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——

千葉大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：金子敏郎教授）

嶋田 耿子

MECHANICAL PROPERTIES OF THE HUMAN VOCAL FOLD ELICITED BY A SINGLE RECTANGULAR PULSE —DAMPING RATIO—

AKIKO SHIMADA, M.D.

Department of Otorhinolaryngology, Chiba University, School of Medicine, Chiba

Mechanical properties of the vocal fold have been investigated by means of ultrasonic variant M mode. Vibrations of the vocal fold elicited by a single rectangular pulse were displayed on an oscilloscope. These oscillation waves were analysed by a wave analyser with fast Fourier transform, and resonance frequency, Q value, and damping ratio of the vocal fold in vivo and in vitro were obtained, respectively.

In the present study, the damping ratios were mainly discussed in various cases as follows; normal vocal folds in vivo, normal vocal folds of totally excised human larynges loaded with tension or a mass, vocal folds with unilateral lesions such as polyps, recurrent nerve paralysis and cancer.

Results

1) As phonation pitches were higher, the damping ratios of the vocal fold significantly decreased at phonation neutral gesture. In the excised larynges, as loaded tension stronger, damping ratio also decreased. These results suggested that damping ratio was correlated with the tension of the vocal fold.

2) In the vocal fold with polyp or cancer without vocal cord fixation, higher damping ratios were obtained when compared with healthy side. The damping ratios increased when the vocal folds of the excised larynges loaded with a mass. Mass effect of the vocal fold could be related to the damping ratio.

3) In the vocal fold with recurrent nerve paralysis, damping ratio increased and in the fixed vocal fold with cancer, damping ratio decreased. Stiffness of the vocal fold altered by these lesions changed the damping ratios.

4) The damping ratios of the normal vocal fold during quiet respiration ranging from 0.091 to 0.144 (mean value 0.116 ± 0.014). The damping ratios of male (mean value 0.121 ± 0.016) was slightly higher than that of female (mean value 0.108 ± 0.006).

5) Lower resonance frequencies in comparison with healthy side were obtained in the vocal fold with polyp, cancer without fixation, and with recurrent nerve paralysis. In the case of fixed vocal fold with cancer, the resonance frequency was markedly higher. These results were nearly

accordant with the data of the previous investigations obtained by continuous sinusoidal wave.

Key words: 声帯物性, 共振特性, 減衰率, 単発矩形波励振, 超音波パルス法

A 90—1992—61026

I. はじめに

声帯の振動機構, また喉頭の調節機構を解明するにあたり, 声帯の振動動態を様々な生理学的条件下, あるいは病理学的変化のもとで観察することが重要であるが, 一方, 同様の条件下での声帯の諸物性についての検討も不可欠である。当教室では ultrasonoglotto-graphy (U. G. G.)^{1)~3)}を開発し, さらに声帯の微細な振動を観察するために, 超音波パルスMモード変法⁴⁾⁵⁾を考案し, 連続正弦波強制振動による声帯の励振波形より声帯の物性について検討してきた^{6)~9)}。今回, 教室の沼田¹⁰⁾, 増田¹¹⁾は従来の連続正弦波に代えて, 単発矩形波加振により得られた声帯の励振波形より, in vitro, in vivo での声帯物性について検討を加えた。本論文ではこの新しい方法を用いて, 正常声帯の発声準備状態ならびに安静呼吸時, また摘出喉頭健側声帯への張力, 質量負荷時の減衰率, さらに in vivo での病的声帯の安静呼吸時の共振周波数と減衰率を求め, 検討を加えた。

II. 原理と装置

単発矩形波励振による声帯の共振特性については教室の沼田, 増田がそれぞれヒト摘出喉頭, ヒト生体での測定を行っており, その方法の原理については既に報告しているので, 詳細は省略する。

今回使用した刺激時間 0.5 msec の単発矩形波を高速フーリエ変換して得られる周波数パワースペクトルは 0~625Hz の範囲では均一なパワーを有している。この単発矩形波により声帯を励振させると, 極めて短時間に広い周波数領域内の振動が励起され, 声帯の固有振動モードに応じた共振が出現する。この共振波形をMモード変法により描出する。(Mモード変法とは, 声帯の微細な振動をとらえるために, 声帯の遊離縁からの反射エコーの高さの変化を電位に変換する方法である。)さらにミニコンピュータで高速フーリエ変換し, 振動波形分析を行う(図1)。この際得られた周波数パワースペクトルのピークの周波数を f_0 とし, f_0 における共振の鋭さ Q 値を求め, さらに減衰率を算出する。 Q 値は得られた周波数スペクトルをスムージン

図1 単発矩形波加振により声帯の励振波形(上段)とその周波数スペクトル(下段)

図2 共振の鋭さと減衰率の算出法(沼田¹⁰⁾より改)

グし、 f_0 の高さの $1/\sqrt{2}$ の高さに対応する周波数を f_1 , f_2 とすると、 $Q=f_0/|f_1-f_2|$ から算出される。また減衰率は $1/2Q$ として表現される (図2)。

図3は装置の装置の配置図である。励振系、超音波系、解析系に分類される。

1) 励振系

電気刺激装置 (SEN-3201) を用いて、刺激時間 0.5msec の単発矩形波パルスを発振させ、出力アンプ (MIMY AM-30) にて増幅した後、Wilcoxon 社製インピーダンス・ヘッド内蔵型加振器 (F3Z-602W) を駆動させる。

2) 超音波系

甲状軟骨側面上外頸皮膚に圧抵した 2.25MHz、直径 10mm の超音波探触子と、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-19W) を用いて、声帯遊離縁からの反射エコーを A モードとして検出する。その際、声帯内部の他の界面からの反射エコーを受信利得を下げながら減少させて、声帯遊離縁からの反射エコーを選び、この位置にエコーセクター (SSZ-43W) の gate をあわせ、得られたエコーをオシロスコープ (VC-10) にモニタリングする。ここでモニターされた振動波形をデータ・レコーダー (MP-10) で記録する。

