

## 卒後研修セミナー

## 呼吸筋トレーニング\*

宮川 哲夫\*\*

## 要旨

近年、呼吸不全の病態形成に關与する呼吸筋疲労や、呼吸筋の特性も徐々に解明されつつある。そこで、最近のトピックスについて、1. 呼吸筋の運動学、2. 呼吸筋の力学的特性、3. 呼吸筋の収縮特性、4. 呼吸筋力・耐久力の評価、5. 呼吸筋疲労、6. 呼吸筋トレーニング、1) 筋力トレーニング、2) 耐久力トレーニング、①過換気法、②吸気抵抗負荷法、③運動療法について述べた。

呼吸筋も四肢筋と同じような特性を持ち、四肢筋同様、強化することができる。その強化方法も四肢筋の強化方法に準じて行われる。例えば、筋力を目的に強化するためには、高張力、低頻度の刺激がよく、耐久力を強化するためには低張力・高頻度の刺激強度が適している。しかし、その方法については十分に確立されていないのが現状であり、至的負荷強度を確立するためには、今後、系統的な研究が望まれるところである。

キーワード 呼吸筋、筋力トレーニング、耐久力トレーニング

## はじめに

呼吸筋は循環器系における心筋の働きに相当し、換気を生み出すポンプの作用をしている。近年、呼吸不全の病態形成に關与する呼吸筋疲労や呼吸筋の特性も徐々に解明されつつある。本セミナーでは、呼吸筋の特性、呼吸筋疲労および呼吸筋トレーニングについて骨格筋と対比しながら、最近のトピックスを紹介する。

1. 呼吸筋の運動学<sup>1)2)3)</sup>

## 1) 横隔膜

横隔膜はその起始部によって3つの部分に分けられる。それは、胸骨部、肋骨部、脚部であり、これらの腺維は互いに集まり腱中心を形成している。横隔膜を機能的に考えると、橢円形のシリンダーの上にドームをかぶせた形をしており、このシリンダー部分は、胸郭の内面と接しており“zone of apposition”と呼ばれ重要な部分である。安静呼吸では、横隔膜は主として体軸方向にピストン状の運動をすることにより肺気量の変化を生じており zone of apposition で2 cm、胸郭下部で左右径

0.3cm、前後径0.5 cm の変動がみられる。ピストン運動のほかに胸郭に作用し、①胸腔内圧陰圧化、②腹腔内圧上昇および腹腔内臓器の下方移動、③下部胸郭の拡張をもたらす。胸腔内陰圧化は、肺を膨らませる力となるが、この陰圧は上部胸郭を内側に引っ張る力（呼気方向）として働く。この陰圧は下部胸郭に対しても同様に働くが、肋骨付着部の作用により、収縮作用より拡張作用が大きく胸郭は拡大する。吸気時、腹部前後径は増大するが、腹腔内容物を除去すると胸郭は縮小し、腹腔内圧および腹腔内容物は横隔膜に対し“てこ”の働きをしている。

肋骨部と脚部は作用にも差があり、肋骨部の収縮では腹部前後径と下部胸郭前後径は拡大するが、脚部の収縮では下部胸郭前後径は増大しない。また、肋骨部は上位の横隔膜神経支配で脚部は下位の横隔膜神経支配といわれている。筋腺維でみても脚部のほうが遅筋線維が多く速筋線維は少ないといわれている。胸腔側と腹腔側でみると、腹腔側に遅筋線維は多いとされる。横隔膜<sup>4)</sup>の重力は成人で260 g、厚さ0.35 cm、表面積750 cm<sup>2</sup>、最大張力1.3 kg/cm<sup>2</sup>とされる。また、横隔膜の筋力（重量）は栄養状態（体重）と正の相関があるとされている。

## 2) 肋間筋

肋間筋は、内肋間筋と外肋間筋の2層の筋肉から構成されている。内肋間筋は、機能的見地から後部（骨間部）と前部（肋軟骨間部）に分けられている。吸気時胸

\* Respiratory muscle training

\*\* 緑成会病院・整育園、リハビリテーション部

Tetsuo Miyagawa, RPT: Ryokuseikai Hospital and Seikuen, Division of Rehabilitation

