研 究

声帯の粘膜波状運動について

黒川 浩伸・岡本 和憲
湯本 英二・丘村 熙

Traveling Wave in Vocal Fold Vibration

Hironobu Kurokawa, Kazunori Okamoto,
Eiji Yumoto and Hiroshi Okamura
(Ehime University)

The authors reviewed the literature on the mode of vocal fold vibration, which has been considered to be a transmission of the mucosal wave upward from the lower surface of the vocal fold. Many high-speed cinematographic or stroboscopic images have been obtained from the supraglottic area, but the vibratory mode of the lower surface of the vocal fold remains unclear. We observed vocal fold vibrations from the infraglottic as well as the supraglottic areas with high-speed cinematography and found that:

- 1) Traveling waves moved upward from the mucosal upheaval or inside it. That is, the mucosal upheaval vibrated with an earlier phase than any other portion of the vocal fold.
- 2) In the closing phase, the lower lip became a free edge and moved upward. After contract of the lower lips of both sides in the midline, lower lip became the upper lip and moved upward. At the time of contact, the reflection wave, identified as the lower lip from the infraglottic image, retracted laterally rapidly.
- 3) At the end of the opening phase, the lower lip of the next cycle began to move medially.
- 4) The mucous membrane outside of the mucosal upheaval did not vibrate actively.
- 5) On the basis of these findings, we tried to diagram the frontal sections of the vibrating vocal fold in different phases.

Key words: traveling wave, lower lip, upper lip, mucosal upheaval, high-speed cinematography

はじめに

声帯振動に関する研究は高速度映画、ストロボスコーピー、X線ストロボスコーピー等を用いて数多く行われてきた。しかし、多くの研究は声

帯上面からの観察であり、声帯下面から観察した声帯振動、とくにヒダ状粘膜隆起・粘膜の波頭の動きについての詳細な報告は数少ない。また従来の説明では、発声時声帯粘膜にみられる

波状運動に際して生じる粘膜の波頭である上唇と下唇が、それぞれ独立して閉開運動を行っているかのような印象を与えやすい。

そこで、著者らはまず現在までに行われてきた研究について文献的に考察して声帯振動様式に関する現在までの知見を整理した。さらに犬摘出喉頭の吹鳴を行い、高速度映画を用いて振動中の声帯下面を観察し、ヒダ状粘膜隆起、粘膜の波頭の上面からでは観察できない詳細な動きを検討した。

文献的考察

1937年 Bell Telephone Laboratories において、人発声中の声帯振動を初めて高速度映画撮影に成功して以来、声帯振動の研究は格段の進歩を遂げた。それ以後、高速度映画^{11)~14)}・ストロボスコーピー^{15)~18)}・X線ストロボスコーピー^{19)~22)}などを用いて数々の研究が報告された。以下に会話音域中の声帯振動について主な研究結果を紹介し、現在なお十分に解明されていない問題点を挙げた。

Farnsworth¹¹⁾ は Bell Telephone Laboratories のフィルムを観察し、「低い周波数で振動中の声帯は声帯下面から上方に向かって開いていく。また下部は最初に閉鎖し始める。すなわち、上下の2点間において位相差を認める」と分析した。Timcke²⁾ は人発声時の声帯振動を高速度映画で撮影し「上唇の振幅の方が下唇のそれよりも大きく、位相に関しては下唇の方が早い」と述べた。吉田⁹⁾ は同じく人発声時の声帯振動を高速度映画で撮影し「声帯全体としての内下方と外上方の間を往復する声門閉開運動に、粘膜の波状運動が組合わさったもの」と声帯振動を観察し、この結果は広戸の提唱した muco-viscoelastic-aerodynamic theory⁷⁾ に一致すると述べた。平野^{10), 23)} は人声帯の層構造を組織学的に検討し、声帯は cover (上皮および固有層浅層) と body (声帯筋および固有層中間層・深層) から成る振動体である、という body-cover theory を提唱した。さらに平野は声帯の振動に cover が大きく関与していると述べた。