3) 解析系

日本光電社製ミニコンピュータ (ATAC-450) を使用して、この記録された励振波形を高速フーリエ変換し、周波数解析を行う。サンプリングタイムを 1024 とし、12.2Hz 単位ヒストグラムにて表示させる (図1)。スペクトル図の横軸は周波数、縦軸はそのパワーを示している。さらに ATAC-450 を使用して、あらかじめプログラミングしておいた共振の鋭さ Q 値と減衰率を算出した。

図3 装置の配置図 (沼田¹⁰⁾より改)

III. 対象と検査法

A 正常声帯 (in vivo) における減衰率

1) 発声準備状態

正常声帯を有する男性 4 例、女性 1 例の発声準備状態、つまり呼吸が声門を通過すればいろいろな声の高さで発声可能な状態で検査を施行した。この状態は声帯モデル用語でいうと、部分的にはいわゆる phonation neutral gesture に相当する。

被験者は座位とし、やや下顎を挙上して発声する。超音波探触子を甲状軟骨外側皮膚に圧抵し、超音波ビームが声帯遊離縁に直角にあたるように、A モード法にて声帯からの反射エコーを確認しながら定める。次に被験者は甲状軟骨正中線上加振器を圧抵し、種々の高さの発声準備状態を設定する。この時、加振器からの単発矩形波により励振された声帯の振動波形を得て、ミニコンピュータで解析し、声の高さと減衰率について検討した。

2) 安静呼吸時

正常声帯を有する男性 24 例、女性 15 例の計 39 例の安静呼吸時の場合の減衰率について検討した。1) の場合と同様にして声帯の振動波形を得、共振周波数を求めて減衰率を算出し、男女差について検討した。

B 摘出喉頭健側声帯での減衰率

1) 張力負荷時

摘出喉頭 7 例 (男 6 例、女 1 例) の健側声帯について検討した。摘出喉頭は披裂部で後壁を左右に展開し、粘膜固有層直下で披裂軟骨声帯突起に 5-0 ナイロン糸をかけて長軸方向へ牽引し、日本光電社製筋張力計を用いてその張力を計測しながら、甲状軟骨上より超音波探触子、加振器を圧抵し、単発矩形波にて加振する。得られた励振波形より減衰率を算出し、張力との相関を検討した。

2) 質量負荷時

摘出喉頭 9 例 (男 2 例、女 1 例) の健側声帯について検討した。1) と同様に摘出喉頭を展開し、様々な大きさの鉛小片を可及的少量の接着剤で声帯膜様部中央上面に貼布して、同様の方法にて励振波形を得て減衰率を算出した。実験後、接着剤を含めた鉛小片を声帯よりはがして、総質量を微細質量計測器にて求め、減衰率との相関を検討した。

C 病的声帯 (in vivo) での共振周波数と減衰率

1) 声帯ポリープ 17 例 (男 12 例 女 5 例)

2) 反回神経麻痺 10 例 (男 6 例 女 4 例)

3) 声帯癌 19 例 (男 18 例 女 1 例) について検討

した。いずれも一側性の病変を有する症例のみを対象とし、安静呼吸時の励振波形より共振周波数を求め、Q値、減衰率を算出し、患側と健側について比較検討した。

IV. 成 績

A 正常声帯 (in vivo) における減衰率

1) 発声準備状態

正常声帯を有する男性4例、女性1例の種々の声の高さにおける発声準備状態での減衰率の値は表1のごとくである。これを横軸を声の高さを示す周波数、縦軸を減衰率としてプロットすると、声の高さが上昇するにつれ、減衰率は低下した(図4)。図中の▲は女性、他は男性である。推計学的には声の高さと減衰率の間に負の相関($\gamma = -0.922$, $P < 0.01$)が認められた。

表1 声の高さと減衰率(発声準備状態)

	T.M. (♂)	T.N. (♂)	T.K. (♂)	S.Y. (♂)	A.S. (♀)
73.2	0.095 ± 0.011	—	0.095 ± 0.007	—	—
85.4	—	0.104 ± 0.008	—	0.113 ± 0.022	—
97.6	0.099 ± 0.013	0.105 ± 0.014	—	—	—
109.8	—	0.111 ± 0.014	—	0.096 ± 0.019	—
122.0	0.082 ± 0.006	0.099 ± 0.012	0.082 ± 0.006	0.088 ± 0.011	—
146.0	—	0.081 ± 0.014	—	—	—
158.6	—	—	0.067 ± 0.011	—	—
183.0	—	—	—	—	0.075 ± 0.008
195.2	—	0.054 ± 0.007	—	—	—
207.4	—	0.073 ± 0.010	—	—	0.056 ± 0.006
231.8	—	—	—	—	0.045 ± 0.002
305.0	—	—	—	—	0.037 ± 0.006

図4 声の高さと減衰率(発声準備状態)(▲印は女性例、他は男性例)

2) 安静呼吸時

男性24例、女性15例、計39例の安静呼吸時の減衰率は 0.116 ± 0.014 であった。そのうち男性は $0.091 \sim 0.154$ (平均 0.121 ± 0.016)、女性は $0.098 \sim 0.118$ (平均 0.108 ± 0.006)で男性が女性よりも高値を示した(図5)。

