

呼吸リハビリテーションにおける呼気筋トレーニングの効果

佐々木 誠

要 旨

呼吸リハビリテーションの一要素である呼吸筋トレーニングのうち、吸気筋トレーニングについてはガイドラインやステートメントで有効性が示唆されている。しかし、呼気筋トレーニングについては十分なエビデンスが不足しており、さらなる検討が必要である。本稿では、呼吸リハビリテーションにおける呼気筋トレーニングに焦点を当て、呼気筋力、呼吸機能や換気機能、運動を中心とする負荷中の応答に対する効果について概説する。

はじめに

呼吸筋トレーニング (ventilatory muscle training; 以下 VMT) は呼吸リハビリテーションの一要素である^{1, 2)}。吸気筋トレーニング (inspiratory muscle training; 以下 IMT) は、Smith ら³⁾の VMT についてのメタ分析を参考にした the American College of Chest Physicians (ACCP) と the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation (AACVPR) による1997年の科学的根拠に基づくガイドライン¹⁾において、VMT の実施により呼吸困難感または運動耐容能のどちらかあるいは双方に改善が認められているので、慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary disease; 以下 COPD) 患者の中でも、適切な治療を行っているにもかかわらず症状が残っている者などには、実施を検討してもよいとされている。その後、Lotters らのメタ分析⁴⁾では、IMT は、最大吸気圧 (maximal inspiratory pressure; 以下 PImax) と持久力を有意に高め、安静時ならびに運動時の呼吸困難感を有意に改善し、運動耐容能を高める傾向があることが示されている。対照的に、Salman らのメタ分析⁵⁾では、IMT は、歩行距離や呼吸困難感を改善しないことが示されている。その間ならびにその後、多くの研究によって

IMT の有効性が報告され⁶⁻¹¹⁾、American Thoracic Society and European Respiratory Society²⁾は、「IMT は、主に疑わしいか証明された呼吸筋力低下を伴う患者に対して、呼吸リハビリテーションの付加的な治療と考えられる」とのステートメントを発表している。また、Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD)¹²⁾では、科学的根拠のレベルは低いものの呼吸筋トレーニングは有益であるとしている。先の ACCP と AACVPR の2007年のガイドライン¹³⁾においても、適切な治療を行なっているにもかかわらず呼吸筋力が低下し息切れのある患者に対して実施を検討する内容に変更はない。

一方、呼気筋トレーニング (expiratory muscle training; 以下 EMT) は、COPD 患者^{14, 15)}のみならず、健常者^{10, 16-26)}、多発性硬化症患者²⁷⁻²⁹⁾、重症筋無力症患者³⁰⁾、神経筋疾患患者^{31, 32)}、脊髄損傷後の四肢麻痺患者^{33, 34)}、Parkinson 病患者^{35, 36)}において、最大呼気圧 (maximal expiratory pressure; 以下 PEmax) が増加し、呼吸機能や換気機能、運動能力が向上し、吸気負荷中や日常生活、運動負荷中の呼吸困難が低下することなどが示されている。しかし反対に、EMT によって PEmax の増加を認めなかったとする報告³⁷⁾や PEmax の増加以外の効果を認めなかったとする報告^{38, 39)}、PEmax の増加以外の効果に否定

