

原 著

運動時フローボリュームループを用いた 慢性呼吸不全患者の換気制限の評価の試み

間瀬 教史¹⁾・野添 匡史²⁾・村上 茂史²⁾
 岡田 誠²⁾・荻野 智之²⁾・松下 和弘²⁾
 荻野 真知子²⁾・加治佐 望²⁾・木原 一晃²⁾
 和田 智弘²⁾・眞 渕 敏³⁾

The Evaluation of Ventilatory Limitation of the Chronic Respiratory Failure using the Flow Volume Loop during Exercise

Kyoshi MASE¹⁾, Masafumi NOZO²⁾, Shigefumi MURAKAMI²⁾, Makoto OKADA²⁾,
 Tomoyuki OGINO²⁾, Kazuhiro MATSUSHITA²⁾, Machiko OGINO²⁾, Nozomu KAJISA²⁾,
 Kazuyuki KIHARA²⁾, Tomohiro WADA²⁾ and Satoshi MABUCHI³⁾

Abstract : The purpose of this study was to clarify the features of ventilation constraint in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and interstitial pneumonia (IP) by observing the tidal exercise flow volume loop (extFVL) within the maximal flow volume envelope (MFVL). Three patients with COPD and IP were tested during ramp exercise (symptom-limited cycle ergometer exercise). From the change in volume and flow during the test, an extFVL was made, and expiratory flow limitation and lung volume changes were observed. In the patient with COPD, expiratory flow limitations were apparent both at rest and during exercise. In addition, inspiratory reserve volume was also lowered in patients with dynamic hyperinflation. In patients with IP, inspiratory reserve volume was limited. The expiratory flow limitation was accepted only during maximal exercise, and dynamic hyperinflation could not be recognized.

Key Words : Flow-volume loop, Exercise, Ventilatory limitation

抄録：安静時および運動中の換気制限が臨床的に問題となる慢性閉塞性肺疾患（chronic obstructive pulmonary disease：COPD）、間質性肺炎（interstitial pneumonia：IP）に対し、フローボリュームループ（flow volume loop：FVL）を用いた換気制限評価を試み、2つの疾患の換気制限の特徴について検討することを目的とした。対象は、COPD患者3名、IP患者3名（IP群）である。自転車エルゴメータにて最大運動強度まで漸増負荷したときの volume と flow の変化から、安静時および運動時 FVL を作成し、呼気流量制限、肺気量位変化について観察した。FVL を用いた換気制限の評価は、流量計により測定される、volume と flow の値を比較的簡単な分析プログラムで波形分析することで測定が可能であった。COPD 患者では、安静時から呼気流量制限が見られ、さらに、動的肺過膨張が認められる例では吸気予備量も低下していた。IP 患者では、吸気予備量が制限されていたが、呼気流量制限は最大運動時にしか認めず、動的肺過膨張も認められなかった。

キーワード：フローボリュームループ、運動負荷、換気制限

¹⁾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

²⁾兵庫医科大学篠山病院リハビリテーション室

³⁾兵庫医科大学病院リハビリテーション部

I. はじめに

安静時および運動中の換気制限を評価する一つとして、フローボリュームループ (flow volume loop: FVL) を用いた方法がある。この方法は最大吸気、呼吸により得られた FVL (maximal flow-volume loop: MFVL) の中に、安静時および運動中のフローボリュームループ (exercise flow-volume loop: extFVL) を描くことにより、安静時および運動中の換気変化を評価する方法である¹⁾。運動に伴う換気変化を評価する指標としては、一般的には呼吸数、一回換気量、分時換気量などが用いられる。FVL を用いた評価では、換気変化を表すこれらの一般的な評価項目だけでなく、閉塞性換気障害を示す慢性呼吸不全患者に見られる動的肺過膨張を評価するために必要な肺気量位変化や流量制限の程度を量的かつ、視覚的に評価することが可能とされており、理学療法上有用な評価方法になる可能性がある。動的肺過膨張とは、運動時に呼気終末肺気量位が連続的に増大する現象のことである。しかし、この方法は、運動中の FVL を測定する一般的に普及した市販の測定機器がないためか、臨床評価としては、ほとんどに用いられていない。

そこで、今回我々は、流量制限や肺気量位変化が臨床上問題となる閉塞性換気障害、もしくは拘束性換気障害の代表的な疾患である慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary disease: COPD)、間質性肺炎 (interstitial pneumonia: IP) に対し、FVL を用いた換気制限評価を試みた。さらに、2つの疾患の安静時から運動時にかけての換気制限の特徴について検討したので報告する。

