

〔原著〕 発声時のヒト声帯内部振動について — Ultrasound Laryngography による測定 —

富 永 信 次*

(平成5年11月16日受付, 平成5年11月30日受理)

要 旨

声帯遊離縁の振動は詳細に研究されているが, 声帯内部の振動については有効な検索手段がなく, 未だ十分な検討はなされていない。当教室で開発された Ultrasound Laryngography による高速Mモード法を用いれば, 声帯遊離縁のみならず声帯内部の振動も同時に記録することが可能である。両者の振動を比較して声帯内部に向かう振動減衰状態の指標となる effective depth (振幅減衰距離) ならびに位相速度を測定した。一定の pitch・loudness で発声した場合, 声帯内部の振動と遊離縁の振動の周波数は等しく, 振幅は深さによってほぼ指数関数的に減少していた。effective depth は110Hz・60dB で3.3mm, 150Hz・60dB で2.2mm, 110Hz・70dB で3.7mm, 150Hz・70dB で2.3mm であり, pitch が減少するほどまた loudness が増加するほど effective depth は深くなった。また遊離縁と内部の振動の間には位相差を認め, 位相速度は110Hz・60dB で110cm/s, 150Hz・60dB で140cm/s, 110Hz・70dB で120cm/s, 150Hz・70dB で150cm/s であり, pitch が増加するほどまた loudness が増加するほど位相速度は速くなった。Ultrasound Laryngography による高速Mモード法を用い発声時のヒト声帯内部振動を記録し effective depth ならびに位相速度を測定した結果, 声帯遊離縁と同様に声帯内部も声帯振動に関与していることが示唆された。

Key words: 声帯内部振動, Ultrasound laryngography, Effective depth, 位相速度, 声帯振動

略語一覧: ULG: ultrasound laryngography

I. 緒 言

声帯振動を観察・研究する方法として, 喉頭ストロボスコーピー, 超高速カメラ, 光電グロトグラフィー, 電気グロトグラフィー, フォトキモグラフィー, X線ストロボスコーピー等が数多く行われてきた¹⁾。しかしその多くは声帯遊離縁粘膜の振動の観察であり, 声帯内部筋層の振動については有効な観察手段がなく十分な検討はなされていない。一方, 声帯を物理的にモデル化して数値的に声帯内部振動を検討する研究^{2,3)}も行われているが, これらの研究は常に生体での声帯振動と対比して検討されるべきである。

1964年, 当教室では声帯振動を観察する方法として超音波パルス法を応用した, Ultrasonoglottography を開発し⁴⁻⁶⁾, 声帯振動や声帯物性等について研究報告してきた⁷⁻¹⁹⁾。さらに1986年, 喉頭用超音波画像診断装置 Ultrasound Laryngography (以下 ULG と略す) を開発し²⁰⁾, 喉頭のBモード画像の観察や, 高速Mモード法ならびにMモード変法による声帯振動波形を観察研究してきた²¹⁻²³⁾。今回著者らは, ULG による高速Mモード法を用い, ヒト生体における発声時の声帯遊離縁と声帯内部の振動波形を同時に記録し観察研究した。そして, 声帯遊離縁と声帯内部の振動波形の振幅比と深さの関係から声帯内部へ向かう振動減衰の指標となる effective

* 千葉大学医学部耳鼻咽喉科学講座

* Shinji TOMINAGA The Vibration of the Inner Layers of the Vocal Fold during Phonation —Observation by Ultrasound Laryngography—

* Department of Otorhinolaryngology, School of Medicine, Chiba University, Chiba 260.

Received November 16, 1993 Accepted November 30, 1993.

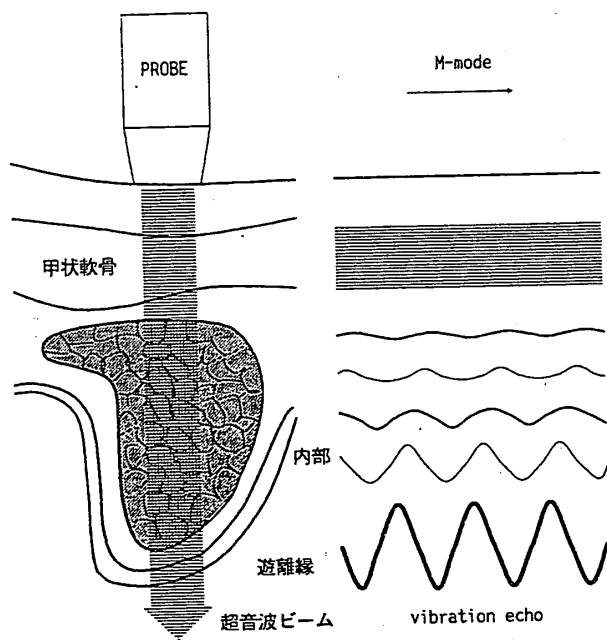


図 1. 超音波Mモード法の原理 (発声時の声帯)

depth (振幅減衰距離) を測定した。また、声帯遊離縁と声帯内部の振動波形の位相差と深さの関係から位相速度も同時に測定した。その結果、声帯遊離縁と同様に声帯内部も声帯振動に関与していることが示唆されたのでここに報告する。

