ヒトの聴覚喉頭反射

兼 竹 博 之

Human Auditory-laryngeal Reflex

Hiroyuki Kanetake

(University of Tokushima)

The mammalian larynx reacts promptly to external stimuli for protective and phonatory purposes. In particular, human speech has been thought to have an elaborate laryngeal control mechanism through the auditory system, although this has not yet been proved by empirical data. In the present study, the mechanism of laryngeal control through the auditory system was studied in terms of change in activity of the intrinsic laryngeal muscles.

Healthy adults maintained phonation at a constant voice pitch while receiving repeated click-sound stimuli in both ears. The voice signal was transduced with a throat microphone and bandpass filtered to isolate the fundamental frequency (F0). Average values for about 40 recordings of this F0 voltage at various click-sound stimuli were determined. The muscle activity of the larynx was recorded with bipolar wire electrodes inserted into the crico-thyroid muscles and/or the lateral crico-arytenoid muscles. The induced EMG (electromyographic) potentials were rectified, the average of about 80 values was calculated and the activity change in the intrinsic laryngeal muscles caused by the auditory stimulus was determined.

- 1) A short-latency change in F0 (about 50 msec) was noted in response to auditory stimulation.
- 2) In most subjects who received sound stimulation of more than 90 dB during high pitch phonation, muscle activity increased with a steady latency, as shown by the electromyogram.
- 3) The average time from the stimulus to the maximum amplitude of muscle activity was about 26 msec for the crico-thyroid muscle on both sides, about 45 msec for the right lateral crico-arytenoid muscle and about 47 msec for the left lateral crico-arytenoid muscle.

Key words: auditory feedback, laryngeal reflex, electromyography

緒 言

系統発生的にみると、最も原始的な喉頭は、肺魚 (Polypterus) に至って出現する。すなわち、消化管壁より派生した気道の入口部に sphincter fibers (括約筋線維) が認められ

ようになり、この作用により水の呼吸器への流入を防止する¹⁾。喉頭の有する機能の中で最も基本的なものは、この様に外界の異物より下気道を防禦する異物防禦機能である。しかし、進化に従って喉頭は開大筋や軟骨を持つよう

なり、哺乳類の一部では発声も行えるようになる。そのため、哺乳類の喉頭では外界からの刺激に対して俊敏な反射応答が必要となってくる。そして、哺乳類の中でも、とくに、音声言語という複雑な機構が必要なヒトでは、聴覚系を介した精密な喉頭制御機構が存在しているものと考えられる。すでに、イヌ、ネコなどの哺乳類を用いた実験では、鈴木²⁾、Kirchner³⁾や Mårtensson⁴⁾ など数多くの研究により、短潜時の聴覚喉頭反射の存在が実証されている。しかしヒトに関しては、1979年、Baer⁵⁾ が持続

発声中に音刺激（耳元で手をたたく）を与えることと基本周波数の変化がおこることを報告しており、また、1983年に Sapir ら⁶⁾ が Baer⁵⁾ の実験をより詳細に行い基本周波数変化の出現しやすい音刺激の強さおよび発声のピッチの高さを調べているが、これら以外の報告はきわめて乏しく、依然不明な点も少なくない。そこで今回著者は、まず Sapir ら⁶⁾ の研究を再検討し（第1部）、次いで、内喉頭筋筋電図変化を指標として、ヒトの喉頭制御に関わる聴覚の役割につき検討した（第2部）ので報告する。

第1部 音刺激に対応する平均基本周波数の変化

I 研究方法

1) 対象

聴力正常で音声障害の既往のない健常成人13人を対象とした。男性は9名、女性は4名で、年齢は20才から35才で平均25.8才であった。

2) 装置および実験の手続き

被検者に、ホノラリンゴグラフ（リオン製 SH-01）のモニタースクリーンを見させつつ、自覚的に一定のピッチと楽な大きさに持続発声を行うよう指示し、発声中両耳に繰り返し音刺激を与えた。モニタースクリーン上には、口前に置いたマイクロフォンより誘導した音声波から得られた基本周波数および強さが表示されるようになっている。そして、音刺激として（三栄測器TYPE 3G26より）持続時間0.09 msec のクリック音を、平均1秒に1回程度不規則に繰り返し、ヘッドフォンを通して被検者の両耳に与えた。刺激を不規則に与えた理由

は、この研究が不随意的な反射を記録することを目標としたので、被検者が音刺激を予測して身構えるのを防ぐためである。刺激の大きさは30dB から 90dB (Hearing Level) であった。その際、輪状軟骨下方の前頸部に付着させたコンタクトマイクロフォンより気管前壁音を誘導し、データレコーダ（TEAC MR-30）に記録した。気管前壁音より基本周波数F0を抽出した後、シグナルプロセッサ（三栄測器Type 7T07）を用いて刺激音をトリガーとしてF0を約40回加算平均し、音刺激に対応する平均基本周波数の経時的変化を求めた（図1）。

