垂直方向からみた声帯振動の定量的解析

佐伯 克哉

Quantitative Analysis of the Vertical Aspect of Vocal Fold Vibration

Katsuya Saeki, M.D.

Department of Otolaryngology, Ehime University School of Medicine, Ehime

The vertical movement of the vocal folds during phonation was analyzed using laser Doppler vibrometry (LDV). Four excised canine and two human larynges were used for the study. A laser beam reflected from a LDV target on the upper surface of the vocal fold was fed into the LDV to measure its vertical velocity and displacement. A photoglottography (PGG) was simultaneously employed to follow changes in the glottal aperture during phonation. Signals from the LDV and PGG were recorded under three conditions: with and without vocal fold elongation, and with thyroarytenoid muscle (TA) contraction. Vocal fold elongation was obtained by cricothyroid approximation. TA contraction was attained by direct electrical stimulation. The vertical velocity and displacement increased as the mean airflow rate was increased. Displacement decreased when the vocal fold was elongated. On the other hand, the vertical velocity did not always increase when the vocal fold was elongated. When TA contracted, the vertical velocity and displacement increased.

By using the PGG output and the vertical displacement, we could investigate the changes in the trajectory of the LDV target in response to an increase in the mean airflow rate and in the contraction of TA. The LDV trajectory increased vertically and horizontally as the mean airflow rate increased. With TA contraction, the vertical change in the trajectory was much larger than the horizontal one.

Key words : vertical velocity, vertical displacement, laser Doppler vibrometry, photoglottography, trajectory of an LDV target

I. はじめに

高速度カメラやストロボスコープを用いた声帯振動の観察により¹⁻⁸⁾, 声帯振動の本質は声帯下面から上面に伝播する粘膜波状運動であること⁹⁻¹²⁾が明らかにされた。これらの研究の多くは声帯上面, あるいは下面から水平方向の運動

を分析したものである。しかし, 振動時には声帯は水平方向だけでなく垂直方向や前後方向にも運動する。とりわけ垂直方向の運動は粘膜波の伝播と関連しており, 声帯振動を解析する上で重要な要素と考えられる。実際, 声帯振動の軌跡は長軸を上外方に傾けた楕円形であることがX線ストロボスコープを用いた前額面での分析から明らかにされている⁵⁾。しかし, 声帯の垂直方向の運動を定量的に測定した研究は現在まで全く行われていない。

本研究ではイヌおよびヒト摘出喉頭を用いて声帯振動の垂直方向の速度と振幅を測定し, 吹

愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室
別刷請求: 〒791-0295 愛媛県温泉郡重信町志津川
愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室
佐伯克哉
投稿受付: 1997年12月1日

図1 実験装置の概略

鳴条件の違いによる声帯振動の変化を分析した。また、光電グロットグラフィ¹³⁻¹⁵⁾(以下、PGG と略す)を用いて声門面積波形を同時に記録し、声帯振動一周期における水平、垂直両方向の運動を解析した。

II. 対象と方法

1. 吹鳴方法

吹鳴装置の概略を図1に示す。声帯上面からの垂直方向の振動を観察するために摘出喉頭を上方は喉頭室のレベルで、下方は第一気管輪と輪状軟骨の間で切断した。両披裂軟骨に4-0 ナイロン糸をかけ吹鳴が可能となるように声門を閉鎖した。著者が考案した吹鳴用木箱に開けた小孔に声帯上面を外側に向けて粘土で喉頭を固定した。箱の側面から加湿した空気を送気し喉頭を吹鳴した。声帯上面に直径45 μm のガラスビーズを一層に塗布した0.6 mm 角、厚さ88 μm 、重さ98 μg の反射板を微量の接着剤で固定し、レーザー光の標的とした。実験に先立ち、一側声帯上面に反射板を置いた状態で喉頭を吹鳴してストロボ照明下に声帯を観察し、両側声帯にほぼ対称的な粘膜波動が惹起されることを確認した。吹鳴中に上方からレーザードップラー振動計(ポリテック, OFV 3000, OFV 302) (以下, LDV と略す) のレーザー光を反射板に

