

# 人および犬声帯の構造とスチッフネス

横山 哲夫\*・古川 睦久\*・平野 実\*\*

## Structure and Stiffness of the Human and the Canine Vocal Cords

by

Tetsuo YOKOYAMA

(Department of Materials Science and Engineering)

Mutsuhisa FURUKAWA

(Department of Materials Science and Engineering)

and Minoru HIRANO

(Department of Otolaryngology, School of Medicine, Kurume University)

Structure and stiffness of the human and the canine vocal cords were studied. Light microscopic observation showed that the both vocal cords are not uniform in its structure but should be regarded as, at least, a double-layered vibrator which consists of a body and a cover. Load-elongation relationships of the cover and the body as well as the entire vocal cord were measured for the specimen sliced in a frontal section of an excised fresh vocal cord. The elongation caused by loading at the tip of the edge was measured by using a measuring microscope. The strain for the cover was much greater than that of the body. The ratio of the strain for the cover to that of the body was approximately 6:1 for the canine vocal cord. In the case of the human vocal cord the ratio of the strain for the cover to that of the transition layer to that of the body was approximately 10:8:1.

Changes in stiffness of the entire vocal cord caused by the contraction of the cricothyroid muscle and the vocalis muscle were investigated for excised hemilarynges. The load and elongation were automatically recorded by using a force-transducer and a linear variable differential transformer. When the cricothyroid contraction was stimulated, the stiffness was increased as a result of the longitudinal stretching of the vocal cord. When the vocalis muscle was activated, the stiffness was rather decreased for smaller loads, especially in vertical direction, because the cover was slackened. For greater loads, however, the stiffness was increased expectedly by the stiffening of the body under stimulation.

### 1. 緒 言

生体組織を構成する生体高分子は原理的には有機高分子の系列に属するが、従来の合成高分子にはいまだ達し得ない高度かつ特殊な機能を持っている。すなわ

ち、材料としての観点からは生体高分子は精妙な機能材料であり、その機能を部分的にも *in vitro* で再現することは高分子材料の1つの努力目標である。筋肉をモデルとしたメカノケミカルシステム、DNAの遺伝

\* 材料工学科

\*\* 久留米大学医学部 耳鼻咽喉科学教室 久留米市旭町

情報の転写と複製をモデルとしたテンプレート重合、生体組織の体外代替さらに体内移植を意図する抗凝血性ポリマーや生体適合性材料、酵素をモデルとした高分子触媒、などはこの方向に沿った進展であり、合成高分子サイドからの生体機能へのアプローチはこの方向からなされてきた。一方、生体組織の構造と機能を直接に解明することは、生化学、生体物理学、医学、薬学サイドから努力されている。当然のことながら両者のアプローチは相互に研究の作業仮説を提供しあうものであり、密接に関連すべきものである。

著者らは本研究において音声外科および音声生理学の基礎となる喉頭とくに声帯のバイオメカニクスの基礎的知見を得ることを目的とした。生体組織の弾性に関しては各種の筋肉や血管などについてかなりの研究があるが、声帯については研究は非常に乏しい。

## 2. 振動体としての声帯の構造

犬の摘出喉頭を写真1に示す。写真は上側から撮ったものであり、写真の上方向が前側、下方向が後側である。上面の白い膜は仮声帯で振動に関与しない。この下に振動部の声帯があり、中央部にその端が見えている。添えてあるメジャーの単位はcmである。

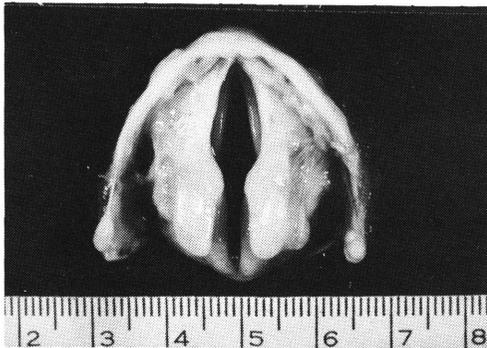


Photo. 1 Excised canine larynx.