郭の動きは、上位肋骨が前上方に動く pump-handle motion と下位肋骨が外上方に動く bucket-handle motion の2つの動きがある。吸気時には外肋間筋と内肋間筋の前部が働き、呼気時には内肋間筋の後部が作用することが筋電図で証明される。しかし、横隔膜収縮に対する拮抗筋として作用している可能性もあり、未だ十分に解明されていない。最近、内・外肋間筋の両者とも同じ作用を持ち、上位の肋骨を引き下げ下位の肋骨を持ち上げる作用があるとされている。さらに安静吸気の30%は肋骨筋が関与するとされている。しかし、肺容量<sup>5)</sup>の増大に働いているのではなく、胸郭をスムーズに動かすための固定装置として等尺収縮をしており、横隔膜収縮の準備段階として横隔膜の至的初期長を調節し吸気のよい条件を作るためとされる。また、肋間筋の第1の機能は、体幹を回旋させるのではないかと推察しており、肋間筋の作用は現在でも確立されておらず今後の研究が必要である。

### 3) 吸気補助筋

胸鎖乳突筋は胸骨を、斜角筋は第1, 2肋骨を挙上する働きがあり重要である。临床上、胸鎖乳突筋の肥大は閉塞性障害が疑われる。斜角筋群<sup>6)</sup>の肥大は、前斜角筋は閉塞性障害でのみ認め、中・後斜角筋群では閉塞性、拘束性、混合性障害のいずれでもみられるが、拘束性障害のとき認めやすいとされる。吸気補助筋だけによる収縮では、肺、胸郭は拡張するが、腹部は内方に変位し縮小する。健常人で横隔膜を全く動かさないで、吸気補助筋だけで呼吸した場合は1分も呼吸できない。

### 4) 腹筋群

呼吸に関与する腹壁筋は、腹直筋、内・外腹斜筋、腹横筋がある。腹筋の収縮は腹圧を高め腹部を内方に偏位させる、その結果、横隔膜は胸腔内へ移動し肺容量を低下させる。腹筋群は最も大切な呼吸筋である。腹直筋は下部肋骨の前後径・横径を低下させるが、内腹斜筋、腹横筋にはその働きはない。外腹斜筋単独の収縮では胸郭の前後径、横径を増大させ（吸気方向）へ働く。腹筋群は呼吸筋であるが、吸気補助筋としての働きも同様に重要である。それは、運動中やCO<sub>2</sub>再呼吸時や吸気抵抗負荷時によく認められる。吸気補助として働く2つのメカニズムが考えられる。第1に、呼気量を増し機能的残気量を低下させ肺容量が減少すると、吸気はその弾性圧で促される。第2に呼吸筋の活動により、吸気筋を伸張し長さ-張力関係の至的初期長を作り、吸気筋の収縮を促通させる働きがある。頸髄損傷では、腹筋の働きがないため坐位で腹腔内容物は前下方に押され、横隔膜が下部肋骨を挙上させるのに必要な腱中心の固定がなされなくな

り、収縮効率が低下する。このように、横隔膜の収縮効率をよくするだけでなく、下部肋骨を拡張させる効果もある。起立位では上腹部より下腹部の緊張性活動が大きい。肺過膨張<sup>7)</sup>の肺気腫の場合、腹筋群の中でも腹横筋が緊張性に働いており、疲労耐性も最も強いとされている。

## 2. 呼吸筋の力学的特性<sup>8)9)10)</sup>

### 1) 長さ-張力関係

骨格筋では、発生張力は安静時の長さ付近において最大となり、それより短くても長くても減少する。呼吸筋の安静時は、機能的残気量(FRC)レベルに相当する。この時には、肺、胸郭、腹壁などの弾性圧が安定している状態である。呼吸筋においては肺気量を長さの指標、呼吸筋による発生圧を張力の指標とすると、吸気筋ではFRC付近で発生圧が最大となり、呼気筋では全肺気量(TLC)付近で発生圧は最大となる。肺過膨張の肺気腫の場合は、FRCでの横隔膜の筋張は健常時より短縮することになり、張力発生の点では不利となる。しかし、肺気腫では、長さ-張力曲線は健常より短い方へ偏位するという報告がある。