II. 対 象

対象は、COPD 患者 3 名 (COPD 群)、IP 患者 3 名

(IP 群) である。IP 群の診断名は、3 例すべて非特異性間質性肺炎 (nonspecific interstitial pneumonia: NSIP) であった。全例症状は安定し慢性期にあるものであった。年齢、性別、BMI、呼吸機能、Fletcher-Hugh-Jones (F-H-J) 分類は表 1 に示した。対象者に対しては、兵庫医科大学リハビリテーションセンターにて事前に評価者が本研究の目的、方法、運動負荷上のリスクを口頭で説明し、同日、もしくは後日、口頭で研究参加の同意を得た。

III. 方 法

1. 運動負荷方法

運動負荷は、自転車エルゴメータにて、10 watts 3 分のウォーミングアップ後、1 分間に 15 watts 増加させるランブ負荷を用いた。運動終了時基準は、日本呼吸管理学会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会、日本呼吸器学会ガイドライン施行管理委員会、日本理学療法士協会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会編集、呼吸リハビリテーションマニュアル²⁾の運動負荷中止基準を用いた。

2. MFVL と extFVL の測定

安静時、運動負荷中、および運動後の最大呼気・吸気中の volume、と flow 変化を呼気ガス分析器 (ミナト医科学社製 AE-300 S) の流量計にて測定し、サンプリング周波数 100 Hz でパーソナルコンピュータに取り込んだ。その後、Visual Basic 6.0 (マイクロソフト社製) にて作成した分析プログラムにて以下の波形分析を行った。

流量計を用いて肺気量位変化を測定する場合、測定機器の機械的誤差により生じる肺気量位のドリフト現象が波形分析時の問題となり、その補正処理が必要となる。今回はその補正処理を Johnson ら³⁾の方法に準拠しておこなった。すなわち、最大吸気時の肺気量位

表 1 対象

疾患名	性	年齢 (才)	BMI	呼吸機能		F-H-J 分類	
				%VC (%)	FEV1 (%)		
COPD 群							
症例 1	COPD	女	63	15.8	70.6	40.2	Ⅲ
症例 2	COPD	男	74	16.3	63.0	39.8	Ⅲ
症例 3	COPD	男	73	16.4	121.5	45.2	Ⅲ
IP 群							
症例 4	NSIP	女	63	21.1	64.5	91.7	Ⅱ
症例 5	NSIP	女	72	21.9	75.1	80.0	Ⅲ
症例 6	NSIP	女	82	17.1	72.6	65.5	Ⅲ

は姿勢に変化がなければ変化がないと仮定³⁾、被検者に測定開始直後から1分毎に最大吸気を行わせ、それぞれの最大吸気の値が被検者の肺活量と一致するようにドリフト補正を行った上で、肺気量位波形の分析を行った。具体的には以下の式からサンプリングポイント毎に生じるドリフト現象により生じる誤差を算出し、測定値からその誤差を引くことによりドリフト現象の補正を行った(図1)。

サンプリングポイント毎の誤差

$$= \frac{(\text{最大吸気位の肺気量位} - \text{次の最大吸気位の肺気量位})}{\text{サンプリングポイント}}$$

次にドリフト補正を行った安静時、嫌気性代謝閾値(anaerobic threshold: AT)時、最大運動(Max)時のvolumeとflow波形から適当に3つ以上のextFVLを抽出し、平均的なextFVLを作成した(図2)。その後、MFVLの中に肺気量位を合わせたextFVLを描き、安静時からMax時にかけてのextFVLの変化について観察した。

