垂直方向からみた声帯振動の解析

佐伯 克哉, 湯本 英二, 門田 吉見

The Vertical Aspect of Vocal Fold Vibration

Katsuya Saeki, M.D., Eiji Yumoto, M.D., and Yoshimi Kadota, M.D.

Department of Otolaryngology, Ehime University School of Medicine, Ehime

Vertical movements of the vocal folds during phonation were analyzed using a laser doppler vibrometer (LDV). Four excised canine larynges were used for the study. A laser beam reflected on the upper surface of the vocal fold was fed into a LDV to measure vertical velocity and displacement of the mucosal wave. Signals from the LDV during vibration were recorded under two conditions: with and without vocal fold elongation. Vertical velocity and displacement increased as 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.

Key words : vertical velocity, vertical displacement, laser doppler vibrometer,
vocal fold elongation, stiffness of the vocal fold

I. はじめに

高速度カメラやストロボコピーを用いた声帯振動の観察により¹⁻⁷⁾, 声帯振動の本質は粘膜波状運動であることが明らかにされた⁸⁻¹¹⁾。これらの研究の多くは声帯上面, あるいは下面から見た水平方向の運動を分析したものである。しかし, 実際の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動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。本研究では, レーザードップラー振動計 (以下, LDV と略す) を用いてイヌ声帯振動における垂直方向の運動を検討した。

II. 対象と方法

1. 吹鳴方法

実験装置の概略を図1に示す。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, 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固定した。箱の側面から加湿した空気を送り喉頭を吹鳴した。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軽く固定し, レーザー光の標的とした。上方からLDV (ポリテック, OFV 3000, OFV 302) 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, 振幅を記録した。

LDV の測定原理を図2に示す。He-Ne レーザービームを反射板に向けて照射し, 参照光と反射光の周波数を個別に検出する。この時の反射光の周波数は反射板の振動に伴いドップラー

愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室
別刷請求: 〒791-0204 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8月18日

図1 実験装置のブロックダイアグラム

図2 レーザー Doppler 振動計の測定原理

効果により変化する。LDV では変化したレーザーの周波数から反射板の速度, 振幅を検出する。LDV の出力 (速度と振幅), および吹鳴音をデータレコーダー (ティアック, R-71) に記録した。各波は 1 kHz の low pass filter を通した後, A-D 変換器を経て 10 kHz でコンピューター (アップル, Power Macintosh 7100/80AV) に取り込んだ。この波形をモニターで観察し, 最も波形の安定した 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。

2. 対象と吹鳴の条件

実験にはいったん -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 個を用いた。まず, 各喉頭を気流量 150 ml/秒で吹鳴し, 声帯膜様部前 1/3, 中央, 後 1/3 にそれぞれ反射板を置き, 測定部位による垂直方向の振動速度, 振幅の違いを検討した (図 3)。続いて, 気流量を 150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と変化させ, 気流量による変化を測定した。

次に, 輪状甲状筋 (前筋) の作用を輪状甲状軟骨接近術で代用し, 声帯を伸展, 緊張させた。気流量を 150 ml/秒, 180 ml/秒, 200 ml/秒と変

図3 木箱に固定したイヌ喉頭
声帯膜様部中央に置いた反射板および前後1/3の測定部位 (矢印)

図5 喉頭1の測定部位と垂直方向の振動速度波形と振幅 (気流量150 ml/s)

図4 喉頭1の垂直方向の振動速度波形, 振幅波形
(声帯膜様部中央, 気流量150 ml/s)

化させ, 声帯非伸展時と比較検討した。

3. 分析の指標

図4は代表例(喉頭1)の振動速度波形, 振幅波形を示す。振動速度波形では, 正の部分は上向きの速度, つまり反射板が上方へ向かう速度を示し, 負の部分は下向きの速度, つまり反射板が下方(気管側)へ向かう速度を示す。最大となる点は上向きの速度の最大値, 最小となる点は下向きの速度の最大値を示す。以後の振動速度の検討には上向きの速度の最大値を用いた。なお, 1. で抽出した100 msの区間の最も安定した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。振幅波形は基線が安定しなかったため, 便宜的に連続した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周期の各周期の最大値と最小値の差(変位の最大値)の平均値を振幅とした。また, 基本周波数(以下, f_0 と略す)は同一の10周期の時間をもとに算出した。

III. 結 果

代表例(喉頭1)における気流量150 ml/秒での振動速度波形, 振幅を測定部位ごとに図5に示す。垂直方向の振動速度, 振幅は声帯膜様部

図6 喉頭1の気流量と垂直方向の振動速度波形, 振幅, 基本周波数

表1 各喉頭における気流量と垂直方向の振動速度, 振幅の測定結果

喉頭	150 ml/s			180			200		
	速度 (mm/s)	振幅 (μ m)	f_0 (Hz)	速度	振幅	f_0	速度	振幅	f_0
1	515	471	128	546	594	133	566	634	138
2	399	985	92	412	1254	99	424	1306	103
3	355	266	133	430	532	139	520	609	145
4	335	169	328	390	203	336	405	237	344

