呼吸筋力と増強

Respiratory Muscles and Muscle Strengthening

解良 武士¹⁾

TAKESHI KERA, MA, RPT¹⁾

¹⁾Department of Physical Therapy, Waseda College of Medical Arts and Sciences: 354-3 Ota, Iwatsuki-city, Saitama 339-8555, Japan. TEL +81-48-758-7113 FAX +81-48-758-7120 E-mail: okerasan@mtf.biglobe.ne.jp

Rigakuryoho Kagaku 18(1): 1-6, 2003. Accepted Oct. 10, 2002.

ABSTRACT: Respiratory muscle strength is generally evaluated by the maximal respiratory pressure. The maximal respiratory pressure, which varies with various factors, is affected most largely by a change in lung capacity. Deterioration of respiratory muscles causes low alveolar ventilation, and results in hypoxemia along with hypercapnia. It is therefore important for the management of patients with respiratory diseases to observe deterioration of respiratory muscles. Respiratory muscles are deteriorated by several causes, and this article introduces obstructive ventilation disorders and restraint ventilation disorders as typical examples. The improvement in symptoms caused by deterioration of respiratory muscles is of importance for the patients, and the article also introduces the method of respiratory muscle training.

Key words: characteristics of respiratory muscles, cause of deterioration of respiratory muscles, respiratory muscle training

要旨：呼吸筋力の測定には、最大口腔内圧を用いることが一般的である。最大口腔内圧は様々な因子で変化するが、肺気量の変化が最も大きな影響を及ぼす。この呼吸筋力の低下は肺胞低換気による高炭酸ガス血症を伴う低酸素血症の原因となるため、呼吸器疾患を持つ患者には重要である。呼吸筋力はいくつかの原因で低下するが、閉塞性換気障害と拘束性換気障害を例に取り解説する。呼吸筋力低下がもたらす症状を持つ患者にとってその改善は重要であるが、そのトレーニング方法についても紹介する。

キーワード：呼吸筋力の特徴、呼吸筋力低下の原因、呼吸筋トレーニング

¹⁾ 早稲田医療技術専門学校理学療法学科：埼玉県岩槻市太田字新正寺曲輪354番3（〒339-8555）
TEL 048-758-7113 FAX 048-758-7120 E-mail: okerasan@mtf.biglobe.ne.jp

I. 呼吸筋力とは

呼吸筋力の測定には、呼吸運動により胸腔や口腔で発生する陽圧および陰圧の最大値が筋力の指標として用いられる。この最大発生圧がMRP (Maximal respiratory pressure) で、特に口腔における吸気時の最大発生陰圧を最大吸気口腔内圧 (P_Imax)、呼気時の最大発生陽圧を最大呼気口腔内圧 (P_Emax) と定義される¹⁾。

II. 呼吸不全における呼吸筋力低下の位置づけ

呼吸不全はガス交換に関係する肺実質の機能不全である肺不全と、換気に関係する呼吸筋機能不全に由来するポンプ不全に大別される (図1)。ポンプ不全は更に中枢性の抑制、機械的欠損 (呼吸筋弱を含む) および呼吸筋疲労に分類される²⁾。ポンプ不全は分時換気量を減少させ、高炭酸ガス血症を伴う低酸素血症を引き起こす。

a. 呼吸筋弱

頸髄損傷や神経筋疾患は骨格筋の1つである呼吸筋の弱化による呼吸障害、そなわちポンプ不全を起こす代表的な疾患である。特にP_Imaxの減少がポンプ不全の指標として重要で、たとえば五十嵐らは強直性筋ジストロフィーの経過観察からP_Imaxが30 cmH₂Oを下回ると呼吸管理が必要と報告しており³⁾、SahnとLakshminarayanがウィーニングにはP_Imaxが30 cmH₂O以上必要だと報告している⁴⁾。さらにRochesterとBraunはCOPDを持つ患者のデータから、P_Imaxが55 cmH₂Oを下回るとPaCO₂が急激に上昇することを報告している⁵⁾。いずれもポンプ不全による肺胞低換気に起因する現象である。

b. 呼吸筋疲労

胸郭の拘束や呼吸負荷装置などの外部の機械的抵抗や、胸郭の可動域制限、気道抵抗などの内部抵抗の増大による呼吸筋の仕事量増加、胸郭変形や呼吸筋力弱などによる呼吸筋の発生圧の減少などが起こると、MRPと負荷圧との差が十分ではなくなる。これらにより呼吸筋は容易に筋疲労が発生する。さらにCOPDなどの急性増悪などでは、呼吸筋疲労によりポンプ不全が起こる。

