食道発声の空気力学的検討

長井 克明・岩田 重信・高須 昭彦・三輪 正人
大津有二郎・竹内 健二・越知美樹子・竹内 昌宏

Aerodynamic Study of Esophageal Speech

Katsuaki Nagai, Shigenobu Iwata, Akihiko Takasu, Masato Miwa,
Yujiro Ohtsu, Kenji Takeuchi, Mikiko Ochi and Masahiro Takeuchi
(Fujita Health University School of Medicine)

This aerodynamic study was performed to clarify the mechanisms of esophageal speech. We simultaneously measured the air flow, sub-neoglottic pressure, pitch and intensity of esophageal voices in 20 esophageal speakers.

Sub-neoglottic pressure was measured with a miniature catheter pressure transducer through the nose.

The data were obtained during both softer and louder speaking. Sub-neoglottic pressure varied from 11 to 103 cmH₂O. These values were higher than those of subglottic pressure in the normal larynx during phonation. The relation of positive neoglottic resistance and sub-neoglottic pressure, and negative neoglottic resistance and the air flow rate in esophageal speech was similar to that in the normal larynx during phonation. The sub-neoglottic pressure and the neoglottic resistance of skillfull esophageal speakers were higher than those of unskillfull subjects.

Key words: esophageal speech, aerodynamic study, sub-neoglottic pressure

はじめに

近年、喉頭癌に対する治療法が著しく進歩し¹⁾、喉頭全摘出術の頻度は減少の傾向にある。しかし、下咽頭癌、頸部食道癌等を含め生命保持を目的に喉頭全摘出術が必要となる症例は少なくない。無喉頭者には音声リハビリテーションが必須となるが、数ある代用音声の中でも食道発声は生理的で、清潔である事、道具を用いないため両手が自由に使える事等の点で最も重要で優れたコミュニケーション手段と考えられている。しかしながら食道発声の音声調節機構については Van den Berg ら²⁾、Snidecor と

Isshiki³⁾ をはじめいくつかの研究があるが今なお不明確な部分が多く、習熟度の客観評価法も確立されていない。今回我々は当教室で病的音声に対して施行している方法⁴⁾⁵⁾に準じ、発声時に流率 (ml/sec.)、音圧 (dB)、基本周波数 (Hz) に加え、食道発声時にできる新声門下部の圧 (cmH₂O、以下新声門下圧とする) を同時測定し、空気力学的に検討した。また当科で施行している発語明瞭度テスト、聴覚心理テストを使用し、聴覚的分析による習熟度クラスを作成し、食道発声上級者と初級者の差異につき考察した。

対 象

対象は藤声会（藤田保健衛生大学耳鼻咽喉科学教室に所属する食道発声教室）に参加している食道発声者20名（男性18名、女性2名）、年齢は42歳から75歳で、平均年齢は59.9歳である。食道発声開始後の期間は2カ月から6年4カ月であった。術式としては18例が喉頭全摘出術、両機能的頸部郭清術であり、1例は甲状腺喉頭全摘出術、両機能的頸部郭清術、1例は食道全摘、喉頭甲状腺左葉合併切除、大腸弁を使用した食道再建術を施行していた。放射線治療に関しては甲状腺癌症例を除く19例に対し術前後含めてリニアックまたはコバルトを40から70 Gy照射していた。なお被検者各自に本実験の目的と方法を説明し、同意を得た。

方 法

発声時の流率、基本周波数および音圧は永島医科器械社製発声機能検査装置 PS-77⁶⁾（以下PS-77と略す）を用いて測定した。新声門下圧は体内式マイクロチップトランスデューサートヨダ TCA2-P1を使用した。この圧力センサーの長さは600 mm、太さは先端部で1.8 mm、カテーテル部で1.65 mm、受圧部の大きさは1.5×3.5 mmであった。本実験のブロックダイアグラムを図1に示した。各パラメータの記録は三栄測機社製ポリグラフ141-6を用いビジュグラフ上に描出させた。

マイクロチップ挿入を容易にするため、被

験者の鼻咽腔を4%キシロカインネブライザーにて10分間表面麻酔した。マイクロチップは経鼻的に挿入し、受圧部を可及的に前方に向け、新声門下3 cmの位置で外鼻に固定した。PS-77検出部にマスクを挿着し、右手に持たせ顔面に密着させて使用した。検査内容は、①最長持続発声、②変化発声（主になるべく大きな声）とし、各パラメータを同時記録した。