実験1

まず、音刺激の強さの違いによる反応の強弱を知るために、3名の被検者に対し同一ピッチ発声時に種々の大きさの音刺激を加えた。すなわち、250Hzの持続発声を行わせつつ、域値上

図1 実験装置の block diagram

90, 70, 50, 30dB の大きさの音刺激を両耳に加えた。

実験 2

同一被検者内の再現性をみるために被検者 5 に 200Hz の発声をさせ、90dB の刺激を与えた際の反応を、前半30回と後半30回とを別々に加算平均し比較した。

実験 3

全例につき発声時基本周波数と刺激音強度の

差による反応の有無を検討した。

表 I 全例につき発声時基本周波数と刺激音強度の差による反応の有無を示す
○印：反応陽性 *印：反応陰性

Hz \ dB	90	80	70	60	50	40	30
400	○						
270	○○		○		**		*
260	○		○		*		
250	○○		○	*	○		*
240	○○			*	*		*
230	○						
220	**						
210							
200	○○		○*		**		**
190	**			*			
180	○**			○			
170	○						
160							
150	○						
140	**		*	*	*		*
130	**		*	*			*
120	**						

positive ○
negative *

図 3 被検者 5 の前半30回と後半30回の基本周波数

図 2 被検者 2 に異なった強さの音刺激を加えた状態での基本周波数
↓：立ち上がりを示す ▼：ピークを示す

II 研究結果

実験 1

被検者 2 の場合, 90dB の音刺激を加えると約 50msec の潜時をもって基本周波数 F 0 の上昇がおこり 100msec で最大変動幅に達した. この最大変動幅はほぼ 3.5Hz であった. 刺激音が 50dB の強さまで反応が認められ, 30dB では反応は出現しなかった (図 2). 他の被検者でもほぼ同様の結果が得られた.

実験 2

前半と後半でほぼ同様な結果が得られ (図 3), 日時をかえて実施した場合にも同様の所見が得られた.

実験 3

結果を表 1 に示す. 刺激音が強いもの, また発声のピッチが高いものに反応が出現しやすいことがわかる. 例えば, 90dB の音刺激を与え, 230Hz 以上のピッチで持続発声させた場合にはすべての場合に F 0 の上昇がみられる. 一方, 40dB 以下の音刺激を与えた場合や 140 Hz 以下のピッチでの持続発声では, F 0 の上昇が認められない.

III 考 察

表 1 に示した著者らの成績は, 14人の被検者に一定のピッチにて持続発声させ, 音刺激を加えて基本周波数の変化をみた Sapir らの実験結果とよく一致する. Sapir らの結果では潜時は約 50msec とほぼ一定していたが, 著者らの得た値も立ち上がりの値については約 50msec と一定した結果が得られ, Sapir らとほぼ同じ結果になった. また Sapir らのデータでは, 反応が最大変動幅に達するまでの時間にはややばらつきがみられているが, 著者の実験でも, 反応が最大変動幅に達するまでの時間には若干の変動がみられた. 基本周波数の変化についてみると, 実験 1 にみられるように, 90dB 刺激では約 3.5Hz の上昇がみられるのに比して, 70dB では 2Hz, 50dB では 1.5Hz の上昇にとどまっている. Sapir らの実験結果では, 基本周波数の上昇は最大 2.4Hz にとどまってい

るが, 最大刺激音のレベルが 85dB と今回の 90dB 刺激よりやや小さな刺激であったことが一因とも考えられる. いずれにしても, 刺激音が強い程基本周波数の上昇の程度が大きくなる傾向がみられ, Sapir らの実験結果と相似していた.

1954年 [Fairbanks⁶⁾] は auditory feedback が発声の自動調節に欠くことのできない部分であるという説を掲げており, また1976年 Wyke ら⁷⁾ は短潜時の聴覚喉頭反射を経る「acoustic automonitoring」すなわち脳幹をとおして蝸牛神経核から尾側網様体組織, 下丘, オリーブ核, 小脳への投射の存在を予測した. 今回得られた結果はこの auditory feedback の存在を証明する所見と考えられる.

Sapir ら⁶⁾ はこの短潜時の聴覚喉頭反射を発声の制御に関する聴性フィードバックとしてとらえている. しかし同様の実験を行って再検討してみると, いくつかの疑問点が生じる. 例えばこの反射が, Sapir ら⁶⁾ のように発声の制御に関する聴性フィードバックだとするには, ピッチの低い通常の発声条件ではこの反射がおこらないこと, 反射をおこすためには音刺激に一定以上の強さが必要なこと等の点で, 無理があるように思える. むしろこの反射の実体は, はっきりしないが Baer⁵⁾ のいう「startle reflex」により近いものではないかと考えられる. そこで, この喉頭の反応の性質をより詳しく知るために, 直接的に内喉頭筋活動性がわかる内喉頭筋筋電図変化を指標として用いることを計画した. また, 発声準備状態で現実には発声していない場合にこの反射がどうなるか, また音刺激以外の刺激で喉頭反射がみられるかどうかについても研究をすすめることにした (第 2 部).

