声帯振動の解析 —声帯下面の観察を中心に—

湯 本 英 二・黒 川 浩 伸・門 田 吉 見

Vocal Fold Vibration Viewed from Below

Eiji Yumoto, Hironobu Kurokawa and Yoshimi Kadota

The mucosal upheaval (MU) where the mucosal wave starts and propagates upward appears on the lower surface of the vocal fold during vibration. We investigated the location of the MU in response to variations in vocal fold tension and to contraction of the thyroarytenoid muscle (TA). Fresh excised larynxes (seven canine and four human) were used in the experiment. The lower surface of the vocal fold was tattooed with india ink as a reference point. Vocal fold vibration was observed either by high-speed filming or by videostroboscopy. Vocal fold tension was increased by cricothyroid approximation and TA contraction was obtained by its direct electrical stimulation. When vocal fold tension increased, the MU appeared medially or upward compared to its original position. With TA contraction, the lower surface of the vocal fold bulged medially and thus horizontal amplitude of the vibration became smaller. When TA contracted, the MU appeared less prominent and was located more downward compared to its position without TA contraction. These were basically common findings to both canine and human excised larynxes. Moreover, vocal fold vibration was stroboscopically observed through a tracheostoma in twelve patients. The MU occurred on the lower surface of the vocal fold as seen in the excised larynx and the mucosal wave was elicited upward from the MU.

Key words: 声帯振動, ヒダ状粘膜隆起, イヌ摘出喉頭, ヒト摘出喉頭, ヒト生体

I. は じ め に

声帯振動の本質は粘膜の波状運動(粘膜波動)であることが、過去の研究で明らかにされてきた^{1~3)}。しかし、これらの研究の多くは口腔側から声帯上面を観察したものであり、最も本質的な部分、すなわち、粘膜波動が声帯下面のどこでどのように起こるのかについては解明されていない。著者らは、イヌ摘出喉頭を用いて声帯振動を気管側から観察し、声帯下面における粘膜波動の詳細を検討してきた^{4~6)}。その結果、声帯下面にヒダ状の粘膜隆起が生じ、粘膜波動はこの隆起から上方に惹起されることが明らかになった。

本研究では、イヌおよびヒト摘出喉頭におけるヒダ状粘膜隆起の形成部位が甲状披裂筋(以下、内筋と略)や輪状甲状筋(以下、前筋と略)の収縮に際してどのように変化するかを検討した。また、ヒト生体の発声時声帯を気管側から観察し、摘出喉頭に生じるヒダ状粘膜隆起と比較した。

II. 方 法

(1) 摘出喉頭を用いた研究

1. 吹鳴および観察方法

摘出喉頭を上方は喉頭室で、下方は輪状軟骨下端で切断した後、両側披裂軟骨に4-0ナイロン糸を通して吹鳴に必要な声門閉鎖を得た。ガラス箱に設けた小孔に、空気が周囲から漏れないように粘土で声帯上面を外に向けて喉頭を固定した。側面から十分に加湿した空気をガラス箱に送って喉頭を吹鳴した。各喉頭の吹鳴に際して、次項に述べる異なる条件下でもできるだけ気流量(MFR)が一定となるようにした。ガラス板を通して声帯振動を気管側から毎秒約5000駒で高速度映画(Hymac, 日立,あるいはHycam II, Redlake Corp)に撮影した(図1A)。イヌ喉頭の一部とヒト喉頭では、高速度映画による撮影に加えてストロボ光(Type4914, Bruel & Kjaer)で照明してビデオに録画した。(図1B)。なお、後の観察の指標とするためにあらかじめ27G針を声帯下面に刺入し、墨汁で標識した。また撮影前後の吹鳴音を録音し、基本周波数(F₀)を測定した。

2. 吹鳴の条件

実験には摘出直後のイヌ喉頭7個、ヒト喉頭4個を用いた。喉頭摘出を行った患者の性、年齢と喉頭摘出を余儀なくされた原疾患を表に示す。なお、喉頭摘出の適応は本研究グループに属さない複数の医師が決定した。

図1 摘出喉頭の吹鳴法を示す。声帯下面の記録は高速映画撮影 (A), あるいはストロボ VTR (B) にて行った。

表 喉頭摘出を行った患者の性、年齢、原疾患

患者	性	年齢 (歳)	原疾患
HM	女	47	熱傷による下咽頭・食道完全閉鎖
SH	女	65	下咽頭頸部食道癌
SH	男	68	下咽頭癌, 40Gy 照射後
MY	男	63	舌癌広範切除後の肺炎を伴う高度誤嚥 2 年前に頸部転移癌のために 70Gy 照射後

