発声時の喉頭潤滑における気道液の動態

—発声の開始時・終了時の動態ならびに発声の反復や嚥下との関連について—

川井田 政弘*, 福田 宏之*, 加納 滋*
大木 和明*, 紀太 康一*, 川崎 順久*
斎藤 成司*, 都築 達**, 藤岡 正**

Dynamic Movement of the Air Tract Fluid Lubricating the Larynx at the Start and End of the Phonation, in Correlation with Repeated Phonation and Swallowing

Masahiro Kawaida, M.D.,* Hiroyuki Fukuda, M.D.,* Shigeru Kano, M.D.,*
Kazuaki Oki, M.D.,* Koichi Kita, M.D.,* Yoshihisa Kawasaki, M.D.,*
Shigeji Saito, M.D.,* Tohru Tsuzuki, M.D.,** and Tadashi Fujioka, M.D.**

*Department of Otolaryngology, Keio University School of Medicine, Tokyo,

and **Department of Otolaryngology, Dokkyo University School

of Medicine Koshigaya Hospital, Koshigaya

Experiments using the excised canine larynges and experimental air tract fluid were conducted to clarify the dynamic movement of the air tract fluid to lubricate the larynx at the start and end of the phonation. And clinical observations by use of laryngostroboscopy were also conducted to investigate the correlation between the dynamic movement of the air tract fluid and repeated phonation or swallowing.

From the results obtained, it is revealed that the air tract fluid from the subglottis comes up on the glottis at the moment of the onset of phonation. The fluid from the subglottis is then mixed with the fluid on the glottis. The mixed fluid forms a rotating fluid column on the upper surface of vocal folds laterally. At the end of the phonation, the column decomposes and mostly flows backward to the subglottis, lubricating the whole vocal folds. And the amount of the air tract fluid on the glottis increases with repeated phonation; the excessive air tract fluid on the glottis is excreted into the esophagus by swallowing.

Key words : 気道液, 喉頭潤滑, 吹鳴実験, 発声, 喉頭ストロボビデオグラフィ

I. はじめに

発声中の声帯は高頻度で振動している。したがって、潤滑と冷却という作用が必要であり、

*慶應義塾大学医学部耳鼻咽喉科学教室, **獨協医科大学越谷病院耳鼻咽喉科

別刷請求: 〒116 東京都荒川区西日暮里2丁目18番
4号 日暮里駅前ツインビル 川井田政弘

投稿受付: 1988年7月19日

発声時の喉頭潤滑においても、気道液が重要な役割を果たしていると考えられる^{1,2)}。また、発声時の喉頭潤滑を担う気道液は声帯振動と密接に関連した動態を示すことが示唆されている³⁾。

発声時の喉頭潤滑では、声門閉鎖中の声帯振動が行われている時期(発声中)だけでなく、開大していた声門が閉鎖して声帯振動が開始されるまでの時期(発声開始時)と声帯振動が終

了して声門が開大されるまでの時期（発声終了時）も含めて気道液の動態を考える必要があると思われる。さらに、発声の反復や嚥下などとの関連も考慮すべきである。

今回、正常なイヌ摘出喉頭と擬似気道液を用いて、吹鳴法による発声時の喉頭潤滑の実験モデルを作製し、X線透視下に前額面から観察・記録し、気道液の潤滑動態を調べた。また、各種喉頭内視鏡による臨床的な観察・記録の結果と併せ、特に発声開始時と発声終了時の気道液の動態、および発声の反復や嚥下による声門上気道液の動態や変化について検討した。