照射し、反射板の垂直方向の振動速度、振幅を吹鳴音とともにデータレコーダー(ティアック、R-71)に記録した。各吹鳴の記録は約10秒間とした。

LDV の測定原理を図 2 に示す。LDV では He-Ne レーザービームを反射板に向けて照射し、反射板から戻ってくる反射光を捕える。この反射光の周波数は反射板の振動速度に応じてドップラー効果により変化する。変化したレーザーの周波数と参照光を個別に検出し、それらの周波数の違いから反射板の振動速度、振幅を測定する。

PGG の記録は以下の方法で行った。声門上方から直視型硬性内視鏡（永嶋，SFT2）を経て連続光を照射し，吹鳴箱下面の小孔に固定した光センサー（東芝，TPS 605）で声門の透過光の光量変化をデータレコーダーに記録した。

2. 対象と吹鳴の条件

本研究に用いたイヌおよびヒト喉頭とその吹鳴条件を表1に示す。後述のリサーチ波形を作製した喉頭には「L」と記した。

1) イヌ新鮮喉頭

イヌ新鮮喉頭 3 個（喉頭 2～4）は摘出直後に吹鳴を行った。甲状披裂筋（以下、内筋と略す）の刺激は以下の方法で行った。直径 0.1 mm の双極有鉤ニクロム線電極を声帯上面から両側

図2 レーザードップラー振動計の測定原理

表1 対象と吹鳴の条件

	凍 結 保 存 喉 頭			新 鮮 喉 頭	
	測定部位の検討 (気流量一定)	気流量変化 (自 然 長)	伸 展 (気流量変化)	気流量変化 (自 然 長)	内 筋 刺 激 (気流量変化)
イヌ喉頭 1	○	Ⓛ	○		
2	○	Ⓛ	○	Ⓛ	Ⓛ
3	○	Ⓛ	○	○	○
4	○	○	○	○	○
ヒト喉頭 1		○	○	Ⓛ	Ⓛ
2			○	○	○

Ⓛ：リサージュ波形作製

の内筋に直接刺入し、電気刺激装置(日本光電, SEN-3301)を用いて内筋を直接電気刺激した。刺激条件は刺激頻度30 Hzの矩形波、刺激電圧は肉眼的に内筋の収縮が認められる最小電圧とした。なお、刺激の反復により収縮が減弱するため、適宜刺激電圧を5～50 Vの範囲で増加させた。気流量を150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と変化させ、各気流量で内筋刺激なし、刺激ありの条件下で振動速度、振幅を記録した。なお、後述のように凍結保存喉頭4個すべてにおいて振動速度、振幅は声帯膜様部中央において最大であったため、以下、声帯膜様部中央で測定した。

2) イヌ凍結保存喉頭

摘出後の喉頭を－80度で凍結保存し、3時間

常温下で自然解凍したイヌ摘出喉頭4個(喉頭1～4)を用いた。吹鳴条件は、声帯に何ら緊張負荷を加えていない状態(自然長時)と、声帯を伸展し緊張負荷を加えた状態(声帯伸展時)の2条件とした。まず、自然長時、各喉頭を気流量150 ml/秒で吹鳴し、反射板の位置を声帯膜様部前1/3, 中央, 後1/3と変化させ、垂直方向の振動速度、振幅の違いを検討した。続いて、気流量を150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と増加させ、気流量増加時の垂直方向の振動速度、振幅の変化を記録した。

次に、輪状甲状軟骨接近術を行って声帯を伸展させ、垂直方向の振動速度、振幅を記録した。なお、気流量は自然長時と同様に150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と変化させた。