食道音声の評価法

食道発声を総合的、客観的に評価する方法は確立されていないが、当科では食道音声を聴覚的に分析し、客観的評価を可能にしている⁷⁾。具体的には無意単音節語音表57A式を使用した発語明瞭度テストと、“ジャックと豆の木”の文章を被験者に読ませ“聞きやすい聞きにくい”の5段階評価（0～4）をする聴覚心理テスト（10名で行い40点満点）を組み合わせで行った。評価のめやすとしては小宮山⁸⁾の習熟度判定法を使用した。小宮山は習熟度クラスをA、B、C級としている。その内容は、

- A級：他人との意志の疎通を行うのにあまり不自由でない
- B級：他人との意志の疎通を行うのに不自由ではあるが、ある程度理解できる
- C級：何度聞きなおしてもなかなか理解できない

としている。これを当科で行っている聴覚的分析結果に当てはめて考えると、本論文で使用する

図1 ダイアグラム

る習熟度クラスは下記のごとくなる。

A級：発語明瞭度60%以上または“聞きやすい-聞きにくい”評点30以上

B級：発語明瞭度30%以上60%未満（ただしA級を除く）

C級：発語明瞭度30%未満

成績

食道音声の聴覚的分析の結果はA級11例，B級6例，C級3例となった。これをもとに空気力学的検査結果と比較検討を行った。

最長持続発声時における各パラメータの成績を表1に，変化発声時の各パラメータの成績と習熟度クラスを表2に示した。

1. 最長持続発声時間

最長持続発声時間は0.7秒から3.3秒に分布し平均1.9秒であった。大腸弁を使用した症例11は1.5秒で平均よりやや短縮していた。習熟度クラス別にみると，A級者15名では0.7秒から3.3秒に分布し，平均値は1.9秒であった。B，C級者5名の成績は1.2秒から2.7秒に分布し，その平均値は1.8秒であった。この結果よりA級者とB，C級者は最長持続発声時間に関しては差を認めなかった。

2. 流率

持続発声時の流率は26 ml/sec. より173 ml/sec. に分布し，その平均値は59.6 ml/sec. であった。習熟度クラス別にみると，A級者の持続発声時の流率は26 ml/sec. から173 ml/sec. に分布し，その平均値は59.6 ml/sec. であり，B，C級者では34 ml/sec. から92 ml/sec. に分布し，A級者とB，C級者の持続発声時に流率との間に差を認めなかった。また変化発声時の流率は15 ml/sec. から225 ml/sec. に分布し，その平均値は90.0 ml/sec. であった。このうちA級者の流率は15 ml/sec. から225 ml/sec. に分布し，その平均値は86.0 ml/sec. であり，B，C級者の流率は62 ml/sec. から144 ml/sec. に分布しその平均値は101.8 ml/sec. であった。変化発声時においてもA級者の流率が，B，C級者より増大するという傾向

は認められなかった。

3. 新声門下圧

持続発声時の新声門下圧は11 cmH₂O から80 cmH₂O に分布し，その平均値は39.4 cmH₂O であった。習熟度クラス別にみるとA級者15名では19 cmH₂O から80 cmH₂O に分布し，平均43.0 cmH₂O であり，B，C級者5名の新声門下圧は11 cmH₂O から50 cmH₂O に分布し，その平均値は28.6 cmH₂O であった。持続発声時の新声門下圧はA級者の方がB，C級者よりやや高い傾向を示した。変化発声時の新声門下圧は24 cmH₂O から103 cmH₂O に分布し，その平均値は62.0 cmH₂O であった。習熟度クラス別にみるとA級者15名の変化発声時の新声門下圧は36 cmH₂O から100 cmH₂O に分布し，その平均値は64.2 cmH₂O であり，B，C級者5名の新声門下圧は24 cmH₂O から103 cmH₂O に分布し，その平均値は55.2 cmH₂O であった。変化発声時においてもA級者の方がB，C級者よりやや新声門下圧は高値を示した。