II. 研究方法および臨床的観察の対象

正常な成犬の摘出喉頭の声帯を後部で縫合して声門を閉鎖し、気管側から声門下にビニールチューブの一端を挿入し、他端を流量計が付属した空気ポンペに接続し、4l/分の流量で送気して吹鳴させた。擬似気道液として、液状のX線造影剤である38%ヨード化ケシ油脂肪酸エステル（リピオドールウルトラフルイド®）を用いた。また、声門下に存在する気道液を想定するために2つの方法を試みた。1つは外側から声門下に注射針を刺入し、その先端が声門下粘膜に接するように固定して擬似気道液を注入した上で吹鳴させたもので、発声開始時の声門下から声門上への気道液の動態をシミュレーションした（吹鳴開始時の擬似気道液の動態）。もう一つは、声門下における擬似気道液の分布が均一になるように送気回路の途中にネブライザー装置を接続し、擬似気道液を aerosol 状にして気管側から送り込んで40秒間の吹鳴を行った後に吹鳴を終了させ、発声終了時の声門上気道液の動態をシミュレーションした（吹鳴終了時の擬似気道液の動態）。いずれもビデオカメラを用いて上面からモニターしながら、X線透視下に前額面から観察し、16 mm シネフィルムに記録した（図1）。

また、ほぼ正常な声帯所見を有する被験者（被験者1：40歳，男性）および慢性声帯炎の被験者（被験者2：52歳，男性）の計2名に4%塩酸リドカイン液による咽喉頭の表面麻酔を行った後、カーブドラリングテレスコープ（PENTAX MLC-1）や軟性喉頭ファイバース

図1 イヌ摘出喉頭と擬似気道液を用いた吹鳴実験の外景

ビデオカメラを用いて上面からモニターしながら、X線透視下に前額面から観察している。

コープ（町田製 FLT-6）と家庭用ビデオカメラ（JVC GX-N4CH ならびに PENTAX PC-K020）による VTR システムと組み合わせて、150W ハロゲンランプの通常光源および高輝度喉頭ストロボスコープ（Brüel & Kjaer 製 type 4914）を光源として使用し、無関位発声を繰り返させて臨床的に観察・記録を行った。なお、被験者はいずれも座位で内視鏡観察された。

III. 結 果

1) イヌ摘出喉頭での吹鳴開始時の擬似気道液の動態（声門下に刺入した注射針から擬似気道液を注入して吹鳴させた直後の動態）

注射針は気管右側から刺入させ、その先端は左声帯直下の声門下粘膜に接している（図2 a）。吹鳴開始前に擬似気道液が注入され、液は左声帯下面近くに達している（図2 b）。その後

図2 イヌ摘出喉頭での吹鳴開始時の擬似気道液の動態
声門下に刺入した注射針から擬似気道液（液状のX線造影剤）を注入して吹鳴させている。

- a：注射針の先端は左声帯直下の声門下粘膜に接している。
- b：擬似気道液が注入されている。
- c：送気して吹鳴させると擬似気道液は瞬時に声門上に運ばれ、液の貯溜による mass が形成される。左声帯上面に生じた mass は右の mass より大きい。

に送気を開始して吹鳴させると、液は瞬時に声門上に運ばれて声帯上面側方から喉頭室にかけて液の貯溜による mass が形成された。この mass は擬似気道液がその声門下に注入されている左声帯上面側方で大きく、右声帯上面側方では小さなものであった（図2 c）。

2) イヌ摘出喉頭での吹鳴終了時の擬似気道液の動態（擬似気道液の aerosol とともに送気して吹鳴させ、その吹鳴終了後の動態）

X線透視下に前額面から観察すると、両側の声帯上面側方から喉頭室にかけて擬似気道液の貯溜による左右ほぼ同じ大きさの mass が徐々に形成された。図3 a は吹鳴開始直後、図3 b は吹鳴開始後40秒経過した所見を示す。なお、上面から観察すると、両側の声帯上面側方から喉頭室にかけて声帯の長軸方向にほぼ沿って擬似気道液の回転する液柱が形成されていた。

吹鳴開始後40秒経過した後、送気を停止して吹鳴を中止した。図3 c は吹鳴中止後10秒経過後の所見を示す。両側の声帯上面側方に形成されていた擬似気道液の mass はゆっくりと喉頭室付近に移動して貯溜した。また、擬似気道液

の一部は両声帯間を下方に落下する所見が認められた。また、送気を再開して吹鳴させると両声帯間を落下していた擬似気道液は瞬時に両側声帯上面に運ばれ、喉頭室付近に貯溜していた擬似気道液とともに吹鳴中止前と同様な mass を再び形成した（図3 d）。