II. 実験方法

1. 原理

超音波は、光と同様に指向性が強く音源から直進するが、異なる媒体の境界面ではスネルの法則に従って反射屈折し、echo を生ずる。その強さは音響インピーダンスの差が大きい程大で、喉頭では声帯粘膜遊離縁と空気との界面が最大となる。そこで、図1のように超音波探触子を外頸部に当て、声帯に超音波ビームが直角に当たるようにすると、声帯遊離縁から強い echo が得られる。発声時には声帯の振動に一致した特有の vibration echo が生ずるが、この時声帯内部からも小さな echo が発生する。そこで、このように生じた声帯内部の小さな echo も捕らえられるように、超音波系の gain を適当に調節しMモード法を用いれば、声帯遊離縁のみならず声帯内部の振動波形も記録測定することが可能となる²²⁾。

2. 装置

装置は^{20,21)}、超音波系として超音波装置本体および付属の電子リニア探触子ならびに超音波透過法で使用する ultrasound pulse transmission detector と、観察記録系としての ULG 多機能モニターより構成される。block diagram を図2に示す。

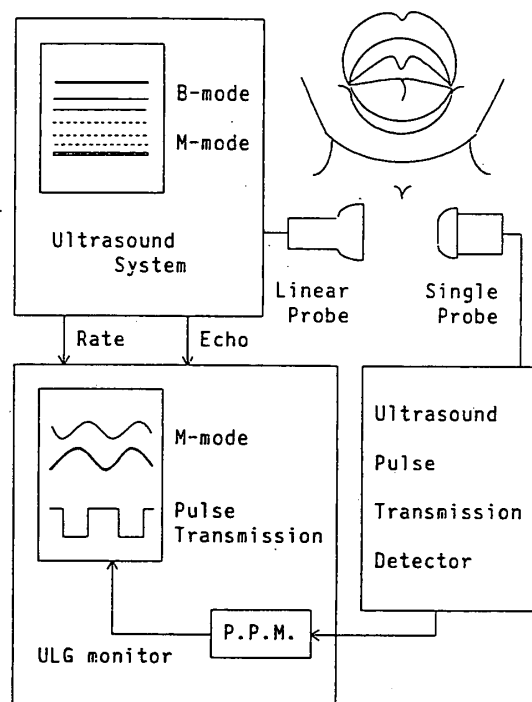


図 2. Block Diagram

1) 超音波系

超音波系本体は東芝製 SAL77A を基本とした Ultrasound Laryngography で、高速Mモード用の探触子は電子リニア走査型探触子10E-702V (有効視野幅25mm, 素子数54本, 走査線107本, 周波数7.5MHz) を使用し、分解能を上げるため超音波ビームに焦点をかけ声帯遊離縁でのビーム幅は理論上約 2×2 mm 程度となっている。透過法用の探触子は直径13mm のシングルプローブ (中心周波数2.25MHz) を用いた。超音波系本体の TV 画面上ではBモード法、高速Mモード法による観察が行える。

2) 観察記録系

声帯のような高速度運動体を超音波系本体の TV 画面上で実時間で連続的に観察することは不可能で、声帯振動を詳細に観察するには ULG 多機能モニターが必要である^{20,21)}。この ULG 多機能モニターを用いて、実時間で連続的な声帯遊離縁と声帯内部の高速Mモード振動波形ならびに超音波透過波を同時に表示した。

3. 測定法

被検者は正常声帯を有する成人男性1名で、声楽練習の経験は有しない。音声サンプルは/e/という胸声区の持続発声で pitch・loudness を変えて繰り返し測定を行った。探触子を声帯の前後軸に垂直となるように甲状軟骨翼側方の皮膚上に直接圧抵した。Bモード法で超音波系本体の TV 画面上に喉頭の冠状断面像を描出し、仮声帯、声帯、喉頭室等の解剖学的位置から目的とする声