松下⁸⁾ は人および犬摘出喉頭を用いて初めて声帯下面および側面より声帯振動を高速度映画で撮影した。「声帯下面と声門下腔との境界部にヒダ状粘膜隆起が形成される。声帯が主として振動するのはこの隆起より上内方の部分であり、粘膜波状運動はこの隆起の少し上方から始まり上部へと伝播する。すなわち声帯辺縁の上部と下部との運動には位相差が認められる。またこの隆起より下外方の声門下腔粘膜はほとんど振動しない」と述べ、「声帯振動は声帯辺縁粘膜の波状運動にはかならない」と結論づけた。Baer¹⁸⁾ は犬摘出喉頭において、炭素の薄片を声帯表面につけ上面および下面からストロボスコーピーで観察した。その結果、下方より上方へ進む声帯の表面波が声帯振動に大きく関与しているとし、body-cover theory を支持した。

斉藤¹⁹⁾ はX線ストロボスコーピーを開発することにより前額面からの観察を可能にした。犬摘出喉頭の観察より「下唇と思われる場所よりも下方において隆起が現れ、規則的な振動を行っているように見える。これはより早く閉鎖し、より早く開大する」と述べた。磯貝²⁰⁾ はX線ストロボスコーピーを用い、鉛の薄片を犬声帯粘膜層内に刺入して観察し「声帯を構成する各点は、垂直成分・水平成分の両成分において、位相・振幅を少しずつずらした運動をする」と述べ、松下の報告と同様に「声帯振動の本質は粘膜の波状運動である」と結論づけた。また、都築²¹⁾ は犬の声帯筋層内に鉛の薄片を刺入してX線ストロボスコーピーにて声帯振動を観察し「声帯筋層は音源振動体として参加していない」と述べた。

現在のところ、声帯振動は声帯の下面に粘膜の隆起(波頭)が生じ、この隆起が下方より上方へと伝播する、すなわち粘膜の波状運動であると考えられている。body は声帯振動において一定の役割を演じているものの、音源振動体としての主役は cover である粘膜とされている^{20), 22), 23)}。

一方、振動中の声帯下面の観察は容易でなく、

人または犬の摘出喉頭を用いてわずかに報告されたのみで^{8) 12) 14) 18)}, 粘膜波動の発生する部位・時期とその動き, ヒダ状粘膜隆起の動きとその形成される位置, さらにヒダ状粘膜隆起と声帯の他の部位との位相差などについてなお不明確な点を残したままである。

そこで, 著者らは犬摘出喉頭を用いて吹鳴実験を行い, 波状運動に際して生じる粘膜の波頭とヒダ状粘膜隆起の動きを分析してきたので, その概要を報告する。また, この結果に基づいて振動声帯の前額断面図を描いてみた。

実験方法

実験には3個の成犬摘出喉頭を用いた。声帯上面を観察しやすくするため, 仮声帯より上部を切除した。気管側は輪状軟骨と第一気管輪との間で切除した。高速度カメラを用いて振動時の粘膜表面の1点の動きを波頭と関連づけて検討したものは声帯上面から観察したものがあるにすぎない^{11) 13)}。また鉛片を用いてX線ストロボスコーピーにより粘膜固有層・筋層の動きを観察した報告もあるが^{12) 19) 20) 22)}, 微細な粘膜の波状運動に鉛片の挿入が影響を与える可能性がある。以上の理由から著者らは3個の摘出喉頭の

図1 マークの位置

No 1 には右側声帯上面やや後方と右側下面中央部に, No 2 には右側声帯中央部でヒダ状粘膜隆起が形成される位置よりさらに下方にマークした。

声帯上面及び下面に, 分析の際の標識として27 G針を用いてピオクタニンあるいは墨汁でマークした。No 1の犬には右側声帯上面やや後方に, また右側下面中央部で遊離縁よりほんの少し下方にマークした。No 2には右側下面中央部でヒダ状粘膜隆起が形成される位置よりさらに下方と考えられる位置にマークした(図1)。No 3にはマークをしなかった。

吹鳴に必要な声門閉鎖を得るために両側声帯軟骨部を4-0 ナイロン糸で縫合した。声帯上面を外に向けてガラス箱に開けた小孔に喉頭を固定し, ガラス箱の側面よりビニールチューブを介して加湿した空気を送気した。喉頭を吹鳴させ上面は直接, 下面はガラス箱越しに秒速4000コマで高速度映画(日立 Hymac)に撮影した(図2)。声帯振動を観察したフィルムは1コマごとに film motion analyzer (Nac 社 MC-08)を用いて解析した。吹鳴音はテーブに録音しピッチを測定した。

実験結果

1. 声帯上面の観察

犬 No 1 の右声帯上面やや後方のマーク点および遊離縁の軌跡を図3に示す。マークを大きくつけ, マークの内側・外側の2点を分析した。ピッチは 479 Hz であった。