B 摘出喉頭健側声帯での減衰率

1) 張力負荷時

摘出喉頭7例(男6例、女1例)の健側声帯の長軸方向へ張力負荷した時に得られた減衰率の値を表2に示す。無負荷時の減衰率は $0.098 \sim 0.132$ (平均 0.114 ± 0.011)であり、張力を次第に加えていくと、いずれの例でも減衰率は低下し、負荷張力が50gの時の減衰率は平均 0.087 ± 0.009 であった。この変化を、横軸に張力、縦軸に減衰率を示すグラフに表わすと、負荷した張力が50gまではすみやかに減少し、それ以上の張力負荷した場合には減衰率の変化は少なかった。両者の間には負の相関($\gamma = -0.941$, $P < 0.01$)が認められた(図6)。

2) 質量負荷時

(男性24例 女性15例)

図5 正常声帯における安静呼吸時の減衰率

表2 摘出喉頭健側声帯の張力負荷時の減衰率

症例	負 荷 張 力 (g)							
	0	10	20	30	40	50	70	100
T.N.♂	0.110	0.108	0.096	0.097	0.097	0.092	0.091	—
K.T.♂	0.132	0.120	0.095	0.089	0.079	0.078	0.075	0.075
K.H.♂	0.111	0.101	0.096	0.096	0.091	0.083	0.080	0.084
H.R.♂	0.124	0.121	0.110	0.104	0.103	0.104	—	0.097
N.K.♂	0.118	0.118	0.104	0.087	0.088	0.084	—	0.084
H.R.♂	0.108	0.110	—	0.108	0.090	0.091	0.092	0.086
G.H.♀	0.098	0.091	0.085	0.082	—	0.079	—	0.071

図6 張力負荷と減衰率 (摘出喉頭健側声帯)

摘出喉頭9例(男8例,女1例)の健側声帯に鉛小片を負荷した場合の結果を表3に示す。無負荷時の減衰率は0.088~0.111(平均0.104±0.011)であり,声帯に負荷した鉛小片の質量は一定していないが,質量が大きくなるにつれ減衰率は増加した。これを横軸を質量,縦軸を減衰率としてプロットすると,正の相関($r=0.642$, $P<0.01$)が認められた(図7)。

C 病的声帯 (in vivo) での共振周波数と減衰率

1) 声帯ポリープ

一側声帯ポリープを有する男性12例,女性5例,計17例について検討した。症例とその測定結果を表4に示す。年齢は29~66歳(平均44.2歳)であった。ポリープが声帯前~前1/3に位置するものが12例と多く,ま

表3 摘出喉頭健側声帯の質量負荷時の減衰率

症例	負 荷 質 量 (mg)				
	0	35	183	194	
M.I.♂	減衰率	0.096	0.101	0.123	0.117
N.T.♂	負荷質量(mg)	0	40	90	
	減衰率	0.110	0.106	0.122	
H.R.♂	負荷質量(mg)	0	15	43	65
	減衰率	0.124	0.102	0.127	0.144
C.G.♂	負荷質量(mg)	0	32	74	
	減衰率	0.094	0.108	0.105	
K.T.♂	負荷質量(mg)	0	17	22	59 158
	減衰率	0.088	0.092	0.093	0.114 0.145
H.R.♂	負荷質量(mg)	0	46	78	102
	減衰率	0.108	0.106	0.132	0.131
K.H.♂	負荷質量(mg)	0	40	80	100
	減衰率	0.111	0.126	0.127	0.152
G.H.♂	負荷質量(mg)	0	41	80	
	減衰率	0.098	0.120	0.150	
C.C.♀	負荷質量(mg)	0	20	30	90
	減衰率	0.103	0.121	0.126	0.135

図7 質量負荷と減衰率 (摘出喉頭健側声帯)

た喉頭鏡所見でポリープの大きさを大,中,小と分類するとそれぞれ8例,4例,5例であった。

共振周波数は患側が73.0~101.9Hz(平均92.7±7.0Hz),健側は87.3~108.5Hz(平均97.5±5.6Hz)で患側が健側よりも低値を示した。性差については,その平均値は男性が92.8±8.4Hz,女性は92.5±1.7Hz(いずれも患側)で男女差は認められなかった。同一症例の患側と健側を対比させて検討すると,図8のように男性2例を除く15例で患側の共振周波数が健側よりも低値を示し,危険率5%以下で有意差が認められた。

つぎに共振の鋭さQ値は患側が3.47~4.80(平均4.25±0.36),健側は3.68~6.14(平均4.61±0.56)で,

表4 声帯ポリープ症例の声帯物性（安静呼吸時 17例）

氏名	年 令	性	ポリープの位置		共振周波数 f		Q 値		減 衰 率	
			位置	大きさ	患側	健側	患側	健側	患側	健側
M. H.	37	♂	前	1/3 中	84.8	90.4	3.80	4.25	0.132	0.118
A. M.	52	♂	前	大	97.7	103.1	4.30	4.78	0.116	0.105
T. A.	40	♂	前	1/3 小	97.6	97.7	4.34	6.14	0.115	0.080
T. S.	42	♂	前	1/3 大	98.6	100.2	4.12	4.92	0.121	0.102
H. K.	40	♂	前	1/3 小	93.3	97.1	4.50	5.15	0.111	0.097
M. M.	30	♂	前	1/3 小	96.1	89.0	4.09	4.01	0.122	0.125
T. Y.	43	♂	前	1/3 小	100.0	102.5	4.66	4.83	0.107	0.104
Y. K.	34	♂	前	1/3大127mg	101.9	108.5	4.80	4.75	0.104	0.105
A. K.	47	♂	後	1/3 中	89.5	102.9	3.94	4.53	0.127	0.110
S. S.	53	♂	前	2/3 大	73.0	98.1	3.66	4.20	0.137	0.119
Y. S.	66	♂	全体	大	96.0	87.3	4.61	3.68	0.108	0.136
S. M.	60	♂	前	1/3 大	84.5	92.3	4.21	4.55	0.119	0.110
S. H.	29	♀	前	1/3 中	91.1	97.3	3.47	5.08	0.144	0.098
Y. T.	33	♀	前	1/3 大	93.1	100.7	4.04	4.60	0.114	0.109
T. F.	44	♀	後	1/3中31.5mg	91.4	96.5	4.56	4.54	0.110	0.110
H. F.	45	♀	前	1/3 小 5mg	95.2	99.9	4.40	4.04	0.114	0.124
H. H.	57	♀	全体	大	91.7	94.5	4.44	4.33	0.113	0.115
平均	44.2				92.7 ±7.0	97.5 ±5.6	4.25 ±0.36	4.61 ±0.56	0.119 ±0.011	0.110 ±0.013

