論 説

喉頭移植の問題点

—発声機能から見た再生喉頭神経と外喉頭筋—

うえ た がお あき
上 田 直 昭*

I はじめに

近来、喉頭の外傷、腫瘍の増加にともない、喉頭の観血的療法においても、喉頭機能を可及的に保存、乃至は再建しようという意図の下に、種々の型の喉頭部分切除・修復術、形成術が試みられているが、喉頭移植の考え方もこれに関連する一工夫である。

喉頭移植の最終目標は、移植した喉頭が可及的に正常に近い機能を発揮することを期待するにあるが、これには、喉頭神経再生の問題を始めとして、多くの問題点が纏絡し、これらの解決が必要となってくる。

今回、私は、喉頭移植研究の一環として、移植後喉頭の音声生成機能に関する多くの問題点の中から、

(1) 移植された（あるいは麻痺した）喉頭が再生した喉頭の神経群によって再支配された場合、その音声機能が果して正常回復を示しうるか否か？

(2) 喉頭に附着する多くの外喉頭筋群をどのように処理すれば、移植後喉頭の音声機能回復に有利であろうか？

この2つの疑問点に注目し、これらに対して聯かの approach を試みたので、その内容、成績の大略を報告し、これらの問題点に関する私の得た印象を述べる次第である。

II 再生喉頭神経と音声機能

1 研究内容与方法

(a) 研究材料

今回の実験において、私は、体重 16~23kg、延 30 匹の、正常喉頭を有する成犬を使用した。これらは、便宜上、次の 4 群に分類し、操作を行なった。

(i) A 群：正常喉頭を有する成犬 10 匹

(ii) B 群：1 側反回神経および同側上喉頭神経外枝が再生した状態にある成犬 10 匹。すなわち、これらの神経再生は、喉頭外にて神経切

断後、直ちに、Epineural suture 法による喉頭外端々吻合により実験的に生成された。

(iii) C 群：1 側反回神経および同側上喉頭神経外枝が麻痺した状態にある成犬 5 匹。すなわち、これらの神経麻痺は、広範囲にわたる神経切除を喉頭外にて行ない、再生不能化せしめることにより実験的に生成された。

(iv) D 群：1 側反回神経のみが再生した状態にあり、同側上喉頭神経外枝は正常状態にある成犬 5 匹。

Regenerated Laryngeal Nerves and Extrinsic Laryngeal Muscles in Voice Function of the Transplanted Larynx

Naoaki Ueda

*広島大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：黒住静之教授）

なお、B, C, D, の3群の反対側反回神経、上喉頭神経外枝は正常のままとした。この内で、B群は、術後8～12ヶ月間、C, D群は術後7～9ヶ月間にわたり飼育生存され、この間、次に述べる如き自然音声誘発による音声検査が、1ヶ月に少なくとも1回の割合で施行された。なお、B, D群に関しては、術後生存期間中に経時的になされた内喉頭筋筋電図検査、飼育期間終了後の生電的ならびに組織学的検索により、縫合神経の再生が確認されている。

(b) 私の行なった自然音声誘発法

今回の研究に際しては、動物の自然音声を一定の条件下に捕えることが必要であったため、私は、次の如き浅麻酔下自然音声誘発法を工夫した。すなわち、静脈麻酔下で成犬を背臥位とし、広く開口した状態のまま固定しておく。この際、舌、喉頭蓋に縫合操作を加え、口腔外より容易に直視できるよう声門を口腔内に大きく露出しておく。更に、第1～2気管輪の間で、経皮的に声門下圧測定用鋼鉄針を気管内に正中線上挿入固定する。

麻酔が浅くなった時期に、機械的疼痛刺激を動物に加えると、動物は悲鳴に似た発声を行なうことが多いが、この方法では音声安定せず、動物もしばしば暴れて実験続行が不能となることが多い。従って、私は、呼吸に際して声門運動が開始する時期を狙って、Isoproterenol hydrochloride (以下IHと略す) を、0.2mg/kgの割合で皮下注射した。

犬の個体差、あるいは麻酔の深度により、多少の違いはあるが、IH注射後、呼吸は次第に早く強くなり、正常成犬においては、IH注射後1～2分後で激しい呼吸運動は音声をとまなうに至る。

このようにして生じた音声は、声門より40cm離れた位置にsetされた Condenser microphone により採集され、第1図に示す如き装置により、声の強さが音圧レベル (db. SPL) で、声の高さ (ピッチ) が cps 単位で測定され、同時に発声時声門下圧が cmH_2O 単位で

第1図：実験装置のダイアグラム

第2図：正常成犬(A群)における誘発音声
V：誘発音声，P：声門下圧，
T：時間（1目盛 10msec）

測定された。なお、音声採集終了後、口腔内に Pneumotachograph が直ちに挿入され、口腔、鼻腔は外側より固くしばることにより閉鎖され、かかる方法により、発声時の喉頭空気流量が cc/sec . 単位で声門下圧と共に同時記録された。

私の行なった音声誘発による正常成犬群 (A群) の発声様式について総括すると、IHにより増強された呼吸運動に際して、声帯は前後に伸展されて緊張を増し、かつ次第に内転性を示すようになるが、当初は、緊張した声帯間かなりの間隙を残し、この際、弱々しい口笛音、

あるいは whine に似た音声が生じ (第2図-1), 後に, 声帯は左右完全に相接するようになって, 本来の犬の音声に移行する. 先ず, 繊細な感じのする, 中等度の強さの音声, 円滑な起声の下に始まり (第2図-2), 後に, 声は強く高くなり (第2図-3), この間, 鼻尖部や口唇粘膜に, 中等度の機械的疼痛刺激を加えると, 声の強さは最大となる. かかる誘発音声は, 発声開始後4~5分間持続するが, それ以後では, IH の強烈な影響による犬の疲労の関係もあって嗶声の傾向となり, 声の強さ, ピッチも低下する (第2図-4). 従って, 今回の検索に際しては, 嗶声傾向となる以前の声音が対象とされた. なお, この検査においては, 動物が途中で暴れることもなく, 音声誘発は円滑に終始し, その内容もほぼ安定していた. なお, IH による悪影響 (ことに, Isoproterenol による脱水症) も考慮し, 実験中は, 静脈内に持続点滴を持続させたが, 実験終了後においても, 動物の疲労が著しいため, 直ちに保温, 補液, 気管内挿管による気道確保などの処置による一定時間の看護を余儀なくされた.

