

特集 発声発話器官の最新の知見

発声発話器官としての胸郭・呼吸筋の
構造と特性

総説▶

解良武士

Takeshi Kera

要旨 胸郭や呼吸筋は呼吸のみならず発声発話において重要な器官である。発声のための呼息運動と呼吸運動は共通であるため、換気についての解剖学的・呼吸生理学的・運動学的な理解は重要である。胸郭運動や呼吸筋活動は運動学的に特徴があるし、呼吸器系の圧量曲線で説明される胸郭の物性は発話時の呼息運動に影響を与える。本稿では、発声発話器官としての呼吸器系、とりわけ胸郭・呼吸筋の構造とその特性を中心に解説する。

キーワード▶ 発声、発話、胸郭、呼吸筋

I. はじめに

発声発話には動力としての呼吸器系、とりわけ胸郭腹部の働きが不可欠である。呼吸器系の基礎的な換気力学的研究は完成しているといっても良いほど多くの知見があるが、言語領域ではあまり扱わないためそれほど知られていない。そのうち胸郭・呼吸筋の機能とその特性についての理解はきわめて重要であるため、本稿で解説する。

II. 胸郭と腹部の構造

1. 胸郭の構造と呼吸筋

胸郭は胸骨、12対の肋骨、脊柱で構成される籠状の構造で、肋骨は肋骨頭関節と肋横突関節で胸椎と、胸肋関節で胸骨と連結している。肺を膨らませ呼吸運動を行うためにはこの胸郭を拡張させる必要があるが、その機能を担うのが呼吸筋である(図1)¹⁾。主な吸気筋としては横隔膜、外肋間筋、内肋間筋内側部(傍胸骨筋)がある。これ以外に努力吸気時に動員される吸気補助筋として胸鎖乳突筋、斜角筋などがある²⁾。呼吸筋には内肋間筋のほか、腹筋群(腹横筋、内腹斜筋、外腹斜筋、腹直筋)がある¹⁾。

2. 呼吸の運動学

吸気は主に横隔膜と外肋間筋の作用によって行われる。横隔膜は脚部、肋骨部、胸骨部に分けられる。脚部は横隔膜を下方へ牽引する作用が、肋骨部はこれに加え下部肋骨を上方へ引き上げる作用がある。内肋間筋と外肋間筋は肋

間の向きに対する筋線維の方向からそれぞれ呼気、吸気に作用する。胸鎖乳突筋や斜角筋は吸気努力が必要ときに動員される。一方、呼気は胸郭の弾性縮小圧により胸郭が縮小するため、内肋間筋が弱く活動するのみであるが運動時や咳嗽、発声時は腹筋群が動員される。この腹筋群は腹横筋、内腹斜筋、外腹斜筋、腹直筋で構成されるが、呼気の強さや深さに応じて深層から優先的に動員される³⁾。

呼吸運動の際の肺容積変化は横隔膜の腹側への移動による寄与が大きいが、肋間筋や横隔膜肋骨部などの収縮による胸郭の外側への拡大もきわめて重要である。肋骨頭関節と肋横突関節で起こる肋骨の運動により、吸気時には胸郭が拡張する。この2つの関節で作られる運動軸が上部胸郭と下部胸郭、浮遊肋で異なるため、運動方向が一様ではない。上部胸郭は前上方へ(pump-handle movement)、下部胸郭は上外側へ(bucket-handle movement)、浮遊肋が外側後方へ(caliper movement)動くことで、全体としては胸郭が拡張する(図2)⁴⁾。

3. 呼吸運動と発話時の呼吸様式の違い

発声時は声門を振動させて音を発生するためには、換気のための呼吸筋活動とは異なる神経系の調節が行われる。換気が声門を解放したまま肺・胸郭の弾性収縮圧と気道抵抗に任せた自由な呼出が行われるのに対して、発声時は呼気筋の収縮力、収縮速度の調節が必要となる。これにより音量、音質、文節の長さなどに応じた声門下圧(=肺・胸郭の弾性収縮圧+呼気筋の発生圧)が作られる。安静呼吸時と発声発話時の呼吸様式の比較を表1に示す⁵⁾。

東京都健康長寿医療センター研究所, 小川赤十字病院

[連絡先] 解良武士: 東京都健康長寿医療センター研究所 (〒173-0015 東京都板橋区栄町 35-2)