3) ヒト摘出喉頭

実験には2個の摘出喉頭を用いた。喉頭1は57歳男性, 放射線 30 Gy 照射後, 喉頭2は72歳男性, 放射線 50 Gy 照射後の喉頭を用いた。両者とも原疾患は下咽頭癌で視診上声帯は正常であった。なお, 喉頭摘出の適応は当科と放射線科の合同カンファレンスにて決定した。

摘出直後の新鮮喉頭は気流量を150 ml/秒, 170 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と変化させ, 各気流量で内筋刺激前後に振動速度, 振幅を記録した。内筋の刺激はイヌ喉頭と同様の方法で行った。凍結保存後の喉頭は気流量150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒で吹鳴し, 垂直方向の振動速度, 振幅の変化を記録した。また, 声帯伸展時の垂直方向の振動速度, 振幅も記録した。

3. 分析方法

記録したデータを1 kHzのLow Pass Filter (GW インストルメンツ, スーパースコープII) を通した後, A-D 変換器を経て10 kHzでコンピュータ (アップル, Power Macintosh 7100/80AV) に取り込んだ。この波形をモニター画面上で観察し, 波形の安定した100 msの区間の波形を波形解析ソフトウェア (GW インストルメンツ, スーパースコープII) を用いて分析した (図1)。

前述の100 msの区間の中で最も安定した連続した10周期の各周期における上向きの速度の最大値の平均値を振動速度とした。振動波形は基線が安定しなかったため, 便宜的に連続した各周期の最小値を基線として波形を再描画した。振動速度の測定に用いた10周期の各周期の振幅の平均値を振幅とした。基本周波数 (以下, f_0 と略す) は振動速度と振幅の測定に用いた10周期の時間から算出した。

リサージュ波形の作製には分析に用いた10周期中の任意の1周期分の値を用いた。X軸値にはPGGの出力を, Y軸値にはそれに対応する垂直方向の振幅を用いた。

PGGの出力は声門の開閉に伴う透過光量を示し, 水平方向の振幅に比例する相対値である。したがって, 得られるリサージュ波形は実際の声帯表面の軌跡を示すものではない。また, 透過光量は照明光量, 照射角に影響されるため, 異なる喉頭間での比較はできない。このため,

声帯伸展時のリサージュ波形は作製しなかった。しかし, 吹鳴中の光量, 照射角が一定である連続した吹鳴時における流量増加による変化や, 内筋刺激前後のリサージュ波形の変化は声帯振動の変化を反映すると考えられる。なお, 振幅波形で基線が安定しなかった例では軌跡のおよその形状がわかる部分のみ表示した。また, 得られたリサージュ波形の長軸の傾きを比較検討するため, 原点から軌跡に引いた, 角度が最大の接線と最小の接線の中線の傾きを長軸の傾きとした。

4. 統計学的解析

声帯伸展前後, 内筋刺激前後における垂直方向の振動速度, 振幅の差, また, 内筋刺激前後におけるリサージュ波形の長軸の傾きの差について, 統計学的解析を行った。解析には対応のある t 検定を行い, p 値が0.05未満の場合を有意差ありと判定した。

III. 結 果

1. イヌ摘出喉頭

1) 測定部位による垂直方向の振動速度, 振幅の比較

凍結保存喉頭4個とも垂直方向の振動速度, 振幅は声帯膜様部中央において最大となった。各喉頭の声帯膜様部前1/3, 中央, 後1/3における気流量150 ml/秒の振動速度, 振幅を図3に示す。以後の検討には声帯膜様部中央における振動速度, 振幅を用いた。

2) 気流量増加時

新鮮喉頭2~4および凍結保存喉頭1~4の気流量の増加に伴う振動速度と振幅の変化を図4に示す。どの場合も気流量の増加に伴い垂直方向の振動速度と振幅は大きくなる傾向を認めた。新鮮喉頭, 凍結保存喉頭の間で, 振動速度, 振幅に明らかな差は認めなかった。