上述の音声誘発法により, 私は, 4群の成犬の音声機能を検討し比較を行なったが, その成績を次項において総括する.

2 研究成績総括, ならびに考按

Isoproterenol は, Adrenergic amine の1つで, β 受容器に作用し, その強力な薬理作用により, 代謝機構, 筋肉系, 心血管系および中枢系に著しい影響を生じることは周知の事実である¹⁾. 特に, 平滑筋系への影響による気管・気管支拡張作用は Epinephrine の10倍以上の作用を示すといわれ²⁾, これにより肺活量は著しく増大し, 成犬においても, 呼気流量は IH の注射前の3.5倍以上 (700cc/sec.db. 以上) に至るのも多々存した (第3図).

兎もあれ, 浅麻酔下でこの薬剤を成犬に投与することにより, 著しい肺からの呼気流量の増大, 呼吸中枢への影響による激しい呼吸作用への促進, 更には, 麻酔覚醒への促進などが音声

第3図: イソプロテレノールの喉頭空気流量への影響

SP: 声門下圧, AFR: 喉頭空気流量

誘発に関与するものと思惟されるが, 若しも, 深麻酔下で IH を投与すると, 呼吸作用促進は得られても音声誘発に迄は至らず, したがって, その投与時期の選定が重要である. なお, 音声誘発に際しての声門下圧測定には, 厳密には, 声門上圧と下圧との圧差を考慮すべきであるが, 大きく開口し, かつ声門を口腔内に広く露出せしめた今回の動物の状態では, 声門上圧は無視し得る程小さく, 今回は声門下圧絶対値のみを対象とした.

(a) 各群における音声改善経過状況

1 側反回神経, 同側上喉頭神経外枝再生群 (B群), 1 側反回神経再生群 (D群) における喉頭神経再生は, 筋電図的に, 神経縫合後3ヶ月以内に完了したと考えられた.

先ずB群においては, 術後4ヶ月経過頃において, 大多数の例が, 発声持続の短い, 著明な氣息声嗶声 (第4図-1), あるいは, 粗雑な音声 (第4図-2) の誘発音声状況を示していたが, 音声改善は術後5ヶ月経過時頃迄に見られ, それ以後では, 声音性状, 声の強さ, ピッチの著しい改善, 変化を誘発下では見出せなかった. 術後8~12ヶ月経過時における最終音声誘発検査時においては, 大多数の例が良好な発声を示していたが, それでもなお, A群 (正常群) に比してその内容は完全でなく, 嗶声が発声持続途中で明瞭な音声に変化したり (第4図-3), 発声途中で氣息声に変化したり (第

第4図：1側反回神経および同側上喉頭神経外枝再生群(B群)における誘発音声(その1).
V: 誘発音声, P: 声門下圧,
T: 時間 (1目盛 10msec).
音声1は術後3カ月時の誘発音声例, 音声2は術後4カ月時例, 音声3は術後6カ月時例を示す.

第5図：B群における誘発音声(その2. 第4図から続く).
音声4, 5は術後7カ月時例, 音声6は術後6カ月時例.

5図-1), 吠えるが如き爆発的な短かい発声を行なう場合(第5図-2)などが部分的に認められた. 総体的には, 過半数の例が正常型に類した内容(第5図-3)を示していたが, 概して, 起声が爆発的で円滑性に乏しく, 正常群にみられた如き繊細な声音の出現(第2図-1, 2)や高音の伸びに難を示しており, いわゆる澄んだ音声とはいえない難い状況を示していた.

1側反回神経, 同側上喉頭神経麻痺群(C群)においては, 術後長期にわたって全例が著明な気息性嚔声または失声の状況を示した. この群における誘発音声は, 術後5~6ヶ月経過時頃より聴取可能となったが, それ以後におい

第6図：1側反回神経, 同側上喉頭神経外枝切除群(C群)と1側反回神経再生群(D群)における誘発音声.
V: 誘発音声, P: 声門下圧,
T: 時間 (1目盛 10msec)
音声1は術後7カ月時のC群誘発音声例, 音声2は術後9カ月時のC群例, 音声3, 4は術後5カ月時のD群例.

ても著しい音声改善はなく, 発声持続の短かい無響性音声(第6図-1), あるいは, 気息性嚔声(第6図-2)の状態にあり, 術後7~9ヶ月経過時においても全例が音声の抑揚性に乏しい, 弱々しい無力性発声内容が誘発下に観察された. 筋電図的にも, この時期において, 麻痺側内喉頭筋群より脱神経性筋電位の検出を認めた.

1側反回神経再生群(D群)においては, 術後1~4ヶ月の間に音声改善が認められた. この群では, 全例が, 術後7~9ヶ月経過時には明瞭な音声を示し, B, C群に比して音声も有響的で, 繊細な発声もかなり円滑であって(第6図-3), 強声発声に際しての声音波形の乱れも多くな(第6図-4), ほぼA群に近い発声状況を示していた.