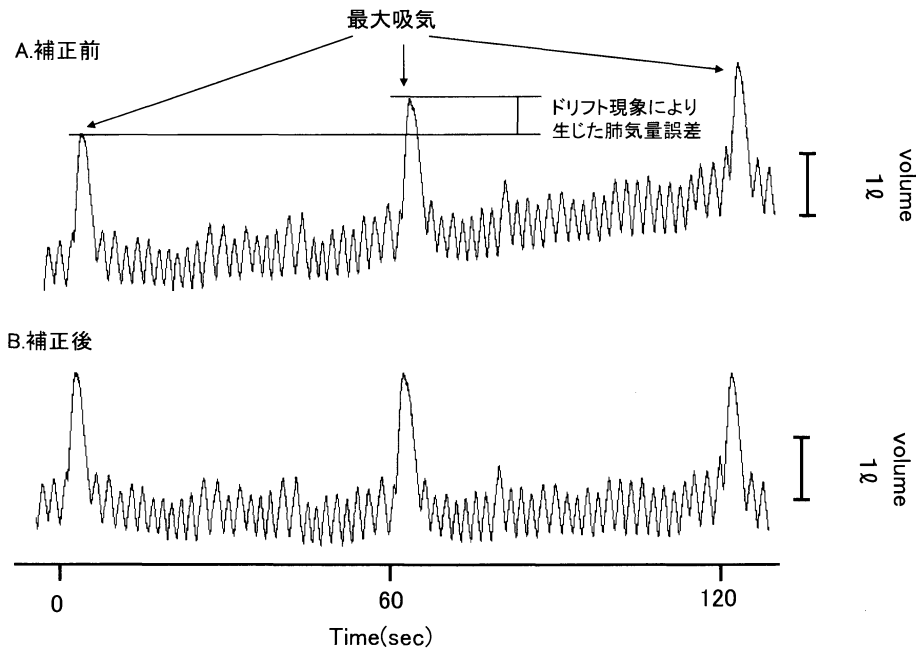


図1 ドリフトの補正

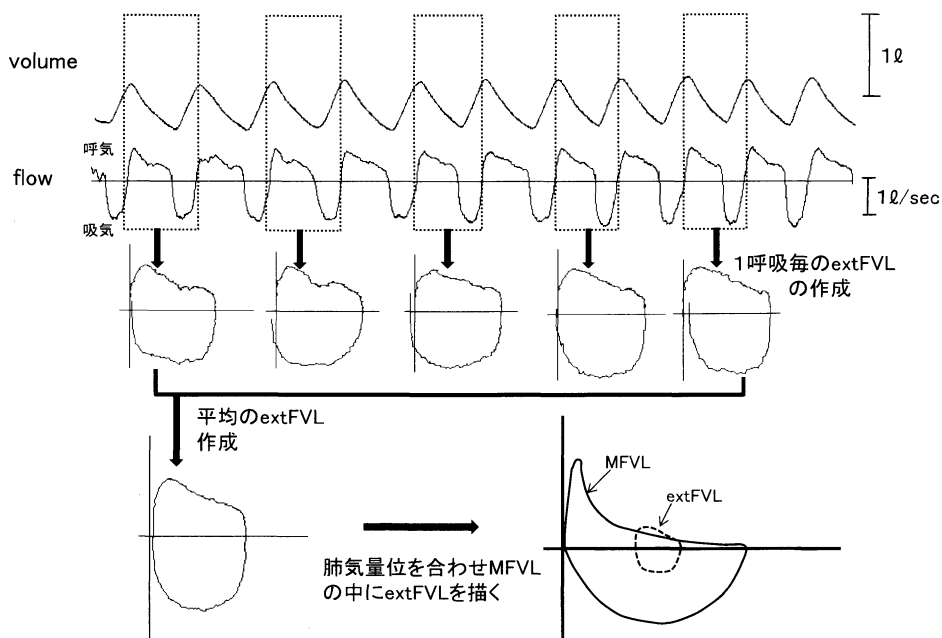


図2 運動時 FVL (extFVL) の作成

3. 肺気量位変化および流量制限の評価

肺気量位変化は、MFVL中に描いた extFVL 変化から、安静時、AT時、Max時の終末吸気肺気量位 (end inspiratory lung volume: EILV)、終末呼気肺気量位 (end expiratory lung volume: EELV) をもとめた。EILV、EELV は各症例の肺活量に対する比で表した。

呼気流量制限は、以下のいずれかの項目が満たされている場合に呼気流量制限があり、そうでない場合は、呼気流量制限はないと判断した (図3)。

- ①同肺気量位での extFVL の流量が MFVL の流量より高い値を示した場合。
- ②同肺気量位での extFVL の流量が MFVL の流量と同じ値を示した場合。
- ③ extFVL の流量は MFVL の流量より低いが、ほぼ平行に推移していると視覚的に判断される肺気量位がある場合。