### 2) 負荷-速度関係

骨格筋に一定重量の負荷をかけて最大収縮させると、負荷が軽いほど収縮速度は速くなり負荷が大きくなるほど収縮速度は遅くなり、両者の関係は双曲線となる。呼吸筋においては流量が収縮速度を示し、発生圧が負荷の指標となる。臨床的<sup>4)</sup>には、吸気抵抗が存在すると吸気筋の収縮速度は遅くなる。さらにその負荷に打ち勝って吸気するためには、強い吸気筋力が必要となる。安静時の呼吸ではこの因子の影響は少ないが、強度な運動中や最大換気量のような状態では、吸気の流量や最大収縮速度は制限される。また疲労時には、収縮力も収縮速度も低下する。

## 3. 呼吸筋の収縮特性<sup>8)9)10)</sup>

### 1) 遅筋と速筋

遅筋は低頻度刺激で加重が出現し、比較的低い頻度で最大張力に達するが、速筋は完全強縮に達するのに高頻度刺激を要し、その最大張力は遅筋より大きいという収縮特性がある。横隔膜および肋間筋の収縮特性は、速筋と遅筋の中間型を示す。筋線維組成からみて横隔膜は type 1 線維が55%, type 2a が21%, type 2b が24%を占め、その76%は疲労耐性が強く、中間型の筋である。通常の四肢筋では36~46%である。横隔膜は、呼吸という持続的な収縮をする一方で、咳やくしゃみなどの高出力の収縮をおこすこともあり、遅筋と速筋の両方の機能を

合わせ持っている。胸鎖乳突筋は速筋、腹筋は遅筋の傾向を示している。

## 2) 頻度-収縮曲線

単一の最大刺激で単収縮が生じる。次に連続刺激でその頻度を上げていくと加重され、収縮力は漸増し強縮に達する。それ以上刺激頻度を上げても収縮力は増えなくなる。横隔膜や胸鎖乳突筋においても、頻度-収縮曲線は骨格筋と変りがない。横隔膜に疲労負荷を与え、頻度-収縮曲線を描いてみると、疲労からの回復の点で頻度による差が異なる。すなわち、高頻度刺激での収縮力回復は早く、低頻度刺激における回復は時間を要する。それは低頻度疲労と呼ばれ、興奮収縮連関の不全とされる。

## 4. 呼吸筋力・耐久力の評価<sup>11)12)13)</sup>

### 1) 呼吸筋力

①最大吸気圧<sup>14)</sup>(Maximal inspiratory pressure, MIP)と最大呼気圧 (Maximal expiratory pressure, MEP)

呼吸筋力は一定の肺気量位において口腔を閉鎖し、最大吸気あるいは最大呼気努力をさせたときに発生する口腔内圧から、呼吸器全体の弾性圧を引いた圧として求められる。FRCでは弾性圧は0であるから、口腔内圧がそのまま最大呼吸筋力となる。また、弾性圧は最大呼吸筋力に比較して非常に小さいため、臨床的には、口腔内圧より呼吸筋力が十分評価し得る。陰圧側が最大吸気筋力、陽圧側が最大呼気筋力を表わす。MIP, MEPは年齢・性による影響があり、Black & Hyatt<sup>15)</sup>がその予測式を報告している。通常成人でMIPは、75~100 cm H<sub>2</sub>O以上、MEPが150 cm H<sub>2</sub>O以上ある。MIP40~60 cm H<sub>2</sub>Oは疲労域を示す、MIPの60%の吸気負荷で疲労が出現する。急性呼吸不全では20 cm H<sub>2</sub>O以下であり、人工呼吸器からの離脱には30 cm H<sub>2</sub>Oが必要である。高CO<sub>2</sub>血症やCOPDや神経筋疾患などでは低下している。