IV 結 語

1. 持続発声を行わせつつ, 音刺激を与えて音声の基本周波数変化を検討したところ, 刺激強度が聴覚域値上 50dB 以上において, 潜時約 50msec で基本周波数の上昇がみられ, 最大変

動幅は約 3.5Hz であった。

2. この反応の大きさは、音刺激の強さが強

いほど、また発声のピッチが高いほど増大する傾向がみられた。

第2部 音刺激に対応する内喉頭筋活動性変化

I 研究方法

1) 対象

聴力正常で音声障害の既往のない健康成人12人を対象とした。男性は9名、女性は3名で、年齢は24才から63才で平均39才であった。

2) 装置および実験の手続き

被検者に、ホノラリンググラフ(リオン製 SH-01)のモニタースクリーンを見させつつ、自覚的に一定のピッチと楽な大きさに持続発声を指示し、両耳に繰り返し音刺激を与えた。モニタースクリーン上には、口前に置いたマイクロフォンより誘導し、マイクロプロセッサで処理して得られた基本周波数および強さが表示されるようになっている。そして、音刺激装置(三栄測器 Type 3 G 26)に接続したヘッドフォンより持続時間 0.09msec のクリック音を、平均 1 秒に 1 回程度、不規則に繰り返して、被検者の両耳に与えた。刺激の大きさは 30dB から 90dB (Hearing Level) であった。その際、輪状軟骨下方の前頸部に付着させたコンタクトマイクロフォンより気管前壁音を誘導した。また、反回神経支配筋の代表として外側輪状披裂筋を、また上喉頭神経支配筋として輪状甲状筋を選択し、Hirano ら⁹⁾の方法に従ってそれぞれ経皮的に双極ワイヤー電極(ステンレス製直径

0.1mm) 刺入して筋活動性を導出し、筋電計(Medelec MS 6 Filter 16Hz-3.2kHz)で増幅した後、データレコーダ(T E A C MR-30)に記録した(図4)。

導出した筋電図波形は全波整流し、シグナルプロセッサ(三栄測器 Type 7 T 0 7)を用いて、刺激音をトリガーとし、加算平均値を求めた。波形の特徴を明らかにするために digital filter (0-230 Hz) を用いて平滑処理し、音刺激に対する筋活動性の変化を検索した。なお今回の加算波形は変化成分(AC成分)のみで表わした。また一部の例では研究1と同様の処理を行い、音刺激に対応する音声の基本周波数変化も求めた。加算回数は筋電図では通常80回、音声では40回とした(図5)。

実験1

ヒトの聴覚喉頭反射の出現する刺激条件を知るために、Case 8 に対し 420Hz の持続発声を行わせつつ、両耳に与えるクリック音刺激の強さを域値上 90, 70, 50, 30dB と変化させ、左輪状甲状筋筋電図の加算平均波形を求めた。

実験2

反射の再現性をみるために、Case 7 に高ピッチ発声をさせ、90dB の音刺激を与えて得られた右輪状甲状筋筋電図の前半40回、後半40回

図4 実験装置の block diagram

を別々に加算平均し、その波形を比較検討した。また、同じ Case 7 に、期日を改め、同一条件下の実験を繰り返し行い、反応の再現性の程度を観察した。

実験 3

Case 8 に両耳に与えるクリック音刺激の強さを 90dB で一定にして、発声のピッチを高ピッチ (420Hz)、中ピッチ (155Hz)、低ピッチ (100Hz) と変化させて、左輪状甲状筋筋電図の加算平均波形を求めた。

実験 4

Case 8 に対して高ピッチ発声時とは別に、高ピッチ発声と同様に筋活動性は上昇しているが実際には発声のない発声準備状態下で、90 dB の音刺激を与えて左輪状甲状筋筋電図の加算平均波形を求めた。

図 5 被検者 5 の筋電図
O : 音刺激時点 LCA : 外側輪状披裂筋

図 6 被検者 8 に異なった強さの音刺激を加えた状態での筋電図
CT : 輪状甲状筋

実験 5

Case 11 に対し高ピッチ発声下で、知覚神経であるところの三叉神経第一枝の上眼窩神経に電圧 40V、持続時間 0.2msec の直流電気刺激を 40 回与え、左輪状甲状筋筋電図の加算平均波形を求めた。

実験 6

実験 1 から実験 4 の結果得られた最も強い反応の出現する条件を用いてあらためて全例の検討を行った。すなわち、すべての被検者について高ピッチ発声下、90dB の音刺激を与えて、左右 2 筋の筋電図の加算平均波形を求めた。