3) 各種喉頭内視鏡による臨床的観察

ほぼ正常な声帯所見を有する被験者1の軟性喉頭ファイバースコープを用いた喉頭ストロボビデオグラフィーによる声帯振動のスローモーション像（以下、略して単にストロボ像）のうち、3つの異なる発声時期の各1フレームを図4に示す。図4 a は無関位発声の開始直後である。ややわかりにくいですが、実際のビデオモニターテレビ画面上では両側の声帯上面で粘膜波動が消失する部位に沿って、その側方に気道液による液柱様の貯溜が認められた。図4 b は無関位発声を10回繰り返させた時点のストロボ像の1フレームである。声門上気道液は発声の反復とともに徐々に増加し、両側の声帯上面側に形成される液柱様の貯溜が顕著となった。図4 c は引き続いて嚥下させ、その直後の無関位発

図3 イヌ摘出喉頭での吹鳴終了時の擬似気道液の動態

擬似気道液(液状のX線造影剤)の aerosol とともに送気させ、その吹鳴終了後の動態を観察している。

- a: 吹鳴開始直後。
- b: 吹鳴開始後40秒経過後。両側声帯上面側方から喉頭室にかけて擬似気道液の貯溜による左右ほぼ同じ大きさの mass が形成される。
- c: 吹鳴終了後10秒経過後。擬似気道液の一部は両声帯間を下方に落下する。
- d: 吹鳴再開後。吹鳴終了前と同様な擬似気道液の mass が形成されている。

声時のストロボ像の1フレームである。過剰になった声門上気道液は嚥下作用により食道に排出され、図4 aと同程度の量まで減少した。

通常光源下にカーブドラリングテレスコープを用いて観察した慢性声帯炎の被験者2の発声中の声帯所見を図5に示す。図5 aは無関位発声開始直後であり、両側の声帯上面側方に気道液の貯溜が認められた。図5 bは無関位発声を8回繰り返させた時点の発声中の声帯所見である。声門上気道液は著しく増加した。この被験者2の声門上気道液はあわ立ちがみられ、図5 bでは特に顕著に認められている。

図5 bの観察がなされた直後の発声終了時の

図4 ほぼ正常な両側声帯所見を呈する被験者1の喉頭ストロボビデオグラフィ

軟性喉頭ファイバースコープを用いて得られたストロボ像のうち、3つの異なる発声時期の各フレームを示す。

- a: 無関位発声の開始直後。両側声帯上面側方に気道液の液柱様貯溜がみられる。
- b: 無関位発声を10回繰り返させた時点。声門上気道液は増加し、両側声帯上面側方の液柱様貯溜は顕著になっている。
- c: 引き続いて嚥下させ、その直後の無関位発声時。声門上気道液は減少している。

声帯所見を図6に示す。発声中止に引き続いて声門は開大し、声門上気道液の一部は拡散した状態で声帯上面にとどまるが、その他は両側の声帯全体を覆いながら声門下へ落下する所見が認められた。そして、再び発声させると、落下

図5 慢性声帯炎を呈する被験者2の発声中のカーブドラリングテレスコープ所見

- a: 無関位発声開始直後。両側の声帯上面側方に気道液の貯溜が認められる。
- b: 無関位発声を8回繰り返させた時点。声門上気道液は著明に増加した。また、あわ立ちが顕著である。

した気道液は閉鎖した声門を通過して声門上に現れ、両側の声帯上面側方に貯溜した。

IV. 考 按

イヌ摘出喉頭を用いた吹鳴実験において、X線透視下に前額面からの観察で声門下に刺入された注射針に擬似気道液を注入して吹鳴させると、吹鳴開始とともに瞬時に声門上に運ばれ、声帯上面側方から喉頭室にかけて擬似気道液の貯溜による mass が形成された。したがって、声門下の気道液の一部は発声開始時には呼気流によって声門上に瞬時に運ばれるものと推測される。ただし、この場合、声帯上面側方に生じる擬似気道液の mass の大きさには左右差があっ