3) 声帯伸展時

各凍結保存喉頭の声帯伸展前後における振動速度と振幅の変化を図5a, bに示す。喉頭1, 4の振動速度は自然長時に比べて伸展時に小さくなった。喉頭3の振動速度は, 1 mmの伸展では大きくなり (伸展時1), 2.5 mmの伸展では小さくなった (伸展時2)。喉頭2の振動速度は伸展時に大きくなった。振幅 (図5b) は喉頭

3の伸展時1を除く他のすべての場合に小さくなった。

図3 イヌ凍結保存喉頭における声帯膜様部前1/3, 中央, 後1/3での振動速度, 振幅の比較 (気流量150 ml/秒)

●: 喉頭1, ◆: 喉頭2, ▲: 喉頭3, ■: 喉頭4 (図4も同様)。☆: $p < 0.05$, ☆☆: $p < 0.025$, ★: $p < 0.01$, ★★: $p < 0.005$, ◎: $p < 0.0025$ (図4, 5, 6, 8, 11, 12も同様)
全例で垂直方向の振動速度, 振幅は声帯膜様部中央において最大となった。

4) 甲状披裂筋刺激時

喉頭2～4の内筋刺激前後の振動速度, 振幅, f_0 の変化を図6に示す。喉頭2においては内筋刺激時に振動速度, 振幅が大きくなったが, 喉頭3, 4では内筋刺激時に振動速度は小さくなった。振幅は喉頭3の気流量が安定した150 ml/秒, 200 ml/秒では明らかな変化は認めず, 喉頭4では小さくなる傾向を認めた。なお, f_0 は内筋刺激により喉頭2, 3では低下し, 喉頭4では上昇した。

2. ヒト摘出喉頭

1) 気流量増加に伴う垂直方向の振動速度, 振幅の変化

ヒト摘出喉頭 (新鮮, 凍結保存) の気流量増加に伴う振動速度, 振幅の変化を図7aに示す。凍結保存喉頭2は解凍後に変色が見られ, 実験には不適当と判断し除外した。イヌ摘出喉頭と同様に垂直方向の振動速度と振幅は気流量の増加に伴い大きくなる傾向が認められた。

2) 声帯伸展時

凍結保存喉頭1では自然長時と伸展時で振動

図4 イヌ新鮮喉頭, 凍結保存喉頭における気流量増加に伴う振動速度, 振幅の変化
新鮮喉頭, 凍結保存喉頭とも全例で垂直方向の振動速度, 振幅は気流量の増加に伴い大きくなった。

図5 イヌ凍結保存喉頭における声帯伸展前後の振動速度の変化(a)と振幅の変化(b)

●：自然長時，○：伸展時(喉頭3では，○：伸展時1，△：伸展時2)。喉頭1，喉頭2は2mm，喉頭3は1mm(伸展時1)，2.5mm(伸展時2)，喉頭4は1mm伸展した。垂直方向の振幅は喉頭3の伸展時1を除き，伸展時に小さくなった。振動速度の変化は一定ではなかった。

図6 イヌ新鮮喉頭における内筋刺激前後の振動速度, 振幅, 基本周波数の変化

●: 刺激前, ○: 刺激時。喉頭2では垂直方向の振動速度, 振幅は大きくなり, 喉頭3, 4では小さくなる傾向を認めた。 f_0 は喉頭2, 3では低下し, 喉頭4では上昇した。

速度, 振幅に明らかな差は認められなかった(図7b)。

3) 甲状披裂筋刺激時

内筋刺激前, 刺激時の振動速度, 振幅, f_0 の変化を図8に示す。喉頭1では内筋刺激時に振動速度に明らかな変化は認めなかった。振幅波形の基線が安定した気流量180 ml/秒の吹鳴時, 刺激前後で振幅に明らかな差はなかった。喉頭2では内筋刺激時に振動速度, 振幅は大きくなった。なお, f_0 は2例とも内筋刺激時に上昇した。