TEL: 03-3964-3241 (Ext.4242) E-mail: kera@tmig.or.jp

受稿日: 2016年5月12日 受理日: 2016年5月13日

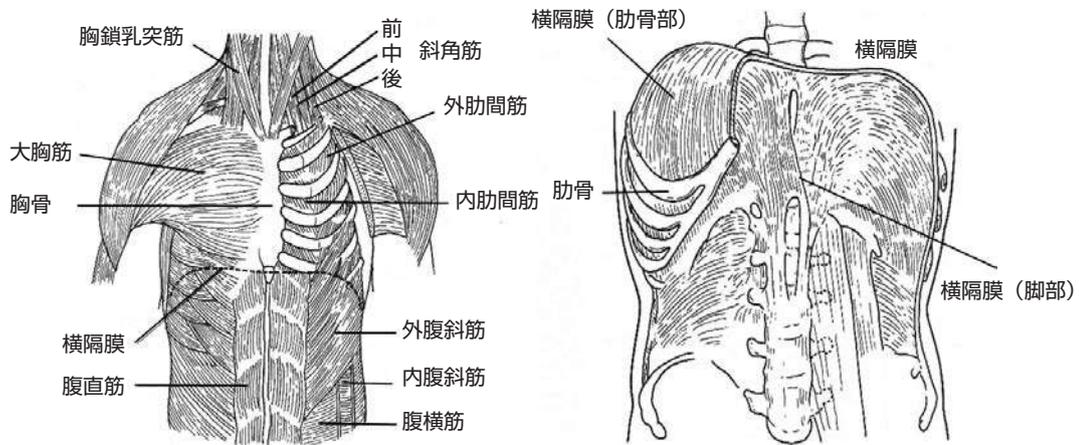


図 1 主な呼吸筋 (文献 1 より)

吸気筋 (横隔膜, 外肋間筋), 吸気補助筋 (胸鎖乳突筋, 斜角筋), 呼気筋 (腹横筋, 内腹斜筋, 外腹斜筋, 腹直筋)

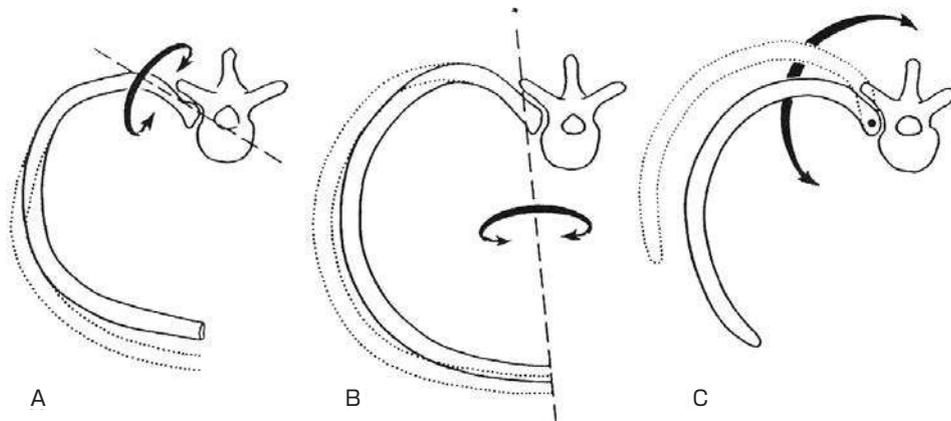


図 2 肋骨の運動 (文献 4 より引用)

A ; 上部胸郭は前上方へ拡張する (pump-handle movement) B ; 下部胸郭は外側上方へ拡張する (bucket-handle movement), C ; 浮遊肋は後方へ拡張する (caliper movement)

表 1 安静呼吸時と発話時の呼吸様式の比較 (文献 5 より引用)

		安静呼吸時	発声時
空気の動き	一回換気量 (ml)	500-600	1,500-2,400
	吸気時間		
	吸気時間+呼気時間	0.4	0.13
	平均呼吸数	16~20	4~20
	呼吸の様式	持続性	断続的 声門下圧の上昇を伴う
運動調節	呼気筋の活動	ほとんどなし	発声のはじめにはほとんどないが、発話が続くと活動開始する。
	吸気筋の活動	吸気時のみ活動	吸気時および発声のはじめに働くが呼気筋が働き出すと休止する。
	呼吸運動の調節	胸・腹呼吸で、胸・腹筋は同期的に働く。	主として胸式呼吸、胸・腹筋の間に同期的活動あり
	空気の経路	主として鼻腔を通る。	主として口腔を通る。

