健常男性における自転車エルゴメーター駆動中の Chest Wall 体積変化について

Chest Wall Volume Changes of Healthy Males during Ergometer Exercise

松下 和弘¹⁾ 野添 匡史¹⁾ 間瀬 教史²⁾ 高嶋 幸恵²⁾ 高山 雄介¹⁾
橋詰 裕美¹⁾ 和田 智弘¹⁾ 眞淵 敏³⁾ 内山 侑紀⁴⁾ 山本 憲康⁵⁾
福田 能啓⁴⁾ 道免 和久⁶⁾

KAZUHIRO MATSUSHITA¹⁾, MASAFUMI NOZOE¹⁾, KYOSHI MASE²⁾, YUKIE TAKASHIMA²⁾, YUSUKE KOYAMA¹⁾,
YUMI HASHIZUME¹⁾, TOMOHIRO WADA¹⁾, SATOSHI MABUCHI³⁾, YUKI UCHIYAMA⁴⁾, NORIYASU YAMAMOTO⁵⁾,
YOSHIHIRO FUKUDA⁴⁾, KAZUHISA DOMEN⁶⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Hyogo College of Medical Sasayama Medical Center: 5 Kurooka, Sasayama-shi, Hyogo 669-2321, Japan. TEL+81 79-552-7381 E-mail: matsushita@hyo-med.ac.jp

²⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Nursing and Rehabilitation, Konan Women's University

³⁾ Department of Rehabilitation, College Hospital, Hyogo College of Medicine

⁴⁾ Department of General Medicine and Community Health Science, Hyogo College of Medicine

⁵⁾ Department of Functional Regenerative Science, Hyogo College of Medicine

⁶⁾ Department of Rehabilitation Science, Hyogo College of Medicine

Rigakuryoho Kagaku 29(2): 295-299, 2014. Submitted Oct. 2, 2013. Accepted Nov. 11, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] We measured the chest wall volume changes of healthy males during ergometer exercise using a 3D motion analysis system, and investigated their characteristics. [Subjects] The subjects were 6 healthy males. [Methods] Under a ramp load protocol, the subjects performed bicycle ergometer exercise until reaching their symptomatic limits, while their chest wall volume was measured using a 3D motion analysis system. [Results] Compared to at rest, at exercise load intensities above 20%, significant increases in upper and lower chest volumes at inspiratory end, and a significant decrease in abdominal volume at expiratory end were found. [Conclusion] The results suggest that with increasing exercise load intensity, the chest wall volume is changed by raising the ribs further at inspiratory end, and by further reducing the abdominal part at expiratory end to realize a greater tidal volume.

Key words: chest wall volume, bicycle ergometer, 3D motion analysis system

要旨:〔目的〕健常男性における自転車エルゴメーター駆動中の chest wall 体積を、三次元動作解析装置を用いて測定し、その特徴を検討する。〔対象〕健常男性 6 人。〔方法〕ランプ負荷にて自転車エルゴメーターを症候限界域まで駆動させ、その間の chest wall 体積を三次元動作解析装置を用いて測定した。〔結果〕安静時と比べて 20% 時以上の運動負荷強度で、終末吸気の体積変化では上部・下部胸郭体積が有意に増加し、終末呼気の体積変化では腹部体積の有意な減少が認められた。〔結語〕運動負荷強度の増加に伴う chest wall 体積の変化は、終末吸気時には肋骨がより大きく引き上げられ、終末呼気時には腹部がより縮小することで、より大きな一回換気量を得ることが示唆された。
キーワード: chest wall 体積, 自転車エルゴメーター, 三次元動作解析装置

