ヒト摘出喉頭の声帯物性

—— 単発矩形波励振による共振特性 ——

千葉大学医学部耳鼻咽喉科学教室 (主任: 金子敏郎教授)

沼 田 勉

MECHANICAL PROPERTIES OF THE VOCAL FOLD
IN EXCISED HUMAN LARYNGES

— RESONANCE CHARACTERISTICS BY A SINGLE RECTANGULAR PULSE EXCITATION —

TSUTOMU NUMATA, M. D.

Department of Otolaryngology, School of Medicine, Chiba University, Chiba

In order to examine the resonance characteristics of the vocal fold in a wide frequency zone, a single rectangular pulse of 0.5 msec duration was given to the vocal fold via the thyroid cartilage and the vibration pattern of the vocal fold was recorded by the ultrasonic pulse variant M-mode display. Healthy side of the vocal fold in 13 specimens removed surgically due to cancers of the larynx, hypopharynx and of the tongue were used for the study. The power spectra of the decremental waves recorded by this method were analyzed by the Fast Fourier Transform and resonance characteristics including Q-values were obtained using mini-computer.

The results were as follows;

1) Resonance characteristics in freshly excised larynx

The mean value of the lowest resonance frequency of the normal vocal fold was 117.5 ± 12.9 Hz and Q-value 4.92 ± 0.45 . The second resonance frequency was observed at 180.3 ± 17.7 Hz with Q-value 6.38 ± 1.39 . Resonance frequencies of the vocal fold were a little higher in females than in males.

2) Effect of mass factor

As the weight of the loaded mass increased, the resonance frequency and Q-value tended to decrease.

3) Effect of fold tension

A higher resonance frequency was observed when a longitudinal tension was applied to the vocal fold. When a longitudinal tension became over 50 gr, however, the resonance frequencies increased non-linearly. Q-values were well correlated with the resonance frequency variation.

4) Mechanical factors of the vocal fold

Effective mass, effective stiffness of human vocal fold can be estimated within the range of 0.141 ± 0.02 gr and 73.7 ± 12.0 kdyn/cm, respectively.

Key words: ヒト声帯, 単発矩形波励振, 共振特性, 超音波パルス法, 声帯物性 A88-0853-61086

I はじめに

声帯の振動機構を解明するためには、医学、工学の両面からの approach が行われる必要がある。工学的に声帯をモデル化して論ずる場合には、必要な声帯の bio-mechanical factor をあらかじめ実測することが不可欠な条件である。さらに、そのような声帯モデルによるシミュレーションによって、声帯調節機構の定量的解析や、病的声帯の病態生理学的検討も可能となる。当教室では、1964年超音波パルス法による ultrasonoglotto-graphy (UGG)^{1)~3)}を開発し、声帯振動を観察し、併せて種々の角度より声帯振動機構を追求してきた。近年、より微細な声帯振動を観察しうる超音波パルス法 M-mode 変法⁴⁾を新たに開発して以来、声帯の連続正弦波強制振動に対する共振特性を in vivo, in vitro^{5)~8)}において測定し、振動体として声帯の有する物性の観点より検討を加えてきた。その研究によって、発声の pitch は発声準備状態における声帯の共振周波数に近似することが明らかにされた。声帯は粘弾性を有する組織であるから、発声条件で規定される物性や形態の変化によって定まる多数の固有振動数、およびその振動モードをもつと考えられる。教室における従来の連続波による励振では、共振特性を測定できる周波数領域は制限されていた。そこで、さらに広範な周波数領域にわたって共振特性を測定する目的で、声帯に単発矩形波衝撃を与えて励振させ、その振動特性を測定する実験が企画されるに至った。筆者は、共振特性を規定する条件設定が可能であるヒト摘出喉頭を用いて、単発矩形波励振による声帯の共振特性を測定した。得られた知見を従来の連続波による成績と比較して報告する。また、単発矩形波励振の特長について、考按を加える。

II 実験方法

II-1. 原理

図1は、duration 0.5msec の単発矩形波を高速フーリエ変換 (FFT) により解析したパワースペクトルである。0~625Hz の図示する範囲では、ほぼ均一な連続スペクトルをもつ事が示されている。一般に、duration Δt の矩形波は、広い周波数領域にわたる連続スペクトルをもち、 $\omega/2\pi \ll 1/\Delta t$ なる周波数においては、ほぼ均一な周波数成分を有する⁹⁾。

このようなスペクトルをもつ duration の短い単発矩形波衝撃で、声帯に衝撃的な強制振動を励起し、声帯の response を測定し分析することによって、従来用いてき

図1 単発矩形波とパワースペクトル

た連続正弦波による強制振動と比較して、はるかに広い周波数領域における声帯の共振特性を測定することが可能となる。

II-2. 対象

13例の新鮮なヒト喉頭全摘標本の病変のない側の声帯を対象とした。男性は11例で、原疾患は、喉頭ガン9例、下咽頭ガン1例、舌ガン1例である。女性は2例で、舌ガン1例、気管ガン1例である。