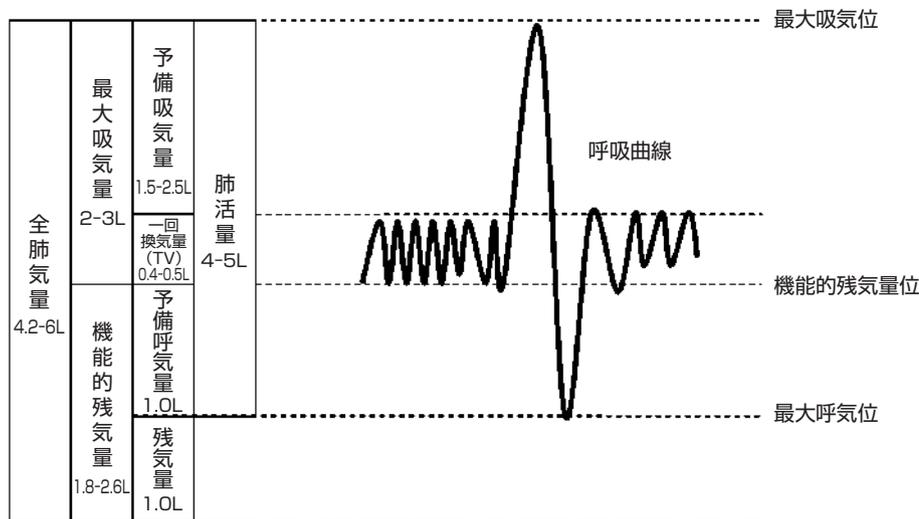


図3 肺気量分画

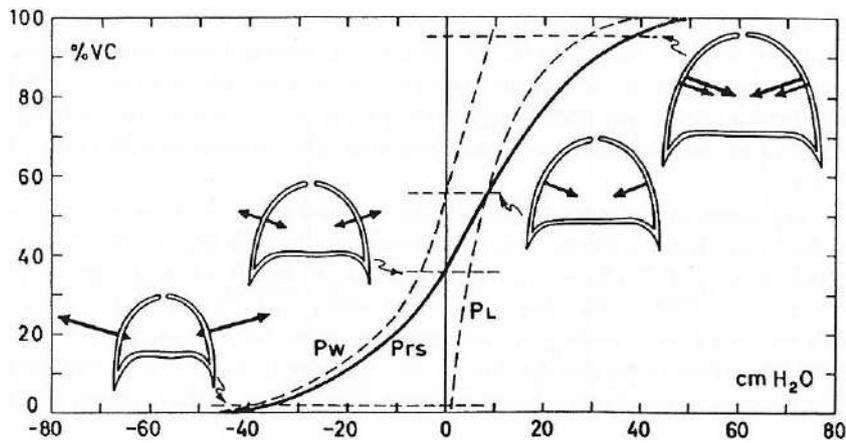


図4 肺・胸郭の圧量関係 (文献6より引用)

胸郭は最大呼気位では陽圧が、最大吸気位では陰圧が発生する。肺はいずれの肺気量でも陽圧が発生する。この2つを合成すると呼吸器系全体の圧量曲線が描出できる。胸郭の弾性拡張圧と肺の弾性収縮圧が釣り合う点が機能的残気量 (FRC) となる。

%VC: 肺活量で表した肺気量位 Pw: 胸郭の圧量曲線 Prs: 呼吸器系の圧量曲線 PL: 肺の圧量曲線

Ⅲ. 呼吸器系の換気力学的特性

1. 肺気量分画

肺の拡張と縮小の変化は呼吸曲線で描出することができる。最大吸気位、最大呼気位など、呼吸曲線におけるある特定の位置を肺気量位という。それらの関係から肺活量 (Vital capacity; VC) や全肺気量 (Total lung capacity; TLC) などの肺気量分画が決まる (図3)。VC は後に説明する肺/胸郭の弾性拡張圧・収縮圧 (堅さ) と呼吸筋力によって決まる。

2. 呼吸器系の圧量関係

肺・胸郭を含む呼吸器系は、肺気量位と弾性拡張圧およ

び縮小圧に関係がある。この関係を圧量関係と呼ぶ (図4)⁶⁾。肺はいずれの肺気量でも縮小圧が発生するが、胸郭は高肺気量位 (吸気位) では縮小圧が、低肺気量位 (呼気位) では拡張圧が発生する。肺は肺気量にかかわらず常に縮小圧が発生しているため、肺と胸郭の間である胸腔は常に陰圧である。肺の弾性収縮圧と胸郭の弾性拡張圧が釣り合う点が機能的残気量位 (functional residual capacity; FRC) である。FRC 位より高肺気量位では呼吸器系には縮小圧が発生している。安静呼吸ではFRC 位より吸気筋が収縮することで吸気が起こり、その後吸気筋が弛緩すると弾性収縮力により呼気が起こる。