これら4群の検討により, (i)犬の正常発声に際しては, 反回神経, 上喉頭神経外枝支配下内喉頭筋群の正常な働きが必要であること, (ii)再生反回神経を有する成犬の発声において, 正常上喉頭神経外枝を有する群と再生した該神経を有する群とを比較した場合, 前者において音声

回復・改善がより早く、しかも、回復音声の聴覚的明瞭性、有響性、声音波形性状、ならびに円滑な起声下における繊細な声音生成能力について後者より優れた内容を示すこと、したがって、犬の正常発声に際しての輪状甲状筋の果す割役は重要である。などの印象を受けた。なお、B群においては術後8～12ヶ月経過時、C、D群においては術後7～9ヶ月経過時に、それぞれ最終音声誘発検査がなされたが、以下、この成績における声の強さ、ピッチ、ならびに発声時喉頭流量の比較により、今回の4群の音声状況を検討する。

(b) 声の強さに関する比較

正常A群の凡ての犬の種々異なる強さの声を採集し、その強さの時の発声時声門下圧をそれぞれ検討し、声の強さと発声時声門下圧との間の相関関係を調べてみると、第7図に示す如く有意の相関関係が認められ、その関係は回帰直線で表わすことができた。同様に他の3群についても有意の相関関係が認められたが、これら回帰直線による4群の比較を示すと第8図の如くである。

すなわち、再生反回神経を有するB、D群においては、直線の見かけ上の差はないが、正常A群との間にはその勾配(声門下圧上昇に伴い、声の強さの増加する割合)に差が認められた。このことは、声門下圧上昇に伴って生じるエネルギーを声の強さに変換する声帯の能率が、反回神経再生群において正常群より劣ることを示している。一方、麻痺群であるC群においては、声門下圧上昇の範囲がせまく、他の群との比較が困難であった。なお、第8図に示したB、D群の相関係数 r が、A、C群より劣る内容を示したのは、再生反回神経を有する各例の神経再生内容に差があったものと私は想像している。なお、今回の凡ての犬において得られた誘発音声の最大の強さについて総括すると、各群における声の強さの(平均値±標準偏差)db. SPLは第1表に示す如くである。すなわち、B、D群の間には有意の差はないが、A群

第7図：A群(10匹の正常成犬)における誘発音声の強さと発声時平均声門下圧との間の相関関係。

X軸は声門下圧 (cmH₂O), Y軸は声の強さ (db, SPL), r は相関係数, n は採集した異なる強さの声の数を示す。

第8図：各群に関する、声の強さと声門下圧との間における相関関係。

X軸は声門下圧 (cmH₂O), Yc軸は見積りの声の強さ (db, SPL), r は相関係数, n は各群における採集した異なる強さの声の数を示す。

付) 各群における回帰直線方程式

A群: $Yc = 72.99 + 1.45X$ (Sys = ± 10.91)

B群: $Yc = 72.15 + 0.79X$ (Sys = ± 5.68)

C群: $Yc = 66.48 + 0.85X$ (Sys = ± 1.56)

D群: $Yc = 66.52 + 0.97X$ (Sys = ± 4.42)

第1表 誘発音声における声の強さ

群 (N : 例数)	声の強さの最大値 M±SD (db, SPL)	声の強さ最大時の 声門下圧 M±SD (cmH ₂ O)
A (N = 10)	109.33±5.46	25.13±6.30
B (N = 10)	94.22±3.90	23.72±4.08
C (N = 5)	80.98±2.82	15.74±3.42
D (N = 5)	97.96±3.83	29.56±7.32

(註) M : 平均値, SD : 標準偏差

と B, D 群との間, C 群と B, D 群との間にはそれぞれ有意の差があり, $A < B, D < C$ ($P < 0.05$) の関係が得られた。

このことより, (i) 再生反回神経を有する群は, 正常群のように強い声を出すことはできないが, 麻痺群よりは強い声を出することができる, (ii) 再生反回神経群においては, 両側正常上喉頭神経外枝を有する場合と, 偏側正常で他側再生した該神経を有する場合との間に声の強さの差はないなどのことを確認した。

(c) 声のピッチに関しての比較

4 群の誘発音声のピッチを測定し, 各例におけるピッチの最上限と最下限とを以て **vocal range** とし, 各群における **range** の平均値±標準偏差を総括すると第2表に示す如くなる。

概して, 浅麻酔下で誘発された動物の音声は, 覚醒時のそれに比してピッチの範囲に制限をみることは止むを得ない現象であり, 更に IH の影響もあって, 呼吸筋, 内外喉頭筋群の活動が発声運動に関与するため, せまい **vocal range** は, 必然的に **high level** にあり, その **Octave range** もせまい内容を示す。兎もあれ, かかる状況下での各群における成績を比較すると, A, B, D の3群における **Octave range** に有意の差はないが, A 群における **Vocal range** は最も高い位置にあり, B, D 群がこれに次ぐ。なお, B, D 群の両者の間での成績に有意の差がない。

過去, 多くの研究により, 上喉頭神経外枝支配の輪状甲状筋はピッチ調節に重要な役割を果

第2表 誘発音声におけるピッチの比較

群 (N : 例数)	ピッチ下限	ピッチ上限	オクターブ
	M±SD (c.p.s)	M±SD (c.p.s)	M±SD
A (N = 10)	335±56.59	681±152.24	1.04±0.29
B (N = 10)	260±93.87	462±91.08	0.90±0.57
C (N = 5)	264±107.84	346±76.68	0.46±0.30
D (N = 5)	270±60.41	474±120.58	0.81±0.27