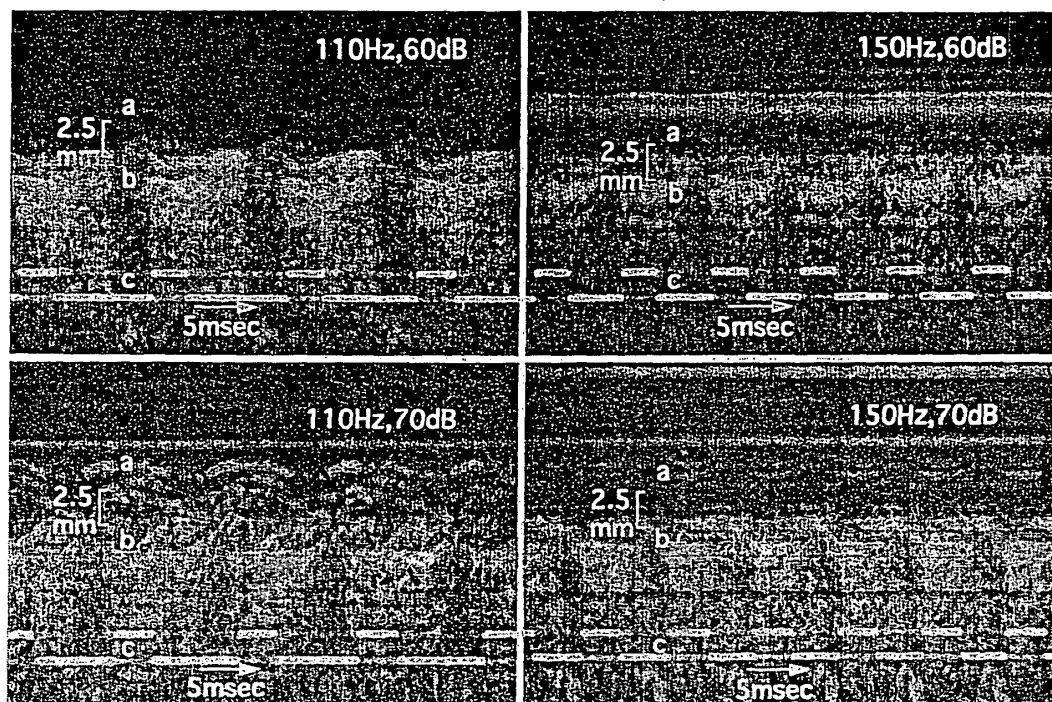


図 3. ULG による遊離縁と内部の同時記録

- a : 内部の高速Mモード波
b : 遊離縁の高速Mモード波
c : ULG 超音波透過波

帯の位置にカーソル線が合っていることを確認した後、高速Mモード法に切り換え、高速Mモード波ならびに透過波を ULG モニター上に描出しポラロイド写真で撮影した。ULG モニターの撮影条件はX方向5～20msec/division, Y方向2.5mm/div. とした。測定中発声はなるべく同一状態を維持するように努め、声帯遊離縁と声帯内部の高速Mモード波を同時に描出するように超音波系本体の gain を適当に調節した。pitch・loudness はミナト医科製 Phonation Analyser (PA-500) にてモニターした。

図3にそれぞれの pitch・loudness における高速Mモード法の声帯内部と声帯遊離縁の波形ならびに超音波透過波のポラロイドによる同時記録写真の例を示す。1 div. は縦2.5mm, 横5 msec であり a が声帯内部, b が声帯遊離縁, c が透過法の波形である。そして、図4のようにして、遊離縁の振幅 (I_0), 内部の振幅 (I), 遊離縁から内部までの深さ (d), 遊離縁から内部までの位相差 (t) を測定した。両側声帯間の中央地点にあたる遊離縁の基線は高速Mモード法のみでは声帯の接触時に対側声帯のエコーが映るためはっきりしないので声帯接触時に対側声帯に伝わる超音波透過波をもとにして声門の開閉時を定め、遊離縁の基線を設定した²³⁾。深さは遊離縁の基線から内部の振幅の谷までの距離とした。位相差は遊離縁の山から遅れて起こる内部の波形の一番近い山

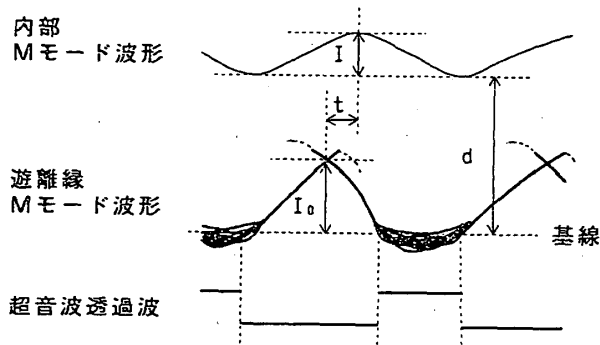


図 4. 声帯振動のパラメーターの計測

I_0 : 遊離縁の振幅, I : 内部の振幅, d : 遊離縁から内部までの深さ, t : 位相差

との間隔とした。また内部の波形が複数個存在する場合にはそれぞれの波形に対し測定した。

III. 結 果

1. 測定値

pitch を 110Hz と 150Hz, loudness を 60dB と 70dB に変化させて測定した。いずれの pitch・loudness においても遊離縁と内部の周波数は等しかった。遊離縁の振幅は 110Hz・60dB で 1.50 ± 0.047 (n=20), 150Hz・60dB で 1.25 ± 0.034 mm (n=16), 110Hz・70dB で 1.64 ± 0.021 mm (n=22), 150Hz・70dB で 1.37 ± 0.020 mm