吹鳴は以下の 4 条件で行った。

①自然吹鳴

②輪状甲状軟骨接近術 (以下、接近術と略)

前筋収縮時の効果, すなわち声帯緊張を得るために行った。上面からみた声帯模様部の長さを測定して声帯緊張度の指標とした。

③両側内筋刺激

25G 針のガイド下に双極有鉤ニクロム線電極を両側内筋に刺入した。吹鳴前に電気刺激 (8EN3301, 日本光電) を行い, 内筋が持続的に収縮することを確認した。刺激条件は電圧 7-50V, 持続時間は 1ms の矩形波, 刺激頻度は 30Hz とした。吹鳴時の流量を一定としたままで内筋を刺激してその前後の声帯振動を連続してビデオに録画した。

④接近術+両側内筋刺激

イヌ喉頭 3 個およびヒト喉頭 3 個で行った。内筋の刺激

図2 ヒト生体における声帯下面の観察法を示す。

方法は③と同様である。

時間を経ると内筋の収縮が次第に減弱してくるため, 実際の吹鳴は, ③, ④, ②, ①の順に行い, すべての吹鳴実験が喉頭摘出後 2 時間以内に終了するようにした。また, 適宜, 生理食塩水によって声帯表面を湿潤に保ち粘膜面が乾燥しないように留意した。

3. 声帯振動の分析

高速度撮影したフィルムは 16 駒/秒で繰り返して映写し, 声帯振動を定性的に観察した。その後, 分析に耐えるフィルムを選び, フィルムモーションアナライザ (MC-08, Nac) を用いて 1 駒毎に分析した。分析点は, 声帯前後軸に垂直で声帯遊離縁が最大振幅を示す点, または標識点を通る直線がヒダ状粘膜隆起, 粘膜波動に伴う波頭, 遊離縁と交差する点とした。本報告ではヒダ状粘膜隆起の形成部位に焦点を絞って述べる。

ビデオ録画した声帯振動も繰り返して定性的な観察を行った。また, 振動の安定した部分を選んで, 画像を 30 フレーム/秒でデジタル化して DF (digital fluorography) 装置 (DFP-50A, 東芝) に取り込み, 声門の最大開大時の画像をマスク像としてそれに引き続いた画像との間で次々に減算処理を行った。動きのあった部分のみが黒く描出されるようにした。

(2) ヒト生体における観察

なんらかの原疾患のために気管切開を行った患者 12 例を対象とした (頭頸部癌摘出術後一時的に気管切開孔を設けた 8 例, 甲状腺癌の浸潤のため両側反回神経を切断した 2 例, 原因不明の両側反回神経麻痺と下咽頭癌で根治照射後の喉頭浮腫の各 1 例)。なお, 全例とも声帯には病変を認めなかった。

気管切開孔から斜視型硬性鏡を挿入し, 連続光およびストロボ光で声帯振動を気管側から観察した (図 2)。画像はビデオに記録し, 定性的な分析を行った。また, 画像処理は摘出喉頭の場合と同様に行った。ただし, 発声時に喉頭が大きく挙上した症例では減算処理の意味が無いので, 画像処理を行わなかった場合もある。

無関位の発声と可能な場合は高音発声時の声帯振動を観察した。

Ⅲ. 結 果

(1) 声帯下面の形態について

実験に用いたイヌおよびヒト声帯はすべて肉眼的に異常を認めなかった。図3にイヌ摘出喉頭の無処置時、接近術時、右内筋刺激時の声帯下面の形態を示す。無処置時の声帯下面は紡錘形の丸天井様を呈する。接近術時には声帯が前後に伸長され丸天井様の形態を呈さない。内筋刺激時には刺激された右声帯下面が正中に膨隆し、無処置時とは逆に声門下腔に向けて張り出した。図4にヒト摘出喉頭の声門閉鎖時の声帯下面の形態を示す。イヌの形態と比較して、丸天井様の凹みが著しくない。

(2) イヌ摘出喉頭

図5Aに気管側からみた自然吹鳴時の声帯振動の1周期を示す(MFR170ml/秒, F_0 191Hz)。前連合から声帯突起にかけて紡錘状の粘膜の隆起(ヒダ状粘膜隆起)が認められ、粘膜波動はこのヒダ状粘膜隆起から内上方にのみ惹起された。図5Bに最大開大時、声門閉鎖時および両者の間で減算処理をして得られた画像を示す。ヒダ状粘膜隆起から内上方のみが黒く描出され、動きのあったことが示された。逆に、ヒダ状粘膜隆起を境としてその外側では動きがまったく無かったことがわかる。このことからヒダ状粘膜隆起は粘膜波動の起始部として重要であるといえる。