(註) M : 平均値, SD : 標準偏差

第3表 発声時声門下圧最大時における喉頭流量

群 (N : 例数)	発声時声門下圧 M±SD (cmH ₂ O)	喉頭流量 M±SD (cc/sec)
A (N = 10)	25.56±0.78	370.50±36.88
B (N = 10)	23.75±2.53	605.50±73.78
C (N = 5)	14.75±1.65	725.50±35.35
D (N = 5)	25.55±2.12	595.50±57.09

(註) M : 平均値, SD : 標準偏差

たすことが知られており, この成績に関する限り, B 群における上喉頭神経外枝の再生は, ピッチ生成において一応良好に完了したと推察された。しかしながら, 正常輪状甲状筋を有する D 群と正常の A 群との間に, 声のピッチ最上限値に有意の差があり, ピッチ調節における輪状甲状筋の影響の限界を知ると共に, 犬における完全なピッチ調節に際しては輪状甲状筋のみならず, 正常な内喉頭筋群活動も必要であるとの印象を受けた。

C 群に関しては, ピッチ上限と下限との間に有意の差がない, すなわち, **Octave range** が最もせまく, ピッチ上昇に不可欠の声帯緊張性が極めて不良であることを示していた。以上の成績により, 正常群と再生反回神経群との比較では, ピッチ調整能において前者が勝り, 再生反回神経群と麻痺群との比較では, 後者においてその障害が著明であり, 声の強さにおける比較成績とはほぼ同内容の結果を得た。

(d) 発声時喉頭流量に関する比較

今回の発声時喉頭流量の測定は, 音声誘発開始後 4～5 分経過時に行なわれた関係もあつ

て、犬の疲労、IHの影響をも考慮するとその測定値は生理的でないが、かかる状況下における4群の、発声時声門下圧最大値(但し絶対値のみ)に対する喉頭流量平均値を示すと、第3表に示す如くとなる。これによると、C群において流量が最大で声門下圧が最も低く、B、D群がこれに次ぐが、B群とD群との間には有意の差はない。A群においては声門下圧が最も高く、流量は最小であった。

声門抵抗は、オームの電氣的法則に模して、声門下圧を流量で除した値で表わすことができるが、この概念からすれば、発声時声門下圧最大の時点における声門抵抗の大きさは $A > B, D > C$ の順となる。このことは、発声時声帯緊張度、あるいは声門閉鎖不全の内容を示しているともいえる。すなわち、反回神経および上喉頭神経外枝切除のC群において声帯緊張は最も不良で、声門閉鎖不全が最も大であり、反回神経再生群であるB、D群はC群よりも優れた内容を示す。しかしながら、B、D群は正常のA群の内容にはおよばない、との結果を得た。これらの成績は、既述の声の強さ、ピッチの比較検討成績の裏付けの一となるといえよう。

(e) まとめ

今回の検討成績を以て音声機能の凡てを決定

づけることはできないが、一応、今回の成績から推察すると、喉頭神経縫合後、麻痺側内喉頭筋群において、神経再生による active な筋活動電位が認められるようになり、その後、長期間経過しても、かかる再生喉頭神経を有する群の音声機能の正常回復はほとんど期待しえないことがいえるし、両側性に再生喉頭神経を有する例ではなお更であろう。このことは、反回神経の過誤連結性再生³⁾⁴⁾、神経再生側内喉頭筋筋線維萎縮などの問題を含めた再生喉頭運動単位の性状変化などにも関連するものと思われる。しかしながら、喉頭神経切除群に比して、喉頭神経再生群の音声機能は良好であるが故に、ことに喉頭移植の際には喉頭神経再生を目的とした何らかの処置を行なうことは、その音声機能回復において必要であるとの結論を得た。なお、今回のB、D群の症例の一部に、筋電図的に過誤連結性神経再生現象にもとづくと思惟された反回神経再生側声帯の奇異運動⁵⁾⁶⁾が認められたが、この運動は、発声時には、声帯伸展に伴なって不明瞭となり、呼吸時にこの運動が不明瞭な反回神経再生群例との間には、音声状況にそれ程差があるとの印象を受けなかったが、この問題については今後症例を重ねて検討したい。

Ⅲ 2, 3の外喉頭筋群収縮の人工音声に及ぼす影響について

喉頭移植に際しては、喉頭に附着する多くの外喉頭筋群の処理の問題が必然的に生じてくる。このためには、外喉頭筋群の機能、ことに音声との関連性を把握しておくことが必要である。

発声時に外喉頭筋群が作働することは、過去の多くの研究、ことに筋電図学的検索からも明らかであるが、これらの外喉頭筋群収縮が、喉頭から作り出される原音にどのような変化、影響を与えるかという問題は、はなはだ興味ある問題点であり、喉頭移植研究面のみならず、喉頭再建、麻痺喉頭の治療への外喉頭筋を利用する面からも重要であると考え。かかる観点か

ら、冒頭にのべたテーマ(2)への予備実験として次の如き検討を試みた。

1 研究方法

研究材料としては、体重13~16kgの、正常喉頭を有する6匹の成犬を用いた。静脈経由で深く麻酔した後、正中頸切開を行い、気管、喉頭 各外喉頭筋群、両側反回神経および上喉頭神経外枝を、損傷しない様に慎重に剝離・露出せしめた。気管を第2~3気管輪の間で横断した後、喉頭側に Air chamber からの Tube を接続した。次に、両側反回神経(以下 RLN と略す)および上喉頭神経外枝(以下 SLN と略す)を可及的に中枢側に近い部位で切断し、