閉小期に波頭が下方より上内方へと進み, 対側の波頭と衝突した。衝突後, 波頭は対側のそ

図2 実験装置

ガラス箱に開けた小孔に摘出喉頭を固定し, 上面は直接, 下面はガラス箱越しに高速度カメラで撮影した。

れと共に上方へ移動した。次いで減衰しながら外方へ向かい、やがて消失した。

マークの内側は開大期には遊離縁より下方に位置し上方からは観察できなかった。閉小期にはいるとマーク内側が見え始め、遊離縁が合してしばらくすると再び観察できなくなった。マーク外側の点は振幅が小さく、内側の点に比べると約30度位相の遅れを認めた。マークの外側と内側の二点間の距離は閉小期に徐々に長くなった。

図3 犬 No 1 上面の軌跡

正中線より上が右側、下が左側を示す。上の破線よりマーク点外側縁、同内側縁、遊離縁右側、同左側を示す。

図4 犬 No 3 下面の軌跡

正中線より上が左側、下が右側を示す。図5, 6についても同様。正中より遊離縁、波頭、ヒダ状粘膜隆起の軌跡を示す。

2. 声帯下面の観察

1) 声帯膜様部中央の分析

犬 No 3 の声帯膜様部中央における遊離縁、粘膜波頭およびヒダ状粘膜隆起の軌跡を図4に示す。ピッチは 208 Hz であった。

ヒダ状粘膜隆起部に生じた波頭は上内方へ進んで遊離縁となり閉小期が開始した。やがて対側の波頭と正中で衝突し、合したまま上方へ移動した。衝突した際に下外方へ速やかに移動するやや小さい波頭が認められ、ヒダ状粘膜隆起部に達して消失した。この波頭は衝突に際して生じる反射波と考えられた。その後左右の遊離縁が離開を始める頃に次の周期の波頭が観察された(後述のように犬 No 1 では、左右の遊離縁が離開してしばらくしてから次の周期の波頭が観察された)。遊離縁より少し下方に前連合部より披裂軟骨声帯突起にかけて生じたヒダ状粘膜隆起は、振幅は小さいが遊離縁の開大・狭小に伴い振動した。ヒダ状粘膜隆起より下外方の粘膜には波状運動は認められなかった。

次に犬 No 1 の下面右声帯膜様部ほぼ中央のマーク点、遊離縁、粘膜波頭の軌跡を図5に示す。なおヒダ状粘膜隆起の軌跡は一部不明確な部分があったため記載しなかった。

マークはヒダ状粘膜隆起が観察される位置よ

図5 犬 No 1 下面マーク点の軌跡

破線がマーク点の軌跡を示す。他の線は正中より遊離縁と波頭の軌跡を示す。

り内側に認められた。マークは波頭がヒダ状粘膜隆起部より内方移動を開始するとしばらくして観察できなくなった。波頭が正中で衝突した後、下外方へ移動する波頭、すなわち反射波が認められるようになるとマークは見え始めた。その後マークと反射波の距離は徐々に長くなり、やがて再び徐々に短くなった後、観察できなくなった。位相に関してはマーク点はヒダ状粘膜隆起より遅かった。

最後に犬 No 2 におけるマーク（ヒダ状粘膜隆起より外側）、遊離縁、ヒダ状粘膜隆起の軌跡を図 6 に示す。なお粘膜波頭の軌跡は一部分が不明確なため記載しなかった。ピッチは 288Hz であった。

マーク点の振幅はヒダ状粘膜隆起のそれより小さく、動きはヒダ状粘膜隆起の動きに比して若干の位相の遅れを認めた。このことからマーク点の振動はヒダ状粘膜隆起に生じた振動の一部が下外方へ伝播した結果に過ぎないと考えられた。

考 察

声帯振動を声帯の上面および下面から観察し、粘膜の波頭、ヒダ状粘膜隆起等の動きについて分析した。また声帯粘膜表面につけた標識点の

図 6 犬 No 2 下面マーク点の軌跡
破線がマーク点の軌跡を示す。他の線は正中より遊離縁とヒダ状粘膜隆起の軌跡を示す。

分析を併せて行い、X線ストロボスコーピーによる前額断面の声帯振動の観察^{19) 20)}を参考にして声帯粘膜の垂直方向の動きを推定し、前額断面図を描いた（後述）。