た。注射針が刺入されて、その先端が接しているのは左声帯下面の声門下であり、左声帯上面側方に生じた mass の方が大きいものであった。これは、この実験方法では声門下に存在する擬似気道液の分布が不均一であるためと思われる。

そこで、吹鳴のための送気回路の途中にネブライザー装置を接続することにより、擬似気道液を aerosol 状にして声門下の擬似気道液の分布を均一にすることを試みた。この場合、声帯上面側方から喉頭室にかけて左右ほぼ同じ大きさの mass が徐々に形成された。吹鳴の中止により擬似気道液の大部分はさらに喉頭室方向に移動して貯溜したが、一部は両声帯間を声門下方向に落下した。吹鳴実験では声帯後方で両側声帯が縫合されているために、実際の発声終了時のように声門開大をシミュレーションできない。したがって、声門開大が生じれば、声門下に落下する擬似気道液の割合がかなり多くなるものと推測される。一方、再び送気して吹鳴させると声門下方向に落下しつつあった擬似気道液は瞬時に声門上に運ばれた。

声帯振動の本質は声帯下面から上面に向かう進行波 (travelling wave) であると考えられている^{4,5)}。したがって、声門下、特に声帯下面からその直下付近の気道液の大部分は発声開始時に呼気流により瞬時に声門上に運ばれるが、発声中は少量の気道液がこの声帯粘膜の進行波に乗って少しずつ声帯上面側方に運ばれていくものと考えられる。

実際に被験者1, 2における臨床的観察でも無関位発声を繰り返すうちに声門上気道液の増加がみられた。増加した気道液の大部分は発声中止後に開大した声門を声帯全体を覆いながら声門下に落下するが、発声再開で閉鎖した声門を通過してそのほとんどが再び声門上に現れた。したがって、吹鳴実験の結果から推測されたように、発声終了時には声門開大により声門下に落下する気道液の割合はかなり多いと言える。そして、落下した気道液の大部分は発声開始時に瞬時に呼気流により声門上に現れるとともに、発声中に気道液は徐々に増加していると言える。

ところで、被験者はいずれも咽喉頭の表面麻

図6 被験者2における発声終了時のカーブドラリングテレスコープ所見
発声中止に引き続いて声門は開大し、声門上気道液の一部は声帯上面に拡散した状態でとどまるが、その他は声帯全体を覆いながら声門下に落下する。

酔がなされ、喉頭内視鏡が挿入されているため、内視鏡挿入という刺激に対して、気道の防御機構が働いて気道分泌は亢進しており、この臨床的所見は必ずしも生理的な状態を反映しているとはいえない。しかし、それは程度の差の問題と考えられ、生理的な状態でも発声の反復で声門上気道液は徐々に増加していくものと考えられる。また、慢性声帯炎の被験者2では声門上気道液のあわ立ちが顕著であった。気道液のあわ立ちとしては声帯結節の foaming 現象が知られている⁶⁾。foaming 現象は声帯下面から上面に向かって運ばれる気道液が結節の存在のために乱流を生じるためと推測されるが、この場合のあわ立ちは局所的なものである。一般に液体の表面張力が大きくなるとあわ立ちしやすくなるとされる⁷⁾。被験者2の場合、慢性炎症が喉頭の腺組織（喉頭腺）に影響を及ぼし、そこから分泌される気道液のレオロジカルな性状に変化を引き起こし、表面張力が低下したという可能性も考えられる。いずれにしても喉頭潤滑における気道液の動態を考える時、レオロジーの観点からも今後は検討していくべきであろう。

Nassar ら⁸⁾や佐藤⁹⁾はヒト喉頭の組織学的研究により喉頭の腺組織（喉頭腺）の分布を調べ

ている。それによれば、声帯膜様部の粘膜上皮下には腺組織はほとんど存在せず、仮声帯や喉頭小嚢を含めた喉頭室、後部声門、声門下部の粘膜に多数存在するとされる。したがって、声帯の上下から、さらに一部は後方から喉頭潤滑を担う気道液が供給されるものと推測される。