III. 呼吸筋力の特徴

最大口腔内圧は肺気量¹⁾、性⁶⁻¹⁰⁾、年齢⁶⁻¹⁰⁾、体格^{7,9,10)}に影響を受けることが知られている。特に肺気量の影響はもっとも大きく、呼吸筋力測定に十分考慮すべきである。

図1 呼吸不全の分類

Roussos C, Macklem PT (1982)²⁾ による。

たとえば全肺気量位から肺内の空気のある肺気量位まで呼出させ、それぞれの最大吸気あるいは呼気口腔内圧を静的に測定し、この操作を繰り返して全肺気量の範囲で口腔内圧と肺気量との関係を求める。全肺気量位から肺気量を減少させていくと、図2のようにP_Emaxは減少していき、逆にP_Imaxは増加していく。P_Emaxは全肺気量位 (TLC)、P_Imaxは残気量位 (RV) で最大値をとる。これが“最大努力時における口腔内圧と肺の圧量関係”と呼ばれるものである¹¹⁾。

次に性、年齢、体格が挙げられる。一部の研究者は最大口腔内圧と体格とを結びつけている^{7,9,10)}、多くの研究者は性別と年齢のみをその予測式の変数としている⁶⁻¹⁰⁾。MRPは他の体力的パラメーターと同様に性差 (男性 > 女性) があり、加齢によって減少していく。但し50歳までの加齢によるMRPの減少はそれほど小さくなく、55歳までにMRPが減少していくという報告もある⁶⁾。

IV. 呼吸筋力低下の原因

a. 慢性閉塞性肺疾患

慢性閉塞性肺疾患の代表例である肺気腫は、気腫性病变による肺の酸素化機能低下のみならず呼吸筋力低下も問題となる。肺気腫では気腫性病变により、肺実質の支持組織が減少するため、肺のコンプライアンスは高くなり肺が過膨張となる。これに伴い機能的残気量 (FRC) が増加し、横隔膜が平低化する¹²⁾。これによりZone of appositionが短縮するため、横隔膜の長さ張力関係が悪化する¹³⁾。これらの理由により、肺気腫では特にP_Imaxの減

図2 肺気量と呼吸筋力の関係 (Volume-pressure diagram)
Agostoni E, Mead J (1964)¹¹⁾による。

少が著明となる¹⁴⁾。しかし病態の進展に伴い、呼気時の気道閉塞による内部負荷の増大により呼気筋疲労から呼気筋弱化に至り、PEmaxも減少する。

b. 拘束性肺疾患

頸髄損傷の場合、肋間筋や腹筋群の麻痺のためPEmaxが減少する。しかし横隔膜が麻痺から逃れたにもかかわらず、PImaxも減少する¹⁵⁾。胸郭は単なる剛体ではなく、肋間筋が横隔膜と協調して胸郭の拡張と縮小を行うが、麻痺により肋間筋や胸郭を固定する筋群の筋力低下が起こると、たとえ横隔膜が収縮しても胸腔内圧の陰圧に胸郭が抵抗できずに縮小または変形する。つまり横隔膜によって腹部は突出するが、上部胸郭は縮小する奇異呼吸様の運動様式となる¹⁶⁾。このため横隔膜に麻痺が無くてもPImaxは減少する。さらに呼気筋群の麻痺によりRVまで呼息できないため、横隔膜の長さ張力関係を改善することができないこともPImaxの減少の原因に挙げられる。

肺線維症などの拘束性換気障害では、胸郭と肺の弾性低下のため筋力が十分発揮できず筋力低下を示す。特にPImaxの減少が明らかである。肺線維症では肺コンプライアンスの低下に伴い¹²⁾、呼吸器内部抵抗（負荷）が増大する。この負荷は発生圧を減少させるだけでなく、呼吸筋疲労を引き起こし、さらに長期間続く筋疲労は筋力弱화를引き起こす。