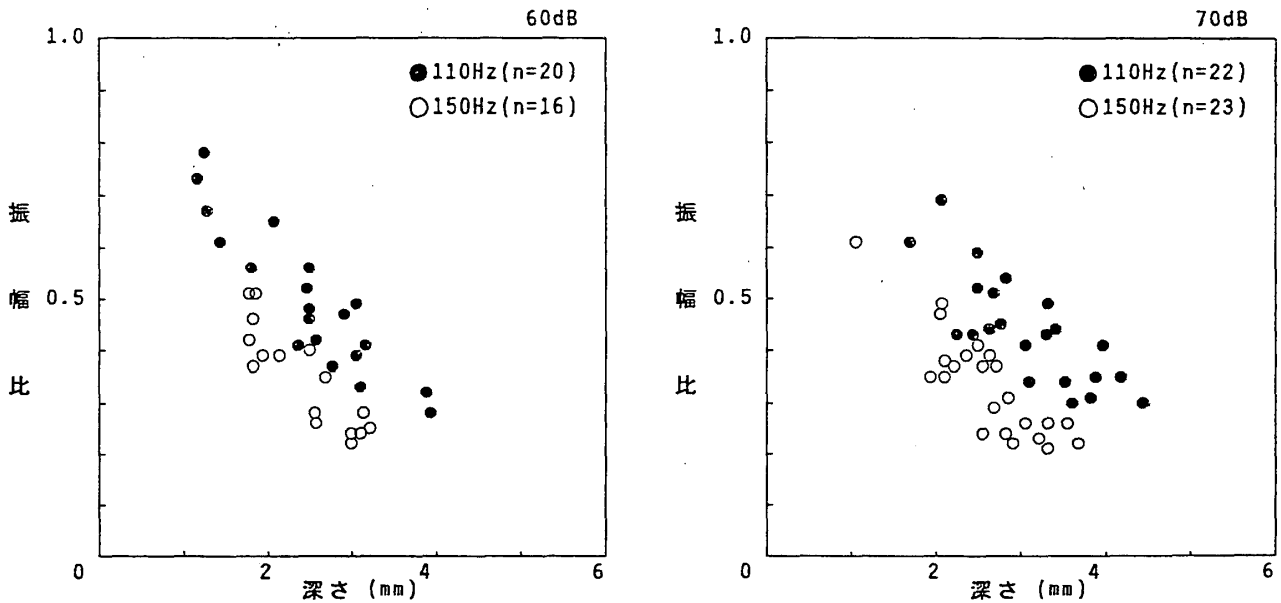


図 5. 振幅比と深さの関係

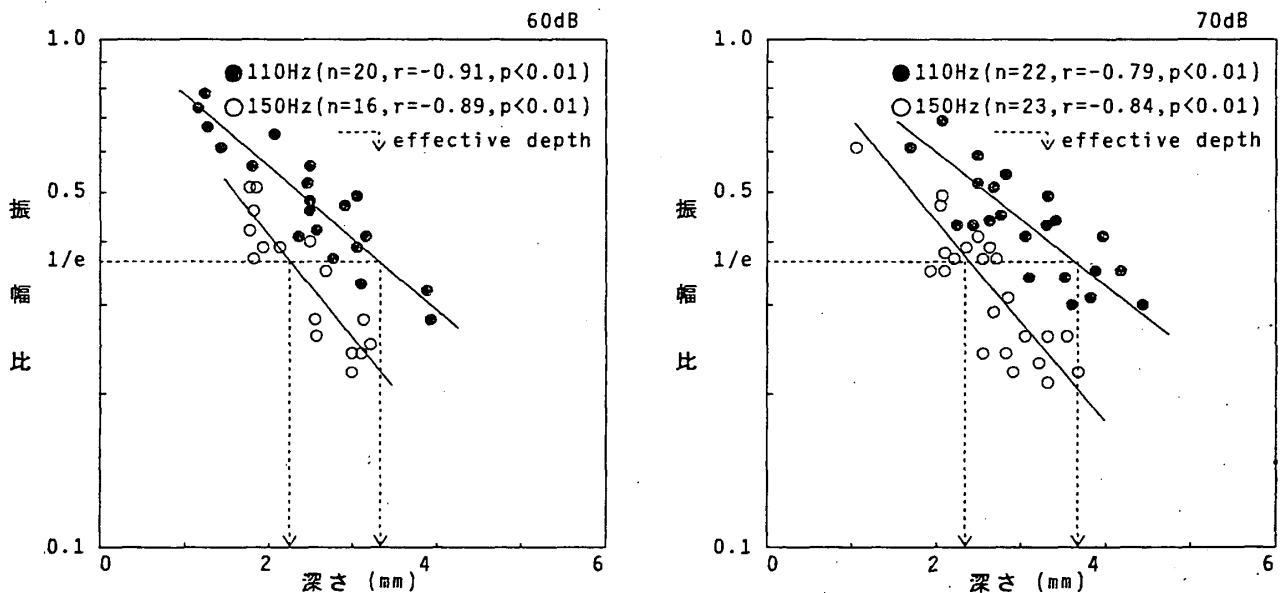


図 6. 振幅比と深さの関係

($n=23$) であり, pitch が減少するほどまた loudness が増加するほど遊離縁の振幅は増大した。1.06~4.44mm の深さで声帯内部の波形が記録できた。内部の振幅は 0.28~1.20mm であり, いずれの pitch·loudness においても深さによって減少した。また位相差は 0.72~3.83 msec であり, いずれの pitch·loudness においても深さによって増大した。