声帯振動に関しては、ストロボスコープや超高速映画による観察に基づいていくつかの模式図が書かれている<sup>1)</sup>。これらは一相構造であるが、平野<sup>2)3)</sup>は超高速映画の観察と声帯組織の研究に基づき、2層モデルによって声帯の挙動を模式的に示している(図1)。

声帯の振動は1平面上における声門の単純な開閉運動ではなく、声帯自身の形の変化を伴う左右および上下方向への複雑な動きであることがわかる。

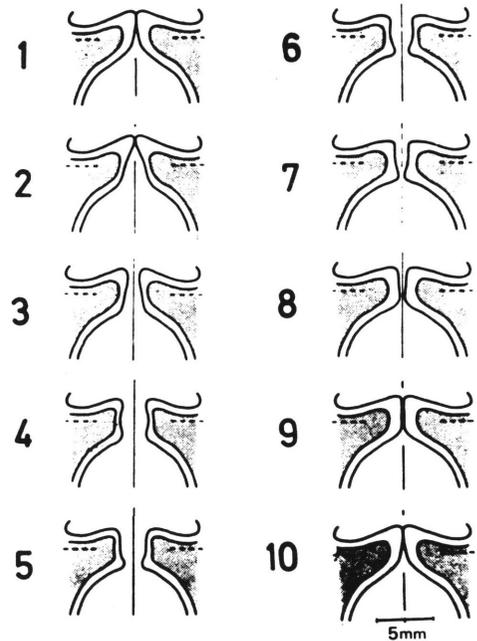


Fig. 1 Schematic presentation of the behavior of a vocal cord by two-layer model.

## 2.1 光学顕微鏡的にみた人声帯の構造

屍体剖検標本から得た正常成人男子の喉頭10例(10%ホルマリン固定)について各方向断面切片を作製し、各種染色を施して鏡検した結果<sup>4)</sup>は次のように要

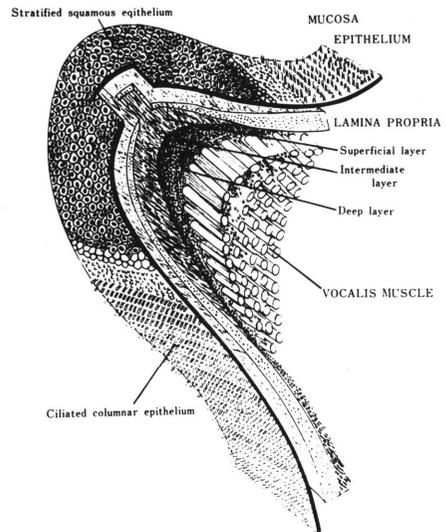


Fig. 2 Schematic presentation of the structure of the human vocal cord.

約される<sup>注1)</sup>

人声帯は筋(声帯筋)とこれを覆う粘膜とから成り、粘膜はさらに上皮と固有層から成る。特に声帯遊離縁においては明瞭な層構造を持っている。構造は模式的に図2に示される。振動体としてみると、人声帯の遊離縁部には組織が疎できわめて柔軟な cover, すなわち粘膜固有層浅層とこれを覆う上皮と、組織が密で弾力性に富む body, すなわち声帯筋とがあり、両者の間にはこれらの中間的性質を有すると考えられる移行部, すなわち固有層中間層および深層(声帯靱帯)が介在する。

## 2.2 光学顕微鏡的にみた犬声帯の構造

喉頭の発声機能に関する実験的研究においては、犬の喉頭がしばしば用いられる。犬は入手が容易で、喉頭が比較的大きく、また喉頭の構造が人の喉頭に比較的類似しているからである。成犬摘出喉頭を10%ホルマリンで固定し、人声帯の場合と同様に鏡検した結果<sup>9)</sup>は次のように要約される<sup>注1)</sup>。