3. 姿勢による肺気量変化

肺気量は姿勢の影響を受ける。特にその影響を強く受け

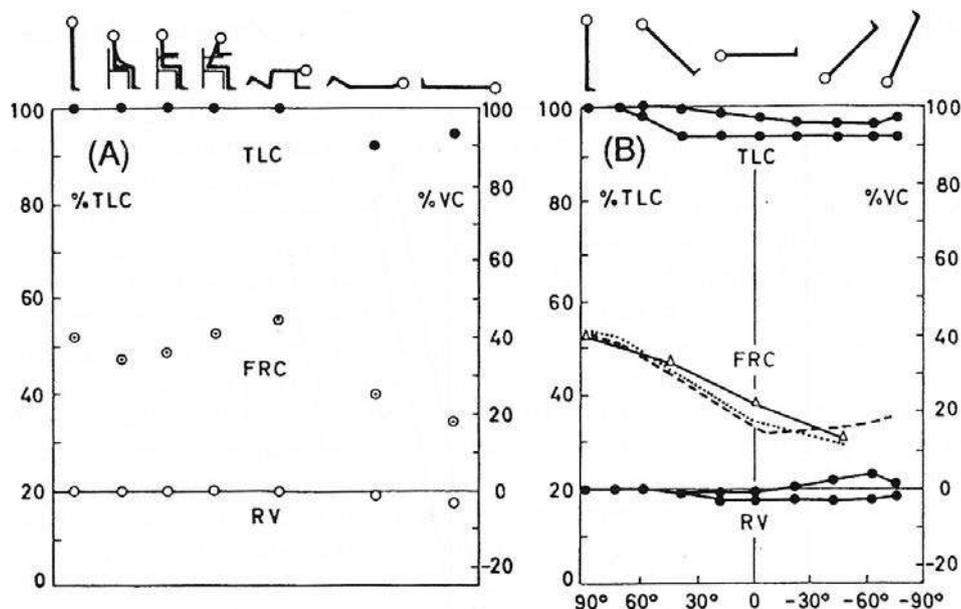


図5 姿勢と肺気量の変化 (文献6より引用)

左図はさまざまな姿勢での肺気量, 右図は傾斜台での起立から頭低位までの肺気量の変化を示す. 起立位に比べ背臥位や頭低位では腹部臓器の重さにより横隔膜が胸腔へ圧迫されるため, FRCは小さくなる. 背臥位や頭低位では下肢の血液が肺へシフトすることにより肺胞が小さくなるため TLCも減少する.

TLC: 全肺気量 FRC: 機能的残気量 RV: 残気量 VC: 肺活量

るのは FRC である (図 5). 背臥位では腹部臓器の胸腔への圧力が高まり横隔膜が胸腔へ押し上げるため, Resting Position である FRC が減少する (肺が小さくなる). 頭低位はその影響がさらに強い⁶⁾.

IV. 呼吸筋の特性

1. 呼吸筋力

呼吸筋は四肢とは異なり関節トルクを直接測ることができないが, 呼気筋力 (PE_{max}) は最大呼気努力 (Valsalva maneuver), 吸気筋力 (PI_{max}) は最大吸気努力 (Müller's maneuver) で得られる口腔内圧で代用が可能である. 前者を最大呼気口腔内圧, 後者を最大吸気口腔内圧という⁷⁾. 呼吸筋力の正常値は報告によりさまざまあるが, PE_{max} は 70-130 cmH₂O, PI_{max} は 90-100 cmH₂O 程度で呼気筋力のほうが高い. また呼吸筋力は加齢によって低下する^{8,9)}.

2. 呼吸筋の肺気量依存

最大吸気位から肺気量を減弱すると PE_{max} (呼気筋の収縮力) は減弱し, 最大呼気位では PE_{max} は 0 cmH₂O となる. PI_{max} はその反対の関係である. この関係を呼吸筋力の肺気量依存という (図 6)⁶⁾. 最大吸気位では腹部が膨隆し最大に腹筋群が伸長される. このとき筋の長さ-張力関係 (length-tension relationship) により最大呼気筋力が発揮される. 声楽や大声を出すときに深吸気を行うのは, 持

続発声時の呼気 (含気) を多く蓄えることができるだけでなく筋力の発揮においても有利であるからである. この最大呼気筋力の発揮には最大吸気筋力も重要である. FRC から全肺気量位まで完全に胸郭を拡張 (深吸気) させるためには強い吸気筋の収縮が必要で, 吸気筋が弱体化すると呼気筋も筋力を発揮できない.

3. 呼吸筋弱体化と呼吸筋疲労

骨格筋である呼吸筋は筋力が低下したり疲労によって筋出力が低下したりすることがある. 健常者の場合, 運動時であっても, 換気に要求される圧より最大呼吸筋力のほうが遥かに強いいため十分な予備力がある. そのため, かなり激しい全身的な運動でも呼吸筋は最大までは動員されず呼吸筋疲労は生じにくい¹⁰⁾. しかしながら, 呼吸器疾患では呼吸筋は弱体化し予備力がないため, 呼吸筋疲労が起りやすい^{11,12)}. ガス交換の観点からは吸気筋力の弱体化が議論されることが多いが, 慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary disease; COPD) では PI_{max} が 55 cmH₂O または予測値の 50% を下回ると換気不全 (高 CO₂ 血症) に陥る¹¹⁾. 呼気筋力は咳嗽の観点からも議論されることが多いが, 神経筋疾患では呼吸筋力と咳嗽力は関連が強い¹³⁾.