2. effective depth

図 5 は縦軸に遊離縁の振幅を 1 とした場合の内部の振幅比 (I/I_0) を, 横軸に遊離縁から内部までの深さ (d) を取ってプロットしたグラフである。そして図 6 は縦軸を対数目盛にかえて振幅比 (I/I_0) を, 横軸に深さ (d)

を取ってプロットしたグラフある。いずれの pitch, loudness においても直線的傾向, すなわち振幅は深さによって指数関数的に減少していた。effective depth (振幅減衰距離) とは, 振動が距離に応じて振幅を指数関数的に減少させる時その振幅が $1/e$ になる深さのことである。図 6 の相関関係を表す回帰直線から計算される effective depth は 110Hz·60dB で 3.3mm ($n=20$, $r=-0.91$, $p<0.01$), 150Hz·60dB で 2.2mm ($n=16$, $r=-0.89$, $p<0.01$), 110Hz·70dB で 3.7mm ($n=22$, $r=-0.79$, $p<0.01$), 150Hz·70dB で 2.3mm ($n=23$, $r=-0.84$, $p<0.01$) であり, pitch が減少するほどまた loudness が増加するほど effective depth は深くなった。

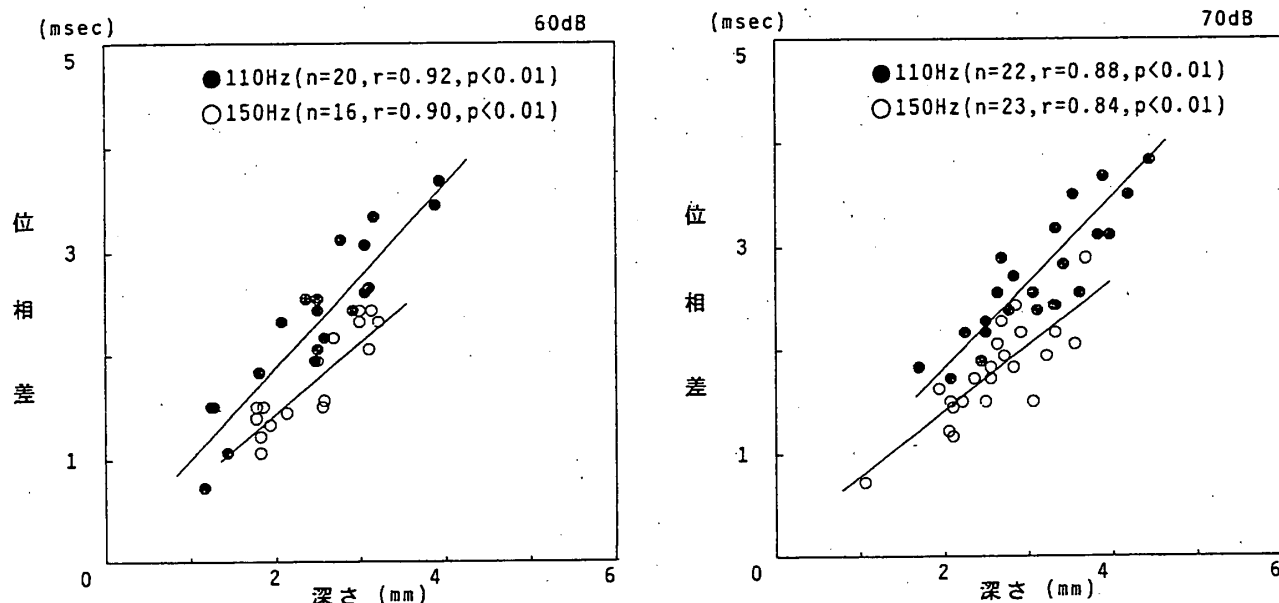


図 7. 位相差と深さの関係

3. 位相速度

高速Mモード法による遊離縁と内部の振動波形には位相の遅れが存在した。これは声帯遊離縁で生じた振動が内部へ伝わる際の速度と伝搬距離によって変化する。図7は縦軸に位相の遅れ (t) を、横軸に遊離縁から内部までの深さ (d) をプロットしたグラフである。いずれの pitch, loudness においても深くなるに従って位相差が増加するほぼ直線的な関係がみられた。回帰直線の傾きは速度の逆数であり位相速度を計算すると、110Hz・37 dB で110cm/s ($n=20$, $r=0.92$, $p<0.01$), 150Hz・60 dB で140cm/s ($n=16$, $r=0.90$, $p<0.01$), 110Hz・70dB で120cm/s ($n=22$, $r=0.88$, $p<0.01$), 150Hz・70dB で150cm/s ($n=23$, $r=0.84$, $p<0.01$) であり, pitch が増加するほどまた loudness が増加するをど位相速度は速くなった。