¹⁾ 兵庫医科大学 ささやま医療センター リハビリテーション室: 兵庫県篠山市黒岡 5 番地 (〒669-2321) TEL 079-552-7381

²⁾ 甲南女子大学 看護リハビリテーション学部 理学療法学科

³⁾ 兵庫医科大学病院 リハビリテーション部

⁴⁾ 兵庫医科大学 地域総合医療学

⁵⁾ 兵庫医科大学 機能再生医療学

⁶⁾ 兵庫医科大学 リハビリテーション医学教室

受付日 2013 年 10 月 2 日 受理日 2013 年 11 月 11 日

I. はじめに

呼吸理学療法を行う上で、呼吸様式の異常を評価し、適切な呼吸様式の指導により、習得させることは重要なプログラムの一つである。呼吸様式を評価する場合、理学療法では、呼吸の深度である一回換気量とその換気が胸部・腹部呼吸運動のうち、どちらが優位になされているのかを観察する。また、慢性閉塞性肺疾患（COPD）でみられる動的肺過膨張などの肺気量位の異常をみる側面からは、安静時から運動時にかけて、機能的残気量をはじめとする肺気量位がどのように変化し、その変化に対する胸部・腹部呼吸運動の比率について評価することが重要となる。したがって、呼吸様式の評価は、深度、肺気量位、胸部・腹部などの部位別にみた呼吸運動がより客観的に測定できることが重要である。

呼吸運動の測定方法は、magnetometerにて胸部や腹部の前後径変化を測定する方法¹⁾やコイル線を巻き付けたベルト（respiratory inductive plethysmography）、水銀ストレンゲージで胸部や腹部の周囲径変化を測定する方法^{2,3)}が行われてきた。一方、近年 Aliverti ら⁴⁾が報告した運動中の chest wall 体積変化を三次元動作解析装置を用いて測定する手法は、今までの方法とは異なり、呼吸による chest wall 全体の運動を三次元的に捉えることが可能であり、肺全体としての一回換気量や肺気量位変化に加え、その変化を chest wall の部位別に分けて観察できるため、さまざまな報告⁵⁻⁸⁾で用いられてきた。しかし、測定されるデータ量が非常に多く長時間の経時的な測定が困難なためか、運動負荷としてよく用いられる自転車エルゴメーターを用いた漸増運動負荷試験中の chest wall 体積変化については、ほとんど報告されていない。そこで、本研究では自転車エルゴメーター駆動中の健康男性の chest wall 体積変化を、三次元動作解析装置を用いて測定し、運動中の一回換気量や肺気量位変化の chest wall の部位別に観察し、部位により違いがあるのか、もしあればどのような違いがあるのか、について知見が得られたので報告する。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は健康男性6名で、詳細を表1に示す。全対象者に対して、本研究の目的、方法を説明し、書面での研究参加の同意を得た。本研究は兵庫医科大学研究倫理委員会の承認（1278号）を得ている。呼吸循環器系、脊椎・胸部の運動器系の疾患を有する者は対象から除外した。

2. 方法

運動負荷装置として、自転車エルゴメーター（コリバル 1000SCP）を用い、運動開始前に最大吸気位、最大呼

表1 対象者の身体組成と呼吸機能

	平均 ± 標準偏差
年齢(歳)	27.2 ± 4.0
身長(m)	1.73 ± 0.1
体重(kg)	67.8 ± 9.7
BMI (kg/m ²)	22.6 ± 2.7
肺活量(L)	4.59 ± 0.60
%肺活量(%)	107.8 ± 14.3
1秒量(L)	3.68 ± 0.53
%1秒量(%)	85.4 ± 7.2

気位の測定を行った。運動負荷は安静3分間、ウォームアップを40 Wで3分間行わせた後、毎分30 Wのランプ負荷にて自覚的症候限界域まで行わせた。測定中は NERRCOR 社製パルスオキシメータ N-20P を用いて脈拍数を、ミナト医科学社製 EBP-300 を用いて血圧変化を毎分測定した。

胸郭体積の測定は、三次元動作解析システム（Motion Analysis 社製 Mac 3D System）を用いて、体表面に貼り付けた反射マーカの位置を経時的に測定することで行った。各対象者には Cala ら⁹⁾の方法に準じて、体表面に86個の反射マーカを貼り付けた。反射マーカの位置は計8台の赤外線カメラにて測定した。すべてのデータはサンプリング周波数100 Hzで解析ソフト（Motion analysis 社製 EvaRT5.04）に取り込み、反射マーカの経時的な座標データから、胸郭に貼り付けた反射マーカで形成される内部の体積変化を算出した。chest wall 全体の変化は、安静時、運動時ともに流量計による変化を反映することが先行研究^{10,11)}にて報告されている。また Kenyon ら¹¹⁾の方法に準じて、chest wall を上部胸郭、下部胸郭、腹部に分けた（図1）。