的な、あるいは、十分なエビデンスが不足しているとするレビュー⁴⁰⁻⁴³⁾がある。

本稿では、呼吸リハビリテーションにおける EMT に焦点を当て、呼吸筋力、呼吸機能や換気機能、運動を中心とする負荷中の応答に対する効果について概説する。

呼吸筋力に対する EMT の効果

呼吸筋トレーニングが呼吸筋力を特異的に増加させることを示した嚆矢は Leith と Bradley である^{25, 44)}。彼ら⁴⁵⁾は、他の骨格筋と同様に IMT ならびに EMT が標的とする筋を特異的に増強させるかの疑問に答えるために、健常者を対象に呼吸筋の筋力トレーニングを 1 回 30 分、週 5 回、5 週間行なわせた。その結果、筋力トレーニングは P_{Imax}、P_{E_{max}} とともに増大させることが証明された。健常者を対象に IMT と EMT を組み合わせて実施した場合に、P_{E_{max}} が変化しなかったとの報告²⁸⁾もあるが、最近の多くの報告^{22, 23, 25)}は増加したとしている。EMT のみの効果も同様に、P_{E_{max}} が変化しなかったとの報告^{29, 46, 47)}もあるが、多くの報告^{10, 16-20, 26)}で増加を認めている。COPD 患者^{14, 15, 38, 39)}、重症筋無力症患者³⁰⁾、四肢麻痺患者^{33, 34)}、Parkinson 病患者^{35, 36)}においては P_{E_{max}} が有意に増加したと報告されている。多発性硬化症患者では、P_{E_{max}} が増加しなかったとする報告³⁷⁾があるものの、多くの報告²⁷⁻²⁹⁾で増加を認めている。神経筋疾患患者では、P_{E_{max}} が増加しなかったとする報告³¹⁾と増加したとする報告³²⁾の両者がある。概して、健常者や呼吸筋の廃用性変化に対する EMT による呼吸筋力増強効果に加えて、進行性に筋力が低下する疾患においても P_{E_{max}} の増加の効果と認められる。

呼吸機能や換気機能に対する EMT の効果

健常者において EMT によって、P_{E_{max}} が増加するとの報告^{10, 16-20, 22-26)}が多いにもかかわらず、呼吸機能に関しては Leith と Bradley⁴⁵⁾が全肺気量のわずかな増加、Wells ら²²⁾が努力性肺活量、1 秒量の増加を認めたとする以外は、多くの報告^{10, 18, 19, 21, 23-26, 31, 44, 47)}で変化しなかったとしている。換気機能の 1 つのパラメータであり、運動能力の予測に反映される最大換気量 (自発的に可及的過剰換気を一定時間行った場合の最大量: maximal voluntary ventilation; 以下 MVV) については、EMT 後増大するとの報告^{22, 31)}と変化しないとの報告^{23, 24, 46)}がある。COPD 患

者^{14, 15, 38, 39)}においては呼吸機能の向上を認めないが、多発性硬化症患者²⁹⁾では最大呼気流速、重症筋無力症患者³⁰⁾では努力性肺活量と 1 秒量、神経筋疾患患者³¹⁾では肺活量、四肢麻痺患者^{33, 34)}では肺活量が改善したと報告されている。MVV は、多発性硬化症患者²⁷⁾と神経筋疾患患者³¹⁾で向上を認めている。

呼吸器疾患患者のみならず、中枢神経の損傷や変性による疾患患者、神経筋疾患患者において、呼吸器疾患の急性増悪や合併は罹患率増加や死亡率増大の大きな原因である。気道清浄化の障害は、気道内分泌物貯留により呼吸器感染症のリスクを増大させる⁴⁸⁻⁵²⁾。咳嗽^{50, 53)}や努力呼気テクニック (ハフティングとも言う)⁵⁴⁾は気道を守るための鍵となるメカニズムである。粘液清浄化の効果は、咳嗽時最大流速 (peak cough flow; 以下 PCF) や最大呼気流速に大きく依存する。呼吸筋力の低下は PCF や最大流速値 (peak flow rate) の減少をもたらす。COPD 患者において、呼吸筋力の低下は吸気筋ばかりではなく呼気筋にも生じる¹⁴⁾。神経筋疾患患者では、疾患の進行したステージで、肺活量の減少とともに呼出に使用される筋の減弱が招来される^{55, 56)}。多発性硬化症患者では、P_{Imax} よりも P_{E_{max}} の方が先に筋力低下が生じる³⁷⁾。これらのような疾患患者では、呼吸筋力の低下を防ぐことが重要である。しかし、健常者、COPD 患者、多発性硬化症患者、重症筋無力症患者において、EMT によって、呼気流速に関連する呼吸機能が向上したとする報告^{22, 30)}がある一方で、変化しなかったとする報告^{10, 14, 15, 18-21, 26, 29, 38, 39)}が大多数である。また、EMT によって咳嗽能力の増大が期待される^{21, 28, 36, 57)}との言及があるものの、多発性硬化症患者において咳嗽効率が有意に増加したとする報告³⁷⁾と最大の随意的な咳嗽が変化しなかったとする報告²⁷⁾の両者があり、一致した見解は得られていない。最近のレビュー^{42, 43)}では、咳嗽に対する EMT の効果の検討は、極めて少なく現在検討中であるとされている。