IV. 考 察

1. 声帯振動機構論について

声帯振動機構論としては、古くは反回神経の律動的な impulse によって声帯筋が収縮弛緩を繰り返すとする neurochronaxie 説も存在したが、気管切開患者における観察や神経生理学的条件からすでに否定された説となっている。現在では呼気流そのものによって声帯振動が惹起され、逆にその振動によって呼気流が変化するという呼気流と声帯振動の相互的關係が成立していると考えられている。声帯振動と呼気流の關係については、Bernoulli 効果を重視する Tonndorf の aerodynamic 説²⁴⁾、声帯筋と靱帯を重視した Van den Berg の

myoelastic-aerodynamic 説²⁵⁾、粘膜の粘弾性的性質を重視した広戸の mucoviscoelastic-aerodynamic 説²⁶⁾、声帯を声帯筋からなる body と粘膜からなる cover とから構成された振動体とする平野の body cover 説²⁷⁾、声帯振動の基本は粘膜波動であるとする travelling wave 説²⁸⁾ 等が考えられている。これらの概念は、高速度映画²⁹⁾ や喉頭ストロボスコーピー³⁰⁾、X線ストロボスコーピー²⁸⁾、超音波グロトグラフィー³¹⁾ 等による声帯振動の詳細な観察や、声帯構造の解剖学的な研究を基礎にして考案されたものである。

しかし、その観察の殆どは声帯遊離縁粘膜の観察であるため、声帯内部筋層まで含めた声帯振動機構論にまでは到っていない。振動は純粋な物理的現象であり、本質的には声帯各層を含んだ声帯全体の粘弾性体としての物性にこそ声帯振動を規定する要因があると思われる。したがって声帯の諸物性を知るためには声帯遊離縁だけではなく声帯内部の振動も検討することが必要であろう。他方、主に工学的立場からこれらの研究結果と一致するような声帯振動機構のモデルを作り上げ、音声の発声機構を理論的に検討する研究も行われている。single mass モデルや two mass モデル³²⁾、multi mass モデル²⁾、またさらにより生理的に近いモデル³⁾も作られており、声帯遊離縁ばかりではなく声帯内部の振動も数学的に解明しようとする試みもなされている。しかし、本来ならば、これらの研究は常に生体において実測された諸条件と対比検討されるべきであろう。

声帯の内部振動が詳細に研究されていない理由の一つは声帯振動自体が非常に高速で複雑且つダイナミックな

振動であり、その内部振動を観察測定しうる有効な手段が無いことによると思われる。わずかにX線ストロボスコピーを用いた犬摘出喉頭での吹鳴実験³³⁾で、声帯内部筋層内に刺入した金属マーカの動きが検討されている程度である。そこで声帯内部振動を無侵襲で解明すべく、当教室で開発した ULG による高速Mモード法を用い、声帯内部振動波形を記録観察し、振動モードのパラメーターとなる effective depth ならびに位相速度を測定したのである。

2. 測定値について

本文では測定値を計算上3桁で示したが ULG の用手的な測定法の誤差を考えると実際の有効数字は2桁までである。そこで有効数字2桁で計算すると声帯遊離縁の振幅は1.2~1.7mm となり、これは平野³⁴⁾が超高速映画で測定した1.0~1.5mm にほぼ一致する。このように ULG による測定値はある程度の精度はあるものの、さらなる記録解析系の改良が必要と思われる。しかし、現在のところ声帯内部の振動を ULG ほど正確に測定できる方法は存在しないし、また ULG による最大の利点は発声時のヒト声帯の振動を生理的条件下で無侵襲に何回でもリアルタイムに測定できることにある。

3. effective depth について

effective depth (振幅減衰距離)とは、振動が距離に応じて振幅を指数関数的に減少させる時その振幅が1/eになる深さのことであり、距離による減衰の程度を示すパラメーターである。今回の測定から、声帯内部振動は深さに応じて振幅を指数関数的に減少させる振動であり、その effective depth は2.2~3.7mm で、pitch が減少するほどまた loudness が増加するほど effective depth は深くなった。Titze⁸⁾は viscoelastic theory にもとずき声帯を断面矩形の細長い弾性を有する非圧縮性媒体とみなし、前後端および外側が固定されているより生理的に近い声帯モデルを考えて、この場合の振動を論じている。それによれば、effective depth は粘性率と声帯の厚さの関数であり、粘性率が150P で声帯厚が2~8mm に変化した場合、effective depth は2.4~2.9mm となり、また声帯厚が8mm で粘性率が50P の時 effective depth は2.1mm で、150P のときは2.6mm になると述べている。これは ULG による高速Mモード法を用いた今回の実測値に近い値である。平野²⁷⁾は、胸声区における pitch の調節は主に前筋によってなされ、loudness の調節は主に呼気圧と声帯筋によってなされると述べている。すなわち、前筋の収縮が減少し声帯の緊張が弱くなり声帯が厚くなると pitch が減少し、呼気圧が上昇し声帯筋が収縮し声帯の粘性率が増大すると loudness が増