犬声帯の組織学的構造は基本的には人声帯と同様で、筋(声帯筋)と粘膜とから成るが、声帯の組織構成の点で人声帯とはいくつか異なる点が認められる。すなわち、粘膜上皮はその範囲が広く、粘膜固有層は人声帯の場合のような3層構造はみられず上皮直下の膠原線維および弾力線維の比較的豊富な浅層と、それより深部の非常に疎な深層との2層構造とから成り、その間には明瞭な境界はなく線維が次第に減少するような構成である。振動体としてみると、犬声帯の遊離縁部では、組織が密で弾力性に富む body すなわち声帯筋を、疎で柔軟な cover すなわち粘膜全層が直接覆っているとみなされる。

## 3. 各層別にみた声帯のスティッフネス

生体組織は生命現象という特別の性質をもつが、この特別の性質のほかは物理学的にみれば質量、密度、温度などの通常の物理的性質をもつ物理系である。また高分子科学の観点からは、複雑な構造をもつゴム状弾性体とみなすことができる。エラストン、コラーゲン、ミオシンなどは多かれ少なかれゴム状弾性体であり、これらの物質を伸長するために加えられた力は仕事をしない、内部エネルギーを増大させるのみならず高分子鎖の配向をひき起こす。もし全仕事配向のプロセスのエントロピー変化に関係し内部エネルギーの変化を生じないならば、その系は理想ゴム弾性体である。しかし実在の系は通常のゴムといえども理想的ではなく、生体組織の弾性は更に複雑な機構により発現

することが明らかにされている<sup>6)</sup>。

声帯は前項の形態学的観察からすると均質な物体ではなく、粘弾性の異なる少なくとも2つの層、すなわち body と cover から成ることが明らかである。従って声帯の振動を理解するためには各層の形状、質量のほか、粘弾性定数に関する情報が必要である。しかし各層についてこれらを直接に測定することは極めて困難であるので、ここでは主として body と cover のスティッフネス<sup>注2)</sup>の違いについて検討した。

### 3.1 摘出喉頭における body と cover のスティッフネス

犬および人の新鮮摘出喉頭より声帯の前額断切片を採取し、荷重と伸びの関係を検討した。図3のように粘膜上皮に細い鉤を掛け、これに荷重を与えたときの声帯各層の伸びを読取顕微鏡で測定した。粘膜上皮のスティッフネスは固有層のそれより大きいので、声帯全体に力が加わった場合の各層の変化の程度を比較する目的のためには上皮断端を支持物である甲状軟骨に縫着固定した。他方、各層のスティッフネスを求めるために声帯の1部を図4のように角柱状に切り出したものについて測定した。結果を図3、図4に示す。

犬では cover のスティッフネスは body のそれに比べて極めて小さく、前額断標本において全体の伸びが1mmの場合 cover のひずみ( $\Delta l/l_0$ )と body のそれとの比は約8:1、全体の伸びが2mmの場合には約6:1である。振動中の声帯は基本的位置(正中線よりやや外側)から片側へ1~2mm動くから、摘出喉頭を吹鳴して振動させると、cover と body のひずみは6~8:1の割合となることが推測される。

角柱標本では cover と body のひずみの比は、全体の伸びが1mmの場合には約5:1、全体の伸びが2mmの場合には約6:1である。伸びの小さいところで前額断標本より body のひずみに対する cover のひずみの比が小さいのは、前額断標本では弧状にたると cover 表面(上皮)が直線状になるためである。伸びが大きくなると、前額断標本では上皮の断端が甲状軟骨に固定されていてたるとみなくなるので、上皮のスティッフネスが加わって、body のひずみに対する cover のひずみの比は伸びの小さいところよりも小さくなるが、角柱標本では逆に大きくなる。

人では前額断標本のみで測定した。全体の伸びが1mmの場合の各層のひずみの比は、cover:移行部:body=16:7:1、また、全体の伸びが2mmの場合にはこの比は=10:8:1である。