得られた体積変化から安静時、最大運動負荷強度の20%時、40%時、60%時、80%時、および最大運動負荷時の4～5呼吸を任意に抽出し、それらを各運動負荷強度での代表値として用い、以下の分析を行った。

各運動負荷強度における胸郭体積の波形の陰性ピークを終末呼気 chest wall 体積、陽性ピークを終末吸気 chest wall 体積として算出した。また上部胸郭、下部胸郭、腹部についても同様に算出した（終末吸気上部胸郭体積、終末呼気上部胸郭体積、終末吸気下部胸郭体積、終末呼気下部胸郭体積、終末吸気腹部体積、終末呼気腹部体積）。すべての部位の体積は終末吸気、および終末呼気の安静時の体積を0 Lとし、変化量を算出した。

次に、最大吸気位の上部胸郭吸気体積、下部胸郭吸気体積、腹部体積をそれぞれ100%、最大呼気位の体積を0%とし、安静時、および各運動負荷強度毎の終末吸気体積、終末呼気体積の相対的变化を観察した。

また、各運動負荷強度における終末吸気 chest wall 体

積と終末呼気chest wall体積の差を一回換気量として算出した。

統計学検定として、一回換気量、chest wallと各部位別の終末吸気体積、および終末呼気体積の変化量について、安静時の値をコントロール群としてDunnettの方法で行った。また部位別体積の相対的变化とした各部位毎の終末吸気体積、終末呼気体積について各運動負荷強度で、それぞれ部位別の比較を行い、Bonferroniの方法にて多重比較を行った。すべての統計学的検定はSPSS 12.0 J for Windowsを用いて行い、危険率は5%未満とした。

III. 結果

一回換気量(表2)は、安静時、20%時、40%時、60%時、80%時、最大運動時と徐々に増加し、安静時と比べて20%時以上の運動負荷強度で有意に増加した。最大運動時には安静時の4.4倍の増加が認められた。

表3のchest wall体積変化のパターンをみると、終末吸気chest wall体積は安静時から最大運動時にかけて徐々に上昇し、安静時と比べて20%時以上の運動負荷強度で有意な増加が認められた。終末呼気chest wall体積は安静時から80%時にかけて減少し、安静時と比べて80%時で有意な減少が認められた。

chest wall体積の変化を3つの部位別に分けてみると、部位により違いが認められた(表3)。終末吸気の各部位の体積変化をみると、上部胸郭体積、下部胸郭体積はchest wall体積と同様の増加が認められ、安静時から最大運動時にかけて徐々に増加し、安静時と比べて20%時以上の運動負荷強度で有意な増加が認められた。一方、

終末吸気腹部体積は80%時、最大運動時で有意な増加が認められた。次に終末呼気の各部位の体積変化をみると、下部胸郭体積は安静時から最大運動時にかけて有意な差は認められなかったが、安静時と比べて上部胸郭体積は40%時以上の運動負荷強度で有意な増加が認められた。また、終末呼気腹部体積は安静時から最大運動時にかけて徐々に減少し、安静時と比べて20%時以上の運動負荷強度で有意な減少が認められた。

図4の部位別体積の相対的变化をみると、終末吸気体積について腹部では安静時の上部胸郭・下部胸郭に比べて有意な増加が認められ、20%時以上の運動負荷強度で下部胸郭と比べて有意な増加が認められた。上部胸郭では下部胸郭に比べて80%時、最大運動時で有意な増加が認められた。一方、終末呼気体積については、安静時で腹部が下部胸郭と比べて有意に増加し、最大運動時で腹部は上部胸郭と比べて有意な減少が認められた。

IV. 考察

安静時からのchest wall体積変化は、肺気量位を反映する⁴⁾と考えられる。一般に、運動中の一回換気量の増加は、終末吸気肺気量位の増加と終末呼気肺気量位の減少によると報告¹²⁾されている。今回の結果でも、全体としては、運動負荷強度の増加に伴う一回換気量の増加は、終末吸気chest wall体積の増加と終末呼気chest wall体積の減少によりなされた。しかし、そのchest wall体積変化は部位により異なっていた。

終末吸気時のchest wall体積の増加は、上部胸郭体積、および下部胸郭体積によりなされ、主に肋骨の引き上げが大きく関与していると考えられた。先行研究⁴⁾でも今

表2 一回換気量

	安静時	20%時	40%時	60%時	80%時	100%時
一回換気量	0.55 ± 0.09	1.02 ± 0.09**	1.38 ± 0.21**	1.94 ± 0.28**	2.27 ± 0.36**	2.40 ± 0.15**

*p<0.05, **p<0.01 v.s. 安静時.