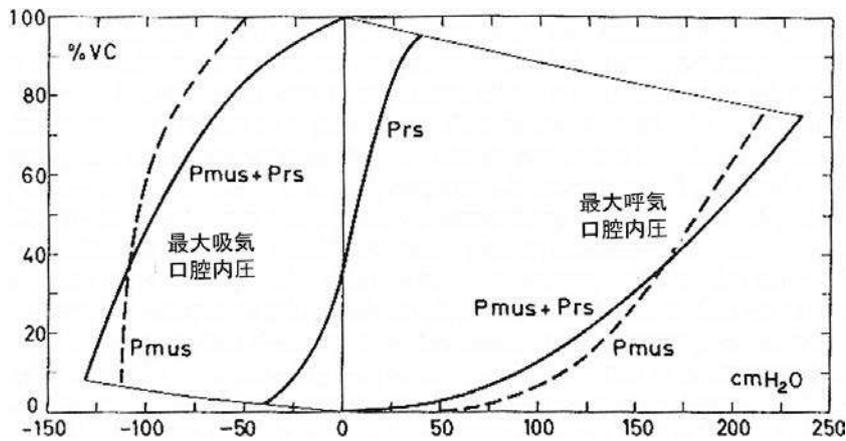


図6 肺気量と呼吸筋力の関係(文献6より引用)

閉塞したマウスピースに吸気または呼気努力を行わせることで呼吸筋力を測定する。最大吸気位(100%VC=全肺気量位)から呼気努力を行うと、Boyleの法則に従って肺内の気体が圧縮されながら(肺気量位が低くなりながら)圧が上昇する。このときの最大圧を最大呼気口腔内圧(PE_{max})とする。同様に最大呼気位(0%VC=残気量位)で吸気努力を行った際の最小圧を最大吸気口腔内圧(PI_{max})とする。 PI_{max} は絶対値で表すことが多い。 PE_{max} は肺気量位の低下に伴い低くなり、逆に PI_{max} は肺気量位の上昇に伴い低くなる(絶対値が)。

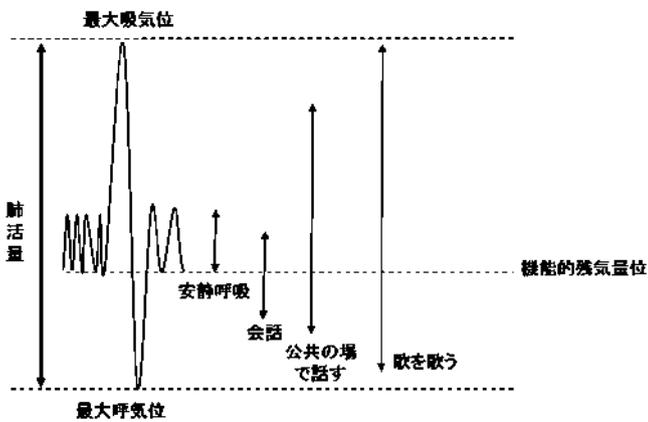


図7 発声時の肺気量変化

呼吸曲線も描出してある最大吸気位から最大呼気位まで呼出した空気量が肺活量である。発声はこの肺活量の範囲で肺気量位が変化する。(文献18, Proctor, 1974のデータに基づく)

V. 発声発話における胸郭と呼吸筋の特性

1. 発話時の呼気圧

発話には声帯を振動させるための声門下圧が必要であるが、少なくとも0.2-0.5 kPa (<5 cmH₂O)¹⁴⁾の圧があれば声帯を振動させることができる。日本人での声門下へのカテーテル挿入による直接測定の結果では、平常会話の音量での発話の声門下圧は4-12 cmH₂Oである^{15, 16)}。一回換気量を500 ml, 肺活量を3000 mlとおくと、安静換気での吸気位(吸気時はFRCより高い肺気量位)で発生する呼吸器系の収縮圧は5-10 cmH₂O程度の陽圧である。

したがって平常会話程度の大きさで発声時間が短ければ、呼吸器系の弾性収縮圧に加えて腹筋群のわずかな活動により発声は可能である。この筋活動は姿勢によって影響を受ける。背臥位では腹筋群の活動はほとんど認めないが、座位では持続的な活動に加え発話に関係した活動が観察される¹⁷⁾。これは座位や立位のような姿勢では、重力により降下した腹部臓器と横隔膜を挙上するために腹筋群の活動がより必要なためである。