3. 速度波形, 振幅波形, PGG 波形の分析

イヌ凍結保存喉頭1の気流量150 ml/秒における速度波形, 振幅波形, PGG 波形を図9に示す。振動速度波形では, 正の部分は上向きの速度を示し, 負の部分は下向きの速度を示す。

(1) 声門閉鎖期 (PGGの基線の区間): 垂直方向の振動速度および振幅はともに増加した。

(2) 声門開大期 (PGGの基線と最大値の間の区間): 垂直方向の振動速度は声門開大期に上

向きから下向きに転じ, その後振幅は最大となった。

(3) 声門最大開大期 (PGGの値が最大となる点): 垂直方向の振動速度は下向きで, 振幅は減少した。

(4) 声門閉小期 (PGGの最大値から基線までの間の区間): 垂直方向の振動速度は声門閉小期に下向きから上向きに転じ, その後振幅は最小となった。

この結果から声帯上面の1点は上方→外方→下方→内方と動いたことが分かった。

4. リサージュ波形の作製

イヌ新鮮喉頭2, 凍結保存喉頭1~3の, 各気流量でのリサージュ波形を図10に示す。いずれの喉頭においても, 軌跡は長軸を上外方に傾けた楕円形に近い形であった。図には気流量150 ml/秒における長軸の傾きと各気流量での長軸の傾きとの差を示した。いずれの場合も気流量の増加によらず長軸の傾きはほぼ一定であった。すなわち, 気流量の増加に伴い軌跡は水平,

図 7

- a: ヒト新鮮, 凍結保存喉頭における気流増加に伴う振動速度, 振幅の変化。
 ●: 喉頭 1 - 新鮮, ○: 喉頭 1 - 凍結保存, ■: 喉頭 2 - 新鮮。
 垂直方向の振動速度, 振幅は気流量の増加に伴い大きくなる傾向を認めた。
- b: ヒト凍結保存喉頭 1 における声帯伸展前後の振動速度, 振幅の変化。●: 自然長時, ○: 1 mm 伸展時。自然長時と伸展時で垂直方向の振動速度, 振幅に明らかな差は認めなかった。

垂直両方向に同程度に拡大した。

イヌ新鮮喉頭 2 の内筋刺激前後のリサージュ波形の変化を図 11 に示す。図には内筋刺激前の長軸の傾きと刺激時の傾きとの差を示した。気流量増加に伴う長軸の傾きはほぼ一定であった。内筋刺激時には声門の開大が小さい区間では垂直方向に, 声門の開大が大きい区間では水平方向に大きくなる。2 段階の変化を示した。

ヒト喉頭 1 の内筋刺激前後のリサージュ波形の変化を図 12 に示す。気流量増加に伴う長軸の傾きはほぼ一定であった。内筋刺激時には垂直方向の振幅は大きく, 水平方向の振幅は逆に小さくなり, 軌跡は垂直方向に引き延ばされた形に変化した。

IV. 考 按

声帯上面の一点は粘膜波動を伝播する媒体の

一部であり, その運動は声帯振動, 特に粘膜波動を解析する上で重要な要素と考えられる。本研究で測定した垂直方向の振動速度, 振幅は厳密に声帯表面上の一点のそれではない。著者は声帯上面に置く反射板を 0.6 mm 角とできるだけ小さくすることにより, 反射板の運動が声帯上面の一点の垂直方向の運動を反映すると考えた。

声帯粘膜波状運動の伝播速度 (traveling wave velocity, 以下 TWV と略す) は声帯粘膜病変を客観的に評価する指標の一つであるが, その測定方法は様々で, 結果もばらつきが大きい¹⁶⁻²⁰⁾。小林ら²¹⁾は, 本研究と同様の方法で測定した垂直方向の振動速度と, ストロボ VTR を用いて測定した声帯粘膜表面上の距離既知の 2 つの標識間を移動する波動伝播時間から得られた波動速度 (表面波速度) とを比較し, 両者