加すると考えられる。したがって Titze のモデルにおける粘性率と声帯の厚さの変化に伴う effective depth の変化は、実測値の pitch や loudness の変化にともなう effective depth の変化に一致していると考えられる。つまり、pitch や loudness の変化にともなう effective depth の変化は声帯内部における厚さや粘性率等の物理的性状が変化することに起因していると考えられた。

4. 位相速度について

半無限弾性体の表面一点で振動が起これば、それは媒質中を進行して伝播する。このような進行波が存在する時、異なる2点での振動を比較すれば位相差がみられるはずである。振動の周波数がわかれば位相差は時間に換算され得るから2点間の距離を測定することから振動の位相速度が求められる。

Gierke, Oestreicher³⁵⁾らはヒトの大腿および前腕の皮膚での励振実験を行い距離と位相差から表面波の位相速度を求めている。それによると、10~180Hz の励振では位相速度は160cm/s であり、この値からずれ弾性率を算出し $3.5 \times 10^4 \text{ dyn/cm}^2$ としている。これらの値は Titze のモデルを駆動する際の基本的な値として使用されている。また、Baer³⁶⁾は犬摘出喉頭の吹鳴実験において声帯上下面に置いたマーカの運動軌跡を観察し、その位相速度を100cm/s 程度であろうと推定している。皮膚と声帯粘膜では機械特性、つまり粘弾性が異なる筈であり、前述の報告の差速もそれに基づくと考えられる。

今回 ULG による高速Mモード法で記録測定された内部へ伝播する波は位相速度が110~150cm/s であり前述の測定値に近いことからこの波は遊離縁の振動が内部に伝わったものと考えられる。そしてその速度は pitch や loudness の増加にともなって速くなる傾向を示した。先ほど述べたように pitch や loudness の変化は主に声帯内部の性状が変化して起こるのであるから位相速度の変化も声帯内部の性状が変化することに起因していると考えられた。

5. まとめ

1) Ultrasound laryngography による高速Mモード法を用い、いまだ十分検討されたことのない発声時のヒト声帯内部振動をある程度の精度を持って記録測定できた。

2) 声帯内部振動は深さに応じて振幅が指数関数的に減少し、その effective depth は2.2~3.7mm で、発声の pitch の減少や loudness の増加にともなって深くなった。

3) 声帯内部振動は声帯遊離縁の振動が内部に伝わったものと考えられ位相速度は110~150cm/s で、pitch な

らびに loudness の増加にともなって速くなった。

4) これらの振動パラメーターの測定から、声帯遊離縁と同様に声帯内部も pitch や loudness の変化に対応した受動的な振動を示すことが示唆された。

謝 辞

稿を終わるにあたり、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、沼田 勉、日野 剛、土屋英明先生を始め教室員の皆様に厚く御礼申し上げます。本論文の要旨は第38回日本音声言語医学会において発表した。本論文は、審査学位論文である。

SUMMARY

The vibration of the vocal fold membrane has been investigated in detail. The vibration of the inner layers of the vocal fold, however, has not been known yet due to lack of an available method. A newly developed ultrasonic laryngeal imaging system, ultrasound laryngography (ULG) can detect not only the vibration of the membrane but also that of the inner layers, using the high-speed M-mode method. The purpose of the present study was to record the vibration of the membrane and that of the inner layers simultaneously by ULG, and to investigate the effective depth and the phase velocity.

The following results were obtained.

1) The frequency of the vibration of the inner layers was equal to that of the membrane, and the vibratory amplitude of the inner layers exponentially attenuated from the surface to the deep layers. The effective depth was 3.3mm for 110Hz·60dB, 2.2mm for 150Hz·60dB, 3.7mm for 110Hz·70 dB and 2.3 mm for 150 Hz·70 dB. As voice pitch decreased or voice loudness increased, the effective depth became deeper.

2) Phase difference was observed between the vibration of the membrane and that of the inner layers. The phase velocity was 110cm/s for 110 Hz·60dB, 140cm/s for 150Hz·60dB, 120cm/s for 110Hz·70dB and 150cm/s for 150Hz·70dB. As voice pitch or loudness increased, the phase velocity became faster.

In conclusion, ULG is a good method to record the vibration of the inner layers of the vocal fold. By investigating the effective depth and the phase velocity ultrasonically, it was suggested that the vibration of the inner layers of the vocal fold is closely related to that of the vocal fold.