運動を中心とする負荷中の応答に対する EMT の効果

健常者において EMT 後、吸気負荷中の呼吸困難が変化しない³²⁾、サイクリング中、水泳中、ボート漕ぎ中の能力、酸素摂取量、最大仕事量、呼吸困難が変化しない^{17, 22, 47)}とする報告がある。一方で、サイクリングや水泳の運動時間が延長し^{17, 23, 25)}、同一運動負荷中の酸素摂取量が減少し^{10, 23, 25)}、呼吸困難感が軽減し^{10, 16)}、分時換気量が減じる^{16, 23, 25)}ことが報告されている。COPD 患者において、IMT と組み合わせた

EMT によって呼吸負荷中の呼吸困難感が軽減する³⁹⁾こと、EMT によって日常の呼吸困難感が軽減する¹⁵⁾こと、6分間歩行距離が延長し^{14, 39)}運動耐容量が改善する¹⁵⁾ことが示されている。また、重症筋無力症患者で呼吸困難感が改善し³⁰⁾、神経筋疾患患者で吸気負荷中の呼吸困難感が軽減する³²⁾とされている。

健常者の最大運動、亜最大運動の制限要因は、運動課題にかかる骨格筋の血流制限に伴う酸素運搬の制約によるか、これと関連する呼吸筋の酸素不足に伴う呼吸筋疲労による可能性がある^{17, 22, 23, 25, 47)}。健常者の運動による呼吸筋疲労は、吸気筋に限らず呼気筋にも生じ、呼吸困難感に影響することが示唆されている^{58, 59)}。健常者において EMT は、有酸素能力を高めるのではなく呼吸筋を適応させ^{23, 25)}、呼気筋の酸素消費を減少させる²⁵⁾こと、呼吸器に対して直接的に作用し呼吸筋疲労を軽減させることで運動能力を高める¹⁷⁾と考えられる。COPD 患者では安静時、運動時ともに呼気筋の活動を認める^{15, 39)}。EMT によって、肺の過膨張にもかかわらず呼気の強調が引き続いての横隔膜の収縮のための張力 長さを至適に近づける³⁹⁾、呼気筋活動のための酸素消費を減少させる¹⁵⁾、呼吸困難感の脱感作を生じさせる¹⁵⁾などのメカニズムで、呼吸困難感が軽減し運動能力が高まる可能性がある。重症筋無力症患者では、呼吸筋機能の障害に伴って呼吸にかかる仕事量が増大して呼吸困難感が生じるとすれば、EMT が呼吸筋力を増大させ呼吸困難に有効であったと考えられる³⁰⁾。神経筋疾患患者では、呼吸の自覚症状の減少により呼吸困難感が軽減したと考えられる³²⁾。

最後に

ACCP と AACVPR の1997年のガイドライン¹⁾において、IMT は PImax の30%以上の十分なトレーニング負荷を与えると効果があることが記述されており、2007年の同委員会委員会のガイドライン¹³⁾で修正は加えられていない。一方、EMT のトレーニング負荷に関する指針はない。健常者における EMT では、PEmax の30%の負荷で4週間トレーニングすると PEmax が増大したとの報告^{16, 26)}がある。さらにトレーニング期間が短く、あるいはトレーニング負荷が小さい、PEmax の30%の負荷、2週間で効果を認めたとする報告^{10, 18)}、PEmax の20%の負荷、2週間で PEmax の増大を認めたとする報告¹⁹⁾がある。COPD 患者では PEmax の15%から60%に漸増させ3ヶ月^{14, 39)}、PEmax の50%の負荷で5週間¹⁵⁾、多発性硬化症患者では PEmax の40%から80%に漸増させ8週間²⁹⁾、重症筋無力症患者では PEmax の15%から60%

に漸増させ3ヶ月³⁰⁾、神経筋疾患患者では PEmax の30%以上の負荷で6ヶ月³²⁾、Parkinson 病患者では PEmax の75%の負荷で20週間³⁵⁾の EMT で PEmax の増加を認めている。種々の疾患を有する患者で PEmax の増大を期待するためには、健常者よりもトレーニング負荷が強くトレーニング期間が長いことが必要と考えられる。