②経横隔膜圧差<sup>16)</sup>(transdiaphragmatic pressure, Pdi)

Pdiは胃内と食道内にバルーンを入れて測定し、腹腔内圧(胃内圧)と胸腔内圧(食道内圧)の差圧で表わす。やはりFRCレベルで気道を閉じて最大吸気努力をして測定する。測定法によって異なるが、正常値は75~150 cm H<sub>2</sub>O程度で安静時呼吸では10~20 cm H<sub>2</sub>O程度であり、Pdiの40%の吸気負荷で疲労がおこる。

③腹部隆起力<sup>17)</sup>

筆者らは、横隔膜呼吸時の腹部隆起力を横隔膜筋力として評価できるか検討した結果、MIPと腹部隆起力の回帰直線は $Y=3.89X+10.4$ ( $r=0.93$ ,  $P<0.001$ )の式で示された。腹部隆起力は健常人 $21.8\pm 8.3$  kg、呼吸器疾患群 $9.7\pm 0.5$  kgであったので、臨床症状とMIP

から4群に分類した。グレードI(重度低下)0~5 kg, グレードII(中等度低下)5~10 kg, グレードIII(軽度低下)10~15 kg, グレードIV(正常)15 kg以上となり、临床上、徒手筋力テストのように簡便に用いることができる。

### ④その他

MIP<sup>18)</sup>は体幹屈筋力と相関があり、体幹屈筋力を吸気筋力の指標とすることもできる。また脊柱<sup>19)</sup>の可動性をみた場合、肺活量と1秒率は体幹屈曲の可動域と相関があるという報告もある。

## 2) 耐久力<sup>20)</sup>

耐久力の指標には以下のものがあげられる。①最大換気量(MVV)②最大持続換気量<sup>21)</sup>(Sustainable Ventilatory Capacity: SVC)これは部分的な再呼吸を用い、同一のPaCO<sub>2</sub>の状態では15分間持続可能な最大換気量という。MVVの60%にあたる。③最大持続吸気圧<sup>22)</sup>(Sustainable Inspiratory Pressure: SIP)これは吸気負荷を加えて同一PaCO<sub>2</sub>の状態では10分間呼吸可能な最大負荷量(吸気圧)をいい、MIPの60%程度といわれる。この装置は1回換気量は自由で、重りの栓のついた吸気弁を通して定常圧が加わる装置で、流量に関係したSVCは気道因子などにより制限を受けるのに対し、SIPでは定常圧を用いるので、より呼吸筋耐久力を反映しているといえる。また、強い負荷を与える2分間漸増吸気負荷法もある<sup>66)</sup>。④耐久時間(Endurance time: ET)呼吸困難などにより中断した最大運動負荷量の2/3を定常負荷したときの持続できる時間を表わす。⑤横隔膜筋電図 疲労時は低周波成分(10~60 Hz)が増加し、高周波成分(120~350 Hz)の減少がみられ、H/L比の低下が認められる。

## 5. 呼吸筋疲労<sup>23)24)</sup>

### 1) 定義

呼吸筋疲労は、最大の吸気筋である横隔膜が筋疲労となり、その結果、正常な肺胞換気量を維持するために必要とする圧変化を、呼吸器系に持続して発生しえない状態と定義される。とくにCOPDでは呼吸筋疲労が呼吸不全の誘因となる場合が多く、神経筋疾患やレスピレーターからの離脱時にも呼吸筋疲労は問題となる。

### 2) 病態生理

一般に、筋疲労は収縮の程度(Tension)と収縮時間(Time)に依存することが知られる。すなわち、横隔膜の疲労は平均Pdi( $\bar{P}di$ )と最大Pdiの比( $\bar{P}di/Pdimax$ )と呼吸パターンにおけるduty cycle(吸気時間/1回換気に要する時間:  $Ti/T_{tot}$ )との積によって決定されたとしており、これはTTdi(Tension Time index)