声帯上面マークの動き(図 7)：犬 No 1 上面のマークの内側 (#4) は閉鎖期より開大期にかけて観察できない。開大期にはマークの内側は遊離縁よりも下方に移動するからである。閉小期には波頭 (#1') が遊離縁となり、内上方へ進むためマーク内側が観察できるようになる。切替¹⁵⁾は炭末を標識として人の声帯振動をストロボスコーピーにて観察した際に同様の所見を認め、その原因は声帯辺縁粘膜が開大期に内下方へ捲れ込むように移動するためであり、上方へ捲れ上がる運動はしないと述べた。吉田⁹⁾は声門が開き始める際に辺縁部はかえって内側方に捲れ込まれて下方に下がるように見える場合が

図 7 犬 No 1 上面の軌跡図、声帯上面模式図および前額断面図

#1: 波頭 #1': 次の周期の波頭
#2: 反射波 #3: ヒダ状粘膜隆起
#4: マーク内側縁 #4': マーク外側縁

生じると観察した。これは波頭が上部に盛り上がり、斬時この波頭による盛り上がりが外側に移動するからであるとした。また平野¹¹⁾は人声帯上面の粘膜表面の異なる部位の血管を標識として、高速度カメラで振動中の声帯を観察した。声帯上面の内側と外側の血管の2点間の距離が振動中に変化し、これは声帯上面の形態が変化するからであると、今回の実験と同様の結果を述べている。

声帯下面マークの動き(図8): 犬 No 1 の下面にマークした点(#4: ヒダ状粘膜隆起より内側に位置)は閉鎖期より開大期にかけて観察できる。閉鎖期に波頭(#1)は上方へ移動し、波頭よりもマークが下外方に位置するからである。開大期においては波頭は外方へ移動するが、マークは遊離縁(#5)より下方に位置するため

図8 犬 No 1 下面の軌跡図, 声帯下面模式図および前額断面図

- #1: 波頭 #1': 次の周期の波頭
#2: 反射波 #3: ヒダ状粘膜隆起
#4: マーク #5: 遊離縁

観察される。しかし、閉小期には波頭(#1')が上内方へと移動し波頭よりマークが上外方に位置するようになるから観察できない。

従来報告されてきた声帯振動の前額断面模式図(図9)^{10) 24) 25)}は、声帯縁に2つの隆起、すなわち上唇と下唇が存在し、開大期に外側に移動した上唇が、本来であれば閉小期に減衰しながら外側に移動するのに、内側に移動し対側の上唇と合するような印象を与える。そこで著者らの研究結果に基づいて一周期の声帯振動の前額断面図を図10に描いた。図10 a, b, c は閉鎖期を示す。図10 a は両側の波頭(#1)が正中で衝突した相で、下方の隆起はヒダ状粘膜隆起(#3)である。図10 b は正中で衝突した両側の波頭が合したまま上方へ押し上げられた相で、波頭の少し下方の小隆起は反射波(#2)を示す。

図9 垣田ら²⁵⁾による前額断面図

- a. 閉鎖期 b. 開大期
c. 最大開大期 d. 閉小期

図10 cは閉鎖期より開大期への移行の相で、反射波はヒダ状粘膜隆起部に達して消失している。図10 dは開大期を示す。波頭(#1)は外方へ減衰しながら移動し、ヒダ状粘膜隆起の少し上方に次の周期の波頭(#1')が出現している相である。図10 eは閉小期を示す。次の周期の波頭が内上方へ移動している相である。また前周期の波頭はさらに外側に移動している。

ヒダ状粘膜隆起と、この隆起より上方・下方のマーク点の分析結果からヒダ状粘膜隆起の位相が最も早いことがわかる。斉藤¹⁹⁾が報告した「より早く閉鎖し、より早く開大しようとする下唇より下方の隆起」は、ヒダ状粘膜隆起に相当すると考えられた。

以上、声帯下面からの観察を中心に声帯振動の際に生じる現象、すなわち粘膜の波状運動について犬摘出喉頭を用いて検討したので報告した。今後、さらに分析点、ピッチや強さを変化させ、ヒダ状粘膜隆起や波頭の動きを分析したいと考えている。

まとめ

犬摘出喉頭において、声帯上面および下面をビオクタニンあるいは墨汁でマークして、高速映画を用いて声帯振動を観察した。

1) 波状運動はヒダ状粘膜隆起あるいはこれよりほんの少し内側から起こり上方へ進んだ。従って、振動声帯においてヒダ状粘膜隆起の振動は他のどの部分よりも位相が早かった。