4. 新声門抵抗

持続発声時の新声門抵抗は120 cmH₂O/l/sec. より2667 cmH₂O/l/sec. に分布し，その平均値は874.2 cmH₂O/l/sec. であった。習熟度クラス別にみると，A級者の持続発声時の抵抗は191 cmH₂O/l/sec. より2667 cmH₂O/l/sec. に分布し，平均983.0 cmH₂O/l/sec. であり，B，C級者では120 cmH₂O/l/sec. より783 cmH₂O/l/sec. に分布し，平均547.8 cmH₂O/l/sec. であった。持続発声時の抵抗はA級者の方がB，C級者より高い傾向を認めた。変化発声時の抵抗は216 cmH₂O/l/sec. より4733 cmH₂O/l/sec. に分布し，その平均値は1153.2 cm/l/sec. であった。習熟度クラス別のA級者では361 cmH₂O/l/sec. より4733 cmH₂O/l/sec. に分布し，その平均値は1418.7 cmH₂O/l/sec. であり，B，C級者は216 cmH₂O/l/sec. より641 cmH₂O/l/sec. に分布し，その平均値は359.8 cmH₂O/l/sec. であった。変化発声時も持続発声時と同様にA級者の方がB，C級者よ

表1 持続発声時の各パラメータの成績

症例	年齢	性	食発歴	TNM分類	術式	放射線治療	M.P.T sec.	流量 ml/sec.	新声門下圧 cmH ₂ O	抵抗 cmH ₂ O/l/sec.	基本周波数 Hz	音圧 dB	効率
1	61	男	5年10カ月	T ₃ N ₂ M ₀ glottic	喉頭全摘両機能的頸部郭清	60 Gy	1.5	43	49	1140	95	86	6.1×10^{-4}
2	57	男	5年6カ月	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	60	1.4	55	57	1036	90	69	8.2×10^{-6}
3	58	男	2年4カ月	T ₄ N ₂ M ₀ Supra	"	60	1.4	74	30	405	100	69	1.2×10^{-5}
4	42	男	1年3カ月	T ₂ N ₁ M ₀ glottic	"	40	2.6	61	50	820	125	73	2.1×10^{-5}
5	56	男	3年	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	50	2.5	58	39	672	75	71	1.8×10^{-5}
6	61	男	3年7カ月	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	Co 60 60	2.8	109	42	385	110	84	1.8×10^{-4}
7	62	男	1年6カ月	T ₂ N ₂ M ₀ "	"	60	1.9	26	65	2500	100	72	3.0×10^{-5}
8	64	女	4年6カ月	T ₂ N ₀ M ₀ Supra	"	60	2.2	55	19	345	101	63	6.2×10^{-6}
9	59	男	3年7カ月	T ₂ N ₀ M ₀ glottic	"	40	0.9	30	80	2667	80	74	3.4×10^{-5}
10	68	男	3年5カ月	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	40	2.7	34	26	765	100	64	9.2×10^{-6}
11	63	男	3年10カ月	頸部食道癌	食道全摘・喉頭甲状腺左葉合併切除	70	1.5	27	48	1778	150	78	1.6×10^{-4}
12	55	女	3年2カ月	甲状腺癌	甲状腺全摘・両機能的頸部郭清術	(-)	3.3	39	24	615	81	67	1.7×10^{-5}
13	72	男	3年6カ月	T ₃ N ₀ M ₀ glottic	喉頭全摘両機能的頸部郭清	50	1.1	71	48	676	95	63	1.9×10^{-6}
14	59	男	1年8カ月	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	60	2.5	68	62	912	111	72	1.2×10^{-5}
15	59	男	1年2カ月	T ₃ N ₀ M ₀ "	"	60	1.2	72	50	694	120	70	9.0×10^{-6}
16	75	男	6年4カ月	T ₂ N ₀ M ₀ "	"	50	1.2	30	24	800	144	69	3.6×10^{-5}
17	53	男	2カ月	T ₂ N ₀ M ₀ Sub	"	50	2.2	173	33	190	111	78	3.6×10^{-5}
18	56	男	1年1カ月	T ₂ N ₀ M ₀ glottic	"	60	1.4	46	36	783	120	68	1.2×10^{-5}
19	68	男	7カ月	T ₄ N ₂ M ₀ Supra	"	60	1.4	92	11	120	144	72	5.1×10^{-5}
20	49	男	2カ月	T ₂ N ₀ M ₀ glottic	"	60	0.7	46	22	478	58	67	5.1×10^{-6}

り抵抗は大きい傾向を認めた.