II-3. 実験装置および測定方法

図2に block diagram を示す。装置は、励振系と超音波系と解析系に大別される。超音波系としては、従来

図2 Block Diagram

の超音波パルス法 M-mode 変法を用いた。

a. 励振系

電気刺激装置 (SEN-3201) を用いて, duration 0.5 msec の単発矩形波を発振させる。この波形は, オシロスコープ (VC-10) の A-channel でモニターする。矩形波を出力アンプ (MIMY-AM30) にて増幅し, Wilcoxon 社製インピーダンスヘッド内蔵加振器 (F3Z-602 W) を駆動する。

b. 超音波系

超音波探触子 (2.25MHz, 10mm ϕ) と, 周波数 1 万 Hz 高繰返し発振器内蔵超音波パルス送受信器 (USI-19 W) を用し, A-mode として声帯 echo を検出する。受信利得を下げ, 声帯内部の他の界面からの反射波を消去し, 声帯遊離縁よりの反射 echo を選別し, Echo selector (SSZ-43W) の gate を遊離縁にあわせる。単発矩形波衝撃により励起された振動によるこの echo の微小なる高さの変動を電位に変換し (M-mode 変法), オシロスコープの B-channel でモニターする。なお, 声帯遊離縁において echo source は, 声帯膜様部のおよそ 1~2mm $\times$ 10mm の範囲であり, その面の overall の動きを観察することになる。

摘出喉頭は披裂間で後壁を展開し, 手で保持する。喉頭室に強い浮腫が生じている例, 仮声帯と声帯が密着している例では, 仮声帯を切除して, 超音波ビームが確実に声帯遊離縁をとらえられるようにした。超音波ビームが声帯遊離縁に垂直に当たるように, 前喉頭筋群の上から超音波探触子を甲状軟骨側面に当て, 次に加振器を甲状軟骨正中に当て, duration 0.5 msec の単発矩形波衝撃で声帯を励振する。

声帯には以下の三条件を設定した。すなわち, 1. 後壁展開後, 声帯に何ら操作を加えない場合, 2. 声帯に質量負荷を与えた場合, 3. 声帯長軸方向に tension を加えた場合, である。mass 負荷は, 鉛小片を可及的少量のアロンアルファにて, 声帯膜様部上面中央で遊離縁付近に貼布し, 振動測定後, 接着剤を含めた総重量を微細質量測定器を用いて計測した。また長軸方向の tension は, 声帯粘膜固有層直下で披裂軟骨声帯突起に 5-0 ナイロン糸をかけ, 長軸方向に牽引し force-displacement transducer を用いて張力を測定した。

II-4. 解析法

オシロスコープでモニターされる振動波形は, Data recorder で記録する。この波形は, Recticoder によって随時再生記録をとることが可能である。さらに, 振動

図 3 スペクトル表と共振の Q

波形を日本光電社製 Mini computer (ATAC-450) を用いて, 高速フーリエ変換 (FFT) を行い, その周波数スペクトルを求めた。通常, 励振後 80msec の波形を抽出し, サンプルポイント数 1024 とし, スペクトルの最小分解能である 12.2Hz 単位 of ヒストグラムにて表示させた。比較的振動波形の振幅の大きい例においては, サンプルポイント数を変更できないため, 波形抽出時間を 100msec, 200msec に延長し, それぞれ 9.76Hz, 4.88 Hz と最小分解能を上げて, ヒストグラムの単位を細かく解析を加えた。また同時に, 共振周波数および共振の鋭さ Q についても解析した。なお, スペクトル表の横軸は周波数を示し, 縦軸はその周波数の波の power を示している。周波数スペクトル上のピークが共振周波数 f であり, 共振の Q は, スペクトルをスムージングし, power がピークに対応する power の $1/\sqrt{2}$ になる周波数を f_1, f_2 とすれば, 次式で与えられる。

$$\text{共振の鋭さ: } Q = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} \quad (\text{図 3})$$

III. 成 績

単発矩形波衝撃の負荷により, 声帯遊離縁から, 特有な減衰振動波形が観察された。図 4 は, Recticoder によって記録した波形の一例である。上段は duration 0.5msec の単発矩形波を表わし, 下段は声帯遊離縁の振動波形を表わす。通常, 衝撃負荷後, 短い time lag に続いて振動が開始され, 波形は第一波または第二波に最大振幅をもち, 数 10msec で flat になる減衰振動であった。

図 4 Recticorder により記録された波形

上段: duration 0.5msec. 単発矩形波

下段: 声帯遊離縁の振動波形

超音波パルス法 M-mode 変法では、受信利得を調整し、Echo selector の gate の位置を適当に set すれば、声帯遊離縁のみならず、声帯内部の振動の情報をも得ることができる。喉頭展開後、操作を加えていない状態の男性例において、Echo selector の gate の位置を、a. 甲状軟骨 echo に set した場合、b. 声帯筋層に set した場合、c. 声帯遊離縁に set した場合の振動波形とスペクトルを図 5 に示す。内部における微細な振動動態の差異を反映し、甲状軟骨においては、共振周波数 $f = 87.9\text{Hz}$, $Q = 3.00$ 筋層では $f = 117.2\text{Hz}$, $Q = 4.81$ 遊離縁においては、二つの共振周波数が得られ、 $f = 117.2$