2) 粘膜の波頭は正中で衝突した後、対側の波頭と合して上方へ進んだ。衝突した際、その反射に相当する下外方へ進む粘膜の波頭が生じた。

3) 遊離縁が外方移動を開始した直後、もしくはしばらくして次の周期の波頭がヒダ状粘膜隆起部に生じた。

4) ヒダ状粘膜隆起より下外方の粘膜にみられた振動は、ヒダ状粘膜隆起に生じた振動の一部が下外方へ伝播した結果に過ぎないと考えられた。

5) 今回の実験結果に基づいて、振動声帯のより正確な前額断面図を描いた。

図10 著者らの前額断面図

a, b, c: 閉鎖期 d: 開大期 e: 閉小期
 #1: 波頭 #1': 次の周期の波頭
 #2: 反射波 #3: ヒダ状粘膜隆起

参考文献

- 1) Farnsworth DW : High-speed motion pictures of the human vocal cords. *Bell Laboratories Record* 18 : 203~208, 1940.
- 2) Timcke R, von Leden H and Moore GP : Laryngeal vibration; measurements of the glottic wave part I; the normal vibratory cycle. *Arch Otolaryngol* 68 : 1~19, 1958.
- 3) Rubin HJ and Cover LEM : Technique of high-speed photography of the larynx. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 69 : 1072~1082, 1960.
- 4) von Leden H : The mechanism of phonation. *Arch Otolaryngol* 74 : 72~83, 1961.
- 5) Moore GP, White FD and von Leden H : Ultra-high speed photography in laryngeal physiology. *J Speech Hear Res* 27 : 165~171, 1962.
- 6) 広戸幾一郎, 吉田義一, 中山 亨 : 声帯振動の高速度映画撮影について. *耳鼻臨床* 59 : 47~55, 1966.
- 7) 広戸幾一郎 : 発声機構の面よりみた喉頭の病態生理. *耳鼻臨床* 39 : 229~291, 1966.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 平野 実 : 音声外科の基礎と臨床. *耳鼻* 21 : 239~442, 1975.
- 11) Hirano M, Kakita Y, Kawasaki H, et al : Data from high-speed motion picture studies. *Vocal fold physiology* (ed by Stevens KN and Hirano M). pp 85~93, University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.
- 12) Fukuda H, Saito S, Isogai Y, et al : Vocal fold vibration in excised larynges viewed with an X-ray stroboscope and ultra-high-speed camera. *Vocal fold physiology contemporary research & clinical issues* (ed by Bless DM and Abbs JH). pp 238~252, College Hill Press, San Diego, 1983.
- 13) 松尾浩一 : 声帯前後軸の層構造を考慮した振動の分析. *耳鼻* 29 : 149~161, 1983.
- 14) 湯本英二 : 音声外科の立場から一声帯への手術侵襲と術後の声帯振動. *音声言語医学* 29 : 203~207, 1987.
- 15) 切替一郎 : 喉頭ストロボ活動写真撮影法による発声時における人間声帯の振動ならびに声門開閉の時間的關係に関する研究. *日耳鼻* 49 : 236~262, 1943.
- 16) Smith S : Remarks on the physiology of the vibrations of vocal cords. *Folia Phoniat* 6 : 166~178, 1954.
- 17) 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.
- 18) Baer T : Observation of the vocal fold vibration ; measurement of excised larynges. *Vocal fold physiology* (ed by Stevens KN and Hirano M). pp119~133, University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.
- 19) 斉藤成司 : 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.
- 20) 磯貝 豊 : X線ストロボスコーピーによる声帯振動の解析. *耳鼻* 27 : 883~930, 1981.
- 21) 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.
- 22) 川崎順久 : 多面的観察による声帯振動の基礎的研究. *日気食会報* 39 : 476~492, 1988.
- 23) 平野 実 : 振動体としての声帯の構造. *日耳鼻* 76 : 1341~1349, 1973.
- 24) 平野 実 : 声帯振動の基本的パターン. *日耳鼻* 77 : 108~111, 1974.
- 25) 垣田有紀, 平野 実, 川崎 洋, 他 : 声帯の層構造を考慮した振動状態の模式的表示—正常声帯の場合—. *日耳鼻* 79 : 1333~1340, 1976.

原稿受付: 平成元年12月4日
原稿採択: 平成2年6月15日
別刷請求先: 黒川浩伸
〒791-02 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