図8 声帯ポリープ症例（安静呼吸時 17例）の患側と健側の比較

このQ値より減衰率を算出すると、患側は0.104~0.144（平均 0.119 ± 0.011 ），健側が0.080~0.136（平均 0.110 ± 0.013 ）で患側により高値を示した（表4）。つぎに同一症例の患側と健側の減衰率を比較すると、患側は健側よりも高値を示す傾向にあった（図8）。他症例と著しく異なって患側が健側よりも低値を示している症例は、患側声帯全体に中等度の炎症所見が浮腫とともに認められた症例である。性差については男性 0.118 ± 0.010 ，女性 0.119 ± 0.014 （いずれも患側）で差は認められなかった。またポリープの大きさに関しては、共振周波数，減衰率ともに中等大で患・健側差が大きい傾向が認められた（図9）。

2) 反回神経麻痺

図9 声帯ポリープの大きさと 患側の健側差

男性6例，女性4例，計10例の一側性麻痺の症例について検討を行い，表5のごとくの結果を得た。年齢は35~63歳（平均44.7歳）発症から測定までの期間は1週間~19カ月で，平均5.1カ月であった。

共振周波数は患側で82.4~101.3Hz（平均 90.7 ± 6.6 Hz），健側で87.6~102.5Hz（平均 96.7 ± 4.5 Hz）で，患側が健側よりも低値を示した。性差については平均値が男性 88.7 ± 6.9 Hz，女性 93.8 ± 5.4 Hz（いずれも患側）で，女性が男性よりも高値を示した。次に各症例

表5 反回神経麻痺症例の声帯物性（安静呼吸時 10例）

氏名	年齢	性別	発症から測定までの期間	共振周波数 f 患側 健側	Q 値	減衰率 患側 健側
T. H.	59	♂	4 M (中間位)	101.3 90.3	4.49 3.47	0.111 0.144
K. S.	41	♂	4 M	83.9 87.6	3.72 4.09	0.134 0.122
M. E.	51	♂	1.5 M	82.4 97.7	4.07 4.38	0.123 0.114
Y. H.	63	♂	19 M	86.5 97.1	4.99 5.34	0.100 0.094
S. A.	35	♂	1 W	91.8 97.6	4.02 5.31	0.124 0.094
K. S.	43	♂	7 M	86.6 102.5	3.92 4.56	0.127 0.110
T. S.	52	♀	2.5 M	96.3 100.3	4.39 4.79	0.115 0.103
M. S.	38	♀	9 M	98.9 98.7	5.04 4.62	0.099 0.108
Y. G.	48	♀	2 W	93.4 96.8	4.49 4.68	0.111 0.107
N. K.	47	♀	3 M	86.4 98.6	3.76 4.24	0.133 0.118
平均	44.7		5.1 M	90.7 ±6.6 96.7 ±4.5	4.29 ±0.47 4.55 ±0.56	0.118 ±0.013 0.111 ±0.019

図10 反回神経麻痺症例（安静呼吸 10例）の患側と健側の比較

図11 反回神経麻痺の発症から測定までの期間と共振周波数・減衰率の患側・健側差

について患側と健側の比較を行ってみると、図10にみられるように、2例を除き患側が健側よりも低値で、 $P < 0.05$ で有意差が認められた。このうち他と大きく異なった結果を示した例は患側声帯が中間位で固定、萎縮が認められた。

共振の鋭さQ値は、患側が3.72～5.04（平均 4.29 ± 0.47 ）、健側は3.47～5.34（平均 4.55 ± 0.56 ）であった。減衰率を算出すると患側は0.099～0.134（平均 0.118 ± 0.013 ）、健側は0.094～0.144（平均 0.111 ± 0.019 ）であった（表5）。性差については男性が 0.120 ± 0.012 、女性は 0.114 ± 0.014 （いずれも患側）で、女性が男性よりも低値を示した。同一症例での患側と健側の差を比較すると、図10に示すように2例を除き8例で患側が健側よりも高値を示した。ここで他症例と著しく異なり患側で低値を示した症例は前述した中間位固定例であった。

声帯麻痺の発症から測定までの期間と、共振周波数、減衰率の患・健側差を検討すると、共振周波数については相関を認められなかったが、減衰率は中間位固定例を除くと期間が長くなるにつれ差が大きくなる傾向を認めた（図11）。

3) 声帯癌

一側性声帯癌19例（男性18例、女性1例）について検討を行い、表6のような結果を得た。年齢は39～78歳（平均63.3歳）で高齢者が多かった。19例のうち7例は声帯の可動性が良好であったが、他の12例は声帯の可動制限のあるものが1例、固定しているものが11例であった。後者12例では腫瘍は声帯全長にわたっているものがほとんどであった。

共振周波数、Q値、減衰率を検討するにあたり、声帯の可動性良好例（以下A群とする）と、可動性不良・固定例（以下B群とする）の2つに分類し検討を加えた。女性は1例であり、性差については検討しなかった。