Hz, $Q = 6.85$ および $f = 166.5\text{Hz}$, $Q = 6.22$ であった。

次に、設定した各条件下の声帯遊離縁の振動より得られた成績を示す。

Ⅲ-1. 声帯に操作を加えない場合

振動波形のスペクトル上、ピークが単峰性の場合と、二峰性を示す場合が見られた。二峰性の場合、高周波数域の第二共振の power は小さく、同一症例においても、超音波ビームの指向方向によってはピークが出現する場合としない場合があった。図 6 は男性症例の一例で、比較的均一な振動数からなる減衰振動波形が記録されている。図 7 は他の男性症例で、比較的高周波数の振動より開始し、次いで低周波数の振動が続く減衰振動波形が記録された。スペクトルにおいても二峰性のピークが観察され、power の大きい第一共振 $f = 122\text{Hz}$ と、power の小さい第二共振 $f = 207\text{Hz}$ が明瞭に示されている。

全症例の平均値は、共振点が単一のもの、および二つ出現した場合では周波数の低いものについて第一共振としてまとめると、 $f = 118\text{Hz}$, $Q = 4.92$ であった。共振が二つ出現した場合、周波数の高い第二共振は $f = 180\text{Hz}$, $Q = 6.38$ となった。男女を比較すると、第一共振においては、やや男性が低い傾向をもつが、推計学的には、第一、第二共振とも男女において有意の差を示さなかった (表 1)。

図 5 声帯内部の振動動態

図 6 単峰性スペクトル例

図 7 二峰性スペクトル例

表 1 声帯の共振特性（無負荷）

第一共振

mean $\pm$ S.D.

共振周波数	$f = 117.5 \pm 12.9 \text{ Hz}$
共振の鋭さ (n=13)	$Q = 4.92 \pm 0.45$
男 性 (n=11)	$f = 115.9 \pm 13.5 \text{ Hz}$ $Q = 4.81 \pm 0.24$
女 性 (n=2)	$f = 124.9 \pm 8.0 \text{ Hz}$ $Q = 5.24 \pm 0.50$

第二共振

	$f = 180.3 \pm 17.7 \text{ Hz}$
(n=5)	$Q = 6.38 \pm 1.39$

Ⅲ—2. 声帯に mass 負荷を与えた場合

mass を負荷する位置によって、共振周波数は変化した。図 8 は、披裂軟骨部と声帯遊離縁中央部にほぼ同質量の mass を負荷した場合を比較している。披裂軟骨部では mass を負荷しても共振周波数は変化しないが、遊離縁に mass を負荷すると共振周波数は低下した。図 9 は、声帯遊離縁中央上面、下面、前連合部付近に、ほぼ同質量の mass を負荷した場合の比較である。前連合付近では、負荷前と比べて共振周波数はほとんど変化せず、やや高くなる傾向を示した。中央部では、上面、下面ともに共振周波数は低下した。今回の実験では、鉛小片を声帯遊離縁中央部に置いて、検討を加えることに統一した。

男性一症例において、種々の質量の mass を負荷した場合の波形とスペクトルを図 10 に、負荷質量と共振周波数の対応を plot し図 11 に示す。（この症例では、波形の振幅が大きく記録され、FFT 処理の際、励振後 200 msec の波形を抽出した。そのため、4.88Hz 単位の解

図 8 mass 負荷の位置と共振周波数

図 9 mass 負荷の位置と共振周波数

図 10 mass 負荷による共振特性の変化
(男性例, 波形分析時間 200 msec)

図 11 mass 負荷と共振周波数 (同男性例)

図 12 mass 負荷と共振周波数の対応 (男性 6 症例)

析を加えてある。) 負荷質量の増大に伴い共振周波数は低下し、共振のQも低下した。

質量負荷前の声帯遊離縁の共振周波数が近い値をとった男性 6 症例において、負荷質量と共振周波数の対応を図 12 に示す。(質量負荷後も、スペクトルが多峰性を呈する場合、第一共振、第二共振とも、無負荷時と比べて低下した。それぞれの症例における第一共振周波数に限って plot した。) 負荷質量 0~100mg で線型回帰分析を加えた回帰直線を示してあるが、100mg をこえる質

図 13 mass 負荷と共振周波数の対応 (男性 6 症例)

量負荷に対する共振周波数は、この直線より上方にあり、実際の負荷質量と共振周波数の対応は、非線型的関係が予想された。図 13 は、質量を 2 乗しその逆数を X 軸にとり、Y 軸は共振周波数を取り plot したグラフであるが、この場合には正の相関を示唆する。

共振の Q に関しては、FFT 処理後のヒストグラムが 12.2Hz きざみであることから、低周波数領域では Q 値が実際より低い値をとる恐れがある。今回の解析では、60Hz 以下に出現する共振に対して、Q 値は 5.0 以上の値をとることができない。以上の点を考慮しなければならないが、負荷質量 50mg 以下では、 $Q = 3.94 \pm 0.12$ 、50mg をこえる負荷では、 $Q = 3.61 \pm 0.10$ と質量増大に伴い Q は低下する傾向を示した。

