えられる。最後に、図 5.10 の 4 段目の Strouhal 数  $S_l$  より、その平均値は約 0.01 であり、仮定していた  $O(10^{-2})$  の程度であることが分かった。

## 5.5 まとめ

本章では、本論の声門流モデルと、声帯の振動モデルを組合せて、声門波の生成シミュレーションを行った結果について述べた。ここでは、声帯の振動モデルとして、Ishizaka らの 2 質



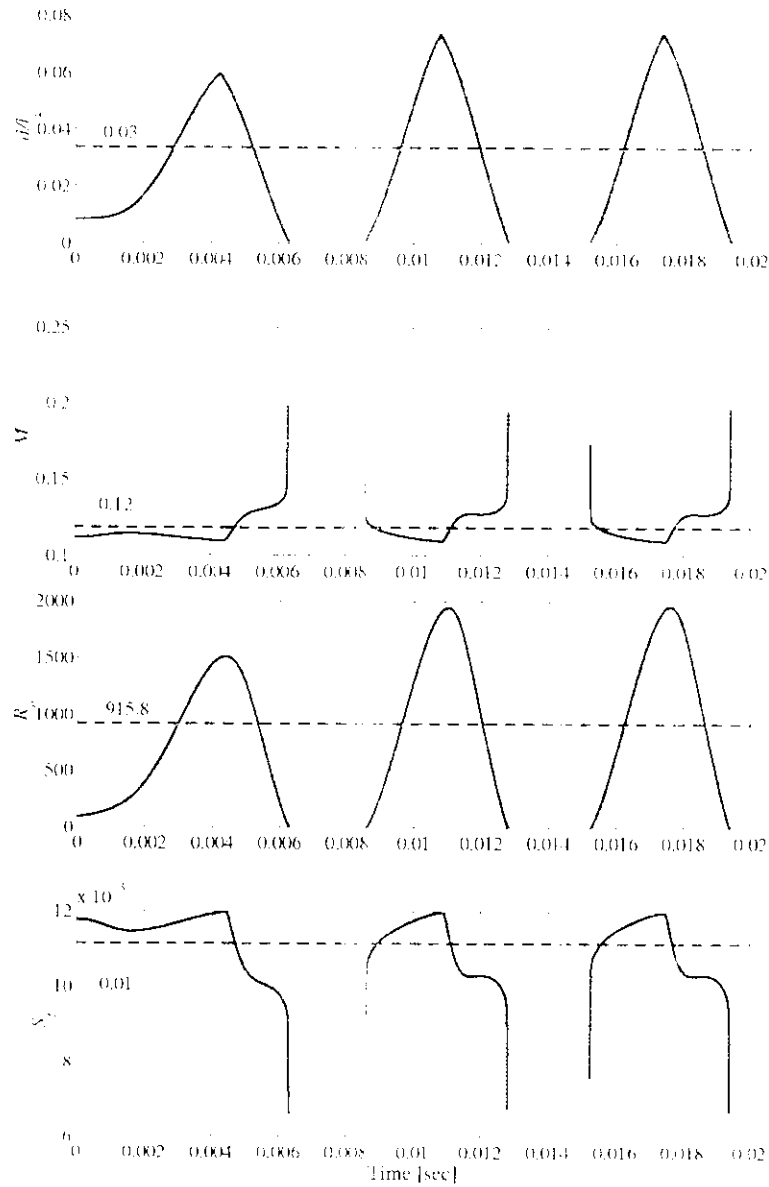


図5.10 声門波の生成シミュレーションにおける、声門流の無次元特徴量の時間変化。1段目は声門形状比  $d/l_g$  を、2段目はMach数  $M$  を、3段目はReynolds数  $Re$  を、4段目はStrouhal数  $St$  を表している。また、赤い破線は、平均値を表している

量モデル [14] を採用した。声帯に働く外力として、境界層解析を通じて得た声帯表面での圧力を与えることで、声帯振動のシミュレーションを行った。ここでは同時に、剥離位置を固定した声門流モデルに基づく声門波の生成シミュレーションを行った。シミュレーションより、声帯振動時における声帯表面に働く圧力を算出した。ここで、剥離位置を固定したモデルでは、非常に大きな負圧が声帯に働き、声門閉鎖が過剰に促進されることを確認した。また、境界層の剥離によって生じる渦流の検討を通じて、渦流は声門波の高域成分に影響を与えることが示唆された。最後に、声門流の無次元特徴量について検討を行い、本論の声門流モデルを構築する際に設定した種々の仮定が妥当であることを確認した。