II 研究結果

実験 1

420Hz の高ピッチ発声下、90dB の音刺激を与えると、左輪状甲状筋活動性には潜時約 30 msec で最大振幅約 22μV に達する反応が認められる。刺激音が 70dB でも、振幅 8.5μV と小さくなるが、潜時は約 30msec で、90dB の音刺激の場合と同様の反応が出現する。しかし、50dB、30dB の音刺激では、反応は明らかではなかった (図 6)。

実験 2

図 7 にみられるように右輪状甲状筋筋電図の前半 40 回 (A-1) と後半 40 回 (A-2) の加算平均波形のピーク潜時は、それぞれ約 26msec、約 25msec となりほぼ同様の結果が得られる。また、期日をあらためて、再び同じ

図 7 被検者 7 の異なった時期の筋電図

図8 被検者8に異なったピッチで発声させた時の筋電図

図9 高ピッチおよび発声準備状態における筋電図

図10 被検者11に各種刺激を与えた時の筋電図

表2 各被検者の最大振幅までの潜時

subject			crico-thyroid m.		lateral crico-arytenoid m.	
No.	sex	age	right	left	right	left
1	F	55			49.0	48.5
2	M	61			42.0	44.0
3	M	26			44.5	47.5
4	M	30			47.5	49.0
5	M	26	31.0	30.5	43.0	46.0
6	M	24	24.0			
7	M	58	25.0			
8	M	24	28.5	28.5		
9	M	27	22.0	23.0		
10	M	26		20.0		
11	F	50		29.5		
12	F	63	28.0			
average		39	26.4	26.3	45.2	47.0

(years old)

(msec)

被検者に同一負荷条件下の発声を行わせた場合 (B) にも、ピーク潜時は約 25 msec となり、ほぼ同じ反応が得られる (図 7)。

実験 3

高ピッチ発声時には、潜時約 28msec、最大振幅約 $24\mu\text{V}$ となる。中ピッチ発声時には、潜時約 28msec、最大振幅約 $8\mu\text{V}$ となり、高ピッチ発声時よりも最大振幅は小さくなるが、高ピッチ発声時と同様の潜時を持った反応が得られる。低ピッチ発声時では筋活動性亢進は明らかではなかった (図 8)。

実験 4

高ピッチ発声時には、潜時約 28msec、最大振幅約 $24\mu\text{V}$ となる。一方、発声準備状態下では、潜時約 28msec、最大振幅約 $11\mu\text{V}$ となり、高ピッチ発声時よりも最大振幅は小さくなるが、高ピッチ発声時と同様の潜時を持った反応が得られる (図 9)。

実験 5

図 10 にみられるように、Case 11 に、90 dB の音刺激を与えた場合、左輪状甲状筋活動性亢進のピークの潜時は約 29msec、最大振幅は約 $14\mu\text{V}$ となる。左上眼窩神経刺激時の左輪状甲状筋活動性亢進のピーク潜時は約 40msec、最大振幅は約 $12\mu\text{V}$ となる。右上眼窩神経刺激時には、ピーク潜時約 45msec、最大振幅は約 $9\mu\text{V}$ となる。このように上眼窩神経刺激時にも、音刺激時と類似の筋活動性亢進が認められる。しかし、潜時はかなり遅れている。このような現象は外側輪状披裂筋においても確認された。

実験 6

全例に、ある潜時をもった筋活動性の亢進が認められた。結果を表 2 に示す。最大振幅までの潜時は右輪状甲状筋では、22msec から 31msec で平均 26.4msec (標準偏差 $\text{SD}=3.0\text{msec}$)、左輪状甲状筋では、20msec から 30.5msec で平均 26.3msec ($\text{SD}=3.3\text{msec}$)、右外側輪状披裂筋では 42msec から 49msec で平均 45msec ($\text{SD}=2.6\text{msec}$)、左外側輪状披裂筋は 44msec

から 49msec の平均 47msec ($\text{SD}=1.9\text{msec}$) と、被検者にかかわりなく類似の潜時が得られた。それぞれの筋ごとに重ね書きをした波形を図 11 に示す。

代表例として 4 筋の筋電図を採取しえた Case 5 を提示する (図 12)。26 才、身長 178cm の健常男子に 350Hz の持続発声をさせつつ、両耳に 90dB の音刺激を与えたものである。図 12 に示すように上段より、刺激に対する基本周波数の変化、右輪状甲状筋、左輪状甲状筋、右外側輪状披裂筋、左外側輪状披裂筋の電気活動性変化を示したものである。音声では音刺激後、約 60msec ではじまり約 100msec で約 3Hz の基本周波数の上昇を認める。さらにそれに先立って、右輪状甲状筋では約 31msec の潜時間でピークをむかえる筋活動性の亢進を認める。左輪状甲状筋でも同様である。一方、外側輪状披裂筋の反応は輪状甲状筋よりも遅く、右側では約 43msec、左側ではさらにそれよりも約 3msec 遅い約 46msec でピークをむかえる。