EMT による呼吸筋力の増加にもかかわらず、呼吸機能や換気機能の向上については未だ議論の余地がある。特に、疾患患者において気道清浄化に有効である咳嗽については、論理的に EMT によってその能力の改善が期待されるものの、一致した見解は得られていない。また、運動などの負荷中の応答に対する EMT の効果は、呼吸困難感の軽減、運動能力・運動耐容量の向上が示されているが、これらの効果を認めなかったとする報告も少なくない。

本稿に記載した内容以外にも、EMT が発話や嚥下の機能を改善することが期待されており^{44, 60)}、検討課題が残されている。今後、さらに研究成果の蓄積がなされることが重要であると考えられる。

文 献

- 1) ACCP/AACVPR pulmonary rehabilitation guidelines panel: Pulmonary rehabilitation: joint ACCP/AACVPR evidence-based guidelines. *Chest* 112: 1363-1396, 1997
- 2) ATS/ERS pulmonary rehabilitation writing committee: American thoracic society/European respiratory society statement on pulmonary rehabilitation. *Am J Respir Crit Care Med* 173: 1390-1413, 2006
- 3) Smith K, Cook D, et al.: Respiratory muscle training in chronic airflow limitation: a meta-analysis. *Am Rev Respir Dis* 145: 533-539, 1992
- 4) Lotters F, van Tol B, et al.: Effects of controlled inspiratory muscle training in patients with COPD: a meta-analysis. *Eur Respir J* 20: 570-576, 2002
- 5) Salman GF, Mosier MC, et al.: Rehabilitation for patients with chronic obstructive pulmonary disease: meta-analysis of randomized controlled trials. *J Gen Intern Med* 18: 213-221, 2003
- 6) Ramirez-Sarmiento A, Orozoco-Levi M, et al.: Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease: structural adaptation and physiologic outcomes. *Am J*