と呼ばれ、この積が0.2以上になったら疲労が起こる。

### 3) 臨床所見

呼吸筋疲労の出現には一連の順序があり、初めに呼吸困難を伴った浅く、速い呼吸が出現し、次いで腹壁の奇異運動 (Hoover's sign) や交代性呼吸 (腹式呼吸と胸式呼吸が周期的に出現) が起こり、その後肺胞低換気によるCO<sub>2</sub>蓄積が認められるようになる。腹壁の奇異運動は視診にても可能であるが Konno-Mead ダイアグラムで定量化可能である。しかし、腹壁の奇異運動<sup>67)</sup>は、呼吸筋疲労よりも呼吸負荷の増大により出現するとの報告がある。

## 6. 呼吸筋トレーニング<sup>20) 25) 26) 27) 28) 29)</sup>

### 1) トレーニングの原則

骨格筋と同様に、呼吸筋もトレーニングにより強化することができる。特異性、過負荷、継続性の三つの原則

表 1 筋力トレーニング

報 告 者	対 象	訓練方法	筋力増加
Delhez, <i>et al.</i> (1966)	健常人	最大吸気	27%
Leith & Bradley (1976)	健常人	最大吸気	55%
Lecoq, <i>et al.</i> (1970)	COPD	最大吸気	50%
	TB	最大呼気	34%
Gross, <i>et al.</i> (1980)	外傷性四肢マヒ	吸気抵抗	42%
Asher, <i>et al.</i> (1982)	嚢胞性肺線維症	吸気抵抗	10%

表 2 耐久力トレーニング (1)過換気法

報 告 者	対 象	訓練方法	訓練時間・期間	効 果	耐運動能
Leith & Bradley (1976)	健常人	部分的再呼吸	45~60分 週 5 回・5 週間	SVC 15% ↑ MVV 14% ↑	
Keens, <i>et al.</i> (1977)	健常人	部分的再呼吸	25分 週 5 回・4 週間	SVC 22.1% ↑ MVV (—)	$\dot{V}O_{2max}$ (—)
	嚢胞性肺線維症	部分的再呼吸	25分 週 5 回・4 週間	SVC 51.6% ↑ MVV (—)	$\dot{V}O_{2max}$ (—)
Peress, <i>et al.</i> (1976)	COPD	SVC	25分 週 5 回・4 週間	SVC 23% ↑ MVV 11% ↑	
Belman & Mittman (1980)	COPD	SVC	15分 週 5 回・6 週間	SVC 33% ↑ MVV 5 l/min ↑	HR <sub>max</sub> 15/min ↑ 12MD 12% ↑
Martin (1984)	COPD	incentive spirometer (シリンダー内のボールを1秒20回上げる)	1秒20回を 1日2回 週 5 回・5 週間	MIP 47.2% ↑ MEP 31.2% ↑	ADL ↑
Levine, <i>et al.</i> (1986)	COPD	SVC	15分 週 5 回・6 週間	SVC 23 l/min ↑	ADL ↑ エルゴメーター・トレッドミルで運動能 ↑ 12MD ↑ 5 分間階段昇降 ↑ 心理テスト改善