表3 chest wall 体積および部位別体積の変化

	20%時	40%時	60%時	80%時	100%時
終末吸気chest wall体積	0.34 ± 0.30*	0.71 ± 0.30**	1.18 ± 0.36**	1.47 ± 0.39**	1.73 ± 0.19**
終末呼気chest wall体積	-0.12 ± 0.22	-0.12 ± 0.24	-0.21 ± 0.16	-0.25 ± 0.27*	-0.11 ± 0.19
終末吸気上部胸郭体積	0.25 ± 0.12**	0.44 ± 0.16**	0.66 ± 0.18**	0.79 ± 0.18**	0.92 ± 0.14**
終末呼気上部胸郭体積	0.09 ± 0.06	0.15 ± 0.07*	0.15 ± 0.10*	0.20 ± 0.14**	0.26 ± 0.12**
終末吸気下部胸郭体積	0.15 ± 0.12*	0.23 ± 0.14**	0.34 ± 0.15**	0.45 ± 0.21**	0.56 ± 0.18**
終末呼気下部胸郭体積	0.04 ± 0.09	0.05 ± 0.10	0.04 ± 0.10	0.06 ± 0.13	0.12 ± 0.20
終末吸気腹部体積	-0.06 ± 0.28	0.04 ± 0.22	0.18 ± 0.16	0.24 ± 0.14*	0.25 ± 0.19*
終末呼気腹部体積	-0.25 ± 0.23**	-0.31 ± 0.23**	-0.40 ± 0.19**	-0.50 ± 0.26**	-0.49 ± 0.22**

*p<0.05, **p<0.01 v.s. 安静時. chest wallおよび部位別の終末吸気・呼気の安静時体積を0 Lとし変化量を算出.

単位: L

表4 部位別体積の相対的变化

	終末吸気体積			終末呼気体積		
	上部胸郭	下部胸郭	腹部	上部胸郭	下部胸郭	腹部
安静時	42.4 ± 9.6	30.6 ± 11.2	74.0 ± 13.3***†	35.0 ± 9.4	21.9 ± 12.4	54.3 ± 12.9†
20%時	55.6 ± 14.2	42.1 ± 11.2	72.8 ± 15.4†	39.7 ± 11.0	24.3 ± 13.6	39.5 ± 9.2
40%時	66.0 ± 16.8	48.6 ± 10.6	79.1 ± 17.3†	42.9 ± 10.6	24.8 ± 13.6	35.3 ± 10.0
60%時	77.1 ± 14.0	58.4 ± 7.5	87.0 ± 15.3†	43.0 ± 9.9	24.2 ± 10.1	29.2 ± 12.8
80%時	83.6 ± 10.2	67.0 ± 9.1*	88.6 ± 8.9††	45.2 ± 6.1	25.3 ± 12.3	23.2 ± 10.5
100%時	91.6 ± 6.7	76.8 ± 9.2*	89.7 ± 7.3††	48.4 ± 8.6	29.3 ± 14.1	22.6 ± 13.3*

*p<0.05, **p<0.01 v.s. 上部胸郭, †p<0.05, ††p<0.01 v.s. 下部胸郭.

単位: %.

回の結果と同様に、運動時に終末吸気上部胸郭体積、および終末吸気下部胸郭体積が増加することにより、終末吸気chest wall体積も増加すると述べている。これは胸部では拡張圧に抵抗して呼気を行うよりも、収縮圧に抵抗して吸気を行う方が仕事量は少なくできる^{13,14)}とされていることから、自転車エルゴメーター駆動中のような座位姿勢では、肋骨関節を軸に肋骨は重力により引き下げられた状態となる。より大きな一回換気量を得るには、上部胸郭や下部胸郭では胸腔内圧を高める呼気努力を行うよりも、肋骨を引き上げる吸気努力のほうが容易であったことが考えられた。また今回の結果である部位別体積の相対的变化をみると、安静時の終末吸気体積について上部胸郭や下部胸郭は腹部と比べて縮小位をとり、吸気への予備能力が高い状態であったため、吸気筋が伸長位をとりやすく筋の張力発揮が得やすい状態であったことが考えられた。