図8 ヒト新鮮喉頭における内筋刺激前後の振動速度, 振幅, 基本周波数の変化 (●: 刺激前, ○: 刺激時)
喉頭2では刺激時に振動速度, 振幅は大きくなった。喉頭1では明らかな差は認めなかった。 f_0 は喉頭1, 2とも上昇した。

図9 イヌ凍結保存喉頭1の気流量150 ml/秒における振動速度波形, 振幅波形, PGG波形
振動速度波形では, 正の部分は上向き, 負の部分は下向きの速度を示す。声帯上面の1点は上方→外方→下方→内方と動いたことがわかる。

図10 イス新鮮, 凍結保存喉頭の各気流量のリサージュ波形の変化

図中の値は, 気流量150 ml/s では長軸の傾きを示し, 気流量180 ml/s, 200 ml/s ではそれぞれの長軸の傾きと気流量150 ml/s における長軸の傾きとの差を示す。いずれの喉頭も気流量の増加によらず長軸の傾きはほぼ一定であった。

図11 イス新鮮喉頭2の内筋刺激前後のリサージュ波形の変化
刺激前の図中の値は, 刺激前の長軸の傾きを示し, 刺激時の図中の値は, 刺激時の長軸の傾きと刺激前の長軸の傾きとの差を示す。内筋刺激時, 軌跡は水平, 垂直両方向に大きくなった。

に極めて高い相関のあることを報告した。この結果は, 垂直方向の振動速度を測定することによって TWV を推定できることを示唆するものである。

水平方向からの観察では気流量の増加とともに粘膜波動と水平方向の振幅がともに増大することが報告されてきた^{2-5,11)}。本研究によって気流量の増加に伴い垂直方向の振動速度や振幅も

図12 ヒト新鮮喉頭1の内筋刺激前後のリサージュ波形の変化
刺激前の図中の値は、刺激前の長軸の傾きを示し、刺激時の図中の値は、刺激時の長軸の傾きと刺激前の長軸の傾きとの差を示す。内筋刺激時、軌跡は垂直方向に大きくなり、水平方向では小さくなった。

増大することが示された。古川²²⁾は、「声帯緊張が増すと振幅は小さくなり、粘膜波動も減弱する」と述べ、また、黒川¹¹⁾は「声帯を伸長すると声帯の振動範囲は遊離縁辺縁に制限され、水平方向の振幅も減少する」と述べている。本研究の結果から、声帯の緊張によって水平方向だけでなく垂直方向の振幅も制限されることが示された。一方、平野²³⁾の body-cover theory によれば、声帯を伸展すると cover のスチフネスが高くなり、TWV は速くなると推定される。しかし、本研究では声帯伸展時の垂直方向の振動速度の変化は一定でなかった。

本研究では吹鳴箱に喉頭を固定する際に用いた粘土によって甲状軟骨が圧迫され、声帯振動に影響を与えた可能性があり、今後同じ吹鳴条件下での検討を要すると考える。イヌ、ヒト喉頭ともに内筋刺激時に振動速度、振幅は大きくなった。内筋の収縮により声帯粘膜の振動範囲が上下方向に拡大したため¹¹⁾と考えられる。

斎藤⁴⁾はX線ストロボスコピーを用い、声帯遊離縁上皮、粘膜固有層、内筋内に小鉛片を刺入し声帯振動を前額面から観察し、声帯遊離縁部は前額面上では円運動をしていると述べた。磯貝⁵⁾は同様の方法で振動中の小鉛片の動きを前額面、水平面、矢状面から観察した。その結果、声帯を構成する各点は垂直成分、水平

成分ともに位相、振幅を少しずつずらした運動をし、長軸を上外方に傾けた楕円形の軌跡を描くことを報告した。しかし、これらの報告では種々の吹鳴条件による軌跡の定量的分析は行われていない。