V. 呼吸筋力低下の評価

a. 最大随意努力による呼吸筋力の測定

MRPの測定にはいくつか方法がある（図3）。侵襲を伴う方法として最大経横隔膜圧（Pdimax）の測定があるが、侵襲を伴うため、臨床的には特に理学療法分野では随意努力下での口腔内圧測定値を用いる。最大口腔内圧の値には、直径3 cm程度の一方が閉じられた管に、圧トランスデューサーまたはアネロイド型圧力計⁶⁾を接続し、吸気時および呼気時の圧を測定したものを用いる。その際の留意点としては、かならず直径1 - 2 mm程度（または14 - 20 gaugeの注射針）の小孔^{6,7,17,18)}をあけておくことが望ましい。これは声門を閉じて頬筋による圧が発生しないためのものである（ストローを吸うときのような状態を作させない）。ただしこの穴の大きさには厳密な決まりはなく、そのサイズによって測定値が変化するため、比較に際しては同じものを使用することが必要である¹⁹⁾。PImaxがRV、PEmaxがTLCでもっとも高値をとるため、これらの肺気量での測定が臨床的に用いられる。FRCでの測定は、肺の弾性収縮圧と胸郭の拡張圧が釣り合う点であり肺と胸郭の弾性に影響されにくい。そのためこの肺気量での測定が用いられることも多いが、真の最大値とはならない。

図3 呼吸筋力の測定方法

b. 非随意的操作による呼吸筋力測定

被検者の随意的な努力に依存しない方法として、経皮的に横隔神経へ電気刺激や磁気刺激を行う方法がある(図3)^{20,21)}。しかし電気刺激の場合はかなりの苦痛を伴うし、電気刺激および磁気刺激法とも随意努力より測定圧は低値となる。圧の測定部位は随意努力と同じである。

c. 呼吸筋疲労

Time-Tension Index (TTdi)²²⁾は呼吸筋疲労の指標として有名であるが、経横隔膜圧を用いるため侵襲的で理学療法分野では測定ができない。このTTdiに代わるものとしてはRamonatxoら²³⁾の口腔内圧を利用する方法がある。吸気運動中に突然マウスピースを閉塞し、その閉塞から0.1秒後の発生圧($P_{0.1}$ または P_{100})を測定する。この $P_{0.1}$ から適正化された平均吸気口腔内圧($PI = 5P_{0.1} \times TI$)を最大吸気口腔内圧で除した値(PI/P_{Imax})が P_{di}/P_{dimax} と良い相関を示すと云われ、COPDの呼吸筋疲労の評価に応用可能である^{24,25)}。

VI. 呼吸筋トレーニング (VMT; Ventilatory muscle training)

呼吸筋力の低下や持久力の低下による症状の改善に、呼吸筋トレーニングが行なわれる。呼吸筋力が低下すると、患者の呼吸困難感や運動制限が引き起こされることがあり、呼吸筋力の改善がこれらの軽減に寄与するであ

ろうという予測が呼吸筋トレーニングの根拠である²⁶⁾。呼吸筋トレーニングの効果についての検討としてSmithら²⁷⁾のメタアナリシスがある。Smithらによれば呼吸筋トレーニングによる患者への治療効果があるという根拠はそれほど大きくなく、AACVPR²⁶⁾の勧告では根拠の強さB段階であり、決して十分な根拠があるとは云えない。しかし少なくとも呼吸筋力の低下による症状の改善の助けにはなる。

VII. トレーニング方法

呼吸筋トレーニングは主に慢性呼吸不全に対して行われる。当然急性期での呼吸筋トレーニングもあるが、ここでは特に慢性呼吸不全に対する呼吸筋トレーニングに限って論じる。