これらを両側性に **Supramaximal** の電気閾値で連続的に電気刺激ができるようにした。

今回の対象とした外喉頭筋群は、喉頭移植に関連した性格から、胸骨舌骨筋 (**Sternohyoid muscle**, 以下 **SHD** と略す)、胸骨甲状筋 (**Sternothyroid muscle**, 以下 **STD** と略す)、下咽頭収縮筋 (**Inferior pharyngeal constrictor muscle**, 以下 **IPC** と略す) であり、これらの筋肉群は、それぞれの支配運動神経を電気刺激により確認後、筋肉に神経を附着せしめたまま、両側性に剝離露出を行い、支配神経を可及的に中枢側よりの部位で切断し、これに刺激電極を **set** した。また、これらの筋肉群機能検討の比較対照として、舌骨上筋群の音声におよぼす影響をみるべく、両側の舌下神経 (**Hypoglossal nerve**, 以下 **HGN** と略す) を露出せしめて、**Ansa cervicalis** との分岐部からやや末梢側部位にてこれを切断し、刺激電極が **set** できるよう操作した。なお、本実験の間、頸部の各神経露出・刺戟部位には、ミネラルオイルを注ぎ、**pool** の状態とし、これらの乾燥を予防し、犬の口腔は外界に広へ開放せしめ、先の誘発音声実験と同様に喉頭も広く口腔内に露出して固定

した。更には、留置した静脈内補液路より、麻酔深度が常に一定となるように調節を行なった。第9図は、今回の実験装置の **Diagram** を示したものである。

実験実施に際しては、まず、300cc/sec の空気を喉頭内に送り込み、**RLN** を両側性に、0.6V, 60Hz, duration 0.2msec. の条件下で電気刺激した。かかる操作により、低いピッチで一定の強さの安定した人工音声を得られる (**low pitched voice**)。次に **RLN** 刺激に加えて、**SLN** を 0.5V, 60Hz, duration 0.2msec. の条件下で両側性に電気刺激すると、強さがやや変化 (多くは僅かに上昇) した、ピッチの高い安定した音声が見られる (**high pitched voice**)。かかる人工音声の持続している間に、各外喉頭筋支配の運動神経を両側性に刺激して各外喉頭筋の単独性の **Tetanic contraction** をおこさせ、人工音声がどのように変化するかを観察した。なお、これらの支配運動神経の刺激条件は **SLN** 刺激時と同内容にした。

今回の実験に際しては、実験中における諸種の事情により、材料の6匹の成犬の内3匹において **SHD**, **STD** の、他の3匹において **IPC**, **HGN** の人工音声におよぼす影響を別個に検討したが、以下、私の検討した成績についてその大略を述べる。

2 研究成績総括ならびに考按

(a) 胸骨舌骨筋収縮の影響

犬の **SHD** は、**n. cervicalis 1.** によって支配される。私の実験においては、この筋の収縮により、喉頭の前半部分が下降し、声帯は前後方向に伸展されて緊張する喉頭像を得た。これは、**Katzenstein** の記載した所見とほぼ同様で⁷⁾、長石も **SHD** 電気刺激による軽度の声帯緊張増加を述べている⁸⁾。

さて、**RLN** 刺激時の人工音声 (**low pitched voice**, 以下 **LPV** と略す) の強さ、ピッチ、および声門下圧をそれぞれ 100% とした時に、**SHD** 刺激時 (**RLN+SHD**) のこれらの変化を検討した結果、3匹の犬の平均値として、強

第9図：外喉頭筋収縮影響に関する音声実験装置。

1は反回神経、2は上喉頭神経外枝、3はある外喉頭筋、4は声の強さ測定、5はピッチ測定、6は声門下圧測定、7は喉頭空気流通量を示す。

さ4.2%, ピッチ58.4%, 声門下圧21.3%の上昇の成績を得た。次に, RLN 刺激に加えて, を SLN 刺激した時 (RLN+SLN) の人工音声 (high pitched voice, 以下 HPV と略す) の強さ, ピッチ, 声門下圧をそれぞれ100%とした時に, SHD 刺激時 (RLN+SLN+SHD) の各々の変化は3匹の犬において, 平均して, 強さ3.7%, 声門下圧12.3%の上昇を得たが, ピッチは逆に14.3%の低下を示した。

これらの成績より, SHD の収縮は, 舌骨の位置低下を生じて甲状軟骨の前半部分を押し下げて, 輪状甲状間隙距離を短縮せしめ, 2次的に声帯の伸展, 緊張をもたらし, 同時に甲状軟骨圧迫による喉頭内腔形状の変化を生じせしめるらしく, この作用によって, RLN が関与する LPV は, 強さ, ピッチ, 声門下圧の上昇を来し, 逆に RLN, SLN が関与する HPV では, 声の強さ, 声門下圧が上昇しても, SLN によって control された輪状甲状間隙距離に微妙な変化を与え, ゆえにピッチが低下するものと思惟された。なお, 雨森も, 動物実験により, RLN+SLN+SHD 刺激の際に, 音高が低下することを同様に述べている⁹⁾。

筋電図学的には, 人の SHD 活動について報告があり, 山脇は正常発声時に SHD の活動はないとし¹⁰⁾, 木村は発声時に SHD は常に収縮して高いピッチの際に筋収縮が増強するとのべている¹¹⁾。Hirano らは, いかなるピッチの時においても, 声の volume を増すときには, 本筋の筋活動が増強すると述べ¹¹⁾, 国武も声のピッチ, 強さの調節に本筋が関与することを報告している¹²⁾。私の動物実験成績を, これらの人における所見に当てはめることは妥当ではないが, 少なくとも, 犬の SHD が, 声の強さ上昇, ピッチ調節に関与するという成績は, これらの筋電図所見内容を裏付けるものである。