### 3.2 筋のスティッフネスの異方性

声帯の筋線維が声帯長軸にほぼ平行に、すなわち呼

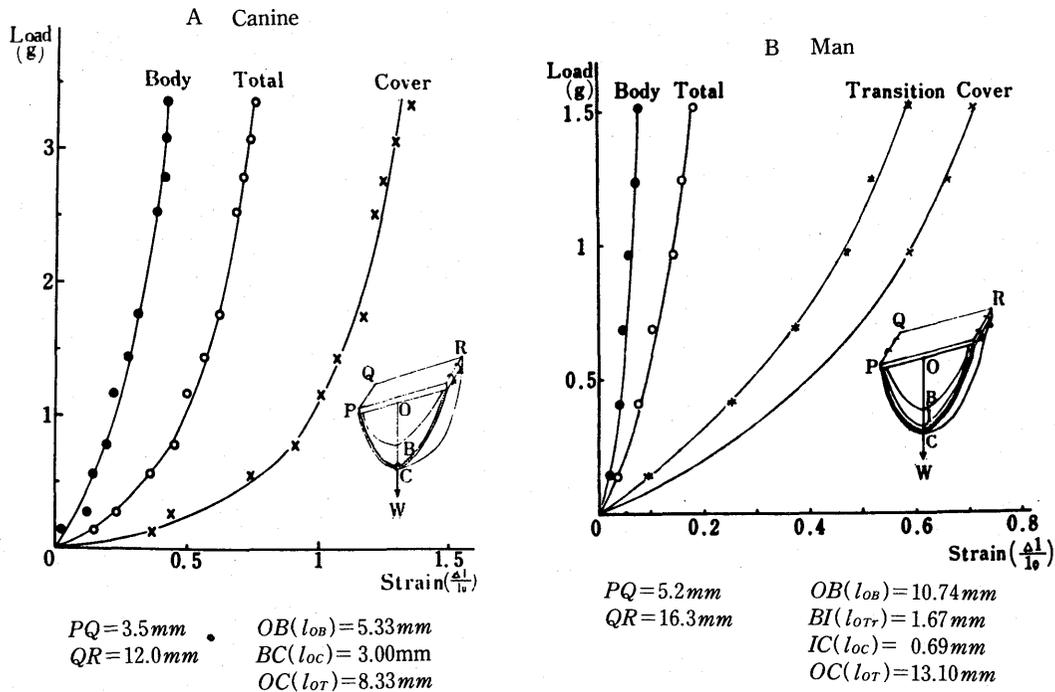


Fig. 3 Load-strain relationships for the specimen of the frontal section of the canine and the human vocal cords.

気流の方向に垂直に走っていることは、振動に際してより動きやすいためであると考えられる。この確認のため犬の前頸筋より横紋筋の角柱状試料を切り出し、島津オートグラフIS-2000型を用いて引張り速度10 mm/minで引張り試験を行なった。

筋線維の走行と同じ方向のヤング率は、ひずみが10%~30%のところでは $0.9\sim 2.0 \times 10^6$  dyne/cm<sup>2</sup>、筋線維の走行に垂直な方向のヤング率は、ひずみが10~30%のところでは $0.9\sim 2.0 \times 10^5$  dyne/cm<sup>2</sup>である。すなわち筋線維の走向に垂直方向に力を加えた場合の方が動きやすく、声帯筋の走行は振動に適応した方向をとっていると言える。

### 3.3 声帯のスチッフネスに及ぼす内喉頭筋の影響

犬および人の摘出喉頭を半載して試料とした。声帯膜様部中央に細い鉤をかけ、垂直方向(頭側)および水平方向(正中側)へ牽引した場合の荷重-伸び関係を、非接着型ストレインゲージ、差動変圧器、および2ペン記録計を用いて自動記録した。引張りは微動ネジによる手動で行なったので引張り速度は一定ではないが、 $\approx 5$  mm/minである。

実験条件としては無操作(対照)、前筋電気刺戟、声

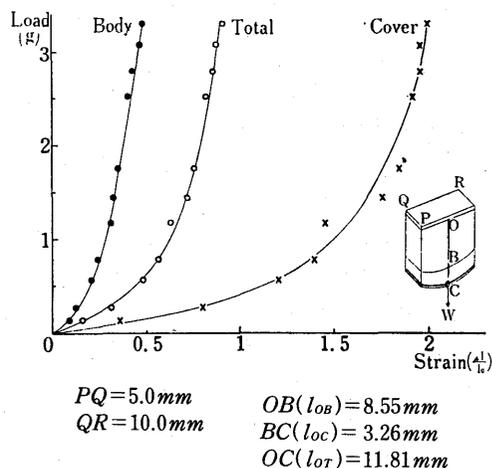


Fig. 4 Load-strain relationships for the square pillar specimen taken from a canine vocal cord.