また、呼気流量制限の程度は、以下の式からもとめた。

呼気流量制限 (%)

$$= \frac{(\text{extFVL が MFVL に接するか漸近している肺気量})}{\text{一回換気量}} \times 100$$

吸気予備量は、MFVL と extFVL が最も接近している肺気量位での吸気流量の差で表し、少ないほど吸気流量に余裕がないと判断した (図3)。

IV. 結 果

COPD 群 3 例の安静時、AT時、Max時の extFVL 変化を図4に示す。最も外側の実線が MFVL を表し、最も内側の点線が安静時の FVL を示している。3 症例ともに、最大運動時だけでなく安静時、AT時においても extFVL が MFVL に接するもしくは漸近し呼気流量制限が認められた。各症例の呼気流量制限

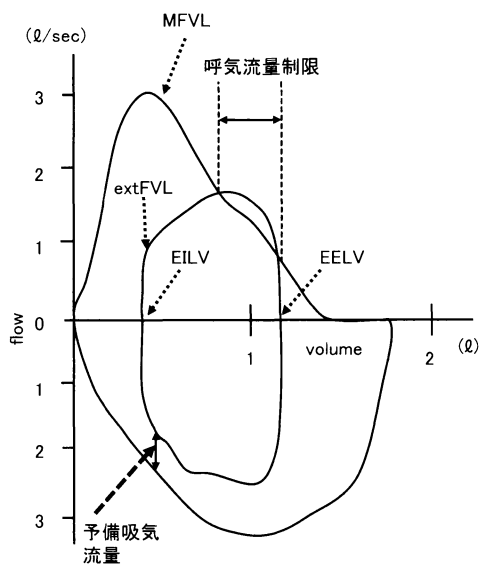


図3 肺気量位変化および気流制限の評価

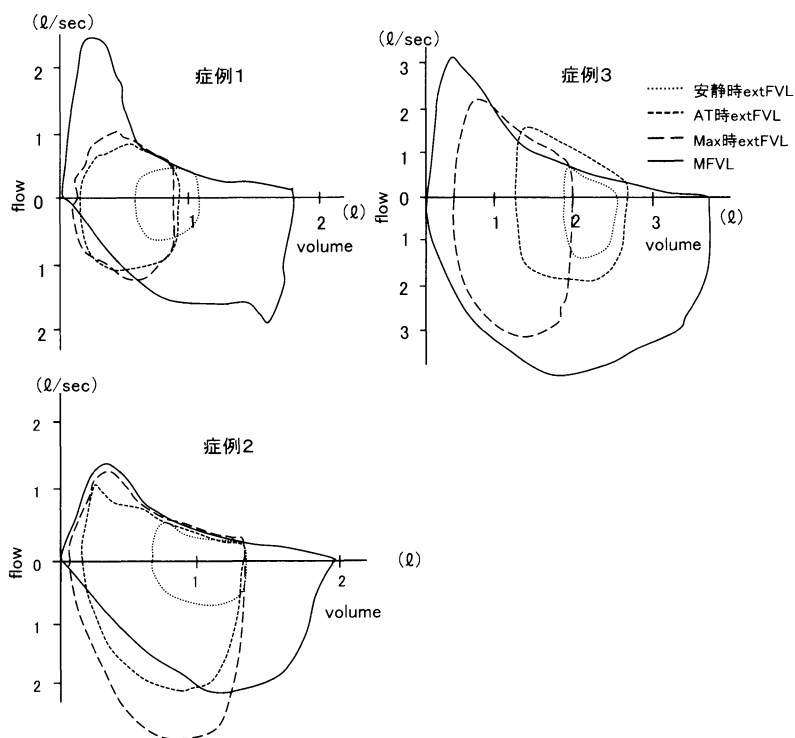


図4 COPD 群 3 例の extFVL

の程度は、症例1 安静時 45.4%，AT 時 44.0%，Max 時 44.0%，症例2 安静時 87.0%，AT 時 48.7%，Max 時 74.0%，症例3 安静時 7.1%，AT 時 96.4%，Max 時 70.0%であった。さらに、症例1, 2では運動負荷の増加に従って吸気のFVLがMFVLと重なり、吸気予備量が0となり、吸気流量にも余裕が無くなることがわかった(表2)。また、EILV, EELVともに、安静時から運動時にかけて上昇し、3例すべてで動的肺過膨張が観察された。EILVは症例1 安静時 67.2%，AT 時 91.5%，Max 時 96.2%，症例2 安静時 52.5%，AT 時 70.8%，Max 時 90%，症例3 安静時 53.7%，AT 時 94.6%，Max 時 100%であった。EELVは、症例1 安静時 39.2%，AT 時 49.5%，Max 時 51.4%，症例2 安静時 35.8%，AT 時 31.6%，Max 時 50%，症例3 安静時 46.2%，AT 時 47.3%，Max 時 47.3%であった。