(b) 胸骨甲状筋収縮の影響

犬の STD は, 同様に, n. cervicalis 1. によって支配される。私の実験においては, STD の収縮により, 喉頭全体がやや下降し, 声帯は

やや弛緩して, 少しく開いた声門像を生じることを観察した。次に STD の人工音声におよぼす影響について, SHD と同様に検討した結果, RLN 刺激時の LPV においては, STD 刺激の際 (RLN+STD) に, 強さ5.5%, ピッチ34.5%, 声門下圧22.7%の低下を認め, 更に, SLN 刺激の加わった HPV においても, STD 刺激の際 (RLN+SLN+STD) には, 強さ8.4%, ピッチ42.0%, 声門下圧8.4%の低下を観察した。雨森も, 本筋の刺激で音高が下降することを述べている⁹⁾。

胸骨甲状筋の声門像におよぼす影響については多少異った見解があり, Katzenstein らは, 本筋は舌骨, 喉頭の位置低下を招くが声帯は少しく緊張するとし⁷⁾, Schilling は, 甲状軟骨を後方に tilting させて声帯を弛緩させるといい¹³⁾, Sonninen は, low tone voice の際, 本筋は声帯を短縮せしめ, high tone voice の際には声帯を延長させる作用を持ち, 人においては, 頸部を伸展させた時と, 頭部を前屈させた時では発声に対する影響が略なることを述べている¹⁴⁾。長石は, 本筋の電気刺激により, 軽度の声帯緊張が発来することを動物実験により述べている⁸⁾。

人における筋電図学的検討では, Faaborg-Andersen, Arnold らは本筋がピッチ調節に関連の深いことを述べ¹⁵⁾¹⁶⁾, 国武はことに声域の両端近くで活動が強いとし¹²⁾, 山脇は, 発声の際, 挙上された喉頭を元の位置に戻す働きがあると述べている¹⁰⁾。

今回の検討成績により, 私は, 犬における STD は, 発声時に活動して, ピッチ, 強さの変化に関係し, ことに低いピッチの声音生成に関与しうること, ピッチ上昇の際には喉頭を固定するべく活動して, 喉頭の位置を変化させて声帯を伸展緊張させようとする他の外喉頭筋群の作用を効果的にするべく support するものと思惟した次第である。

(c) 下咽頭収縮筋収縮の影響

IPC は, 犬においては Nn. glossopharyngeus

et vagus によって支配される。IPC は輪状咽頭筋と甲状咽頭筋とから成るが、今回は神経刺激部位の関係で一括して収縮させ、その影響を観察した。私の観察では、IPC の収縮により、喉頭が外周より強く絞扼されて内腔がせまくなり、これに伴い、声帯が短縮するのを認めた。一方、人工音声の変化に関しては、3匹の犬における平均値から見ると、RLN 刺激時のLPV において、IPC 収縮の際 (RLN+IPC)、強さ 4.2%、声門下圧 29.3%の上昇、ピッチ 26.5%の低下を認めた。更に SLN 関与時の HPV においては、IPC 収縮の際 (RLN+SLN+IPC) には、強さ 8.7%、声門下圧 22.2%の上昇、ピッチ 44.7%の低下を認めた。

発声時の下咽頭収縮筋の重要性に関しては、Dreyfuss, Stupka, Minnigerode らの報告があり¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾、長石は、電気刺激動物実験により甲状咽頭筋は声帯の内転作用を有し、環状咽頭筋は声帯の位相ならびに緊張に関与しないことを述べている⁸⁾。人における筋電図学的検索では、広戸は発声時に甲状咽頭筋は活動するが輪状咽頭筋には活動を見ないとし³⁾、国武は甲状咽頭筋がピッチ調節に関与せず、声区、ことに重い声区の際に活動することを述べている¹²⁾。

今回の私の犬における検討では、IPC の活動は、より強く、低い音声の生成に有利な感じを受けたが、生体の自然発声における際は IPC の態度については、私には未検討の問題である。

(d) 舌下神経刺激の影響

犬において、IPC を Ansa cervicalis より末梢部で電気刺激すると、舌筋線維収縮に加え、hyoglossus, styloglossus, geniohyoid の各舌骨上筋群が収縮することが知られている²⁰⁾。

ピッチの高い音声発声の際には、人においても犬においても、舌骨、喉頭が前上方に索引挙上された状態となることは周知の事実であり、この際、舌骨上筋群活動は当然関与する。私の実験においても、HGN 刺激により、喉頭の前半部分は著明に上昇し、声帯は伸展されて緊張

し、舌は後方に牽引短縮された状態となった。これに伴い、人工音声の変化も認められ、LPV においては、HGN 刺激時 (RLN+HGN) に、強さ 9.8%、ピッチ 72.4%、声門下圧 32.3%の上昇を認め、更に HPV においても、HGN 刺激時 (RLN+SLN+HGN) に、強さ 8.5%、ピッチ 40.9%、声門下圧 17.4%の上昇を認めた。すなわち、舌骨上筋群は、ことにより高い音声生成に重要な役割をなすと考えられ、Arnold は、外傷により生じた両側舌下神経麻痺を有する歌手が、声帯運動が正常であるにもかかわらず、高い声の発声が困難であったことを報告している¹⁶⁾。

舌下神経、舌骨上筋群が、若しも喉頭移植の際に侵襲がおよぶ範囲にあると、移植後の喉頭の音声機能に不利な点が多いことは当然考慮されうる。なお、今回の実験で得られた成績は、例数も少なく、私にとっては参考記録にとどめたい所存であるが、研究対象とした外喉頭筋群の LPV に対する影響を第10図に、HPV に対する影響を第11図に総括しておいた。又、外喉頭筋収縮の人工音声におよぼす影響を CRO で

第10図：反回神経 (RLN) 刺激時の人工音声における各外喉頭筋単収縮時の影響 (喉頭流量 30cc/sec. 時)
SHD は胸骨舌骨筋, STD は胸骨甲状筋, IPC は上咽頭収縮筋, HGN は舌下神経支配下舌骨上筋群の収縮を示す。尚、声の強さ、ピッチ、声門下圧の変化の値は三匹の犬における平均値を示す。

第11図：反回神経(RLN), 上喉頭神経外枝(SLN) 刺激時の人工音声における各外喉頭筋単収縮時の影響(喉頭流量 300cc/sec. 時). この図の内容は第10図に準じる.