本研究ではリサージュ波形を用いて気流量変化、内筋刺激による軌跡の変化を長軸の傾きの変化として定量的にとらえた。気流量増加時には長軸の傾きはほぼ一定で、軌跡の形状に著しい変化を認めなかった。この結果は気流量増加時には振幅は水平、垂直両方向にほぼ同じ割合で大きくなることを示唆するものと考ええる。また、内筋刺激時の軌跡は、イヌ喉頭では声門開大期の初期には垂直方向に、声門開大期の後期には水平方向に大きくなる2段階の変化を示した。一方、ヒト喉頭では垂直方向の振幅は大きくなり、水平方向の振幅は逆に小さくなった。したがって、軌跡は垂直方向に引き延ばされた形に変化し、イヌ喉頭とは異なった変化を示した。組織学的にヒト声帯では声帯筋 (body) を、粘膜上皮および疎な固有層浅層 (cover)、密な中間層、深層 (移行部) が覆っているのに対して、イヌ声帯では声帯筋 (body) を疎で柔軟かつヒト声帯に比べて厚い粘膜固有層 (cover) が直接覆っている²⁴⁾。ヒト声帯粘膜では振動しやすい疎な固有層が薄く、内筋収縮によって振動

範囲が主に上下方向に拡大するため、軌跡が垂直方向に大きくなったものと考えた。一方、イヌ声帯粘膜では振動しやすい疎な固有層が厚く、内筋収縮により振動範囲が上下方向だけでなく水平方向にも拡大したため、軌跡が垂直、水平両方向に大きくなったものと考えた。

V. ま と め

レーザードップラー振動計を用いて声帯上面の垂直方向の運動を、また、同時に PGG を用いて水平方向の運動を測定した。さらに両波形からリサージュ波形を作製し、吹鳴条件による軌跡の変化を検討し、以下の結果を得た。

1) 垂直方向の声帯振動速度および振幅は声帯膜様部中央において最大であり、気流量150 ml/秒の場合、それぞれイヌ新鮮喉頭では260~466 mm/秒, 349~461 μ m, ヒト新鮮喉頭では219~380 mm/秒, 323~532 μ m であった。

2) 垂直方向の声帯振動速度、振幅は気流量の増加に伴い大きくなった。

3) 声帯伸展により垂直方向の振幅は小さくなった。一方、振動速度の変化は一定ではなかった。

4) 内筋刺激時、振動速度、振幅は大きくなった。

5) 声帯振動の軌跡は長軸を上外方に傾けた楕円形であり、振幅は気流量の増加に伴って水平、垂直両方向にほぼ同じ割合で大きくなった。また、内筋刺激時にはイヌ喉頭では垂直、水平方向ともに大きくなったが、ヒト喉頭では垂直方向に大きくなり、水平方向では逆に小さくなった。

稿を終えるに臨み、本研究を直接ご指導下さいました湯本英二講師、本論文のご校閲を賜りました曉清文教授、貴重なご助言を頂きました柳原尚明各誉教授に深甚なる謝意を表します。また、光電グロットグラフィーの製作にあたり、ご協力頂いた永嶋医科器械、青木幸夫氏、本研究にあたりご協力頂いた門田吉見助手をはじめ愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室の諸先生方に深謝致します。