2. 発声時の肺気量変化

安静換気時の肺気量位の変化はFRC位から一回換気量の範囲である。会話では安静換気に比べて呼気開始時・終了時とも肺気量位が低く、かつ一回換気量が増加する。公共の場で話をするような、すこし大きな声を出したり長い文節を息継ぎなしで話したりするときは高い肺気量位からより低い肺気量位まで大きく変化し一回換気量も増加する。歌を歌うときは最大吸気位に近い肺気量位から最大呼気位に近い肺気量位まで変化する(図7)¹⁸⁾。一呼吸サイクルでの発声開始時から終了時までの肺気量(この差が一回換気量である)は同じ課題でも個人差があり¹⁹⁾、さらに要求される会話の長さ、声の質・大きさなどにより変化する。この発声時の肺気量変化は加齢に影響を受け、若年者に比べ高齢者は高い肺気量位で発声を行う²⁰⁾。これは加齢によって肺の弾性収縮圧が減少しFRCが増加する²¹⁾こととも関連すると考えられる。

3. 声門下圧と肺気量との関係

安静換気において呼気努力がなくともFRCまで呼出できるのは気道抵抗が小さいからである。しかし発声の場合、

必要な声門下圧を呼吸器系の弾性縮小圧が下回る条件では呼気筋の活動が必要となる。図8は発声時の声門下圧と呼吸器系の圧量曲線との関係である²²⁾。高肺気量位から持続的に発声を行うと、ある肺気量位より低くなると弾性収縮圧は声門下圧より小さくなる(rsと声門下圧の交点)。この肺気量位はFRCより高い。さらに低肺気量位まで呼出しながら発声を続けるためには、声門下圧と呼吸器系の弾性拡張圧に抗じて呼気筋が収縮する必要がある(A)。大きな発声では必要な声門下圧が高くなるため、弾性収縮圧が声門下圧より小さくなる肺気量位がより高くなる(B)。

発声直前に高い肺気量位まで吸気を行うとより大きな弾性収縮圧と持続時間の長い呼気を得ることができる。しかしそのためには呼吸器系の弾性収縮圧に逆らって深吸気を行う必要がある(吸気努力; グラフ右上方の斜線部はこのときの呼吸仕事量である)。

VI. 発声発話と呼吸筋活動

1. 深吸気・深呼気時の呼吸筋活動

能動的に大きな声や長い文節を発話したり、歌を歌ったりするような、持続した高い声門下圧を要する発話運動の際には呼気筋の活動と直前の吸気量が重要である。それらのためには吸気補助筋の活動が重要である。最大吸気位まで吸気努力を行う場合、横隔膜と外肋間筋が活動するが肺気量が高くなるにつれて斜角筋、胸鎖乳突筋、僧帽筋の順に呼吸補助筋も動員される^{23, 24)}。深呼気を行う場合では、腹筋群で最初に動員されるのは腹横筋で、次いで内腹斜筋、外腹斜筋、腹直筋の順に動員される³⁾。これは発声においても基本的には同じで、最大吸気位から持続した発話を行う課題では胸郭にある内肋間筋が最初に動員されるが、FRCより低肺気量になると腹筋群が動員される(図9)²⁵⁾。

2. 発声時間と換気

長い文節や文章を発話するためには最長発声持続時間(maximum phonation time: MPT)が重要で、これはVCと喉頭の発声効率によって決まる²⁶⁾。発声効率が良好でも、VCが小さいと発声に十分な呼気流速を維持しながら呼気時間を延長することができないため、呼吸筋が弱化する神経筋疾患はVCの減少によりMPTが短縮する²⁷⁻²⁹⁾。ただしその影響は健常者では小さくVCと発声時間は関係がない³⁰⁾。

VII. ま と め

発声発話機能として胸郭および呼吸筋を含む呼吸器系の役割は大きい。平時の発声発話に要求される呼吸機能・換気機能はそれほど高くないが、これらが障害される呼吸器障害や神経筋疾患では発声発話機能が低下する場合もあ