帯筋電気刺戟、前筋と声帯筋の同時電気刺戟を設定したが、半載喉頭においては前筋を電気刺戟すると甲状軟骨板が捻れて声帯筋の部分ががたるむので、前筋の収縮状態を再現するためには電気刺戟に代えて糸によ

る牽引を行なった。なお、人については筋の電気刺激可能な新鮮摘出喉頭が得られなかったので、対照と糸による前筋の働きの模倣のみについて検討した。

犬の場合数例について実験を行なったが、声帯の大

きさに個体差があり荷重-伸び曲線を書くと個体によるばらつきが大きいので、荷重および伸びを真声帯体積で除すことによって規格化を行なった。結果を図5, 6, 7に示す。

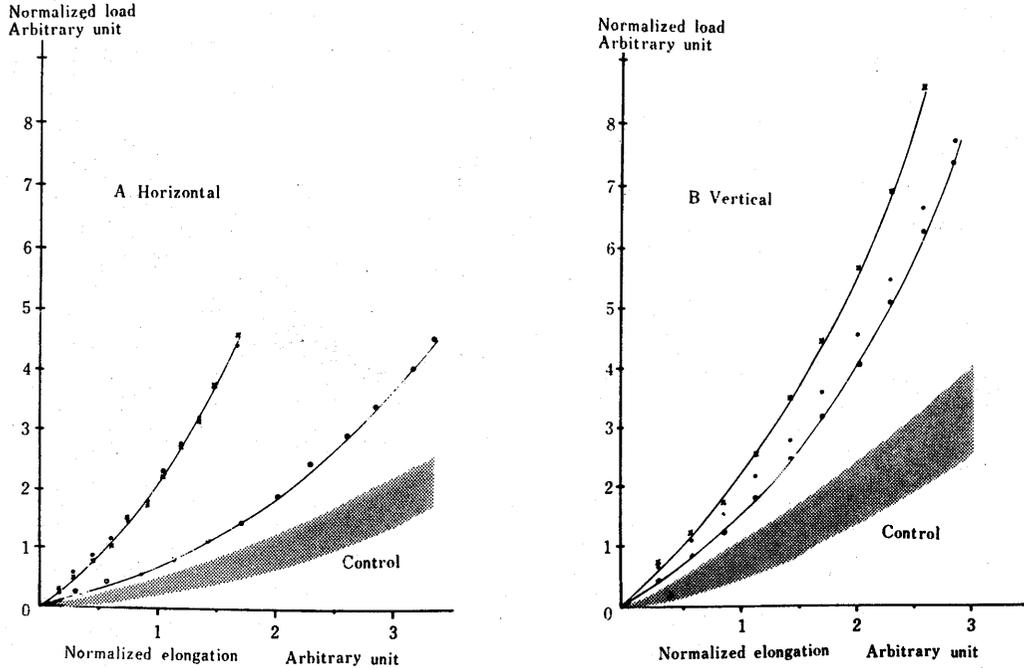


Fig. 5 Normalized load-elongation relationships for the canine vocal cords under mechanical contraction of cricothyroid muscle.