文 献

- 1) 平野 実, 金子敏郎, 沢島正行: 声帯の振動状態に関する検査, 声の検査法, 日本音声言語医学会編, pp.79-122, 医師薬出版, 東京, 1979.
- 2) Titze IR and Strong WJ: Normal modes in vocal cord tissues. J Acoust Soc Am 57: 736-744, 1975.
- 3) Titze IR: On the mechanics of vocal-fold vibration. J Acoust Soc Am 60: 1366-1380, 1976.
- 4) Kitamura T, Kaneko T and Asano H: Ultrasonic diagnosis of the laryngeal diseases. Jpn Med Ultrasonics 2: 14-15, 1964.
- 5) 北村 武, 金子敏郎, 浅野 尚: 喉頭疾患の超音波診断. 日超医講演論文集 5: 25-26, 1964.
- 6) 北村 武, 敏郎, 浅野 尚: 喉頭疾患の超音波診断—Ultrasonoglottography の可能性—. 気食会報 15: 181, 1964.
- 7) 金子敏郎, 浅野 尚, 三浦徹蔵, 石坂鎌三: 声帯の Biomechanics-stiffness を中心として—. 耳鼻臨床 64: 1229-1235, 1971.
- 8) 金子敏郎, 浅野 尚, 内藤準哉, 小林伸行, 林崎勝武, 北村 武: 声帯の Biomechanics-damping ratio を中心として—. 気食会報 25: 133-138, 1974.
- 9) 金子敏郎, 内田邦明, 内藤準哉, 林崎勝武, 吉岡俊章, 鈴木晴彦: ヒト生体における声帯物性—超音波パルス法を用いた声帯の共振特性測定法—. 耳鼻臨床 69: 1963-1969, 1976.
- 10) 浅野 尚: 喉頭に対する超音波パルス法の応用. 日耳鼻 71: 895-917, 1968.
- 11) 三浦徹蔵: 声帯の振動様式について—ultrasonoglottography による研究—. 日耳鼻 72: 985-1002, 1969.
- 12) 内藤準哉: 声帯の振動様式について—超音波パルス透過法による観察—. 日耳鼻 76: 1-14, 1973.
- 13) 林崎勝武: 起声時における声帯振動—Phonation Neutral Area と声帯振動—. 日耳鼻 83: 201-212, 1980.
- 14) 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.
- 15) 鈴木晴彦: ヒト生体の声帯物性—病的声帯の場合—. 日耳鼻 85: 654-666, 1982.
- 16) 小松健祐: ヒト摘出喉頭の声帯物性. 日耳鼻 88: 148-160, 1985.
- 17) 沼田 勉: 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—. 日耳鼻 88: 853-867, 1985.
- 18) 増田 卓: ヒト生体の声帯物性—単発矩形波励振による共振特性. 日耳鼻 89: 763-773, 1986.
- 19) 嶋田耿子: 単発矩形波励振によるヒト声帯物性—減衰率を中心として—. 日耳鼻 90: 1992-2003, 1987.

- 20) 鈴木晴彦, 沼田 勉, 日野 剛, 小松健祐, 持田 晃, 金子敏郎, 浜滝壽伸: 喉頭用超音波画像診断装置 (Ultrasound laryngography) の開発と臨床的応用 (第一報). 日超医講演論文集 49: 391-392, 1986.
- 21) 日野 剛: Ultrasound Laryngography の開発とその音声学的意義. 日耳鼻 92: 837-850, 1989.
- 22) 鈴木晴彦, 日野 剛, 沼田 勉, 金子敏郎: Ultrasound Laryngography. 喉頭 1: 6-10, 1989.
- 23) 土屋英明: Ultrasound Laryngography と Photoelectroglottography による声帯振動の観察. 日耳鼻 94: 895-905, 1991.
- 24) Tonndorf W: Zur Physiologie des Menschlichen Stimmorgans. Z H-N-O Heilk 22: 412-414, 1929.
- 25) Van den Berg Jw: Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. J Speech Hear Res I: 227-244, 1958.
- 26) 広戸幾一郎: 発声機構の面よりみた喉頭の病態生理. 日耳鼻 69: 2097-2106, 1966.
- 27) 平野 実: 音声外科の基礎と臨床. 耳鼻 21(補1): 239-440, 1975.
- 28) 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: 883-930, 1981.
- 29) 広戸幾一郎, 吉田義一, 中山 亨: “声帯振動の高速度映画” 撮影について. 耳鼻臨床 59: 887-895, 1966.
- 30) 切替一郎: 喉頭ストロボ活動写真撮影法による発声時における人間声帯の振動. ならびに声門開閉の時間的關係に関する研究. 日耳鼻 49: 236-262, 1943.
- 31) Holmer NG, Kitzing P and Lindstrom K: Echo glottography. Acta Otolaryng 75: 454-463, 1973.
- 32) Ishizaka K and Flanagan JL: Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords. Bell System Technical J 51: 1233-1268, 1972.
- 33) 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.
- 34) 平野 実, 川崎 洋, 松下 了, 藤 雄一: 声帯状態の定量的観測—正常者における超高速度映画による研究—. 日耳鼻 81: 820-826, 1978.
- 35) von Gierke H, Oestreicher H, Franke E, Parrack H and von Witttern W: Physics of vibrations in living tissues. J Appl Physiol 4: 886-900, 1952.
- 36) Baer T: Observation of vocal fold vibration: measurement of excised larynges. In: Vocal Fold Physiology, Stevens KN and Hirano M, ed., pp.119~133, University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.