III 考 察

実験 1 のように持続発声中に音刺激を加えると筋活動性の亢進を認め、その反応は刺激音が強い程、振幅も大きくあらわれる。しかし、最大振幅までの潜時にはほとんど差を認めないので、質的には同一の反応が出現しているものと考えられた。Sapir (1983) ら⁶⁾ の実験でも、反応の強さ、すなわち基本周波数の変化は、音刺激の強さに関係しており、最小では 45dB の音刺激まで反応が出現したと述べている。第 1 部で述べたような音刺激に対する発声の基本周波数変化には、内喉頭筋活動性変化が強く関与していることが本実験によって証明されたことになる。そして、実験 2 のように同一個体に同一負荷を繰り返しても同様の筋活動性の亢進が得られることより、本現象には馴化が起こりがたいことが推測される。また図 7 でみられるように、本現象には再現性があり、ヒトに普遍的な反応と考えられる。

図11 各筋における筋電図
 CT : 輪状甲状筋 LCA : 外側輪状披裂筋 ▼ : 最大振幅を示す点

図12 被検者5における基本周波数と4筋の筋電図
 F0 : 基本周波数

また実験3(図8)でみる如く、持続発声中のピッチが高い程、内喉頭筋の筋活動性亢進の反応も強く出現することがわかる。ところが、実験4(図9)のように、実際に発声のない発声準備状態においても、筋活動性が励起されていれば、潜時にはほとんど差のない同様の反応が得られる。すなわち、反応の強弱は発声時のピッチの差というよりは、刺激の与えられる時点における筋活動性の大小に由来しているものと考えられる。つまり、反応が比較的微弱であるために、Henneman(1965)ら¹⁰⁾のいうsize principleが当てはまり、相対的に振幅の大きいMUP(Motor unit potential)の参画率が上昇する高ピッチでの発声ないし発声準備状態においてはじめて、反応が明らかになるものと考えられる。Suzuki(1977)ら²⁾のネコを用いた動物実験のように、反回神経より直接反射波を導出できれば、筋活動性の低い状態においても、もっと明確な反応が得られるかもしれない。

さらに実験5では、高ピッチ発声下、音刺激すなわち聴神経入力ではなく、他の知覚神経として三叉神経入力による内喉頭筋活動性の変化を調べてみた。三叉神経入力による迷走神経反射の存在は動物実験では以前より知られていた¹¹⁾¹²⁾。また、三叉神経入力による声門閉鎖現象が生じることも観察されている¹³⁾¹⁴⁾。われわれの実験では、図10の如く、直接発声に関係しない他の知覚神経、すなわち三叉神経に電気刺激を加えても、潜時はかなりおくれるものの類似の筋活動性亢進が認められた。そして、これらの現象が声門閉鎖筋の一つである外側輪状披裂筋¹⁵⁾においても認められることは、本現象がSapir(1983)ら⁶⁾の想像したピッチ調節など直接発声に関係した調節機構というよりは、寧ろもっと原始的な反応、例えば声門閉鎖などに関連して働いている反射の現象であることを示唆するものと考えられる。Baer⁵⁾は持続発声中に被検者の耳元で手をたたくと基本周波数の上昇が起こる現象を「Startle reflex」として

いるが、本現象もそれに類似したものと推察される。

鈴木ら²⁾¹⁶⁾はネコを用いた実験で音刺激を与えると内喉頭筋の活動性が上昇し、内耳を破壊するとその上昇がみられなかったことより聴性フィードバックとして考えるべきかとしている。しかし、聴性フィードバックといっても、いろいろな意義をもつ経路が有り得るのであるから、本研究で明らかにしたような反応がSapir⁶⁾のいう発声の制御に関する聴性フィードバックなのか、あるいはもっと原始的な反応、例えば声門閉鎖などのために働いている現象なのかを明らかにするためには、今後一層の検討が必要であろう。

いずれにしても、高ピッチ発声下、強度音刺激を与えた全例で同様の反応が得られる。そして上喉頭神経支配である左右の輪状甲状筋でそれぞれの最大振幅までの潜時をみると、個体間では反応時間にかんがりのばらつきを認めるが、両側の筋を誘導しえたCase 5, 8, 9の個体内では、左右の潜時にほとんど差を認めない。一方、反回神経支配筋である外側輪状披裂筋では輪状甲状筋と異なり、左右の筋で反応までの潜時に差異が認められる。すなわち、Case 4では1.5msec、Case 2では2msec、Case 3とCase 5では3msecと、右外側輪状披裂筋の方が左外側輪状披裂筋より早く反応を示す。左右の筋の間における反応までの潜時の差の平均値は1.8msec(SD=1.2msec)で、この差は危険率5%(t検定)で有意であった。