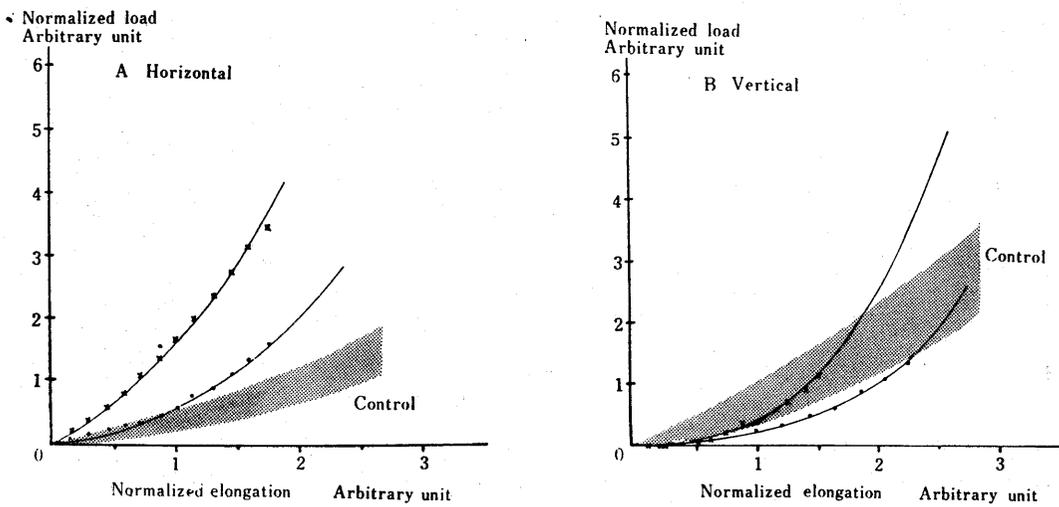


Fig. 6 Normalized load-elongation relationships for the canine vocal cords under electrical stimulation of vocalis muscle.

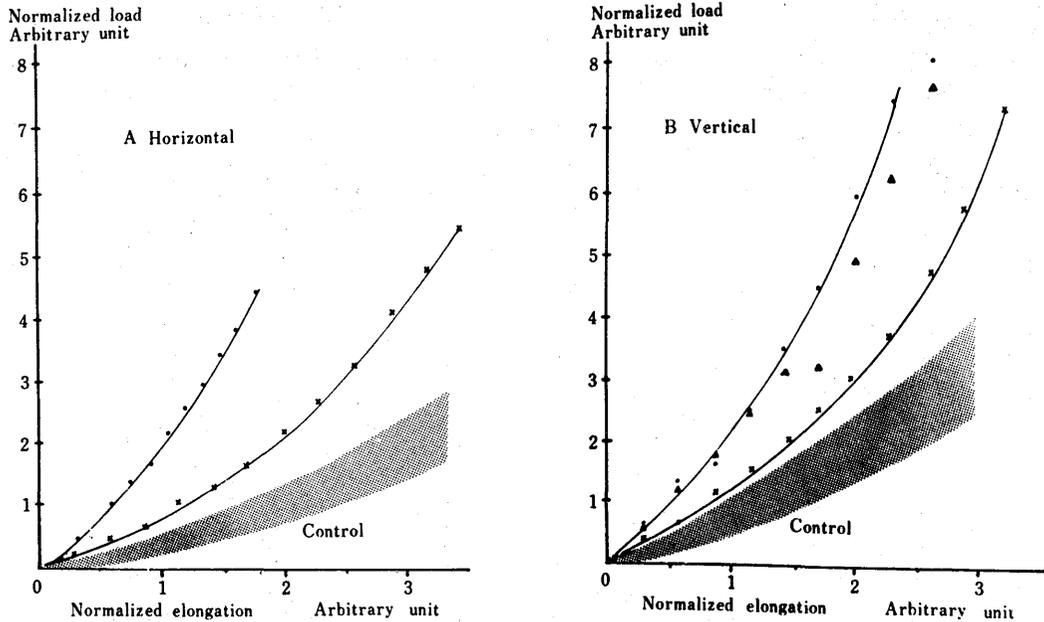


Fig. 7 Normalized load-elongation relationships for the canine vocal cords under mechanical contraction of cricothyroid muscle and electrical stimulation of vocalis muscle.