まず共振周波数については、A群では患側が86.0～106.6Hz（平均 93.1 ± 7.0 Hz）、健側が92.3～111.3Hz

(平均 $100.0 \pm 7.1\text{Hz}$) で患側が健側よりも低値を示した。またB群では患側が $95.1 \sim 113.5\text{Hz}$ (平均 $101.5 \pm 5.7\text{Hz}$)、健側が $84.4 \sim 102.0\text{Hz}$ (平均 $91.3 \pm 6.2\text{Hz}$) で、逆に患側は健側よりも高値を示した。個々の症例について患側と健側を対比させてみると、A群では1例を除き患側が健側よりも低値を示した。他と異なる結果

を示した症例は、腫瘍が声帯長の半分を占めていた。B群では全例で共振周波数は患側が健側よりも高値を示し、 $P < 0.01$ で有意差が認められた (図12)。

Q値はA群では患側が $3.68 \sim 4.99$ (平均 4.15 ± 0.50)、健側は $3.94 \sim 4.91$ (平均 4.47 ± 0.38) であった。B群では患側が $4.06 \sim 5.10$ (平均 4.59 ± 0.34)、健側は

図12 声帯癌の共振周波数 (安静呼吸時 19例) の患側と健側の比較

図13 声帯癌の減衰率 (安静呼吸時 19例) の患側と健側の比較

表6 声帯癌症例の声帯物性 (安静呼吸時 19例)

氏名	年齢	性	声帯の可動性	腫瘍の進展 (部位)	共振周波数 f		Q 値		減衰	
					患側	健側	患側	健側	患側	健側
(A)H.M.	76	♂	良	1/2 (前)	88.8	96.1	4.08	4.91	0.123	0.102
M.K.	57	♂	良	1/2 以下 (前)	106.6	108.0	4.14	4.70	0.121	0.106
G.M.	73	♂	良	1/2 以下 (前)	89.8	111.3	3.70	4.80	0.135	0.104
M.H.	46	♂	良	1/2 以下 (前)	86.0	100.7	3.68	4.15	0.136	0.120
C.S.	69	♂	良	1/2 以上 (後)	96.3	97.2	4.99	4.63	0.100	0.108
H.A.	54	♂	良	1/2 (前)	94.3	92.3	4.63	3.94	0.108	0.127
T.T.	65	♂	良	1/2 以下 (前)	89.5	94.5	3.80	4.18	0.132	0.120
A群平均					93.1 ± 7.0	100.0 ± 7.1	4.15 ± 0.50	4.47 ± 0.38	0.122 ± 0.014	0.112 ± 0.010
(B)M.Y.	64	♂	不良	全長	97.0	89.8	4.81	4.17	0.104	0.120
K.Y.	70	♂	固定	全長	103.3	94.4	4.98	3.90	0.100	0.128
T.N.	67	♂	固定	全長	105.2	87.1	5.10	4.13	0.098	0.121
K.N.	39	♂	固定	全長	104.4	96.1	4.27	4.32	0.117	0.116
M.M.	52	♂	固定	全長	109.6	100.4	4.46	3.60	0.112	0.139
K.I.	76	♂	固定	全長	97.6	84.4	4.12	4.34	0.121	0.115
Y.G.	69	♂	固定	全長	113.5	102.0	4.62	3.91	0.108	0.128
F.K.	59	♂	固定	全長	95.1	86.6	4.37	3.56	0.114	0.140
H.T.	56	♂	固定	1/2 (前)	99.5	95.9	4.90	4.66	0.102	0.107
T.F.	60	♂	固定	全長	96.6	86.0	4.86	3.88	0.111	0.137
H.U.	78	♂	固定	全長	98.8	86.2	4.59	3.68	0.123	0.138
F.M.	73	♀	固定	全長	98.1	86.5	4.06	3.63	0.103	0.129
B群平均					101.5 ± 5.7	91.3 ± 6.2	4.59 ± 0.34	3.98 ± 0.35	0.109 ± 0.08	0.127 ± 0.011

3.56~4.66 (平均 3.98 ± 0.35)であった。また減衰率は、A群では患側が $0.100 \sim 0.136$ (平均 0.122 ± 0.014)、健側が $0.102 \sim 0.127$ (平均 0.112 ± 0.010)であり、患側が高値であった(表6)。B群では患側が $0.098 \sim 0.123$ (平均 0.109 ± 0.08)、健側は $0.107 \sim 0.140$ (平均 0.127 ± 0.011)で、患側に低値を示した(表6)。

各々の症例について患側と健側の比較を行うと、図13に示すように、A群では2例を除き患側が健側より高値を示し、またB群では2例を除き逆に患側が低く、後者は $P < 0.01$ で有意差が認められた。A群の他とは異なる結果を示した2例はともに、腫瘍が他例と比較して大きく、声帯長の半分、あるいはそれ以上を占めていた。

なお、以上のデータで複数の共振点が得られる場合があるが、第2、第3の共振点のパワーは第一共振点のそれに比べて小さく、Q値、減衰率算出による各疾患での差を求めることは困難であり、検討は省略した。

V. 考 按

声帯振動に関する研究は、声帯が毎秒100~300Hz程度の高速度で振動する¹⁴⁾ために、通常の観察ではその詳細を検討することは困難であり、様々な方法によるアプローチがこれまでに試みられている。古くはストロボスコープ¹⁵⁾に始まり、高速度映画¹⁶⁾、あるいは超高速度映画¹⁷⁾による声帯の振動動態の視覚的観察がなされ、その振動機構に関する幾つかの説が唱えられてきた。1966年、広戸は高速度映画所見より、mucoviscoelastic aerodynamic theoryを提唱し、また1972年、平野は声帯の層構造概念を唱え^{19)~22)}、多くの研究者の支持を得ている。