Ⅲ—3. 声帯に長軸方向の tension を加えた場合

男性一症例において、tension を負荷した場合の振動波形とスペクトルを図 14 に示す。長軸方向の tension 負荷により周波数の高い、減衰率の小さい波形が記録された。さらに tension を増加させていくと、波形は複雑な合成振動波形を呈するようになり、70g の tension を加えた波形では、100Hz 前後の振動と 170Hz 前後の振動を区別しうる。tension と共振周波数の対応を plot し図 15 に示す。無操作時の遊離縁の共振周波数を起点として、tension 50g 付近まではほぼ linear に上昇する共振周波数が plot され、これは以後上昇率は飽和してくる。また、tension 70g より 100Hz 付近にも共振帯域が明瞭に出現する。実線は tension と共振周波数間に

図 14 tension による共振特性の変化 (男性例)

図 15 tension と共振周波数の対応 (同 男性例)

図 16 tension と共振の Q (同 男性例)

図 17 共振周波数と共振の Q (同 男性例)

図 18 tension による共振特性の変化
(女性例, 多峰性スペクトル)

図 19 tension と共振周波数の対応
(女性例)

非線型的回帰を想定した二次曲線である。図 16 は、この症例の tension と Q の対応を表わしている。tension の増加とともに Q は増加するが、やはり 50g をこえる tension では飽和傾向をもち、図 17 に示すごとく、tension を負荷した際の共振周波数と共振の Q の間には、正の相関関係が見られた。

次に、無操作時に 2 峰性のピークをもつスペクトルを呈し、tension を加えた際にも 2 峰性あるいは 3 峰性のスペクトルが測定された例を示す。図 18 に tension 負荷時の多峰性スペクトル例を示す。図 19 のグラフのごとく、高周波数領域に出現する第二共振も、tension の増加に伴う周波数の上昇が見られた。女性症例では、男性症例と比較して、共振周波数の上昇が急峻である。また、tension がある程度大きくなると、100Hz 付近に共振帯域が存在することが明瞭になっている。

第一共振について、tension と共振周波数の対応を検討する。無操作時の共振周波数の近似する男性 6 症例に

ついて、図 20 に示すように、各症例ごとに共振周波数の上昇率は異なるが、tension が 50g 付近まではほぼ linear に上昇し、さらに大きい tension においては non-linear な対応を示した。また、第一共振周波数と共振の Q の間には、tension を負荷した際に正の相関関係が存在することが示された (図 21)。

V 考 按

声帯の振動機構に関しては、古くから多くの説が唱えられてきた。現在、声帯振動は粘膜波状運動によって主として構成されるという見解においては、多数の研究者の一致するところである。1966年 広戸¹⁰⁾¹¹⁾ は、発声中の声帯の振動を高速度映画所見より分析して、粘膜波状運動を声帯振動の本質的なものととらえ、声帯振動の主要動力は、声帯表面に粘膜波状運動を起こす粘膜の粘弾性と、声門下圧の変動にあるとする mucoviscoelastic-aerodynamic theory を提唱した。広戸の説に注目した

図 20 tension と共振周波数の対応
(男性 6 症例)

図 21 共振周波数と共振のQ
(男性 6 症例)

石坂¹²⁾¹³⁾は、上下声唇が位相差をもつ粘膜波状運動を記述するため、最も端的に表わしうる振動モデルとして、声帯を上下声唇に対応する2部分にわけ、各々を質量スプリング抵抗よりなる一つの等価振動子で表わし、両質量をスプリングで結合した2自由度モデル(2質量モデル)をとりあげた。金子¹⁴⁾による摘出喉頭声帯の静的引張り応力-変位の測定結果から推定された声帯の標準パラメーター値を用いた計算機シミュレーションより、2質量モデルが、実際の声帯と同様に、声門から見た声道のインピーダンスが容量性であっても発振できること、その他の諸特性も実測結果と一致することが確かめられ、その自励振動機構を明らかにした。また、これは声帯の自励振動における粘膜波状運動の意義を立証したものであり、mucoviscoelastic-aerodynamic theory についての物理学的根拠を示したものと言える。さらに一色、石坂^{15)~17)}は、摘出喉頭において、左右緊張不均衡時の声帯振動様式を高速度映画で記録し、二質量モデルの制御パラメーターの一つである声帯緊張度パラメーターを変化させた計算機シミュレーションの結果がこれと一致した事を報告し、このようなシミュレーションによる定量化が、喉頭生理の理解を深め、臨床的にも意義があると述べた。

粘膜波状運動を声帯構造の観点より掘り下げた平野^{18)~21)}は、声帯は物性の異なるいくつかの層よりなる点

に注目し、声帯の層構造概念を提唱した。すなわち、振動中の動きは粘膜上皮と固有層浅層よりなるカバーで最も大きく、粘膜波動は主にここにおきる。筋層のボディーでは動きが少ない。カバーはすべての筋で受動的に調節されるのに対し、ボディーは受動的調節のほか、能動的調節を行うとした。そして、層構造を考慮した弾性特性値の測定を行い報告している。工学系においても、Titze^{22)~24)}は声帯を非圧縮性の粘弾性を有する連続体として、その振動を内部の振動をも含めて直接記述するため、連続体である声帯を多数の質点系で表わし、声帯の基本的粘弾性定数を用いて各質点の運動を数値計算したうとする計算機モデルの研究を行っている。声帯内部の振動動態に関して、兼坂^{25)~27)}は in vivo において声帯の effective depth を測定する実験を M-mode 変法を用いて行っており、また都築²⁸⁾は、斎藤、磯貝の travelling wave theory^{29)~31)}をうけ、内喉頭筋の活動のある状態での犬喉頭の吹鳴実験を行い、筋層には規則的な振動が認められなかった事を報告している。