この結果から次の考察を得る。

- 1) 対照においては垂直方向への牽引の場合が水平方向の場合よりもスチッフネスは大きい。すなわち声帯振動における水平方向の振幅は垂直方向の振幅に比べて大きいことが示唆される。
- 2) 前筋の働きを与えると声帯のスチッフネスは大きく増大する。これは声帯各層の縦方向への緊張のためであろう。垂直方向へのスチッフネスは水平方向へのスチッフネスよりも大きい。一般に音声の振動数の増大に伴って声帯振動の振幅が減少することが知られているが、これは声帯のスチッフネスの増大の結果であろう。
- 3) 声帯筋を収縮させると、水平方向へのスチッフネスは増大する。垂直方向ではスチッフネスは荷重の小さい範囲では対照より減少する。この減少は cover のたるみが大きくなって垂直方向に動きやすくなるためであろう。荷重の大きい範囲ではスチッフネスは増大するが、これは cover のたるみがなくなり body の緊張を反映するためと考えられる。
- 4) 前筋の働きに声帯筋の電気刺激を加えると、対照に比してスチッフネスは増大する。前筋の働きのみの場合と比較すると、水平方向へのスチッフネスはほとんど変化しないが、垂直方向へのスチッフネス

はやや小さくなる。これは声帯筋の収縮による cover のたるみのためと考えられる。

人の場合の結果を図8に示す。対照においては垂直方向のスチッフネスは水平方向のそれよりも大きい。前筋の働きが加わると、いずれの方向へも対照に比べてスチッフネスは大きく増大する。また、水平方向に比べて垂直方向の方がスチッフネスは大きい。声帯筋を刺激した場合については検討できなかったが、全体として人の声帯は犬の声帯の場合と同様の変化が起ることが予想できる。

#### 4. 振動体としての声帯のモデル

図9Aに示すように声帯上面の形は楕円を一部切った形に似ており、声帯全体の形は楕円柱の一部で近似できる。そして図9Bに示す各部の前額断は、図9Cのような簡単化したモデルで表現できるであろう。このモデルは声帯の振動における声帯上縁の水平方向の変形挙動の粗い考察に有力と思われる。さらに詳細には、図9D, Eに示すような細分化された質量が、スプリングとダッシュポットを並列に接続した Voigt 要素で相互に連結されたものと考えられることができる。

実際に個々の要素のパラメーターにいかなる値を用いるべきかは今後の問題であるが、各層の特長を反映

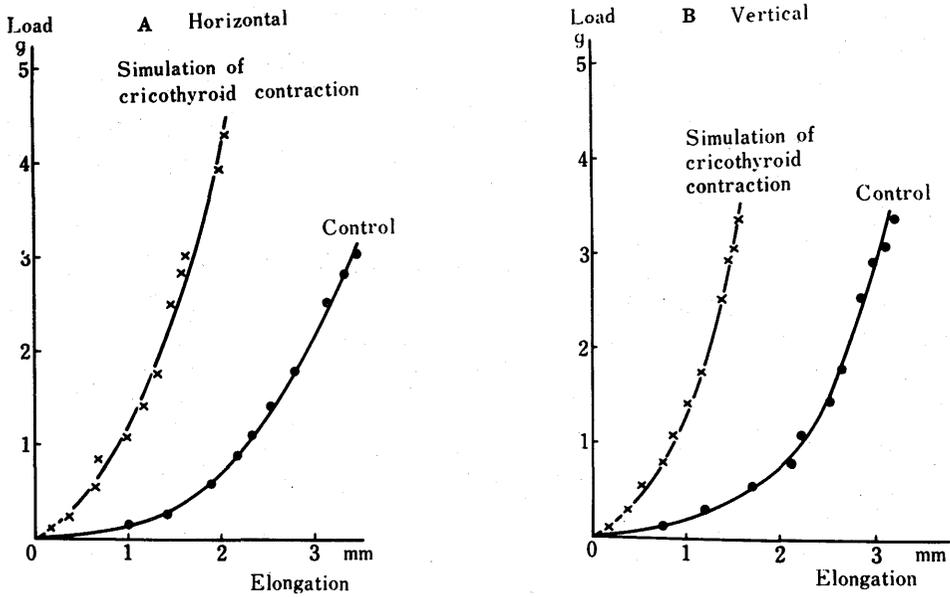


Fig. 8 Normalized load-elongation relationships for the human vocal cord under mechanical contraction of cricothyroid muscle.