また、輪状甲状筋の反応はいずれも、外側輪状披裂筋の反応よりも早く出現している。平均値でみると(表2)、まず両側の輪状甲状筋が約26msecでほぼ同時に反応し、次いで約20msec遅れて右外側輪状披裂筋が反応し、更に2msec程度遅れて左外側輪状披裂筋が反応を示していることになる。個々のCaseでは身長などが違い、当然反回神経の左右差および上喉頭神経と反回神経の長さの差も若干違っていると考えられるので、4筋の反応の仕方を同一

被検者について同時に誘導しえた代表例 **Case 5** で各筋の反応の仕方を比較するのが妥当であろう (図12)。そうすると両側の輪状甲状筋が約 **31msec** でまず反応し、約 **12msec** 遅れて右外側輪状披裂筋、更に **3msec** 遅れて左外側輪状披裂筋が反応している。このように、両側の輪状甲状筋がほぼ同一の潜時をもつに比し、外側輪状披裂筋では左右の間に潜時の差を認める。このことは大変興味深く、その原因として最も考えられるのは支配神経である反回神経の長さの差である。反回神経の長さの左右差は、その神経伝導速度の違いにより代償され、中枢からの指令に対し左右の内喉頭筋はほぼ同時に収縮しているとの説¹⁷⁾がある。しかし、今回の結果よりみる限り、そのような代償機転は働いていないものと考えられる。

ところで、Atkins (1973)¹⁸⁾は、身長**180cm**の人の両側の反回神経の長さの違いは平均**15cm**程度と述べており、この **Case 5** (身長**178cm**) で得られる両外側輪状披裂筋の反応差約 **3msec** をあてはめると、伝導速度は約 **50m/sec** と算定され、ほぼ妥当な値である。したがってこの潜時の差が、Thumfart¹⁹⁾の実験でも示唆されているように、反回神経の長さの差を示すものであると考えられる。

また同じく声門閉鎖に働く筋であるにもかかわらず、輪状甲状筋と外側輪状披裂筋の間には**10数msec**の反応時間差が存在し、この2種類の筋は一見別個に働いているように思える。しかし、笠ら²²⁾のいう **type 1** 筋線維すなわち **slow twitch fiber** は輪状甲状筋に、**type 2** 筋線維すなわち **fast twitch fiber** は外側輪状披裂筋により多く分布しているから、内喉頭筋電気活動性変化から実際の筋力出現までの時間 (**contraction time**) も両筋で異なることが推測される。表3では、文献上^{4) 20) 21)}にみられる、動物実験により得られた **contraction time** を示す。例えば、佐藤ら²¹⁾のイヌの例では、輪状甲状筋では**38msec**、外側輪状披裂筋では**21msec**の **contraction time** が示されている。

この時間を **Case 5** の4筋の最大振幅までの潜時にそれぞれ加算すると、電気的活動性の潜時差は相殺される形となり、実際の筋力出現時間はほぼ同一となる。すなわち、反射の声門閉鎖のためには両筋はほぼ同時に協調して作動することになる。そして、筋力発現より基本周波数変化出現までにさらに約 **30msec** の時間が必要なことは、後輪状披裂筋²³⁾などの括抗筋や肺のコンプライアンスなどの影響があるためと考えられる。いずれにしても、外来刺激に対する反射の声門閉鎖には最短でも約 **100msec** 必要だといえる。

また、筋電図をこのように加算処理すると、最大振幅については比較的明瞭な値を得る事ができるが、反応の始まりについてははっきりした値を得ることが困難になる。そこで、最も反応が大きく出現している **Case 5** の例を取り上げ、加算処理をしていないデータについて反応開始時間を検討した。図13は左輪状甲状筋の音刺激後の筋活動性変化を連続表示したものである。いずれも音刺激後、しばらくしてMUPが解発され、次第にその数を増すとともに、MUPの種類をみても、より振幅の大きいものが参画しているのがわかる。その潜時は少しずつ異なるが、最短では**10数msec**程度である。Thumfart¹⁹⁾は上喉頭神経を表面電極にて電気刺激し、その反射波により輪状甲状筋の筋活動性が**16~18msec**後に亢進すると述べているが、音刺激による今回の潜時の値と近似し興味深い。

ところで Sapir⁶⁾に宛てた Cummings の私信によれば疑核より輪状甲状筋までの上喉頭神

表3 筋収縮時間の報告

CONTRACTION TIME			
	CT	LCA	Subject
Martensson and Skoglund (1964)	35 msec	16 msec	dog
Atkinson (1978)	40 msec	15 msec	human (estimated value)
Sato et al. (1982)	38 msec	21 msec	dog

経の長さは少なくとも10cmあり、いま仮に Ogura (1953) ら²⁴⁾ のように 50m/sec の伝導速度をとるとすれば、遠心性の神経伝導時間は約 2msec と算定される。諸家の成績から終板伝達時間及び輪状甲状筋電氣的興奮に要する時間を約 1msec^{25) 26)}、音刺激より蝸牛神経核までの反応時間を約 3msec^{27) 28)} とすれば、蝸牛神経核から喉頭神経の起始核まで数 msec 前後で到達する必要があることになる。これは、大脳の制御をうけて行われる信号伝達の時