5. 音 圧

本実験で得られた持続発声時の音圧はA級者は63 dBから86 dBに分布した. またB, C級者は64 dBから72 dBに分布し, 持続発声時に73 dB 以上出せる食道発声者はA級であった(A級者15名中6名). しかしながらA級者の中にも持続発声時の音圧が低値を示す例が少なかった. 変化発声時においてはA級者は68 dBから98 dBに分布し, B, C級者は74 dBから79 dBに分布した. 変化発声時に80 dB以上の音圧を示した食道発声者はA級者であったが(A級者15名中8名) 持続発声時と同様A級者の中にも音圧が低値を示した例が少なくなかった.

6. 発声効率

対象となった全症例の持続発声時の効率は 0.019×10^{-4} から 6.1×10^{-4} に分布した. 習熟度クラス別のA級者15名の持続発声時の効率は 0.051×10^{-4} から 6.1×10^{-4} に分布し, B, C

級者では 0.094×10^{-4} から 0.97×10^{-4} に分布した. 持続発声時の効率はA級者の方が, B, C級者よりやや高い範囲に分布した. 変化発声時の発声効率は 0.029×10^{-4} から 4.7×10^{-4} に分布した. 習熟度クラス別のA級者では 0.029×10^{-4} から 4.7×10^{-4} , B, C級者は 0.094×10^{-4} から 0.97×10^{-4} に分布し, 変化発声時も持続発声時同様A級者の効率はB, C級者より高い範囲に分布した.

考 案

食道発声は喉摘後の音声再獲得法の中で最も優れた発声法であるが上達に時間がかかり練習途中で挫折する人も少なくない. 食道発声の獲得率(習熟度クラスA, B/無喉頭者)は当科では高度難聴者, 心肺系の強い障害のある者を除いて65.1%, 一般的には64~69%と報告されている⁹⁾ため平均的である. これを上昇させるためには食道発声の機構解明, 上級者と下級者

表2 変化発声時の各パラメータの成績と習熟度クラス

症例	流 率 ml/sec	新声門下圧 cmH ₂ O	抵 抗 cmH ₂ O/l /sec	基本周波数 Hz	音圧 d B	効 率	習熟度 クラス
1	43	100	2326	173	95	2.4×10^{-3}	A
2	62	54	871	105	80	9.7×10^{-5}	A
3	154	56	364	115	80	3.8×10^{-5}	A
4	69	63	913	110	98	4.7×10^{-3}	A
5	225	61	271	160	76	9.4×10^{-6}	A
6	109	90	826	120	84	8.3×10^{-5}	B
7	15	71	4733	100	73	6.1×10^{-5}	A
8	78	50	641	278	77	4.2×10^{-5}	A
9	25	40	1600	85	77	1.6×10^{-4}	B
10	144	52	361	112	74	1.1×10^{-5}	B
11	19	65	3421	140	82	4.2×10^{-4}	C
12	93	36	387	80	74	2.4×10^{-5}	A
13	85	52	612	110	66	2.9×10^{-6}	B
14	90	90	1000	220	86	1.6×10^{-4}	B
15	113	47	416	89	76	2.4×10^{-5}	B
16	50	67	1340	73	70	9.7×10^{-6}	A
17	196	50	255	130	81	4.2×10^{-5}	A
18	62	103	1661	90	75	1.6×10^{-5}	C
19	111	24	216	94	79	9.7×10^{-5}	C
20	62	70	1129	232	68	4.7×10^{-6}	A

図2 食道発声者の新声門抵抗と流率の関係
 $\text{resistance} = -11.1 \times \text{air flow} + 1845.6$ という一次回帰式を得, 相関係数0.57で負の相関を示した.
 ●: 持続発声時

の違いを検討する事は有用であると考えられる。今回我々は食道発声機構解明のためマイクロチップトランスデューサーと PS77 を使用した空気力学的な手技を用いた検討を行った。前述のごとく食道発声者の最長持続発声時間は正常喉頭者に比較して著しく短かった。また流率も著しく低値を示した。持続発声時の新声門下圧は 11 cmH₂O から 80 cmH₂O に分布し正常喉頭者の声門下圧より高値を示した。有沢¹⁰⁾の報告でも自然な「ア」音発声時に 19~65 cmH₂O と本論文と同様の結果を得ている。また強い発声では新声門下圧の上昇を認めるとしており、本論文の結果に一致している。