超音波を用いた研究が1964年より教室の金子ら、あるいはMensch²³⁾により開始された。教室ではその後、従来のultrasonoglottography (U. G. G.)¹¹²⁾の手法を改良し、超音波パルス法Mモード変法を開発し^{3)~5)}、声帯物性について考察を続けてきた。

これらの研究とは別に、声帯物性の理論値を求める研究が、古くはvan den Berg²⁴⁾²⁵⁾、あるいはFlanagan and Landgraf²⁶⁾らにより報告され、得られた数値を基に、声帯の自励振動をモデルにより近似させる試みが、工学サイドから検討された。石坂は、広戸の報告した上唇下唇に位相差を生じる声帯振動に着目し、two massモデル理論を展開して、声帯の自励振機構の解明に多大の貢献を与えている^{27)~30)}。他に朱雀のモデ

ル³¹⁾、Titzeのdistributed-mass model^{32)~34)}等、声帯振動機構の工学的解析が試みられてきた。このような工学的声帯モデルによる声帯振動のシミュレーションには、in vivo、あるいはin vitroでの実測による声帯の機械定数を求めることが不可欠であり、声帯振動機構、あるいは喉頭調節機構を解明するために、医学、工学両面からのアプローチが重要である。このような観点から、教室では前述したように超音波パルス法Mモード変法を開発し、声帯振動を観察し、声帯物性について、特に声帯の機械定数を求めるべく研究をすすめてきた。内田⁷⁾はMモード変法の原理について述べ、これを用いて、in vivoで声帯に連続正弦波振動を与えて生ずる励振波形をとらえ、その共振特性について、安静呼吸時、ならびに発声準備状態の場合を検討した。鈴木⁸⁾は同様の方法でin vivoでの病的声帯(声帯ポリープ反回神経麻痺、声帯癌)の安静呼吸時の声帯励振波形より共振周波数、共振のQ値を求め、mass factor, stiffness factorを考慮して検討を加えた。さらに小松⁹⁾は、摘出喉頭の健側声帯に質量あるいは張力負荷した時の共振特性について検討し、in vivoで得られた実測値の理論的根拠を示し、声帯の機械定数として、damping ratio, effective mass, effective stiffnessを算出した。

以上はいずれも連続正弦波振動による声帯加振により実験であるが、その後教室では、より広範囲の周波数領域にわたる共振特性を検討するため、連続正弦波に代えて単発矩形波による加振実験を開始した。沼田¹⁰⁾、増田¹¹⁾はこの実験方法の原理と妥当性について述べ、前者は摘出喉頭について、後者はin vivoでの発声準備状態、ならびに安静呼吸時の共振特性について、主に共振周波数、共振の鋭さQ値について検討した。

そこで本論文では、同様に単発矩形波を用いて、病的声帯を含め様々な場合における共振特性を、特に減衰率を中心に比較検討した。

まず減衰率についてであるが、単発矩形波による加振で得られた声帯の励振波形は図1に見られるように、時間の経過とともに振幅は小さくなり、減衰して静止する。一般に振動の減衰率が0であれば加振によりいつまでも振動を続け、また減衰率が1以上では全く振動はおこらないはずである。従って種々の条件下での減衰率の変化を観察することにより、声帯物性の諸因子の変化をうかがい知ることが可能となる。

正常声帯の発声準備状態について検討すると、減衰率は声の高さが上昇するにつれて低下した。声の高さ

が上昇するにつれ、声帯には長軸方向に張力がかかると考えられる。そこで摘出喉頭健側声帯に長軸方向へ張力を負荷する実験を施行し、負荷張力と減衰率の関係を検討した。負荷した張力が10g, 30g, 50gと増大するにつれて減衰率はそれぞれ平均値が0.110, 0.095, 0.087と低下したがこの結果は発声準備状態での声の高さの変化に伴う減衰率の変化と対応した。この事実から、声の高さが上昇するにつれて、声帯の長軸方向への張力が増大し、声帯の stiffness が増大し、この物性の変化が優位に作用して減衰率が低下したと考えられた。

次に安静呼吸時の喉頭疾患を有する症例の減衰率について検討する(表7)。

声帯ポリープと声帯癌可動性良好例では、減衰率は患側が健側よりも高値を示す傾向が認められたが、これらの症例では、声帯ポリープ、あるいは腫瘍による声帯への質量負荷が考えられる。摘出喉頭健側声帯に質量負荷した場合の減衰率を求める実験では、質量が増大するにつれ減衰率は有意に増加し、声帯ポリープ、声帯癌可動性良好例の場合の減衰率の患・健側差と呼応する結果を得た。小松⁹⁾は連続正弦波励振による摘出喉頭での質量負荷実験で減衰率を算出し、今回の実験と一致した結果を報告している。つまり、この二つの疾患の場合、声帯ポリープ、あるいは腫瘍が声帯への負荷質量として優位に作用し、減衰率が増加したと考えられる。しかしながら一色³⁰⁾は摘出喉頭への質量負荷実験として、声帯内に生食水を注入する実験と、小鉛片を声帯に負荷する実験を施行し、前者で減衰率は増大、後者では減少したと報告した。質量負荷によ