呼吸筋力トレーニングを行うための方法としては、換気促進を促す方法(強制呼吸訓練法; Incentive spirometry²⁸⁾, IDSEP; Increased Dead Space & Expiratory Pressure, MSVV; Maximal Sustained Voluntary Ventilation²⁹⁾など)と機械的負荷によるもの(Resistance load, Threshold load)³⁰⁾がある(表1)。Incentive spirometryやIDSEPなどは胸部および上腹部外科の術前・術後の呼吸リハビリテーションとして用いられることが多い³¹⁾。但しこれらは換気量または肺容量を増大させることが主要な目的であるため、呼吸筋トレーニングの負荷としてはあまり大きくない。MSVVは高炭酸ガス吸気下で15 - 25分間、過換気を行わせる方法²⁹⁾である。患者自身の内部抵抗を利用するため、利用する負荷が実際の患者へ常にかかる負荷と同質である点では優れているが、装置が大がかりなうえ高価で臨床向きではない。機械的負荷は器具による負荷圧を利用し、呼吸筋力を増大させる方法としてよく用いられる。穴に流れる空気の流速によって発生圧が変化する負荷がResistance loadである。Threshold loadはバネや重りで押さえられたバルブが発生圧によって開く仕組みになっており、設定した圧を越えると空気が流れる。Threshold loadは流量に関係なく圧設定が可能であるため³²⁾、呼吸筋トレーニングに最も適していると思われる。

機械的負荷による呼吸筋トレーニングのプロトコルとして、RVレベルでの P_{Imax} の25 - 35%程度の負荷圧になるように器具を調節し、15分程度呼吸運動を持続する方法が推奨されている²⁶⁾。他に高負荷(P_{Imax} の52%)の呼吸抵抗をインターバル形式で行う方法³³⁾もあるが、ほとんど用いられていない。これらの機械的負荷を用いる呼吸筋力トレーニングは、使用器具が安価で、自主トレー

表1-a 呼吸筋トレーニングの方法と器具（換気を促す方法）

換気促進を促す方法	対応製品	特徴
強制呼吸訓練法 (Incentive spirometry)	Spirometer Volumetric 5000 Triflow	外科の術前・術後に多く用いられている。 呼吸筋トレーニングの負荷としてはあまり大きくない。
IDSEP (Increased dead space & expiratory pressure)	スーフル	
MSVV (Maximal sustained voluntary ventilation)	なし	高 CO ₂ 吸気下で 15 - 25 分間、過換気を行う。 大がかりなうえ高価で、臨床向きでない。

表1-b 呼吸筋トレーニングの方法と器具（機械的負荷法）

機械的負荷の方法	対応製品	特徴
Elastance load	なし	風船を膨らませるように量が増え、圧が上昇する。 臨床では用いない。
Resistance load	P-FLEX	器具の穴に流れる空気の流速によって発生圧が変化する。 負荷設定をしても、呼吸パターンが変わると負荷が変化する。
Threshold load	Threshold	設定した圧を越えるとバルブが開き空気が流れる。 負荷設定が行いやすい。

ニングも可能である。しかしながら呼吸筋力トレーニングのみで患者の呼吸困難感やQOLを改善することは困難であるため、複数のプログラムと組み合わせ（包括的アプローチ）行うことが望ましい。

参考文献

- 1) Cook CD, Mead J, Orzalesi MM: Static volume-pressure characteristics of the respiratory system during maximal efforts. J Appl Physiol, 1964, **19**: 1016-1022.
- 2) Roussos C, Macklem PT: The respiratory muscles. N Engl J Med, 1982, **307**(13): 786-797.
- 3) 五十嵐勝朗, 宇野光人, 工藤正美・他: 筋強直性ジストロフィーにおける肺活量と呼吸筋力の推移. 平成9年度厚生省精神・神経疾患研究委託費による研究報告集, 1997, p281.
- 4) Sahn SA, Lakshminarayan S: Bedside criteria for discontinuation of mechanical ventilation. Chest, 1973, **63**: 1002-1005.
- 5) Rochester DF, Braun MTN: Determinants of maximal inspiratory pressure in chronic obstructive pulmonary disease. Am Rev Respir Dis, 1985, **132**: 42-47.
- 6) Black LF, Hyatt RE: Maximal respiratory pressures: Normal values and relationship to age and sex. Am Rev Res Dis, 1968, **99**: 696-702.
- 7) Leech JA, Ghezzi H, Stevens D, et al.: Respiratory pressures and function in young adults. Am Rev Respir Dis, 1983, **128**: 17-23.
- 8) Enright PL, Kronmal RA, Manolio TA, et al.: Respiratory muscle strength in the elderly. Cardiovascular Health Study Research Group. Am J Respir Crit Care Med, 1994, **149**: 430-438.
- 9) 山下弘二, 高橋敏彦: 呼吸筋力正常値とその予測式. 東北理学療法学, 1989, **1**: 52-58.
- 10) Wilson SH, Cooke NT, Edwards RHT, et al.: Predicted normal values for maximal respiratory pressures in Caucasian adults and children. Thorax, 1984, **39**: 535-538.
- 11) Agostoni E, Mead J: Statics of the respiratory system. In: Handbook of Physiology, Vol. 1, American Physiological Soc, Washington D.C., 1964, pp387-409.
- 12) 西田富昭, 石橋正義, 吉田 稔: 肺気腫症の呼吸機能評価. 呼と循, 1998, **46**: 173-178.
- 13) Rochester DF, Arora NS, Braun NM, et al.: The respiratory muscles in chronic obstructive pulmonary disease (COPD). Bull Europ Physiopath Resp, 1979, **15**: 951-975.
- 14) Byrd RB, Hyatt RE: Maximal respiratory pressure in chronic obstructive lung disease. Am Rev Res Dis, 1968, **98**: 848-856.
- 15) Gounden P: Static respiratory pressures in patients with post-traumatic tetraplegia. Spinal Cord, 1997, **35**(1): 43-47.
- 16) Estenne M, De Troyer A: Relationship between respiratory muscle electromyogram and rib cage motion in tetraplegia. Am Rev Respir Dis, 1985, **132**(1): 53-59.
- 17) Wen AS, Woo MS, Keens TG: How many maneuvers are required to measure maximal inspiratory pressure accurately? Chest, 1997, **111**: 802-807.
- 18) Hamnegard CH, Wragg S, Kyroussis D, et al.: Portable measurement of maximum mouth pressures. Eur Respir J, 1994, **7**: 398-