SVC : 最大持続換気量    MVV : 最大換気量    MIP : 最大吸気圧    MEP : 最大呼気圧

$\dot{V}O_{2max}$  : 最大酸素摂取量    HR<sub>max</sub> : 最大心拍数    12MD : 12分間歩行距離

表 3 腹部の重り負荷

Barach & Beck (1954)	12°~18° 頭低位で横隔膜の動きが 2cm 増加
Barach (1955)	15°~20° 頭低位で 4~5 kg
Miller (1958)	20°~30° 頭低位で 8~10 lb (3.6~4.5 kg)
Gayrard (1968)	15° の頭低位は 10 lb (4.5 kg) と等しく、横隔膜は右 3.1 cm, 左 2.7 cm 偏位する。10 lb も 20 lb も横隔膜の偏位は変わらない。10 lb で 20 分呼吸すると FRC ↓ RV ↓
Adkins (1968)	横隔膜が持ち上げる力は 20 lb (9.1 kg)。1/4 lb (0.1 kg) ~ 20 lb まで、横隔膜の筋力低下があるときは 6 lb (2.7 kg) まで 6 lb 以上は過伸展される
金野 (1979)	500 g ~ 3 kg 3 kg 以上は腰筋、腹筋が関与する
Merrick & Axen (1981)	7~23 kg のトレーニング (等張性負荷) では最大吸気量 最大吸気流量 最大吸気圧は変化せず
Wetzel (1985)	5 lb (2.3 kg) から開始し、胸腹部の協調した動きが15分維持できる重量

が成り立つ。すなわち、特異性の原則は、筋力トレーニングでは筋力は増大するが、耐久力は増大しない。またその逆もいえる。過負荷の原則は、日常行っている運動では、その機能を向上させる適刺激とはならない。それを上回った負荷量が必要になる。継続性の原則は、トレーニングによる機能の向上は、その運動を中止すると速やかに消失する。以上の三原則を守らなければトレーニングの適刺激にはならない。また、トレーニング刺激に

は、種類・強度・時間・頻度などを考慮しなければならない。

## 2) 筋力トレーニング

骨格筋の筋力トレーニングの刺激には、最大筋力で1

回ないし数回の負荷でよいとされる。呼吸筋でも高張力・低頻度の刺激がよい。口腔を閉鎖し、最大吸気、最大呼気努力をする。3～5秒保持し、1日数回、週5回、5週間行くと呼吸筋力は強化できる。これは等尺性収縮

表 4 耐久力トレーニング (2)吸気抵抗負荷法

報告者	対象	訓練方法	訓練時間・期間	効果	耐運動能
Andersen <i>et al.</i> (1979)	COPD	フェイスマスクに一方 向弁をつけて奇異呼吸 出現まで吸気抵抗	5～10分 1日3回 8週間	耐久時間30秒か ら11分へ	
Gross <i>et al.</i> (1980)	外傷性四肢マヒ	Hans Rudolph 弁 7つの吸気抵抗	15分 1日2回 6週間	MIP↑ EMG で筋 疲労所見の出現の 遅れ	
Pardy <i>et al.</i> (1981 <sup>a</sup> )	COPD	Hans Rudolph 弁 40 cmH <sub>2</sub> O/L/sec	15分 1日1回 8週間	耐久時間 64.1%↑	12MD 12.5%↑ $\dot{V}O_{2max}$ 9%↑
Pardy <i>et al.</i> (1981 <sup>b</sup> )	COPD	Hans Rudolph 弁(1～ 9の吸気孔 4～370 cmH <sub>2</sub> O/L/sec) EMG で疲労所見の出現まで	15分 1日2回 8週間	MIP (－) 肺機能 (－) 耐久時間 40%↑	$\dot{V}O_{2max}$ 13%↑ 12MD 13%↑
Merrick & Axen (1981)	健常人	腹部に重り負荷 7～23 kg (等張性負荷)	30回吸気 1週3日 6週間	最大吸気量(－) 最大吸気流量(－) MIP(－)	
Bjeerre-Jepsen <i>et al.</i> (1981)	COPD	フェイスマスクに1～6 mmの吸気孔	15分 1日1回 6週間	吸気孔の内径減少 (3.5mmから2.25 mm)	階段昇り23%↑
Sonn & Davis (1982)	COPD	P-flex 類似器具(吸気 孔内径 0.47cm から 開始)	30分 1日1回 6週間	MVV 13%↑ 吸 気孔の内径56%減 少	$\dot{V}O_{2max}$ 15%↑ $\dot{V}E$ 17%↑ 最大仕事率37%↑
Asher <i>et al.</i> (1982)	嚢胞性肺 線維症	Hans Rudolph 弁 Pardy(1981 <sup>b</sup> )と同様	15分 1日2回 4週間	MIP 10%↑ 耐久時間 (－)	$\dot{V}O_2$ (－) $\dot{V}E$ (－) HR(－)
Jardim <i>et al.</i> (1982)	COPD	MIP の30%	20分 週5日 8時間	MIP 22.3%↑	$\dot{V}O_{2max}$ 20.2%↑ $\dot{V}E$ 19.3%↑
白井ら (1982)	COPD	Jバルブ吸気孔(6.5, 4.3, 2, 1.5, 1mm) MIP の50%前後	10分 1日4回1ヵ月間	MIP 40.7%↑ 耐容吸気抵抗↑	$\dot{V}O_{2max}$ 16%↑ トレッドミル時間 44%↑
Larson & Kim (1984)	COPD	Volume Plus TM re- spiratory exerciser 50 cmH <sub>2</sub> O/L/sec	15分 1日2回 4週間	MIP 37.3%↑	12MD (－) ADL (－)
Chen <i>et al.</i> (1985)	COPD	樹脂ガラス栓に(2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6 mm の吸気孔) SIP±10%	15分 1日2回 4週間	MIP 1%↑ SIP 59%↑ 肺機能 (－) 血液ガス (－)	最大作業能 (－)
Aldrich (1985)	人工呼吸 器から離 脱困難な 慢性呼吸 不全	P-flex を T字型の吸 気弁につけ O <sub>2</sub> 吸入し ながら MIP の15～20 %	5分から開始し30 分まで1日1～2 回 10日～24日間	MIP 42%↑ PaCO <sub>2</sub> 25.7%↓ 離脱可能	
Belman & Lewis (1986)	COPD	P-flex	15分 1日2回 6週間	呼吸パターンの指 導により耐久時間 10%↑ 呼吸数↓ 外部抵抗仕事量↓ 吸気時間↑	Borg の RPE↓
Larson <i>et al.</i> (1986)	COPD	MIP の 15% MIP の 30%	30分 1日1回2ヵ月間	15%, 30%両者と も改善しているが 30%の方がより改 善 MIP↑ SIP 耐久時間↑	12MD↑