発声終了時の声門開大で声門上気道液は声門下に落下するが、声門下部にとどまり、再び発声開始時に声門上に現れるわけであるが、声門下部でとどまって下気道まで落下していかない理由について次に考えてみたい。声帯振動が生じる声帯膜様部は重層扁平上皮であり、声門下部の粘膜は多列線毛円柱上皮である⁹⁾。発声終了時の声門開大で重力の法則にしたがって声門上の気道液は表面平滑な重層扁平上皮の声帯を滑り落ちるように声門下に落下するものの、声門下部粘膜の線毛上皮に捕捉されるものと考えられる。気道液には粘着性があり、主としてこの粘着性は吸気とともに気道に侵入した微粒子の捕捉に役割を果たすとされる¹⁰⁾が、線毛上皮に付着するためにも必要なレオロジカルな性状と思われる。

最後に増加して過剰になった気道液の行方について考えてみたい。被験者1における臨床的

観察では無関位発声を反復させて徐々に声門上気道液は増加したが、嚥下させることにより無関位発声開始直後と同程度にまで減少した。成田ら¹¹⁾は aerosol 吸入シネシンチグラフィー (aerosol inhalation cine scintigraphy)¹²⁾ を用いて下気道における粘液線毛輸送機構の検討を行い、健常者では吸入された RI-aerosol は肺野に均等に分布した後、気道の粘液線毛輸送機構により下気道を上行し、喉頭まで達すると無意識のうちに嚥下されて食道から胃へと排出されたと述べている。下気道の気道液と喉頭潤滑に関与する気道液とを同一と考えて良いかという問題はあがるが、おそらくは生理的な状態でも嚥下により食道に排出されているものと思われ、嚥下により無意識のうちに喉頭潤滑を担う気道液のクリアランスがなされているものと推測される。

V. おわりに

擬似気道液とイヌ摘出喉頭を用いた吹鳴実験と喉頭内視鏡を用いた臨床的観察を行い、発声時の喉頭潤滑における気道液の動態のうち、特に発声の開始時と終了時の動態、さらに発声の反復や嚥下による変化について検討した。

本論文の要旨の一部は第22回喉頭基礎問題研究会、第88回日本耳鼻咽喉科学会総会・学術講演会（ビデオ演題）において発表した。

文 献

- 1) 市川 忠：喉頭の潤滑作用に関する基礎的研究。耳鼻, 59: 38-52, 1982.
- 2) 福田宏之, 斎藤成司, 都築 達・他：発声機構と気道液。日気食会報, 35: 101-106, 1984.
- 3) 川井田政弘：発声時の喉頭潤滑における気道液の動態的研究。日気食会報, 38: 11-30, 1987.
- 4) Saito, S., Fukuda, H., Isogai, Y., et al.: X-ray stroboscopy. Vocal Fold Physiology (ed. by Stevens, K.N., and Hirano, M.), pp. 95-106, University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.
- 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) 斎藤成司：音声外科—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: 171-384, 1977.
- 7) 桜井俊男：新版潤滑の物理化学（第2版）, pp. 213-216, 幸書房, 東京, 1983.
- 8) Nassar, V.H., and Bridger, G.P.: Topography of the laryngeal mucous glands. Arch. Otolaryngol., 94: 490-498, 1971.
- 9) 佐藤公則：喉頭の立体解剖—大切片連続段階標本による研究—。耳鼻, 33: 153-182, 1987.
- 10) 馬場美智子, 三上正志, 中村清一, 長岡 滋・他：痰の粘着性について。日気食会報, 39: 203, 1988.
- 11) 成田亘啓, 三上理一郎, 澤木政好・他：気道防御機構。日気食会報, 38: 163-170, 1987.
- 12) 井沢豊春, 手島建夫, 平野富男・他：放射性エロソール吸入肺シネシンチグラフィー序説。核医学, 18: 167-173, 1981.