表2 各症例の吸気終末肺気量位 (EILV), 呼気終末肺気量位 (EELV) の変化

	呼吸流量制限 (%)			吸気予備量 (ℓ/sec)		
	安静時	AT 時	Max 時	安静時	AT 時	Max 時
症例1	45.4	44.0	44.0	0.71	0	0
症例2	87.0	48.7	74.0	1.16	0	0
症例3	7.1	96.4	70.0	3.07	2.3	0.38
症例4	0	0	0	2.56	0.97	0.2
症例5	0	0	69.6	1.51	0.19	0
症例6	0	0	0.5	0.28	0.08	0

IP 群3例の安静時から運動中の extFVL 変化を図5に示す。COPD 群とは異なり IP の3症例は、呼吸流量制限が認められたのは Max 時(症例5で69.6%，症例6で0.5%)のみで、安静時、AT 時には認められなかった。しかし、Max 時の吸気予備量は、著しく低下し、症例4が0.02ℓ/sec、症例5, 6が0ℓ/secであり、吸気流量に制限が認められた(表2)。また、運動中の肺気量位変化については、負荷強度増加に伴い EILV が上昇、EELV が下降し、COPD 例のような動的肺過膨張は認められなかった。

V. 考 察

慢性呼吸不全患者において動作時呼吸困難の大きな原因の一つとして換気制限、特に流量制限があげられる。さらに、COPD 患者に見られやすい動的肺過膨張は、吸気筋負荷を増加させ、呼吸困難の原因の一つといわれる³⁾。動的肺過膨張に対する有効な理学療法プログラムは確立されていないが、口すぼめ呼吸による呼気延長や気道閉塞の是正、吸気筋トレーニングによる吸気筋筋力強化は動的肺過膨張による息切れの減少に有効なプログラムとなる可能性はある。そのため、運動中の流量制限の程度や肺気量位変化を把握することは、これら疾患の理学療法を行う上で非常に重要な評価となる。しかし、これら疾患の運動時流量制限を客観的に評価できる方法で一般的に普及している方法はない。換気制限の有無を大まかに把握する指標とし

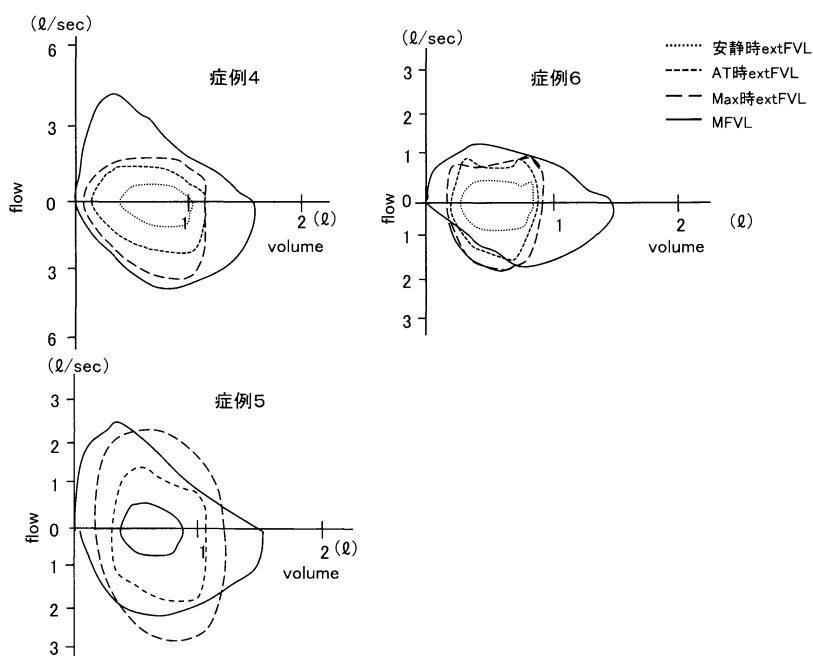


図5 IP 群3例の extFVL

て、分時換気量を最大分時換気量で除した *dyspnea index* や呼吸予備量がある⁸⁾が、FVLを用いた方法で評価可能な流量制限の部位や程度、肺気量位の把握はできない。運動中のFVLを用いた方法は、市販されている測定機器が無い⁹⁾ためか、一般的な評価方法として用いられていない。しかし、流量計により測定される、volumeとflowの値を、パーソナルコンピュータに取り込むことができる環境があれば、その後の波形分析は、今回用いた比較的簡単な分析プログラムで波形分析ができ、測定が可能であった。今後、より多くの臨床応用が望まれる。