中央において最大となった。他の3個の喉頭においても同様であった。この結果から、以後の検討では声帯膜様部中央における垂直方向の振動速度, 振幅を用いた。

代表例(喉頭1)の気流量と振動速度波形, 振幅, f_0 の関係を図6に示す。気流量の増加に伴い f_0 は高くなった。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った。この傾向は他の3個の喉頭でも同様であった(表1)。

各喉頭の伸展前後における振動速度と振幅の関係を図7a, bに示す。振動速度では喉頭1, 4において自然長時に比べて伸展時に小さくなった。喉頭3ではある程度の伸展では振動速度は大きくなり(伸展時1), さらに伸展すると小さくなった(伸展時2)。喉頭2では振動速度は自然長時に比べて伸展時に大きくなった。喉頭3の伸展時1を除く他のすべての場合に振幅が小さくなった。

IV. 考 按

粘膜波状運動の伝播速度 (traveling wave velocity, 以下 TWV と略す) の測定は様々な方法で行われ, 0.1~2.0 m/秒と報告されてきた^{12~16)}(表2)。どの研究でも声帯表面上の一点の TWV でなく, ある一定の距離(1~2 mm 程度)を波動が移動する時間からその区間の平均の TWV が測定された。本研究では, 声帯上面の限られた一点の垂直方向の運動を測定した。その最大値は約0.3~0.6 m/秒で, 表2にまとめた過去の報告の TWV 値と比較的近似したものであることがわかった。

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振動速度, 振幅ではない。著者ら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ものとしてとらえた。観察した声帯上面の一点は粘膜波動を伝播する媒体の一部で

図 7a 声帯伸展前後の垂直方向の振動速度の変化

図 7b 声帯伸展前後の垂直方向の振幅の変化

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。共著者の小林ら¹⁷⁾は、本研究と同じ方法で測定した垂直方向の振動速度を粘膜表面上の波動速度と比較し、両者に極めて高い相関のあることを報告した。

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は大きくなり、水平方向の振幅は増大することが報告されてきた^{2-5,10)}。本研究では声帯遊離縁における垂直方向の運動を測定しており、気流量の増加に伴う垂直方向の振動速度、振幅の増大は粘膜波動が垂直方向にも大きな

表2 粘膜波動速度 (TWV) に関する諸家の報告

	測定方法	TWV値
平野(1976) 高速度映画	イヌ摘出喉頭の声帯表面につけた距離既知の2点間を波動が移動する時間から算出	0.1~0.5 m/s
Titzeら(1993) ストロボスコープ	イヌ摘出喉頭の声帯表面につけた距離既知の2点の位相差をもとに伝播時間を算出	0.5~2.0 m/s
Nasriら(1994) ストロボスコープ	イヌ <i>in vivo</i> モデルの声帯につけた距離既知の2点間を波動が移動する時間から算出	0.9~1.6 m/s
Sloanら(1992) ストロボスコープ	イヌ <i>in vivo</i> モデルを目盛付内視鏡で観察し、波動が移動する時間から算出	0.32~1.0 m/s

った結果と考えられる。

古川¹⁸⁾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¹⁰⁾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、水平方向だけでなく垂直方向の振幅も声帯の緊張によって制限されることが示された。

平野¹⁹⁾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 は大きくなると推定される。本研究で声帯伸展時の垂直方向の振動速度の変化が一定でなかったという結果は、声帯の伸展がある程度までであれば垂直方向の振動速度は増大し、声帯の伸展が高度であれば振動速度は減少することを示唆する可能性があり、今後の検討が必要である。

V. ま と め

声帯振動を垂直方向から観察し、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測定した。

1) 垂直方向の声帯振動速度、振幅は声帯膜様部中央において最大であり、おのおの335~515 mm/秒, 169~985 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

なったが、振動速度の変化は一定ではなかった。伸展の程度により、振動に関与する声帯部分、主に cover の物性が変化するためと考えられた。

なお、本論文の要旨は第8回日本喉頭科学会(1996年、旭川)にて発表した。

文 献

- 1) Farnsworth, D.W.: High-speed motion pictures of the human vocal cords. Bell Laboratories 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線ストロボスコープによる声帯振動の解析. 耳鼻, 27: 883-930, 1981.
- 6) 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.
- 7) Berke, G.S., Moore, D.M., Hantke, D.R., et al.: Laryngeal modeling: Theoretical, *in vitro*, *in vivo*. Laryngoscope, 97: 871-881, 1987.
- 8) Slavit, D.H., Lipton, R.J., and McCaffrey, T. V.: Phonatory vocal fold function in the excised canine larynx. Otolaryngology-Head

- and Neck Surg., 103 : 947-956, 1990.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Hirano, M. : Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. Folia Phoniatr (Basel), 26 : 89-94, 1976.
- 13) Sloan, S.H., Berke, G.S., and Gerratt, B.R. : Effect of asymmetric vocal fold stiffness on traveling wave velocity in the canine larynx. Otolaryngology—Head and Neck Surg., 107 : 516-526, 1992.
- 14) 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.
- 15) Sloan, S.H., Berke, G.S., Gerratt, B.R., et al. : Determination of vocal fold mucosal wave velocity in an *in vivo* canine model. Laryngoscope, 103 : 947-953, 1993.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.