終末吸気時の変化とは逆に、終末呼気時のchest wall体積の減少は、主に腹筋群の活動⁴⁾に伴う腹部体積の減少によりなされた。相対的变化をみた終末呼気体積における安静時の腹部体積は拡張位をとり、呼気への予備能力が高く、呼気筋である腹筋群が伸長位となり筋収縮が得やすい状態であったと考えられた。またコンプライアンスについての報告¹³⁾では、腹部では収縮圧に抵抗して吸気を行うよりも、拡張圧に抵抗して呼気を行うほうが仕事量は少なくできるとされており、腹部を拡張させるよりも腹部を縮小させて、より大きな一回換気量を得たことが考えられた。

これらのことから、運動負荷強度の増加に伴うchest wall体積変化は、終末吸気時には肋骨がより大きく引き上げられ、終末呼気時には腹部がより縮小することで、より大きな一回換気量を得ることが示唆された。

本研究は対象者数が少なく、かつ健常男性のみを対象としている。そのため女性や高齢者では異なる結果となる可能性がある。また今回用いた三次元動作解析装置での測定手法は、換気メカニクスの一つである体積変化量のみを測定したものであり、胸腔・腹腔内圧の変化や筋

活動の変化は測定していない。今後はこれらの測定を同時に行うことで、運動中の換気メカニクスの変化をより詳細に検討できると考えられる。

引用文献

- 1) Grimby G, Bunn J, Mead J: Relative contribution of rib cage and abdomen to ventilation during exercise. *J Appl Physiol*, 1968, 24(2): 159-166.
- 2) Clarenbach CF, Senn O, Brack T, et al.: Monitoring of ventilation during exercise by a portable respiratory inductive plethysmograph. *Chest*, 2005, 128(3): 1282-1290.
- 3) 小室 透, 間瀬教史, 居村茂幸・他: 運動時における健常者の呼吸パターン(呼吸数と一回換気量の関係)および呼吸運動の変化. *理学療法科学*, 1994, 21(8): 549-552.
- 4) Aliverti A, Cala SJ, Duranti R, et al.: Human respiratory muscle actions and control during exercise. *J Appl Physiol*, 1997, 83(4): 1256-1269.
- 5) Vogiatzis I, Aliverti A, Golemati S, et al.: Respiratory kinematics by the optoelectronic plethysmography during exercise in man and woman. *Eur. J Appl Physiol*, 2005, 93(5-6): 581-587.
- 6) Iandelli L, Aliverti A, Kayser B, et al.: Determinants of exercise performance in normal men with externally imposed expiratory flow limitation. *J Appl Physiol*, 2002, 92(5): 1943-1952.
- 7) Aliverti A, Stevenson N, Dellaca RL, et al.: Regional chest wall volume during exercise in chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax*, 2004, 59(3): 210-216.
- 8) Georgiadou O, Vogiatzis I, Stratakis G, et al.: Effects of rehabilitation on chest wall volume regulation during exercise in COPD patients. *Eur Respir J*, 2007, 29(2): 284-291.
- 9) Cala SJ, Kenyon CM, Ferrigno G, et al.: Chest wall and lung volume estimation by optical reflectance motion analysis. *J Appl Physiol*, 1996, 81(6): 2680-2689.
- 10) Nozoe M, Mase K, Tsutou A, et al.: Regional chest wall volume change during various breathing maneuvers in normal men. *J Jpn Phys Ther Assoc*, 2011, 14(1): 12-18.
- 11) Kenyon CM, Cala SJ, Yan S, et al.: Rib cage mechanics during quiet breathing and exercise in human. *J Appl Physiol*, 1997, 83(4): 1242-1255.

- 12) 荻野智之, 間瀬教史, 野添匡史・他: Flow-Volume Loopを用いた若年健常成人における運動時肺気量位の変化について. 臨床理学療法研究, 2009, 26: 47-51.
- 13) Estenne M, Yernault JC, Troyer AD: Rib-cage and diaphragm-abdomen compliance in humans: effect of age and posture. J Appl Physiol, 1985, 59(6): 1842-1848.
- 14) Konno K, Mead J: Static volume-pressure characteristics of the rib cage and abdomen. J Appl Physiol, 1968, 24(4): 407-422.