間としては短かすぎることは明らかである。従って少なくとも最初の反応については、大脳の関与のない^{29) 30)} 脳幹レベルでのいわゆる“反射”であると考えられる。

一方、外側輪状披裂筋においても Case 5 の例を取り上げ、加算処理をしていないデータについて反応開始時間を検討した。図14は、左外側輪状披裂筋の例であるが、潜時は輪状甲状筋よりかなり長く、最短でもその反応開始までの潜時は20数 msec と思われる。Krmptic

図13 被検者 5 の左輪状甲状筋の加算平均した筋電図および原波形

(1958)³¹⁾によれば、疑核より末梢までの右反回神経は平均32.2cm, 左反回神経では42.6cmの長さがあるという。そこで、神経の伝導速度を部位に関係なく同一とみなし、先程の反回神経の差より得られた伝導速度 50m/sec をあてはめると、疑核より末梢までに右側では約 6msec, 左側では約 8msec 必要となる。この場合でも蝸牛神経より疑核までの反応伝達に残される時

間は10数 msec とかなり短時間である。しかしながら、数 msec 程度の時間で反応を示す上喉頭神経とでは、反応時間にかなりの差があることになる。換言すれば、このことは脳幹での音刺激に対する声門閉鎖の指令が、上喉頭神経系と反回神経系とでは別個に行われていることを示唆することになる。輪状甲状筋と他の内喉頭筋群では、その支配神経起始核局在の相

図14 被検者5の左外側輪状披裂筋の加算平均した筋電図および原波形

達³²⁾やその支配神経系の発生学的差異³³⁾が存在することを考えれば、輪状甲状筋系と外側輪状披裂筋系との間における蝸牛神経核から疑核までの推定伝導時間の違いは注目すべき点と考えられる。もちろん、神経伝導速度の差が存在する可能性も否定しえず、なお一層の詳細な検討が必要であろう。

いずれにしても、本方法は現在のところヒトにおける聴覚と喉頭の繋がりを知る極めて限られた手段の一つである³⁴⁾と思われる。したがって、聴覚路から脳幹を経て喉頭に至る経路における疾患の部位診断や、反回神経麻痺の予後判定など、臨床的目的のために本方法を応用し得る可能性が大きいと思われる。

IV 結 語

ヒトの聴覚喉頭反射の存在を筋電図学的に証明し、以下に示す結論を得た。

1) 高ピッチで持続発声させ、しかも 90dB 以上の音刺激を加えると筋電図上安定した潜時をもつ筋活動性の亢進がほとんどすべての被検者にみとめられた。

2) この聴覚喉頭反射には再現性があり、繰り返し施行しても反応の低下を認めなかった。

3) 正常人の最大振幅までの潜時は、両輪状甲状筋では約 26msec、右外側輪状披裂筋では約 45msec、左外側輪状披裂筋では約 47msec であった。

4) 三叉神経刺激においてもほぼ同様の反応が認められ、本反応は一種の声門閉鎖反射と考えられる。

5) 本方法は、現時点ではヒトにおける聴覚をはじめ他の知覚神経と喉頭の繋がりを知る極めて限られた手段の一つであると考えられ、将来臨床に応用しうる可能性が大きいと思われる。

稿を終えるにあたり、終始御懇篤なる御指導、御校閲を戴いた小池靖夫教授に深謝致します。また本研究に御協力戴いた徳島大学耳鼻咽喉科学教室員一同に感謝の意を表します。

尚、本論文の要旨は、第29回、第30回日本音声言語医学会総会並びに第20回国際音声言語医学会総会で発表した。

〔この研究の一部は、1986年度文部省科学研究費奨励研究A（課題番号61771297）の援助を受けた。〕

参考文献

- 1) 豊住頼一，他：喉頭進化に関する比較解剖学的考察。耳鼻 15：100～112，1969。
- 2) Suzuki M and Sasaki CT：Effect of various sensory stimuli on reflex laryngeal adduction. Ann Otol 86：30～36，1977。
- 3) Kirchner JA and Suzuki M：Laryngeal reflexes and voice production. Ann NY Acad Sci 155：98～109，1968。
- 4) Mårtensson A and Skoglund CR：Contraction properties of intrinsic laryngeal muscles. Acta Physiol Scand 60：318～336，1964。
- 5) Baer T：Reflex activation of laryngeal muscles by sudden induced subglottal pressure changes. J Acoust Soc Am 65：1271～1275，1979。
- 6) Sapir S：Human laryngeal responses to auditory stimulation. J Acoust Soc Am 73：315～321，1983。
- 7) Wyke BD and Kirchner JA：Neurology of the larynx. Scientific Foundations of Otolaryngology (ed by Heinemann R and Harrison D). pp 546～574, Heinemann Medical Books, Ltd., London, 1976。
- 8) Fairbanks G：Systematic research in experimental phonetics. 1. A theory of the speech mechanism as a servosystem. J Speech Hear Disord 19：133～139，1954。
- 9) Hirano M and Ohala J：Use of hooked-wire electrodes for electromyography of the intrinsic laryngeal muscles. J Speech Hear Res 12：362～373，1969。
- 10) Henneman E：Functional significance of cell size in spinal motoneurons. J Neurophysiol 28：560～580，1965。
- 11) Green JD, et al：Trigemino-bulbar reflex pathways. Am J Physiol 189：384～388，