MIP: 最大吸気圧 SIP: 最大持続吸気圧 MVV: 最大換気量 12 MD: 12分間歩行距離  
 $\dot{V}O_{2max}$ : 最大酸素摂取量  $\dot{V}E$ : 分時換気量 HR: 心拍数 RPE: 自覚運動強度

である。等張性収縮ならば、腹部、胸部に抵抗を加え、10 RMを測定し負荷量を決定する方法もよい。しかし、腹部<sup>45)</sup>に最大の重り負荷で30回、週3日、6週間行ったが、筋力は増大しなかったという報告もある。また、耐久力トレーニングの吸気抵抗負荷法でも、負荷量が大きいと筋力は増大している(表1)<sup>21) 30) 31) 32) 33)</sup>

### 3) 耐久力トレーニング

骨格筋での耐久力トレーニングの刺激には、最大筋力の20~30%で時間は長ければ長い程よいとされる。呼吸筋においても低張力、高頻度の刺激強度がよい。筋疲労を考えると筋力よりも耐久力の方が、より密接な関係にあるといえる。耐久力トレーニングには3つの方法があげられる。

#### ①過換気法

高換気で外部抵抗を加えない方法である。負荷には前述の SVC を用いて、1日3~5回、週5日、5週間行くと耐久力は増大する。簡便な方法として、外科手術後の呼吸訓練に用いられる呼吸訓練器 (incentive spirometer) の Inspirix, Triflo II, Hadson・Model などを用いる。それらは145~1800ml/secの吸気速度を維持することにより、シリンダー内のボールを持ち上げる方法で、すなわち過換気法であり、負荷速度関係に基づく、スピードのトレーニングでもある。あるいは深呼吸をして過換気する方法もあげられる。IDSEP, Souffle も死腔換気を負荷した再呼吸法で過換気法とも考えられる。しかし、CO<sub>2</sub>再呼吸では、PaCO<sub>2</sub>が増大するので、過換気法に最も適した死腔量はどの程度必要かは今後の課題である。(表2)<sup>21) 34) 35) 36) 37) 38)</sup>