- 401.
- 19) Mayos M, Giner J, Casan P, et al.: Measurement of maximal static respiratory pressures at the mouth with different air leaks. *Chest*, 1991, **100**(2): 364-366.
- 20) Polkey MI, Green M, Moxham J: Measurement of respiratory muscle strength. *Thorax*, 1995, **50**: 1131-1135.
- 21) Clanton TL, Diaz PT: Clinical assessment of the respiratory muscles. *Physical Therapy*, 1995, **75**: 983-995.
- 22) Bellemare F, Grassino A: Effect of pressure and timing of contraction on human diaphragm fatigue. *J Appl Physiol*, 1982, **53**(5): 1190-1195.
- 23) Ramonatxo M, Boulard P, Prefaut C: Validation of a noninvasive tension-time index of inspiratory muscles. *J Appl Physiol*, 1995, **78**(2): 646-653.
- 24) Ramirez-Sarmiento A, Orozco-Levi M, Barreiro E, et al.: Expiratory muscle endurance in chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax*, 2002, **57**(2): 132-136.
- 25) Hayot M, Ramonatxo M, Matecki S, et al.: Noninvasive assessment of inspiratory muscle function during exercise. *Am J Respir Crit Care Med*, 2000, **162**(6): 2201-2207.
- 26) 日本呼吸管理学会監修：呼吸リハビリテーション・プログラムのガイドライン第2版．ライフサイエンス，東京，1999，pp109-113.
- 27) Smith K, Cook D, Guyatt GH, et al.: Respiratory muscle training in chronic airflow limitation: A meta-analysis. *Am Rev Respir Dis*, 1992, **145**(3): 533-539.
- 28) Kim MJ, Larson JL, Sachs P, et al.: Respiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis*, 1984, **129** (Suppl): 129.
- 29) Leith DE, Bradley M: Ventilatory muscle strength and endurance training. *J Appl Physiol*, 1976, **41**(4): 508-516.
- 30) Daubenspeck JA: Mechanical aspects of loaded breathing. In: *The Thorax (Lung Biology in Health and Disease Vol. 85)*, Roussos C, Marcel Dekker eds., New York, 1995, pp953-985.
- 31) 丸川從四郎編：ICUのための新しい肺理学療法．メディカ出版，大阪，1999，pp130-138.
- 32) Eastwood PR, Hillman DR, Finucane KE: Ventilatory responses to inspiratory threshold loading and role of muscle fatigue in task failure. *J Appl Physiol*, 1994, **76**(1): 185-195.
- 33) Preusser BA, Wittingham ML, Clanton TL: High- vs low-intensity inspiratory muscle interval training in patients with COPD. *Chest*, 1994, **106**(1): 110-117.