以上のごとく、声帯振動機構を解明するためには、医学、工学それぞれの面からの研究が行われる一方、両面の協力が必要である。工学的声帯モデルのシミュレーションにおいては、声帯の biomechanical factor の実測値は不可欠な条件であり、また声帯振動の生理学的あるいは病態生理学的検討では、工学面の数理論的裏付けが

必要となる。この意味で、声帯物性を測定する事は、非常に重要なことであるといえる。当教室では、従来の UGG の手法を利用して、新たな振動観察法として、超音波パルス法 M-mode 変法を開発し、声帯のもつ biomechanical factor の追求を続けてきた。内田³⁾は、M-mode 変法の原理について理論的考察を加え、声帯の連続正弦波強制振動による共振特性を in vivo において測定した。その結果、安静呼吸時における声帯の共振周波数は男性で平均 128Hz、女性で 136Hz、共振の Q は男性で 3.4、女性 4.0 であった。発声準備状態では、男性の低い pitch での発声では唯一つの共振点が認められ、発声 pitch はその共振周波数と近似した値をとる。また、男性の高い pitch での発声および女性では、共振点が2つ認められ、発声 pitch はより高い第二の共振周波数に近似した値となることを報告した。鈴木⁶⁾は、病的声帯の共振特性を in vivo で測定し、声帯ポリープ声帯、声帯癌声帯、反回神経麻痺声帯における共振周波数の変化を mass, stiffness factor より詳細な検討を加えた。上述の研究では、それまで皆無であったヒト生体における声帯の共振特性を測定したことが特記される。次いで、小松^{7,8)}は、in vivo における実験成績の理論的根拠を求めるため、ヒト摘出喉頭を用いて声帯に種々の mass, tension を負荷し、その共振特性を測定した。その結果、無操作では共振周波数は 100Hz 前後、共振の Q は 2.0～3.0 であった。tension を負荷すると第二の共振が出現し、第二の共振周波数と Q は張力の増大に比例して高くなった。一方、第一の共振周波数は常に 100Hz 前後であり、Q も 2.0～3.0 にとどまった。mass 負荷では、共振周波数、Q とともに低下することを示した。さらに、声帯の機械定数として、effective mass $0.13 \pm 0.02\text{g}$, effective stiffness $51 \pm 8\text{kdyn/cm}$ を算出した。

振動体として声帯は、工学的には、分布定数系ないしは多質点系モデルとして扱われている。そのような連続体には、多数の固有振動数と振動モードが含まれているはずである^{32)~34)}。連続正弦波による共振特性測定でも、男性 high pitch、女性の発声準備状態、および摘出喉頭の tension 負荷時には、2つの共振点が出現することが確認された。しかし、連続波では共振特性を測定できる周波数領域に制限があり、今回さらに広い周波数領域で共振特性を測定するため、単発矩形波励振法が検討されるに至った。

振動系に既知の加振力を与え、その振動特性を測定す

る方法として、正弦波で定常加振する共振法と、インパルス加振法（今回の単発矩形波励振はこれに属す）がある³⁵⁾。インパルス加振法の特長は、正弦波加振による共振法と比較して、短時間で処理ができ、1回のインパルス加振で、その振動系のすべての固有振動数を知ることができる点にある。すなわち、長時間不動状態に位置を保持することが困難な声帯に应用するには最も適した方法といえよう。しかし、過渡振動を扱うため、アナログ的処理ではその解析は困難であったが、近年コンピューターによるデジタル処理が容易になり、実用化され、種々の振動特性を表わす特性値を求められるようになった。理論的にはかなり以前より検討されており、関ら⁷⁾は、あらゆる振動現象は定常状態にある単一周波数の部分波の重畳であるとの考えの下に、衝撃関数を導き、衝撃波の物理学的意味としての自由振動との関連を考察し、さらに衝撃試験の実用性を述べた。すなわち、自由振動においては、運動を起こす原因をその初期条件に求めるのに対し、衝撃の場合は、初期条件はすべて0で、初速度を与えることで運動がひきおこされるのであるが、現象的には、衝撃によって励起される振動は、その系の自由振動の特別なものと全く同一であるといえる。そして、衝撃試験においては、振動系の response を分析することにより、系の周波数特性を推知しようとしている。別のとらえ方をすれば、duration が限りなく0に近い理想的衝撃波は、全周波数領域にわたって均一な周波数スペクトルをもつため、これを強制振動の入力に用いれば、一瞬にして全周波数領域にわたる均一な振動を励起し、その系に存在するあらゆる固有振動数において共振現象をおこすと考えられる。