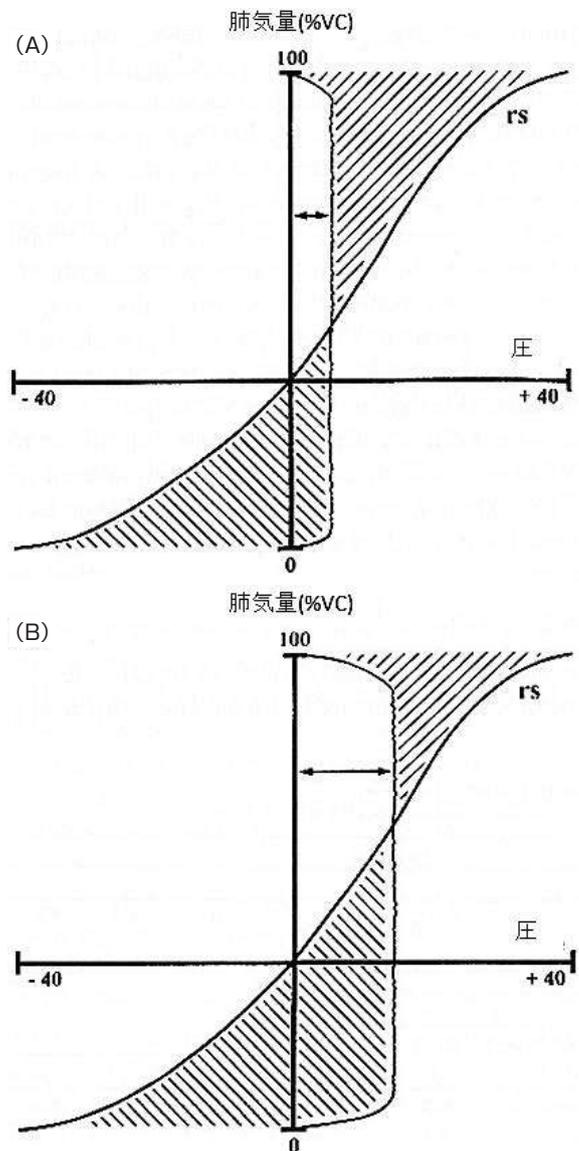


図8 発声時の声門下圧と呼吸器系の圧量曲線との関係(文献22より引用)

小さな発声(A; 声門下圧6 cmH₂O)と大きな声(B; 声門下圧15 cmH₂O)で最大吸気位から最大呼気位まで持続的に発声を行ったときの声門下圧と肺気量の変化である。斜線部は吸気または呼気努力(呼吸仕事量)を表す。軸の交点は機能的残気量に該当する。矢印は声門下圧を示し、この例では高肺気量位から低肺気量位までほぼ一定となる条件で発声している。

る。そのような場合は、呼吸器系の特性に配慮したアプローチが求められる可能性もある。本稿がそのような問題で発声発話機能に障害や制限を受ける患者の治療に寄与することを望む。

文 献

- 1) 谷本普一: 呼吸不全のリハビリテーション, 南江堂, 東京, 3-59頁, 1986.

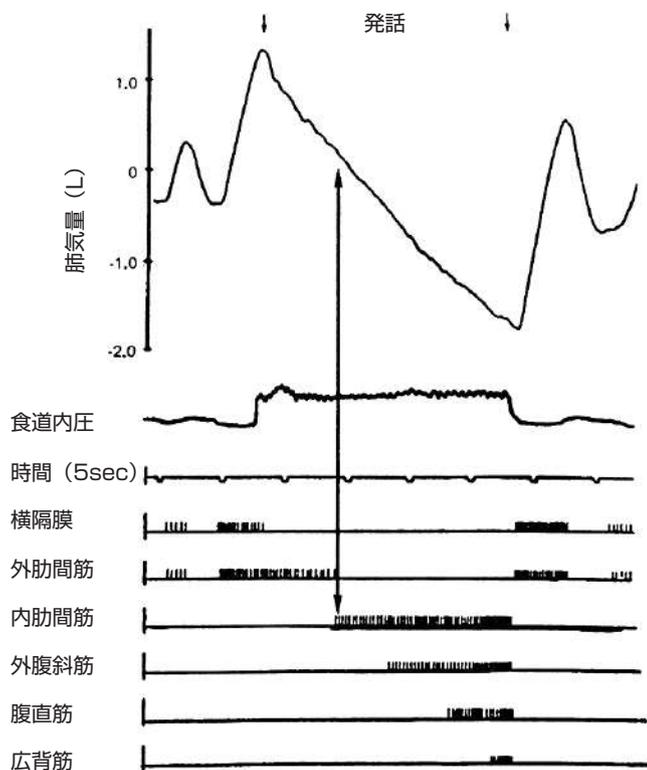


図9 持続会話時の呼吸筋活動(文献25より引用)

最大吸気位から会話を持続したときの肺気量, 食道内圧(=声門下圧), 吸気筋(横隔膜, 外肋間筋)・呼気筋(内肋間筋, 外腹斜筋, 腹直筋, 広背筋)の筋活動を示す。声門を閉じて発声しながら呼出すと声門下圧は上昇する。この圧に抗じて呼気筋が活動する。腹筋群は肺気量によって動員される筋が異なる。矢印は機能的残気量位を指す。