ドリフト現象とは、流量センサーに生じる電気的変化や、温度、湿度等の変化が原因となって生じる流量測定における機械的な誤差である¹⁾。この現象により、たとえ呼吸が一定の肺気量位で行われていたとしても、測定される肺気量位が徐々に増加したり、また、徐々に下降したりする(図1)。このドリフト現象は、測定中ある程度一定の割合で生じる。そのため、測定中に肺気量位が同じと仮定できる二つの点が規定できれば、その間のドリフト現象によって生じた肺気量位の誤差が補正できると考えられている¹⁾。今回は、最大吸気位は変化しないと仮定し³⁾、1分ごとに最大吸気を行わせて、ドリフト現象の補正を行った。今回用いた補正方法は、健常者や慢性呼吸不全患者の安静時および運動中の肺気量位測定に多く利用されている^{1,4)}。

FVLを用いた評価方法からみたCOPD群とIP群の換気制限の特徴については、以下のことがあげられた。COPD群では、今回対象となったF-H-J分類Ⅲで重症度としては中等度に属する症例でも、安静時から呼気流量制限がみとめられ、さらに運動時にはより強い呼気流量制限が生じていることがわかった。さらに、最大運動時には著しい高肺気量位の呼吸様式、つまり、動的肺過膨張が生じていることがわかった。また、吸気予備量も著しく低下していた。MFVLから見ると高い肺気量位での最大の呼気流量は、低い肺気量位での最大の呼気流量に比べ多いが、最大の吸気流量は高い肺気量位で少なくなる。このことは、高い肺気量位での呼吸は、高い呼気流量が得られる代わりに、吸気流量が制限され易くなることになることを示

す。COPDでは、EELVを増加し低肺気量位で生じやすい呼気流量制限を回避することで、一回換気量、呼吸数の増加を可能にし、運動時の換気需要増大に対応しているが、それによって、吸気の流量制限が生じやすい状況になっていると考えられる。

それに対し、IP群では、安静時や中等度の運動強度までは呼気流量制限は受けていなかった。さらに、肺気量位の変化は、健常人の傾向⁶⁾と同じで、運動負荷強度上昇に伴いEILVは上昇、EELVは下降し、動的肺過膨張は生じていなかった。しかし、肺活量の低下を反映し、強い負荷強度では吸気流量に余裕が無くなるという特徴がみられた。

安静時および運動中の換気制限を評価する方法としてFVLを用い、COPD群、IP群の特徴について観察した。COPD群では安静時から呼気流量制限が見られ、動的肺過膨張も観察された。IP群では、動的肺過膨張は見られなかったが、吸気予備量の減少が特徴的であると考えられた。FVLを用いた方法は、肺気量位変化や流量制限の程度を量的かつ、視覚的に評価することが可能で理学療法上有用な評価方法であると考えられた。

参考文献

- 1) Johnson BD, Weisman IM, Zeballos RJ, et al.: Emerging concepts in the evaluation of ventilatory limitation during exercise. The exercise tidal flow-volume loop. *Chest*, 1999; 116: 488-503
- 2) 日本呼吸管理学会リハビリテーションガイドライン作成委員会, 日本呼吸器学会ガイドライン施行管理委員会, 日本理学療法士協会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会編: 呼吸リハビリテーションマニュアル-運動療法-, 照林社, 東京, 2003, p 22
- 3) Younes M, Kivinen G: Respiratory mechanics and breathing pattern during and following maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1984; 57: 1773-1782
- 4) O'Donnell DE, Laveneziana P: Dyspnea and activity limitation in COPD: mechanical factors. *COPD*. 2007; 4(3): 225-36
- 5) Sue DY, Hansen JE: Normal values in adults during exercise testing. *Clin Chest Med*. 1984; 5(1): 89-98
- 6) 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: 47-52