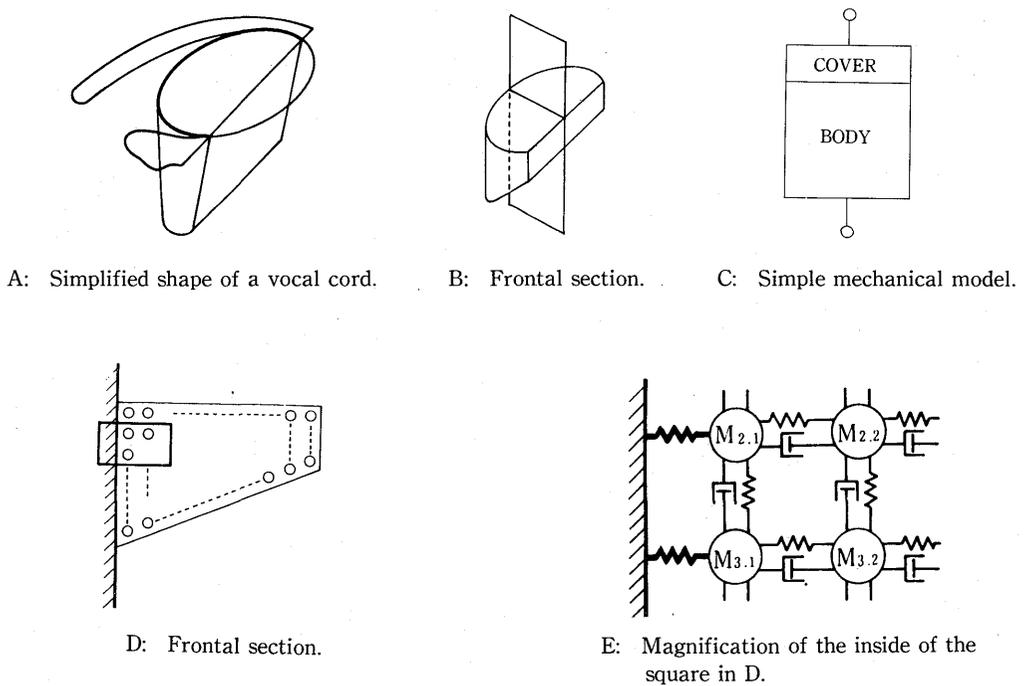


Fig. 9 Models for the vocal cord as a vibrator.

するようにこれらの値をとれば、実際の声帯振動の解析に有益なモデルとなると考えられる。

#### 引用文献および注

- 1) 解説として、平野 実, 医学のあゆみ, **80**, 622 (1972)がある。
- 2) 平野 実, 耳鼻と臨床, **21** 補冊1号, 239~440 (1975)の p. 298.
- 3) M. Hirano, "Structure and Vibratory Behavior of the Vocal Folds", paper presented at the U. S.-Japan Joint Seminar on Dynamic Aspects of Speech Production (1976).
- 4) 2)の p. 239.
- 5) 2)の p. 245.
- 6) A. Szent-Györgyi, *Acta Physiol. Scand.*, **9**,

Suppl, 25 (1945).

- 注1) 声帯各部組織の構造の詳細および血管の分布と走行は声帯の特性に大きな影響をもつが、当面の研究目的には必要でない。組織についての光学的および電子顕微鏡的観察、血管分布と走行についての造影剤注入法によるX線の観察および墨汁注入法による光学顕微鏡的観察の詳細は、文献2)に述べている。
- 注2) スチッフネス (stiffness) は複雑な形状をもつ生体物質の力学的挙動を記述するためにしばしば用いられる量であり、断面積と初期長を参照せず、長さの増分に対する張力の増分の比として定義される。ここでは荷重-ひずみ関係の勾配をスチッフネスと称する。