- 2) 近藤哲理:呼吸補助筋. 呼吸と循環, 41:719-724, 1993.
- 3) Abe T, Kusuhara N, Yoshimura N, et al: Differential respiratory activity of four abdominal muscles in humans. J Appl Physiol, 80:1379-1389, 1996.
- 4) Roussos C: Thorax. Marcel Dekker, New York, p413-444, 1995.
- 5) 広瀬 肇, 白坂康俊, 柴田貞雄:発話機構—音声信号産生時の発声・構音器官の調節—. 言語聴覚士のための運動障害性構音障害学. 医歯薬出版, 東京, 44-47頁, 2001.
- 6) Fenn WO, Rahn H: Handbook of Physiology. Washington, DC, p387-409, 1964.
- 7) 解良武士:呼吸筋力の測定. 理学療法科学, 17:265-271, 2002.
- 8) 菊池喜博:呼吸筋力の指標. 呼吸, 3:1282-1288, 1984.
- 9) 西村善博, 前田 均, 田中勝治, 他:加齢の呼吸筋力に及ぼす影響—最大口腔内圧を用いた検討. 日本胸部疾患学会雑誌, 29:795-801, 1991.
- 10) 解良武士, 古泉一久:呼吸筋トレーニングによる持久性能力の

向上の可能性. 理学療法科学, 24:767-775, 2009.

- 11) Rochester DF, Braun NM: Determinants of maximal inspiratory pressure in chronic obstructive pulmonary disease. Am Rev Respir Dis, 132:42-47, 1985.
- 12) Keens TG, Krastins IR, Wannamaker EM, et al: Ventilatory muscle endurance training in normal subjects and patients with cystic fibrosis. The Am Rev Respir Dis, 116:853-860, 1977.
- 13) Park JH, Kang SW, Lee SC, et al: How respiratory muscle strength correlates with cough capacity in patients with respiratory muscle weakness. Yonsei Med J, 51:392-397, 2010.
- 14) Titze IR: Phonation threshold pressure measurement with a semi-occluded vocal tract. J Speech Lang Hear Res, 52:1062-1072, 2009.
- 15) 黒木康二:発声時の声門下圧に関する研究. 耳鼻と臨床, 15:54-74, 1969.
- 16) 阿部晃治:正常者及び喉頭疾患患者における喉頭機能の空気力学的検討. 喉頭, 9:134-144, 1997.
- 17) Hott AD, Plassman BL, Lansing RW, et al: Abdominal muscle activity during speech production. J Appl Physiol, 65:2656-2664, 1988.
- 18) Wyke B: Ventilatory and Phonatory Control Systems. Oxford University Press, London, p39-57, 1974.
- 19) Estenne M, Zocchi L, Ward M, et al: Chest wall motion and expiratory muscle use during phonation in normal humans. J Appl Physiol, 68:2075-2082, 1990.
- 20) Huber JE: Effects of utterance length and vocal loudness on speech breathing in older adults. Respir Physiol Neurobiol, 164:323-330, 2008.
- 21) 長瀬隆英:加齢と肺機能の変化. 呼吸と循環, 50:665-668, 2002.
- 22) Roussos C: The Thorax. Marcel Dekker, New York, 1995, p1315-1333.
- 23) 増淵ゆかり, 阿部 直, 横場正典, 他:肺気量の変化と頸部吸気補助筋群の活動. 日呼吸会誌, 39:244-249, 2001.
- 24) 一場友実, 解良武士, 島本隆司, 他:呼吸抵抗負荷の相違による呼吸筋活動の分析. 理学療法科学, 17:195-198, 2002.
- 25) Draper MH, Ladefoged P, Whitteridge D: Respiratory muscles in speech. J Speech Hear Res, 2:16-27, 1959.
- 26) 鈴木康司, 堀口利之:発声持続時間, 声域等の検査. 耳鼻咽喉科・頭頸部外科, 82:257-263, 2010.
- 27) Hillel AD, Yorkston K, Miller RM: Using phonation time to estimate vital capacity in amyotrophic lateral sclerosis. Arch Phys Med Rehabil, 70:618-620, 1989.
- 28) Robert D, Pouget J, Giovanni A, et al: Quantitative voice analysis in the assessment of bulbar involvement in amyotrophic lateral sclerosis. Acta Otolaryngol, 119:724-731, 1999.
- 29) Tomik J, Tomik B, Wiatr M, et al: The Evaluation of Abnormal Voice Qualities in Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis. Neurodegener Dis, 15:225-232, 2015.
- 30) 豊田千純子, 小川雅文, 大矢 寧, 他:筋疾患における呼吸機能スクリーニングとしての最大発声時間. Brain and nerve, 56:873-876, 2004.