第12図：人工音声に及ぼす各外喉頭筋収縮の影響(サンプル, 喉頭流量 300cc/sec 時). 矢印は各筋支配の神経刺激時を示す. 尚, 本図における RLN は反回神経, SLN は上喉頭神経外枝, STD は胸骨甲状筋, IPC は下咽頭収縮筋, SHD は胸骨舌骨筋, HGN は舌下神経の刺激を, VP は vocal pitch, sp は声門下圧を意味する.

捕えたサンプルを第12図に示しておいた.

(e) まとめ

声のピッチを変化させると, 喉頭は種々の位置変化を生じ, 声帯の厚さ, 長さの変化を伴うことは, 過去における幾多の研究又は観察報告

により確かめられている. 之らの変化は, 内外喉頭筋群の調和性のある協同作業によるものであるが, ことに, 今回の如く, 外喉頭筋の単収縮の声音におよぼす影響を検すると, 各外喉頭筋は発声時に活動を示していても, その basic な機能は, それぞれ異なることが確認された. すなわち, 各筋の単収縮は非生理的な状態であって, これらの喉頭におよぼす影響が, 生体における自然発声の際にそのまま現われるとはいえない難いが, 一部には拮抗作用に類似した作用をもつ外喉頭筋群が, 同時収縮によってお互いの作用効果を強め, 状況に応じた声音の変化を可能ならしめるものと考えられる. かかる協同作用の観点からすれば, 生体の自然発声の最中に, 1つの外喉頭筋を電気刺激して収縮させた場合, ピッチの低下を認め, 次に, その筋を切断して, 同じ結果をえたとしても, その現象は解釈しうるものとする. 叙上の点より, 1つの外喉頭筋の発声時における重要性を特に強調することはできず, 喉頭移植の際は, 可及的に原型に復することが原則となろう. 今回の対象とした外喉頭筋群の他に, 顎二腹筋, 甲状舌骨筋, 肩胛舌骨筋などを含めた多くの外喉頭筋群があり, これらの発声時における活動性に関する多くの研究があるが, 今回はその内容を省略する. その他, 喉頭麻痺治療, 喉頭の再建, 喉頭部分切除後の修復術に一部の外喉頭筋を利用した実験²¹⁾²²⁾²³⁾, あるいは手術法なども多く発表されているが, 之らの工夫が, 喉頭原音生成改善に役立ちうるならば, その工夫は更に検討されるべき問題と考えるが, そのためにも, 利用する外喉頭筋の性状, 生体における役割などをよく検討し, 理解しておくことが必要である.

IV おわりに

将来, 免疫学的問題が解決され, 喉頭全移植が可能となった場合, 移植喉頭機能の観点から見ると, 喉頭全移植法には次の如き方法が用いられると想像される. すなわち, (i) 全摘喉頭をそのまま replace するに順じた内容で移植する方法と, (ii) 移植喉頭を基盤とし, 移植時において最初から, 輪状甲状筋, 1部の外喉頭筋, あるいは自家組織などを利用して, 声門再建, 声帯運動回復を企て

る方法とである。概して、再生喉頭神経を有する喉頭像は、過去の多くの研究報告に見る如く、発声時の声帯内転性、伸展性がかなり良好であっても、吸気時の声帯外転性の制限乃至は欠如を認め、今回の実験においても、大多数の動物にかかる状態を観察した。従って、両側喉頭神経再生例では、声門閉鎖、発声面に多少の有利な成績を予想しえても、吸気性呼吸障害を残すことが予想される。それゆえに、今回の如き、喉頭外における喉頭神経端々吻合による方法では、移植喉頭の呼吸機能と音声機能とは一応切離せざるを得ず、両側声帯正中位固定、又はいわゆる両側後筋麻痺例と同様に処理せざるを得ない現況にある。かかる理由から、(i)の方法を採用した場合、後に、喉頭内での再生神経、又は筋肉、披裂関節などに何らかの特別な手術的処理を行ない、1側声帯外転固定又は声帯運動回復を企てる必要がある。一方、最初から(ii)の方法を用いて機能回復を狙うのもよいが、これには多くの工夫が必要となる。その他、同種喉頭移植例では、喉頭およびその周辺の循環状況変化が当然予想されるので、神経再生が smooth に行なわれるや否やも未検討の問題である。兎もあれ、喉頭移植に際しては、Recipient に対して、免疫学的影響、その他の多大な犠牲を要求する以上、可及的に、移植喉頭機能が正常に近い状態となるようにしなければならないことを銘記すべきであろう。更には、喉頭移植研究は、喉頭の病態生理に関する総合的研究であるが故に、現在山積している未解明の、あるいは、再検討を要する諸問題を究明する要があり、喉頭移植実用化への前途はけわしいといえよう。