図6に自然吹鳴時、両側内筋刺激時、2mm声帯伸展時、4mm声帯伸展時の声帯振動の1駒を示す。MFRはどの条件下でも200ml/秒とした。声帯下面の形態は少しずつ

図3 イヌ摘出喉頭の無処置時(左)、接近術時(中央)、右内筋刺激時(右)の声帯下面の形態。

図4 ヒト摘出喉頭の声門閉鎖時の声帯下面の形態。左: HM, 47歳女性。右: SH, 68歳男性。

図 5 (A)

図 5 (B)

図 5 A : イヌ摘出喉頭自然吹鳴時の気管側からみた声帯振動の 1 周期.
B : 最大開大時, 声門閉鎖時および両者の間で減算処理をして得られた画像.

異なるものの, どの条件下でも前連合から声帯突起にかけてヒダ状粘膜隆起が認められ, 粘膜波動はそれより内上方に惹起された. 左声帯下面の点Aは, 自然吹鳴時ヒダ状粘膜隆起の外側にみられたが (A, 矢印), 内筋刺激時にはヒダ状粘膜隆起の上方に位置しその陰に隠れて見えなくなった (B). 接近術時には点Aは再びヒダ状粘膜隆起の外側に認められた (C, D, 矢印). 2 mm 伸展時の方が 4 mm 伸展時よりも点Aはヒダ状粘膜隆起に近接していた. 他の

喉頭においてもほぼ同様の結果であった.

(3) ヒト摘出喉頭

図 7 に症例 SH68 歳男性の両側内筋刺激時の振動声帯下面の 1 駒を示す. MFR は 200 ml/秒, F_0 は 120 Hz であった. イヌの場合と同様, 声帯前連合から声帯突起にかけてヒダ状粘膜隆起が生じ, 粘膜波動はその内上方で起こった. なお, 標識点は両側とも声帯遊離縁から 4 mm 下方である. 図 8 に症例 HM47 歳女性の異なった条件下での振動声

図6 イヌ摘出喉頭の、左から順に (A) 自然吹鳴時, (B) 両側内筋刺激時, (C) 2 mm 声帯伸展時, (D) 4 mm 声帯伸展時の声帯振動の高速度映画の1駒. 矢印は左声帯下面の標識点を示す.

図7 症例 SH68歳男性の両側内筋刺激時の振動声帯下面の高速度映画の1駒.

図8 症例 HM47歳女性の異なった条件下での振動声帯下面の形態. 連続光によるビデオ録画. 左から順に, 自然吹鳴時, 両側内筋刺激時, 声帯伸展時を示す.

図9 症例 SH65歳女性の振動声帯下面の形態，高速度映画の1駒．左から順に，自然吹鳴時，両側内筋刺激時，声帯伸展時，声帯伸展＋両側内筋刺激．矢印は右声帯上方の標識点を示す．

図10 64歳男性の楽な発声時（左）および高音発声時（右）の振動声帯下面．ストロボVTR像．

図11 図10と同一症例．楽な発声時における声門開大時，閉鎖時および両者の間で減算処理をして得られた像．

帯下面の形態を示す。連続光による照明下にビデオ録画したものである。MFRは200ml/秒と吹鳴条件にかかわらず一定に保った。自然吹鳴時、連続光の照明でもヒダ状粘膜隆起を認めることができた。それより内上方は高速で振動するため辺縁が不明瞭であった。両側内筋刺激時、声帯下面が正中に向かって膨隆し、声門下腔に向けて張り出した。その結果、水平方向の振幅は小さくなり、粘膜波動を観察しにくくなった。声帯伸展時(13mm→15mm)には、粘膜波動のみられる範囲が声帯遊離縁に局限した。

図9に症例SH65歳女性の異なった条件下の振動声帯下面の形態を示す。高速度映画に撮影した像の1駒である。MFRはどの条件下でも200ml/秒とした。右声帯遊離縁から2mm、4mm下方に2点標識した。自然吹鳴時、右ヒダ状粘膜隆起は内側標識点(矢印)のすぐ外側に形成された。内筋を刺激すると声帯下面が正中に膨隆してヒダ状粘膜隆起はやや不明瞭となった。内側標識点はヒダ状粘膜隆起の上方に隠れて観察されなくなった。声帯を伸展すると(12mm→14mm)、ヒダ状粘膜隆起は内側標識点に一致して出現した。声帯伸展と内筋刺激を行って吹鳴すると内側標識点は再びヒダ状粘膜隆起の上方に隠れて観察されなくなった。標識点との関係から、ヒダ状粘膜隆起は自然吹鳴時の位置と比較して内筋刺激時には外下方へ、声帯伸展時には内上方へ移動したことがわかる。