- Respir Crit Care Med 166 : 1491-1497, 2002
- 7) Minoguchi H, Shibuya M, et al.: Cross-over comparison between respiratory muscle stretch gymnastics and inspiratory muscle training. Intern Med 41 : 805-812, 2002
 - 8) Weiner P, Magadle R, et al.: Maintenance of inspiratory muscle training in COPD patients: one year follow-up. Eur Respir J 23 : 61-65, 2004
 - 9) Beckerman M, Magadle R, et al.: The effects of 1 year of specific inspiratory muscle training in patients with COPD. Chest 128 : 3177-3182, 2005
 - 10) Sasaki M, Kurosawa H, et al.: Effects of inspiratory and expiratory muscle training in normal subjects. J Jpn Phys Ther Assoc 8 : 29-37, 2005
 - 11) Hill K, Jenkins SC, et al.: High-intensity inspiratory muscle training in COPD. Eur Respir J 27 : 1119-1128, 2006
 - 12) GOLD update 2006: Global strategy for diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease. 2006, pp56-61, (online), available from <<http://www.goldcopd.com>> (accessed 2008-3-12)
 - 13) ACCP/AACVPR pulmonary rehabilitation guidelines panel: Pulmonary rehabilitation: joint ACCP/AACVPR evidence-based clinical practice guidelines. Chest 131 : 4S-42S, 2007
 - 14) Weiner P, Magadle R, et al.: Specific expiratory muscle training in COPD. Chest 124 : 468-473, 2003
 - 15) Mota S, Guell R, et al.: Clinical outcomes of expiratory muscle training in severe COPD patients. Respir Med 101 : 516-524, 2007
 - 16) Suzuki S, Sato M, et al.: Expiratory muscle training and sensation of respiratory effort during exercise in normal subjects. Thorax 50 : 366-370, 1995
 - 17) Markov G, Spengler CM, et al.: Respiratory muscle training increases cycling endurance without affecting cardiovascular responses to exercise. Eur J Appl Physiol 85 : 233-239, 2001
 - 18) 秋吉史博, 高橋仁美・他: 呼吸筋強化が呼吸筋力に及ぼす影響. 理学療法学 28 : 47-52, 2001
 - 19) 佐藤麻知子, 佐竹将宏・他: 呼吸筋トレーニングにおける効果的な負荷圧の検討. 理学療法学 29 : 37-42, 2002
 - 20) Sapienza CM, Davenport PW, et al.: Expiratory muscle training increases pressure support in high school band students. J Voice 16 : 495-501, 2002
 - 21) Baker S, Davenport P, et al.: Examination of strength training and detraining effects in expiratory muscles. J Speech Lang Hear Res 48 : 1325-1333, 2005
 - 22) Wells GD, Pyley M, et al.: Effects of concurrent inspiratory and expiratory muscle training on respiratory and exercise performance in competitive swimmers. Eur J Appl Physiol 94 : 527-540, 2005
 - 23) Wylegala JA, Pendergast DR, et al.: Respiratory muscle training improves swimming endurance in divers. Eur J Appl Physiol 99 : 393-404, 2007
 - 24) Yang P, Frier BC, et al.: Respiratory muscle training and the performance of a simulated Anti-G straining maneuver. Aviat Space Environ Med 78 : 1035-1041, 2007
 - 25) Lindholm P, Wylegala J, et al.: Resistive respiratory muscle training improves and maintains endurance swimming performance in divers. UHM 34 : 169-180, 2007
 - 26) Sasaki M: The effect of expiratory muscle training on pulmonary function in normal subjects. J Phys Ther Sci 19 : 197-203, 2007
 - 27) Olgiati R, Girr A, et al.: Respiratory muscle training in multiple sclerosis: a pilot study. Schweiz Arch Neurol Psychiatr 140 : 46-50, 1989
 - 28) Smeltzer SC, Laviertes MH, et al.: Expiratory training in multiple sclerosis. Arch Phys Med Rehabil 77 : 909-912, 1996
 - 29) Chiara T, Martin AD, et al.: Expiratory muscle strength training in persons with multiple sclerosis having mild to moderate disability: effect on maximal expiratory pressure, pulmonary function, and maximal voluntary cough. Arch Phys Med Rehabil 87 : 468-473, 2006
 - 30) Weiner P, Gross D, et al.: Respiratory muscle training in patients with moderate to severe myasthenia gravis. Can J Neurol Sci 25 : 236-241, 1998
 - 31) Estrup C, Lyager S, et al.: Effect of respiratory muscle training in patients with neuromuscular diseases and in normals. Respiration 50 : 36-43, 1986
 - 32) Gozal D, Thiriet P: Respiratory muscle training