なお、本論文の要旨は第47, 48, 49回日本気管食道科学会, 第8回日本喉頭科学会, 第41回日本音声言語医学会において口演した。

文 献

- 1) Farnsworth, D.W.: High-speed motion pictures of the human vocal cords. Bell Lab. Record, 18: 203-208, 1940.
- 2) 松下英明: 高速度映画による摘出喉頭における声帯振動に関する実験的研究. 耳鼻, 15: 127-142, 1969.
- 3) 吉田義一: 高速度映画による発声時の声帯振動に関する研究. 日耳鼻, 72: 1232-1256, 1969.
- 4) 斎藤成司: 発声機構の基礎的研究および喉頭内腔への臨床的アプローチ. 耳鼻, 23: 177-189, 1977.
- 5) 磯貝 豊: X線ストロボスコピーによる声帯振動の解析. 耳鼻, 27: 883-930, 1981.
- 6) 都築 達: 声帯層構造を考慮した声帯振動の基礎的研究. 耳鼻, 30: 131-152, 1984.
- 7) Baer, T., Lofqvist, A., and McGarr, N.S.: Laryngeal vibrations: A comparison between high-speed filming and glottographic techniques. J. Acoust. Soc. Am., 73: 1304-1308, 1983.
- 8) Berke, G.S., Moore, D.M., Hantke, D.R., et al.: Laryngeal modeling: Theoretical, *in vitro*, *in vivo*. Laryngoscope, 97: 871-881, 1987.
- 9) Slavitt, D.H., Lipton, R.J., and McCaffrey, T.V.: Phonatory vocal fold function in the excised canine larynx. Otolaryngol. Head Neck Surg., 103: 947-956, 1990.
- 10) 黒川浩伸, 岡本和憲, 湯本英二・他: 声帯の粘膜波状運動について. 耳鼻臨床, 84: 105-112, 1991.
- 11) 黒川浩伸: 気管側からみた声帯粘膜波状運動—高速度映画による解析—. 日耳鼻, 95: 1151-1163, 1992.
- 12) 湯本英二, 黒川浩伸, 門田吉見: 声帯振動の解析—声帯下面の観察を中心に—. 喉頭, 5: 127-134, 1993.
- 13) Sonesson, B.: On the anatomy and vibratory pattern of the human vocal folds: With special reference to a photo-electrical method for studying the vibratory movements. Acta Otolaryngol., [Suppl.] (Stockh), 1960 (suppl 156)
- 14) Hanson, D.G., Gerratt, B.R., and Berke, G.S.: Frequency, intensity, and target matching effects on photoglottographic measures of open quotient and speed quotient. J. Speech Hear. Res., 33: 45-50, 1990.
- 15) Slavitt, D.H., Lipton, R.J., and McCaffrey, T.V.: Glottographic analysis of phonation in the excised canine larynx. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 99: 396-402, 1990.
- 16) Hirano, M.: Morphological structure of the

- vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatr. (Basel)*, 26 : 89-94, 1976.
- 17) Sloan, S.H., Berke, G.S., and Gerratt, B.R. : Effect of asymmetric vocal fold stiffness on traveling wave velocity in the canine larynx. *Otolaryngol. Head Neck Surg.*, 107 : 516-526, 1992.
- 18) Titze, I.R., Jiang, J.J., and Hsiao, T.-Y. : Measurement of mucosal wave propagation and vertical phase difference in vocal fold vibration. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, 102 : 58-63, 1993.
- 19) Sloan, S.H., Berke, G.S., and Gerratt, B.R., et al. : Determination of vocal fold mucosal wave velocity in an *in vivo* canine model. *Laryngoscope*, 103 : 947-953, 1993.
- 20) Nasri, S., Sercarz, J.A., and Berke, G.S. : Noninvasive measurement of traveling wave velocity in the canine larynx. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, 103 : 758-766, 1994.
- 21) 小林丈二, 佐伯克哉, 湯本英二 : 声帯の粘膜波状運動と垂直方向からの声帯振動. 喉頭, 9 : 125-127, 1997.
- 22) 古川 満 : 摘出喉頭による発声機構に関する研究. 耳鼻臨床, 60 : 145-181, 1967.
- 23) 平野 実, 小池祐一, 広瀬幸矢・他 : 振動体としての声帯の構造. 日耳鼻, 76 : 1341-1348, 1973.
- 24) 平野 実 : 音声外科の基礎と臨床. 耳鼻, 21 : 239-440, 1975.