(4) ヒト生体における観察

気管切開孔に挿入した硬性鏡の周囲から空気が漏れるのを防ぐためにガーゼで軽く圧迫しながら発声させた。そのため、高音発声時の観察が可能であったのは半数程度に留まった。代表例(64歳、男性)を呈示する。ストロボ光による観察で、楽な発声時(F₀144Hz)に前連合から声帯突起にかけてヒダ状粘膜隆起を認め、その内上方で粘膜波動が観察された(図10左)。高音発声時(F₀240Hz)にはヒダ状粘膜隆起は声帯自由縁に近く見られ、楽な発声時と比べると不明瞭であった(図10右)。連続光による観察でも振動部と非振動部を明らかに区別することができた。両者の境界がヒダ状粘膜隆起に相当する。図11に楽な発声時における声門開大時、閉鎖時および両者の間で減算処理をして得られた像を示す。ヒダ状粘膜隆起から上内方のみが黒く描出され、動きのあったことが示された。

Ⅳ. 考 按

声帯振動の解析には、声帯上面だけでなく下面の観察も必要である。しかし声帯は甲状軟骨・輪状軟骨の枠組みの中にあり、しかも吹鳴のためには気管側から送気するという操作を要するので振動声帯下面の観察は容易でない。松下はイヌおよびヒト摘出喉頭を用いて気管側から振動中の声帯を初めて観察し、声帯下面に前連合から声帯突起にかけてヒダ状の粘膜隆起が生じ、これより上方に粘膜波動が惹起されることを報告した^{7,8)}。その後、Baer⁹⁾、福田ら¹⁰⁾はイヌ摘出喉頭を用いて振動声帯下面を観察したが、ヒダ状粘膜隆起については触れていない。

著者らは、イヌ摘出喉頭を用いた実験からヒダ状粘膜隆起は粘膜波動の起始部として重要であること、声帯の緊張を増加させるとより上方に生じ声帯遊離縁に近づくことを報告してきた。^{4,6)} 本報告では、まず、同一の摘出喉頭を用いて声帯緊張の増加と内筋収縮による声帯下面の形態とヒダ状粘膜隆起を中心とした振動様式の変化について検討した。前筋の作用は接近術で代用し、内筋の作用は筋肉を直接電気刺激することによって得た。摘出後2時間以内であれば少しずつ刺激電圧を上げることで筋の収縮が得られた。ただしこの収縮が生理的な範囲かどうかについては不明である。

自然吹鳴時、前連合から声帯突起にかけて紡錘状にヒダ状粘膜隆起が認められ、粘膜波動はその上方でのみ惹起された。接近術により声帯が前後に伸展され丸天井様でなくなり、吹鳴するとヒダ状粘膜隆起は上方のより遊離縁に近い部分に生じた。内筋を刺激すると声帯下面が正中に膨隆し無処置時とは逆に声門下腔に向けて張り出した。吹鳴時にはヒダ状粘膜隆起はやや不明瞭となり、自然吹鳴時よりも下方に生じた。声門下腔への張り出しによって水平方向の振幅は小さくなるが、ヒダ状粘膜隆起が下方に生じることから、粘膜波動はより広範囲に生じると考えられる。これらの観察結果はヒト摘出喉頭においても同様であった。症例SH(68歳、男性)では内筋刺激時にも著明なヒダ状粘膜隆起が認められた(図7)。この例では摘出時の手術操作のためか、内筋の収縮が肉眼的にごくわずかであり自然吹鳴時に近い所見を呈したと考えられた。症例SH(65歳、女性)にみられたように(図9)、声帯の伸展と内筋刺激を同時に行うとそれぞれを別個に行ったときの両方の特徴が観察された。すなわち、声門は前後に伸長され同時に声帯下面の膨隆によってヒダ状粘膜隆起がやや不明瞭となった。自然吹鳴時におけるヒダ状粘膜隆起の位置との関係は明らかにできなかった。標識点との関係からどの条件下においてもヒダ状粘膜隆起は、声帯様部の中央付近では無処置時の声帯遊離縁から2～4mm下方に生じた。