- in neuromuscular disease: long-term effects on strength and load perceptipon. *Med Sci Sports Exerc* 31 : 1522-1527, 1999
- 33) Huldtgren AC, Fugel-Meyer AR, et al.: Ventilatory dysfunction and respiratory rehabilitation in post traumatic quadriplegia. *Eur J Respir Dis* 61 : 347-356, 1980
- 34) Gounden P: Progressive resistive loading on accessory expiratory muscle in tetraplegia. *South African J Physiotherapy* 46 : 4-15, 1990
- 35) Saleem AF, Sapienza CM, et al.: Respiratory muscle strength training: treatment and response duration in a patient with early idiopathic Parkinson's disease. *NeuroRehabilitation* 20 : 323-333, 2005
- 36) Silverman EP, Sapienza CM, et al.: Tutorial on maximum inspiratory and expiratory mouth pressures in individuals with idiopathic Parkinson disease (IPD) and the preliminary results of an expiratory muscle strength training program. *NeuroRehabilitation* 21 : 71-79, 2006
- 37) Gosselink R, Kovacs L, et al.: Respiratory muscle weakness and respiratory muscle training in severely disabled multiple sclerosis patients. *Arch Phys Med Rehabil* 81 : 747-751, 2000
- 38) Ambrosino N, Paggiaro PL, et al.: Failure of resistive breathing training to improve pulmonary function tests in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Respiration* 45 : 455-459, 1984
- 39) Weiner P, Magadle R, et al.: Comparison of specific expiratory, inspiratory, and combined muscle training programs in COPD. *Chest* 124 : 1357-1364, 2003
- 40) Gosselink R, Kovacs L, et al.: Respiratory muscle involvement in multiple sclerosis. *Eur Respir J* 13 : 449-454, 1999
- 41) McConnell AK, Romer LM: Dyspnoea in health and obstructive pulmonary disease. *Sports Med* 34 : 117-132, 2004
- 42) Weiner P, McConnell A: Respiratory muscle training in chronic obstructive pulmonary disease: inspiratory, expiratory, or both? *Curr Opin Pulm Med* 11 : 140-144, 2005
- 43) Kojima H, Yamada T, et al.: Effectiveness of cough exercise and expiratory muscle training: a meta-analysis. *J Phys Ther Sci* 18 : 5-10, 2006
- 44) Kim J, Sapienza CM: Implications of expiratory muscle strength training for rehabilitation of the elderly: tutorial. *J Rehabil Res Dev* 42 : 211-224, 2005
- 45) Leith DE, Bradley M: Ventilatory muscle strength and endurance training. *J Appl Physiol* 41 : 508-516, 1976
- 46) O'Kroy JA, Coast JR: Effects of flow and resistive training on respiratory muscle endurance and strength. *Respiration* 60 : 279-283, 1993
- 47) Griffiths LA, McConnell AK: The influence of inspiratory and expiratory muscle training upon rowing performance. *Eur J Appl Physiol* 99 : 457-466, 2007
- 48) Hasani A, Pavia D, et al.: Regional mucus transport following unproductive cough and forced expiration technique in patients with airways obstruction. *Chest* 105 : 1420-1425, 1994
- 49) Hasani A, Pavia D, et al.: Regional lung clearance during cough and forced expiration technique (FET): effects of flow and viscoelasticity. *Thorax* 49 : 557-561, 1994
- 50) Chaudri MB, Lui C, et al.: Relationship between supramaximal flow during cough and mortality in motor neurone disease. *Eur Respir J* 19 : 434-438, 2002
- 51) Man W D-C, Kyroussis D, et al.: Cough gastric pressure and maximum expiratory mouth pressure in humans. *Am J Respir Crit Care Med* 168 : 714-717, 2003
- 52) Trebbia G, Lacombe M, et al.: Cough determinants in patients with neuromuscular disease. *Respir Phys Neurobiol* 146 : 291-300, 2005
- 53) Sancho J, Servera E, et al.: Efficacy of mechanical insufflation-exsufflation in medically stable patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Chest* 125 : 1400-1405, 2004
- 54) McCool FD, Rosen MJ: Nonpharmacologic airway clearance therapies: ACCP evidence-based clinical practice guidelines. *Chest* 129 : 250S-259S, 2006
- 55) Toussaint M, Win HD, et al.: Effect of intrapulmonary percussive ventilation on mucus clearance in Duchenne muscular dystrophy patients: preliminary report. *Respir Care* 48 : 940-947, 2003
- 56) Gauld LM, Boynton A: Relationship between peak cough flow and spirometry in Duchenne

- muscular dystrophy. *Pediatr Pulmonol* 39 : 457-460, 2005
- 57) Sapienza CM, Wheeler K : Respiratory muscle strength training : functional outcomes versus plasticity. *Semin Speech Lang* 27 : 236-244, 2006
- 58) Suzuki S, Suzuki J, et al. : Expiratory muscle fatigue in normal subjects. *J Appl Physiol* 70 : 2632-2639, 1991
- 59) Suzuki S, Suzuki J, et al. : Relationship of respiratory effort sensation to expiratory threshold loading. *Am Rev Respir Dis* 145 : 461-466, 1992
- 60) Wheeler KM, Chiara T, et al. : Surface electromyographic activity of the submental muscles during swallow and expiratory pressure threshold training tasks. *Dysphagia* 22 : 108-116, 2007

Effects of expiratory muscle training in pulmonary rehabilitation

Makoto SASAKI

Course of Physical Therapy, School of Health Sciences, Akita University

The guidelines and statement suggest the effectiveness of inspiratory muscle training in respiratory muscle training, an element of pulmonary rehabilitation. However, there is not sufficient evidence about expiratory muscle training, and further examination is required. This paper focuses on expiratory muscle training in pulmonary rehabilitation, and the effects on expiratory muscle strength, the pulmonary function and respiratory function, and the response under load particularly during exercise outlined.