- 1957.
- 12) 鈴木理文 : 脳神経刺激特に三叉神経刺激の Vago-vagal reflex に対する影響. 日耳鼻 69 : 536~542, 1966.
 - 13) Jackson RT : Nasal-cardiopulmonary reflexes ; a role of the larynx. Ann Otol Rhinol Laryngol 85 : 65~70, 1976.
 - 14) Yamagiwa M : Interaction of upper airway reflexes on protective laryngeal closure. Auris Nasus Larynx 7 : 51~59, 1980.
 - 15) 佐藤文彦, 他 : 内喉頭筋収縮と声門の形態ならびに力学. 日気食会報 33 : 302~308, 1982.
 - 16) 鈴木理文, 菅谷英一 : 各種感覚刺激と喉頭反射. 自律神経 11 : 123~125, 1974.
 - 17) Shin T : Conduction studies of the Canine recurrent laryngeal nerve. Laryngoscope 81 : 586~596, 1971.
 - 18) Atkins JP : An electromyographic study of recurrent laryngeal nerve conduction and its clinical applications. Laryngoscope 83 : 796~807, 1973.
 - 19) Thumfart W und Geschwandtner R : Die Elektroneurographie der Kehlkopfnerve mittels lupenendoskopischer EMG-Ableitung aus dem Kehlkopf des wachen Patienten. Laryng Rhinol 59 : 727~736, 1980.
 - 20) Atkinson JE : Correlation analysis of the physiological factors controlling fundamental voice frequency. J Acoust Soc Am 63 : 211~222, 1978.
 - 21) 佐藤文彦, 他 : 内喉頭筋の収縮特性と声門運動. 日耳鼻 85 : 951~956, 1982.
 - 22) 笠 誠一 : 内喉頭筋の酵素組織化学的研究. 耳鼻 28 : 394~402, 1982.
 - 23) 村上 泰 : 後輪状披裂筋の tonic activity について. 日耳鼻 74 : 1148~1154, 1971.
 - 24) Ogura JH and Lam LR : Anatomical and physiological correlations on stimulating the human superior laryngeal nerve. Laryngoscope 63 : 947~959, 1953.
 - 25) Fatt P and Katz B : An analysis of the end-plate potential recorded with an intracellular electrode. J Physiol 115 : 320~370, 1951.
 - 26) Takeuchi A and Takeuchi N : Further analysis of relationship between end-plate potential and end-plate current. J Neurophysiol 23 : 397~402, 1960.
 - 27) Achor JL and Starr A : Auditory brain stem responses in the cat. I. Intracranial and extracranial recordings. Electroenceph Clin Neurophysiol 48 : 154~173, 1980.
 - 28) Stockard JJ and Sharbrough FW : Detection and localization of occult lesions with brain stem auditory responses. Mayo Clin Proc 52 : 761~769, 1977.
 - 29) Sohmer H and Feinmesser M : Cochlear and cortical audiometry. Israel J Med Sci 6 : 219~223, 1970.
 - 30) Hast MH, et al : Cortical motor representation of the laryngeal muscles in macaca mulatta. Brain Research 73 : 229~240, 1974.
 - 31) Krmpotic J : Anatomisch-histologische und funktionelle Verhältnisse des rechten und des linken Nervus recurrens mit Rücksicht auf die Geschwindigkeit der Impulsleitung bei einer Ursprungsanomalie der rechten Schlüsselbeinarterie. Arch fur Ohr Kehl Heilkunde 73 : 490~496, 1958.
 - 32) 吉田義一, 他 : 内喉頭筋支配神経起始核について. 日耳鼻 85 : 456~463, 1982.
 - 33) Langmann J : 第13章 消化管およびその誘導体. 人体発生学 (沢野十蔵訳), 東京, 223~225頁, 1976.
 - 34) 兼竹博之, 他 : 喉頭の聴性誘発反応について. 耳鼻臨床 78 : 2131~2136, 1985.

(原稿採扱: 昭和61年10月11日 急載)
 別刷請求先: 兼竹博之
 〒770 徳島市蔵本町3丁目
 徳島大学医学部耳鼻咽喉科学教室)