る声帯の bending による stiffness の変化、疾患による声帯の物性変化など、減衰率に影響を与えている因子についてさらに検討が必要であろう。

反回神経麻痺の場合は、患側は健側に比して減衰率は高値を示した。麻痺声帯の物性の変化としては、麻痺による声帯の stiffness の低下、声帯萎縮による mass の低下などが考えられる。垣田³⁷⁾は反回神経麻痺声帯では、mass の低下よりも stiffness の低下の方が声帯振動に優位に作用すると報告しており、今回の成績も声帯の stiffness の変化が優位に作用して減衰率が上昇したと考えられた。なお麻痺の発症から測定までの期間が長くなると、減衰率の患・健側差は大きくなる傾向がみられた。また一例に他疾患と著しく異なっており患側が健側よりも低値を示したが、喉頭鏡所見で他症例は麻痺声帯が副正中位をとっていたのに対し、この症例では麻痺側は中間位をとり、また著しい声帯萎縮が認められた。

声帯癌可動性不良・固定例では減衰率は患側に低く、健側で高値を示した。この場合は腫瘍による声帯への mass 負荷と、声帯への浸潤による stiffness の増加が考えられるが、前に述べた声帯癌可動性良好例の結果とは逆であること、またこの中で腫瘍が声帯長の半分以上を占めた症例では可動性不良・固定例と同様に患側が健側よりも低値を示したことを考慮すると、腫瘍浸潤による声帯の stiffness の増加が mass の増加以上に優位に作用して、減衰率が低下したと考えられた。なお2例に逆の結果を示す症例があるが、mass の増大の影響が優位であったのかは明らかでない。

正常声帯の安静呼吸時における減衰率は、 $0.116 \pm$

表7 喉頭疾患を有する症例の安静呼吸時の声帯物性

症例数		共振周波数			減衰率		
		患側 Hz	健側 Hz	危険率	患側	健側	危険率
声帯ポリープ	男(12)	92.8 ± 8.4	97.4 ± 6.5	P<0.1	0.118 ± 0.010	0.109 ± 0.014	P<0.1
	女(5)	92.5 ± 1.7	97.8 ± 2.5	P<0.01	0.119 ± 0.014	0.111 ± 0.010	
	計(17)	92.7 ± 7.0	97.5 ± 5.6	P<0.05	0.119 ± 0.011	0.110 ± 0.013	P<0.1
反回神経麻痺	男(6)	88.7 ± 6.9	95.4 ± 5.5		0.120 ± 0.012	0.113 ± 0.019	
	女(4)	93.8 ± 5.4	98.6 ± 1.4		0.115 ± 0.014	0.109 ± 0.060	
	計(10)	90.7 ± 6.6	96.7 ± 4.5	P<0.05	0.118 ± 0.013	0.111 ± 0.019	
声帯癌	可動性良好(7)	93.1 ± 7.0	100.0 ± 7.1	P<0.1	0.122 ± 0.014	0.112 ± 0.010	
	可動性不良・固定(12)	101.5 ± 5.7	91.3 ± 6.2	P<0.01	0.109 ± 0.008	0.127 ± 0.011	P<0.01

0.014 ($n=39$) であり、そのうち男性は 0.121 ± 0.016 ($n=24$) で、女性は 0.108 ± 0.006 ($n=15$) で女性で小さい傾向が認められ、内田の報告⁷⁾と一致した。

ヒト声帯の減衰率に関する報告はこれまでに、金子³⁵⁾がヒト摘出喉頭声帯に外力を加え、光電管を用いて計測した実験で $0.1 \sim 0.2$ 、また一色¹⁶⁾が高速度カメラを用いて同じくヒト摘出喉頭で $0.2 \sim 0.4$ (正常では 0.2 強か) というデータを報告している。また内田⁷⁾は、連続正弦波による実験で正常男性が 0.15 、女性が 0.13 、さらに鈴木⁸⁾は同方法による病的声帯 (in vivo) で $0.13 \sim 0.17$ 、小松⁹⁾は摘出喉頭で 0.21 と報告している。今回、様々な条件下で得た減衰率の値は、過去のいずれのデータよりも低値ではあるが、近似した妥当な数字が得られた。また連続正弦波による加振では、声帯疾患による患・健側差が求められなかったが、今回単発矩形波励振に代えて、各疾患での患側と健側の差を認め、様々な条件での減衰率の変化との相関を論ずることができたのは非常に意義のあることと考える。

最後に、in vivo での病的声帯の共振周波数について検討すると、表 7 に示すように、声帯ポリープ、反回神経麻痺、声帯癌可動性良好例で患側が健側よりも低値を示し、逆に声帯癌可動性不良・固定例では患側が健側よりも高値であった。減衰率と同様に周波数を決定する大きな因子として、声帯の mass と stiffness が考えられる。鈴木⁸⁾は in vivo での病的声帯に連続正弦波を与えた場合の共振周波数について、mass と stiffness の因子を考慮しながら検討したが、そのデータと比較すると、今回得られた結果は、声帯癌可動性良好例を除き、どの症例についても、患側と健側の差については一致した。共振周波数の値については多少今回の結果の方が低値であるが、これは声帯への加振方法の違いと、解析系の違いのためと考えられる。

単発矩形波による短時間の声帯加振は、in vivo で生理的に自然に近い声帯の状態を正確にとらえることが可能であり、非常に有用な手法と考えられる。今後さらに多方面からのアプローチが必要であるが、本実験の結果が声帯の振動機構解明の一助となれば幸いである。

VI. ま と め

単発矩形波加振による正常声帯の発声準備状態、安静呼吸時における励振波形、また摘出喉頭健側声帯への張力、質量負荷時の励振波形を超音波パルス法 Mモ

ード変法によりとらえ、減衰率を算出した。さらに同方法にて、in vivo の病的声帯の安静呼吸時の励振波形を得て、共振周波数、減衰率を求め検討を加えた。

1) 正常声帯の発声準備状態では、声の高さが上昇するにつれ、減衰率は有意に低下した。声の高さの上昇に伴って、声帯には張力が負荷され、声帯の stiffness の変化を生ずると考えられるが、摘出喉頭健側声帯の長軸方向への張力負荷時の減衰率の有意の低下と対応する結果を得た。