図 22 は、duration Δt の単一矩形波の周波数スペクトルを表わすが、連続スペクトルを有し、主要な成分は $1/\Delta t$ Hz までの帯域内に存在していることを示している³⁶⁾。 Δt の値を小さくするとこの周波数帯域は増大し、 Δt をきわめて小さくすると、スペクトルはほぼ flat になる。実際に衝撃試験の入力に使用する場合には、 Δt を限りなく0に近づけることはできないので、上記の周波数帯域が、測定される系の周波数領域をカバーするように Δt を波定数する必要がある。今回の実験では $\Delta t = 0.5$ msec を選んだが、FFT によるスペクトルが示すごとく、少なくとも $0 \sim 625\text{Hz}$ にわたってほぼ flat であり、当教室で従来用いた $30 \sim 300\text{Hz}$ の連続正弦波と比較して、共振特性を測定できる周波数範囲は拡大している。 Δt は0に近づく程カバーされる周波数範囲は広がるが、

図 22 福村³⁶⁾より引用

實際上、電気刺激装置では発振可能であっても、加振器から声帯に与える衝撃の amplitude が低下するため、励起される波形の amplitude も同様に低下してしまう。duration 0.5 msec 以下では、振動波形の検出が困難であった。

さて、振動系をインパルス加振した場合、系に含まれる多数の固有振動が励起されるが、それぞれは独立した（1自由度系と同じ）減衰振動を行い、系全体として振動は各振動モードの総和で表わされる³⁵⁾³⁷⁾³⁸⁾。したがって、声帯を単発矩形波励振し、M-mode 変法により記録された減衰振動波形に FFT 処理を加えれば、それを構成する各振動モードに分解することができ、その周波数スペクトルより声帯の共振特性が求められるのである。（ただし、2つの非常に接近した固有振動数が存在する場合に、それらがスペクトル上で共通のピークを形成し、区別されない可能性は否定しえない。）

ヒト摘出喉頭を用いて声帯を単発矩形波励振し、測定された成績について、連続波を用いて測定された成績と比較し考察を加える。無操作の声帯における今回の成績は、より高い周波数帯域に出現する第二共振が検出されたことが特徴である。この共振は、従来の連続波では in vivo, in vitro の共振特性測定時には検出されなかったものである。単発矩形波励振法では、声帯の有するすべての固有振動数を記録できるはずであるが、第三次以上の共振は測定されなかった。この点については、高周波数帯域では励起される波の amplitude が極端に小さいため検出されなかったと考えるのが妥当であろう。さて第一共振周波数が 117.5Hz であるということは、内田、

鈴木の in vivo の安静呼吸時、および小松の無操作における共振周波数と近似する値である。第二共振周波数については、比較する実測データは過去にはない。前述の石坂の二質量モデル理論では、声帯に多数存在する固有振動数の中で、最も低い2つの固有振動数 fn_1, fn_2 を求め理論的展開をしているが^{32)~34)}、第一共振周波数、第二共振周波数は共に、この理論値ともよく近似する結果であった。また、測定された両共振周波数間に、倍音関係がない事より、金子¹⁴⁾の引張り応力-変位測定において、声帯の上唇部、下唇部で等価スティフネスが異なるという結果とも呼応して、声帯の機械的インピーダンスの分布が不均一であることを表わすものと考えられる。共振のQは、連続波の成績と比較してやや高値であった。スペクトルの最小単位などを考慮すると、Q値の信頼性は、現在のところ連続波における測定の域には達していないと思われる。

次に、声帯に mass 負荷した場合の成績では、mass の増大に伴い共振周波数およびQは低下し、小松の成績と一致した。第二共振が測定された場合、無操作時の第二共振と比較して同様に低下していた。声帯の共振周波数に対する mass factor の関与については、鈴木、小松らがすでに詳細な検討を加え、声帯ポリープ症例では、ポリープ重量が増加すると共振周波数が低下し、重量がかなり重い場合には stiffness の増大により、理論値より高い値をとる。摘出喉頭に mass を負荷した場合にも同様であった。今回の成績も同様であった。Q値に関しては、鈴木は声帯ポリープ症例では、健側、患側に有意差は認められなかったと述べているが、摘出喉頭においては、声帯粘膜に鉛小片を貼布した場合、mass 負荷により低下する傾向を示した。mass 負荷の位置と共振周波数の変化に関して、披裂軟骨部に mass を負荷しても共振周波数に変化が見られなかった。これより、披裂軟骨部が固定端となっていることが示され、単発矩形波励振によって声帯遊離縁に測定される波形は、声帯の膜様部に局限して励起された振動に他ならないことがわかる。

声帯に tension を加えた場合、小松は、100Hz 前後の共振点の他に、第二の共振が出現し、この第二の共振周波数が tension の上昇に伴い上昇したことを報告した。単発矩形波励振による測定では、この共振周波数は、無操作における声帯の第一共振周波数が、tension の小さい時点では linear に、tension が大きくなると non-linear に上昇したものであると考えられた。さらに

高周波数領域にもう一つの共振を認め、これも無操作における声帯の第二共振から、tension の増加に伴い上昇する傾向が示された。100Hz 前後の共振は、今回はある程度 tension の高くなった状態で出現し、やはりほぼ一定の周波数であった。内田は、男性 high pitch および女性の発声準備状態における 100Hz 前後の共振を、声帯のもつ最低次の固有振動数と考察し、小松は声帯のもつ最低次の固有振動数または甲状軟骨などの影響も考えられるとした。今回の測定結果では、tension 負荷が少なくとも 50g 以上になると出現し、しかも加えた tension の大きさは無関係に一定の周波数であるということから、喉頭内の他の振動要素の影響、例えば筋層、破裂軟骨の部分的関与なども考えられるが、今後の検討を要する課題である。