稿を終るにのぞみ、終始、本研究に御援助を賜った、三重大学大山勝助教授、慈恵医大大西俊郎博士、山口大学茂木五郎講師、岡山大学小山高司講師、ならびに米国ワシントン大学 J.H. Ogura 教授に深甚の謝意を表します。なお、本研究は、著者がワシントン大学 (St. Louis, Mo) における喉頭移植研究に従事した際、その一環として行なったものである。

主要参考文献

- 1) Burger, A. : Drugs Affecting the Peripheral Nervous System. New York, Marcel Dekker, Inc., 1967.
- 2) Konzett, H. : Neue broncholytisch hoch wirksame Korper der Adrenalinreihe. Arch. Exper. Path. Pharmk. 197 : 27, 1940.
- 3) 広戸幾一郎 : 発声機構の面より見た喉頭の病態生理, 耳鼻臨床 39 : 220, 1966.
- 4) 黒住静之, 他 : 延髄中枢の電気刺激に対する反回神経再生声帯の反応, 日耳鼻 72 (増刊総会号) : 440, 1969.
- 5) 島崎 進 : 喉頭神経麻痺の神経外科的治療に関する実験的研究, 耳鼻臨床 50 : 550, 1957.
- 6) 平野 実, 他 : 反回神経麻痺における声帯の Paradoxical Movement, 日耳鼻 73 : 885, 1970.
- 7) Katzenstein, H.J. u.a. : Über die Wirkung der äusseren Kehlkopfmuskeln. Ztschr. f. Hals-, Nasen u. Ohrenheilk. 3 : 458, 1922.
- 8) 長石忠三 : 声帯運動に関する実験的研究 (第5編), 耳鼻臨床 33 : 691, 1938.
- 9) 雨森良幸 : 舌骨に関する音声学的研究, 耳鼻臨床 53 : 117, 1960.
- 10) 山脇吉次 : 発声並びに構音機構に関する筋電図学的研究, 日耳鼻 58 : 291, 1967.
- 11) Hirano, M., et al. : The Sternohyoid Muscle during Phonation. Acta Otolaryng. 64 : 500, 1967.
- 12) 国武博道 : 外喉頭筋の機能に関する筋電図学的研究, 日耳鼻 74 : 1155, 1971.
- 13) Schilling, R. : Der Musculus Sternothyreoideus und seine Stimmphysiologische Bedeutung. Arch. f. Sprach-u. Stimmeilk. 1 : 65, 1937.
- 14) Sonninen, A. : The Role of the Extrinsic Laryngeal Muscles in Length Adjustment of the Vocal Cords in Singing. Acta Otolaryng. (Stockh.) Suppl. 130 : 1, 1956.
- 15) Faaborg-Andersen, K., et al. : The Function of the Extrinsic Laryngeal Muscles at Different Pitches. Acta Otolaryng. 51 : 89, 1960.
- 16) Arnold, G.E. : quoted by Sonninen, A. Acta

- Otolaryng. (Stockh.) Suppl. **130** : 14, 1956.
- 17) Dreyfuss : Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss des Schlundschwürers auf die Kehlkopfmuskulatur. Verh. d. Ver. dtsh. Laryngolog. **18** : 492, 1911.
- 18) Stupka, W. : Über ein phonatiosphänomen an den Speisewegen. Monatschr. f. Ohrenh. **55** : 1964, 1921.
- 19) Minnigerode, B. : Über die kompensatorische Wirkung der laryngopharyngealen Muskulatur innerhalb pathologischer Phonationsvorgänge mit besonderer Berücksichtigung des Musculus Cricopharyngeus. Archiv. klin. exp. Ohr. Nas.-u. Kehlk. Heilk. **190** : 291, 1968.
- 20) Miller, M.E., et al. : Anatomy of the Dog. W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1965.
- 21) Bernstein, L., et al. : Correction of Vocal Cord Abduction in Unilateral Recurrent Laryngeal Nerve Paralysis by Transposition of the Sternothyroid Muscle. Laryngoscope **77** : 876, 1967.
- 22) Evoy, Experimental Activation of Paralyzed Vocal Cords. Arch. Otolaryng. **87** : 59, 1968.
- 23) Hast, M.H. : Studies on Extrinsic Laryngeal Muscles. Arch Otolaryng. **88** : 71, 1968.
- 24) 上田直昭 : 喉頭移植とその問題点—米国における現況を中心として—, 広島医学 **24** : 213, 1971.

(原稿到着：昭和47年2月7日
別刷請求先：上田直昭
〒734 広島市霞町
広島大学医学部耳鼻咽喉科)

〔抄 録〕

モルモット蝸牛における蝸牛オリブ神経束の分布に
関する電気生理的研究

Electrophysiological Studies on the Spatial Distribution of the Crossed Olivocochlear Bundle Along the Guinea Pig Cochlea

Teas, D.C. Konishi, T. & Nielsen W. (Univ. of Florida)
J. Acoust. Soc. Am. **51** : 1256-1264, 1972.

蝸牛オリブ神経束(crossed olivocochlear bundle)の機能については近年注目されつつある所で、組織学的には1962年 Kimura と Wersal が、1963年 Smith と Rasmussen らが変性実験により下行性の線維の存在を報告している。

著者らは1967年の Wiederhold や1967年 Fex の刺激実験を若干変え蝸牛各階に記録電極を刺入、同時に

単一蝸牛神経の活動電位をも記録した。

CM は蝸牛オリブ神経束の刺激により、最高 16-20dB の抑制が認められ、これは 7 ~ 10KHz の周波数域であった。167 蝸牛神経単一電位の活性でもやはり 7 ~ 10KHz の所にその抑制が見られた。Scala media に見られる遅い陰性波は蝸牛神経束刺激によって得られる独特のものであった。

(松 岡 抄)