2) 声帯ポリープ症例、声帯癌可動性良好例では、ポリープまたは腫瘍による質量負荷が優位に作用して減衰率は上昇した。摘出喉頭健側声帯への質量負荷時の減衰率の有意の上昇はこの結果と対応すると考えられた。

3) 反回神経麻痺声帯では減衰率は上昇し、麻痺による声帯萎縮よりも声帯の stiffness の変化による影響をより強くうけることが推察された。

4) 声帯癌可動不良・固定例では減衰率は患側で低値を示したが、これは腫瘍による mass の増大よりもむしろ、浸潤による stiffness の増加によるものと考えられた。

5) 正常声帯の安静呼吸時の減衰率は $0.091 \sim 0.144$ (平均 0.116 ± 0.014) であった。男性は 0.121 ± 0.016 、女性は 0.108 ± 0.006 で、男性が女性より高値を示した。

6) in vivo での病的声帯の安静呼吸時の励振波形の共振周波数は、声帯ポリープ、反回神経麻痺、声帯癌可動性良好例で患側が健側よりも低値であるが、声帯癌可動性不良・固定例では逆に患側で高値を示した。この結果は連続正弦波加振によるデータとほぼ一致した。

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—ultrasonoglotography 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) 日本音声言語医学会編: 声の検査法, 医歯薬出版, 1979.
- 4) 金子敏郎, 内田邦明, 内藤準哉, 林崎勝武, 鈴木晴彦 他: 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.

- 5) Kaneko T et al: The Movement of the Inner Layers of the Vocal Fold During Phonation—Observation by Ultrasonic Method in Bless D and Abbs J (ed): Vocal Fold Physiology, Contemporary Research and Clinical Issues. College Hill San Diego, 1981, pp. 223-228.
- 6) Kaneko T et al: Mechanical Properties of the Vocal Fold: Measurements in Vivo, Stevent K and Hirano M (ed): Vocal Fold Physiology, University of Tokyo Press, 1981, pp. 365-376.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 小松健祐: ヒト摘出喉頭の声帯物性. 日耳鼻 88: 148-160, 1985.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 高橋康英, 奥津尚宏, 小泉孝之編: 実用振動解析入門. 日刊工業新聞社, 1984.
- 13) 関宮真佐人, 西田利男: 化学計測のためのフーリエ変換法入門. 共立出版, 1983.
- 14) 広戸幾一郎: 高速振動体の循環病理. 耳鼻 17: 1-5, 1971.
- 15) 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閉鎖の時間的關係に関する研究. 日耳鼻 49: 236-262, 1943.
- 16) 吉田義一: 高速度映画による発声時の声帯振動に関する研究. 日耳鼻 72: 1232-1250, 1969.
- 17) 吉田義一, 平野 実, 松下英明, 中島 亨: 声帯超高速映画撮影用の新装置. 日耳鼻 75: 1256-1262, 1972.
- 18) 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.
- 19) 平野 実: 発声中の声帯, 医学のあゆみ 80: 622-627, 1972.
- 20) 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.
- 21) 平野 実: 音声外科の基礎と臨床. 耳鼻 21: 239-440, 1975.
- 22) 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.
- 23) Mensch B: Analyse per exploration ultrasonique du mouvement des cordes vocales isolées. Compt Rend Biol 12: 2295-2296, 1964.
- 24) van den Berg: Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. J Speech and Hearing Research 1: 227, 1958.
- 25) van den Berg: Calculations on an a model of the vocal tract for vowel/i/ (Meat) and on the larynx. J Acoust Soc Am 27: 332, 1955.
- 26) Flanagan JL and Landgraf LL: Self-oscillating source for vocal-tract synthesizers. IEEE Trans Audio and Electroacoust AU-16: 57-64, 1968.
- 27) 石坂謙三: 声帯の振動に関する研究. 電通大, 1972.
- 28) 石坂謙三, Flanagan JL: 声帯音源の自励振動モデル. 日本音響学会誌 34: 122-131, 1978.
- 29) 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.
- 30) Ishizaka K and Flanagan JL: Synthesis of voiced sounds from a two mass model of the vocal cords. Bell Syst Tech J 51: 1233-1268, 1972.
- 31) 朱雀保正: 声帯振動の有限要素法によるシュミレーション. 日本音響学会講演論文集, 189-190, 1971.
- 32) Titze Ingo R: The human vocal cords: A mathematical model. Part I: Phonetica 28: 129-170, 1973.
- 33) Titze Ingo R: Normal modes in vocal cord tissues. J Acoust Soc Am 57: 736-744, 1975.
- 34) Titze Ingo R et al: On the mechanics of vocal-fold vibration. J Acoust Soc Am 60: 1366-1380, 1976.
- 35) 金子敏郎, 浅野 尚, 内藤肇哉, 北村 武 他: 声帯の Biomechanics—damping ratio を中心として—. 気食会報 25: 133-138, 1974.
- 36) 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.
- 37) 垣田有紀 他: 病的声帯振動の模式的表示. 日耳鼻 79: 1533-1548, 1976.

稿を終えるにあたり, 終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました恩師金子敏郎教授に深甚の謝意を捧げます。また本研究に御協力頂いた鈴木晴彦, 増田 卓, 沼田 勉先生を始め教室員の皆様に厚くお礼申し上げます。

なお本論文の要旨は第86回日本耳鼻咽喉科学会総会において発表した。

本研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費(課題番号60771326)の交付を受けたことを付記する。

(原稿受付 昭和62. 5.26日急載)

別刷請求先 〒260 千葉市亥鼻1-8-1

千葉大学医学部耳鼻咽喉科学教室 嶋田耿子