Salimbeniら¹¹⁾はヒト生体における発声中の声帯下面を気管切開孔から観察し、“subglottic vault”の基部から粘膜波動が起こったと述べた。また、Hiranoら¹²⁾は軟性ファイバースコープを用いて観察し、発声中の声帯下面にヒダ状粘膜隆起が生じたが、摘出喉頭にみられるヒダ状粘膜隆起と比較して不明瞭であると報告した。今回の観察には斜視型硬性鏡を用いたので像の解像度はファイバースコープよりも格段にすぐれている。著者らの観察では、ヒト生体の楽な高さでの発声中、声帯下面に明らかにヒダ状粘膜隆起を認めることができた。開大時と閉鎖時のストロボ像の減算処理によって得られた画像(図11)で明かである。すなわち、ヒダ状粘膜隆起を境としてその内側でのみ動きのあったことが示された。胸声区での高音発声時には声帯遊離縁の近くにヒダ状粘膜隆起がみられたが、楽な発声時よりも不明瞭であった(図10)。この高音発声時の声帯像は、ヒト摘出喉頭を用いて接近術と内筋刺激を同時に

行って吹鳴したときの声帯像(図9)と非常によく似ていることがわかる。

声帯粘膜の移動性の大きな部分に粘膜波動が生じ、下方に向かって移動性が小さくなる部位にヒダ状粘膜隆起が形成されると推定される。門田ら¹³⁾はイヌ声帯遊離縁から3mm付近で粘膜移動性が最低になったと報告しており、本稿の結果と矛盾しない。また、前筋や内筋の収縮が粘膜の移動性にどのように影響するのか、今後の研究課題と考える。

V. ま と め

イヌおよびヒト摘出喉頭、さらにヒト生体の発声時声帯を気管側から観察した。

1) イヌ摘出喉頭では、前連合から声帯突起にかけて紡錘状の粘膜の隆起、ヒダ状粘膜隆起を認め、粘膜波動はここから上方にのみ惹起された。内筋刺激時には声帯下面が正中に向けて膨隆し、ヒダ状粘膜隆起は自然吹鳴時よりも下方に生じた。声帯を伸展するとヒダ状粘膜隆起は自然吹鳴時よりも上方に生じた。

2) ヒト摘出喉頭でもイヌの場合と同様にヒダ状粘膜隆起が生じ、粘膜波動はその内上方で起こった。ヒダ状粘膜隆起は、自然吹鳴時の位置と比較して、内筋刺激時には外下方へ、声帯伸展時には内上方へ移動した。また、内筋刺激時には声帯下面が正中に膨隆するので水平方向の振幅が小さくなった。

3) ヒト生体においても発声時にヒダ状粘膜隆起が生じ、粘膜波動はその内上方にみられた。高音発声時(胸声区)、ヒダ状粘膜隆起は声帯遊離縁の近くにみられ、楽な発声時と比較して不明瞭であった。

参 考 文 献

- 1) Timcke R et al: Laryngeal vibration. measurements of the glottic wave, Part I. the normal vibratory cycle. Arch Otolaryngol 68: 1~19, 1958.
- 2) 廣戸幾一郎: 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.
- 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) 湯本英二ほか: 気管側からみた正常声帯の振動様式. 耳鼻臨床 82: 1473~1477, 1989.
- 5) 黒川浩伸ほか: 声帯の粘膜波状運動について. 耳鼻臨床 84: 105~112, 1991.
- 6) 黒川浩伸ほか: 気管側からみた犬摘出喉頭の声帯振動—ヒダ状粘膜隆起の生じる位置を中心に—. 喉頭 3: 4~9, 1991.
- 7) 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.
- 8) Matsushita H: The vibratory mode of the vocal folds in the excised larynx. Folia Phoniat 27: 7~18, 1975.
- 9) Baer T: Observation of vocal fold vibration. measurement of excised larynges. (Stevens K & Hirano M et), 119~133, University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.
- 10) 福田宏之ほか: 表面構造からみた声帯振動の解析. 音声言語医学 22: 230~236, 1981.
- 11) Salimbeni C & Alajmo E: Laryngostroboscopic observations by means of inferior glottoscopy. J Laryngol Otol 99: 801~803, 1985.
- 12) Hirano M et al: Vibratory behaviour of human vocal folds viewed from below. (Gauffin J & Hammarberg B ed), 1~6, Singer Publishing Group, Inc San Diego, 1991.
- 13) 門田吉見ほか: 粘膜移動性からみたヒダ状粘膜隆起の形成部位. 喉頭 4: 142~146, 1992.

別刷請求先 〒791-02 温泉郡重信町志津川454

愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室 湯本英二