以上の実験成績をもとにして、声帯の機械定数を算出する。いま、無負荷における声帯の共振周波数を f 、既知量の mass Δm を負荷した時の共振周波数を f' とすれば、

$$\text{effective mass} = \frac{\Delta m}{(f/f')^2 - 1}$$

$$\text{effective stiffness} = (2\pi f)^2 \cdot \left(\frac{\Delta m}{(f/f')^2 - 1} \right)$$

で算出される。すなわち図 12 の男性 6 症例の成績から

$$\text{effective mass} = 0.141 \pm 0.02 \text{ g}$$

$$\text{effective stiffness} = 73.7 \pm 12.0 \text{ kdyn/cm}$$

と算出された。

摘出喉頭における声帯の機械定数について、小松⁷⁾は連続波を用いた共振特性より、effective mass $0.13 \pm 0.02 \text{ g}$ 、effective stiffness $51 \pm 8 \text{ kdyn/cm}$ という値を得ており、単発矩形波を用いた結果と近似した。金子¹⁴⁾³⁹⁾は、声帯の静的引張り応力—変位の測定結果から、一自由度振動体として effective stiffness 35.5 kdyn/cm 、二自由度振動体として、上唇 35 kdyn/cm 、下唇 87 kdyn/cm 、effective mass $0.1 \sim 0.29 \text{ g}$ を報告している。一色¹⁷⁾は、effective stiffness 81 kdyn/cm 、effective mass 0.12 g という値を報告しており、これらの現在声帯の標準的 parameter となっている諸家の数値ともほぼ近似する値であった。

ヒト生体において、発声 pitch は、複雑かつ巧妙な調節をうけ制御されている。摘出喉頭における条件設定は、その調節機構のごく一部を検討しているに過ぎない。単発矩形波励振と M-mode 変法による共振特性の

測定法は、本実験に先行して in vivo への応用実験から開始され、増田⁴⁰⁾は予報的にはあるが、本法によって得られた新しい知見を報告している。単発矩形波励振によって、振動測定に要する時間が 1 回あたり数 10 msec に短縮されたこと、また共振特性を測定できる周波数領域が広がったことは、in vivo で発声準備状態をとらえるうえに非常に有利である。また、超音波パルス法 M-mode 法およびその変法によれば、声帯に何ら操作を加えることなく、頸部表面から声帯内部の各界面の振動動態をとらえることも可能である。このような点で、ヒト生体において声帯物性が pitch control にいかなる対応を示すか、in vivo における本法の成績は、我々に有力な情報を与えてくれるものと期待される。

Ⅶ ま と め

ヒト摘出喉頭において、声帯を単発矩形波衝撃を用いて励振させ、超音波パルス法 M-mode 変法により観察し、その共振特性を測定して以下の成績を得た。

1. 声帯に操作を加えない場合

声帯の共振周波数は、 $f = 117.5 \pm 12.9 \text{ Hz}$ 、共振の鋭さは、 $Q = 4.92 \pm 0.45$ であり、性別からみると男性では、 $f = 115.9 \pm 13.5 \text{ Hz}$ 、 $Q = 4.81 \pm 0.24$ 、女性では $f = 124.9 \pm 8.0 \text{ Hz}$ 、 $Q = 5.24 \pm 0.50$ となり、女性が多少高値を示した。高周波数の第二共振は、 $f = 180.3 \pm 17.7 \text{ Hz}$ 、 $Q = 6.38 \pm 1.39$ であった。

2. 声帯に質量負荷を与えた場合

負荷質量の増大により、共振周波数および Q はともに低下した。

3. 声帯に長軸方向の tension を加えた場合

tension 50g 付近までは、共振周波数はほぼ直線的に上昇し、それをこえる tension では、非線型の変化を示した。第二共振周波数も、tension の増加に伴い上昇した。