新声門抵抗は持続発声時に 120 cmH₂O/l/sec. から 2667 cm/l/sec. と広く分布し、その平均値は 874.2 cm/l/sec. と正常値より明らかに高値を示した。

新声門抵抗と流率の関係を図 2 に、新声門下

図 3 食道発声者の新声門下圧と抵抗の関係

$\text{resistance} = 22.3 \times \text{pressure} - 116.0$ という 1 次回帰式を得、相関係数 0.53 で正の相関を示した。

●：持続発声時

圧と抵抗の関係を図 3 に示した。食道発声において新声門抵抗と流率は負の相関、新声門下圧と新声門抵抗は正の相関を示し、この傾向は正常喉頭者と類似していた。

発声効率と音圧の関係を図 4 に示した如く両者間の関係は正常喉頭者と類似していた。

空気力学的なパラメータを聴覚的分析による習熟度クラス別に検討したところ、A 級者は新声門下圧および新声門抵抗において B、C 級者より高値を示す傾向を認めた。有沢¹⁰⁾の報告でも中、下級者に新声門下圧の上昇しない例が多く、上級者の新声門下圧は比較的高値を示しており、本実験結果と一致した。最長持続発声時間、流率は A 級者と B、C 級者の間で差を認めなかった。

まとめ

1) 食道発声機構を解明するため、流率、基本周波数、音圧、新声門下圧を同時測定した。

図 4 食道発声者の効率と音圧の関係

$\text{intensity} = 0.034 \times \text{efficiency} + 69.3$ の一次回帰式を得、相関係数は 0.75 で正の相関を示した。

さらに聴覚的に習熟度をA, B, C級の3段階に分類し, 空気力学的な差異につき検討した.

2) 流率は正常喉頭者に比較して著しく低値であった.

3) 持続発声時の新声門下圧は正常喉頭者より高値を示し, 変化発声時(より大きな声)は新声門下圧の上昇を認めた.

4) 新声門抵抗と流率は負の相関, 新声門下圧と新声門抵抗は正の相関, 発声効率と音圧は正の相関を示し, 正常喉頭者に類似していた.

5) 習熟度クラス別のA級者は新声門下圧および新声門抵抗においてB, C級者より高値を示す傾向を認めた.

参考文献

- 1) 岩田重信: 喉頭癌の現況. 耳鼻臨床 補3: 10~19, 1986.
- 2) Van den Berg J and Moolenaarbyl AJ: Cricopharyngeal sphincter, pitch, intensity and fluency in oesophageal speech. Pract Oto Rhino Laryngol 21: 298~315, 1956.
- 3) Snidecor JC and Isshiki N: Air volume and air flow relationships of six male esophageal

speakers. J Speech Hear Disord 30: 205~217, 1965.

- 4) 岩田重信, 江崎俊夫, 岩見公晴, 他: 喉頭疾患における発声時呼气流率に関する研究. 名市大医誌 26: 398~406, 1976.
- 5) 岩田重信: 空気力学的にみた発声障害の臨床. 音声言語医学 21: 168~174, 1980.
- 6) 澤島政行, 青木幸夫: 発声時の呼气流率, 声の高さおよび強さの同時計測装置. 医科器械学 52: 324~345, 1982.
- 7) Nagai K, Kuroyanagi H and Iwata S, et al: Objective evaluation of esophageal speech. Folia Phoniatr 38: 333, 1986.
- 8) 小宮山壮太郎: 無喉頭者の発声法の選択はいかにあるべきか. 耳鼻臨床 71: 1443~1444, 1978.
- 9) Gates GA: Current status of laryngectomy rehabilitation. Am J Otolaryngol 3: 1~7, 1982.
- 10) 有沢嘉朗: 食道発声における新声門上下圧. 耳鼻臨床 補24: 20~37, 1988.

(別刷請求先: 長井克明
〒470-11 豊明市沓掛町田楽ヶ窪1-98
藤田保健衛生大学医学部耳鼻咽喉科学教室)