共振周波数と Q に、正の相関関係が認められた。

4. 声帯の機械定数

男性声帯において

$$\text{effective mass} = 0.141 \pm 0.02 \text{ g}$$

$$\text{effective stiffness} = 73.7 \pm 12.0 \text{ kdyn/cm}$$

と算出された。

参 考 文 献

- 1) 北村 武, 金子敏郎, 浅野 尚: 喉頭疾患の超音波診断 — ultrasonoglogtography の可能性 —. 日気食会誌 15: 181, 1964.
- 2) Kitamura T, Kaneko T and Asano H: Ultrasonic diagnosis of the laryngeal disease. Jap Soc Ultrason Med 2: 14-15, 1964.
- 3) 日本音言語医学会編: 声の検査法, 医歯薬出版, 1979.
- 4) Kaneko T et al: The Movement of the Inner Layers of the Vocal Fold During Phonation — Observation by Ultrasonic Method (ed. Bless, D and Abbs, J). Vocal Fold Physiology, Contemporary Research and Clinical Issues, College Hill Sandjago: 1981, pp. 223-228.
- 5) 内田邦明: ヒト生体の声帯物性 — 正常者の場合 — 日耳鼻 85: 161-174, 1982.
- 6) 鈴木晴彦: ヒト生体の声帯物性 — 病的声帯の場合 —. 日耳鼻 85: 654-660, 1982.
- 7) 小松健祐 他: 超音波パルス法によるヒト摘出喉頭における声帯物性 第一報. 日超医論文集 41: 287-288, 1979.
- 8) 小松健祐 他: 超音波パルス法によるヒト摘出喉頭における声帯物性 第二報. 日超医論文集 41: 263-264, 1982.
- 9) 関 雅雄, 小林孝夫, 早坂直一: 衝撃関数並に衝撃試験に就いて. 東北帝大, 1940.
- 10) 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(増1): 229-291, 1966.
- 11) 広戸幾一郎: 高速振動体の循環病理. 耳鼻 17: 1-5, 1971.
- 12) 石坂謙三: 声帯の振動に関する研究. 電通大, 1972.
- 13) Ishizaka K and Flanagan JL: Synthesis of voice sounds from two mass model of the vocal cords. Bell Syst Tech J 51: 1233-1268, 1982.
- 14) 金子敏郎, 浅野 尚, 三浦徹蔵, 石坂謙三: 声帯の Biomechanics — Stiffness を中心として —. 耳鼻臨床 64: 1229-1235, 1971.
- 15) Ishizaka K and Isshiki N: Computer simulation of pathological vocal-cord vibration. J Acoust Soc Am 60: 1193-1198, 1976.
- 16) Isshiki N et al: Clinical significans of asymmetric vocal cord tension. Ann Otol 86: 58-66, 1977.
- 17) 一色信彦: 喉頭機能外科とくに経皮的アプローチ — 京大耳鼻科同窓会, 1977.
- 18) 平野 実: 発声中の声帯. 医学のあゆみ 80: 622-627, 1972.
- 19) 平野 実, 小池祐一, 広瀬幸夫, 森尾倫弘: 振動体としての声帯の構造. 日耳鼻 76: 1341-1348, 1973.
- 20) 平野 実: 音声外科の基礎と臨床. 耳鼻 21: 239-440, 1975.
- 21) 王丸光一: 犬声帯の粘弾性に関する基礎的研究. 耳鼻 27: 530-554, 1981.
- 22) Titze Ingo R: The human vocal cords: A mathematical model. Part 1: Phonetica 28: 129-170, 1973.
- 23) Titze Ingo R: Normal modes in vocal fold vibration. J Acoust Soc Am 57: 736-744 1975.
- 24) Titze Ingo R: On the machanics of vocal-fold vibration. J Acoust Soc Am 60: 1366-1380, 1976.
- 25) 兼坂俊章, 鈴木晴彦, 内田邦明, 小松健祐, 金子敏郎 他: 発声時のヒト声帯内部運動 — effective death について —. 日耳鼻 85: 1295, 1983.
- 26) 鈴木晴彦, 小松健祐, 内藤準哉, 金子敏郎: 発声時ヒト声帯の “effective depth” について — Aモード及びMモード法による観察 —. 第15回喉頭基礎問題研究会資料, 1980.
- 27) 内田邦明, 兼坂俊章, 金子敏郎: 声帯内部構造と声帯振動 — 超音波 real time imaging法による観察 —. 第15回喉頭基礎問題研究会資料, 1980.
- 28) 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.
- 29) 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: 171-384, 1977.
- 30) 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(補3): 883-930, 1981.
- 31) 斉藤成司, 福田宏之: 表面構造からみた声帯振動の解析. 第15回喉頭基礎問題研究会資料, 1980.
- 32) 石坂謙三, ジェームズ L. フラナガン: 声帯音源の自励振動モデル. 日本音響学会誌 34: 122-131, 1978.
- 33) 石坂謙三: 声帯の自励振動機構について 第12回喉頭基礎問題研究会資料, 1979.

- 34) 石坂謙三: 声帯の自励振動モデルと計算機シミュレーション. 音声言語医学 22: 243-249, 1981-
- 35) 山田伸志: 振動工学入門. パワー社, 1984.
- 36) 福村晃夫: 短音について. Audiology Japan 24: 31-38, 1981.
- 37) 黒田道雄: 機械振動学. 学献社, 1982.
- 38) Frank S and Crawford Jr: Berkeley Physics Course: Waves Education Development Center Inc. 1968.
- 39) 金子敏郎, 浅野 尚, 内藤準哉, 北村 武 他: 声帯の Biomechanics — damping ratio を中心として —. 気食会報 25: 133-138, 1974.
- 40) 増田 卓, 沼田 勉, 嶋田耿子, 小松健祐, 金子敏

郎: 単発矩形波励振によるヒト声帯物性の観察. 日耳鼻 87: 1256-1257, 1984.

稿を終えるにあたり, 終始御指導, 御校閲を賜った恩師金子敏郎教授に深謝いたします. また, 御協力いただいた鈴木晴彦, 小松健祐, 増田卓先生を始め教室員の皆様に厚く御礼申し上げます.

なお, 本論文の要旨は第44回超音波医学会, 第36回気管食道科学会総会において発表した.

(原稿受付 昭和59. 12. 8日)

別刷請求先 〒280 千葉市玄鼻 1-8-1

千葉大学医学部耳鼻咽喉科学教室 沼田 勉