#### ②吸気抵抗負荷法

正常換気で外部抵抗を加える方法である。実際に生体内では、吸気負荷だけのトレーニングは不可能で、外部抵抗に過換気を合わせた方法がより効果的である。負荷には前述の SIP<sup>22)</sup>を用いて1日2~4回、4~6週行い耐久力は増大する。吸気筋力の指標である MIP から考えると負荷量は MIP の30%あるいは40~60%が良い。ただし、人工呼吸器<sup>57)</sup>からの離脱や重度呼吸筋力低下群においては、MIP の15~20%から負荷を加えていく。簡便な方法として、吸気負荷練習器 P-flex を用いる。吸気は孔を通じて行い、呼気は一方向弁により呼出される。吸気孔の大きさを1.8mm~5.3mmの6段階に切り換えることにより、吸気抵抗を変化させる器具である。トレーニングする上で大切なことは流量<sup>58)</sup>によって抵抗の量は変化するので注意する。さらに P-flex 使用時の COPD で、呼気終末CO<sub>2</sub><sup>29)</sup>をみると小さい孔ではCO<sub>2</sub>が増大するが、大きい孔では過換気となりCO<sub>2</sub>が低

下する。最もよい効果を得るためには、4.6mmの孔 (No. 2)がCO<sub>2</sub>を一定にするのでよいとして、ゆっくり深い呼吸をすることが大切であるとしている。筆者は、チェスト社制バイタロパワー101を用い、まず MIP を測定し、その30%を負荷量としバイオフィードバックしながらトレーニングしている。負荷量と流量からみると、1l/secの流量では40~50 cmH<sub>2</sub>O/L/sec程度の負荷がよいとされる。過換気法のところで述べた従量型の incentive spirometer に抵抗が加わり、負荷量と流量を設定できる Volume Plus TM respiratory exerciser<sup>55)</sup>は簡便である。また、背臥位で上腹部に砂のうをのせて横隔膜呼吸を行う方法もよく行われる。その際、腹部の重り負荷はどの程度が最も適切であろうか。諸家の報告(表3)<sup>39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47)</sup>があるが、筆者は、前述の腹部隆起力を測定し、その30%で負荷させる方法を取っている。例えば、健常例では腹部隆起力は21.8 kgであったので、その30%で6.5 kgの重り負荷となりほぼ諸家の報告と一致する。以上、耐久力トレーニングをまとめると、1回5~10分長くて30分、週5~7回あるいは3~5回、4~16週間、負荷強度は MIP の30%あるいは40~60%、40~50 cmH<sub>2</sub>O/L/sec、腹部の重り(500 g~3 kg)、SVC などである。最もよいトレーニング方法は、Ti/Ttot、流量、一回換気量、呼吸数をフィードバックしながら吸気抵抗を加える方法がよいと思われる今後の課題である。(表4)<sup>32) 33) 45) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59)</sup>

#### ③運動療法

上記訓練の他に、運動負荷 (トレッドミル・エルゴメーター) や歩行・ランニング、水泳、ボードこぎ、上肢筋・体幹筋群の強化も呼吸筋の耐久力を増大させる。歩行については、12分間歩行距離 (12MD)、10分間歩行距離、6分間歩行距離、100m 歩行時間など簡単に評価することができる。12MD は最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) と高い相関を示し、12分間は酸素消費と耐久力を測定するのに最も適した時間である。運動療法時の至適負荷量として、歩行を例にとると、最大歩行中止時の心拍数の70~85%<sup>65)</sup>、 $\dot{V}O_{2max}$ の60~80%を1日20~30分、週3回以上行う。無理のない方法として O<sub>2</sub> 2~3l/分下で、3.2 km/分 (2 マイル/時) を10分行う。歩行距離では2000 m をゴールに100~200m/日増加させる。万歩計では、可能な速さで50~100歩の歩行から始め、500歩/週ずつ増加し5000~6000歩を目標とする。さらに吸気抵抗負荷法と運動療法とどちらが効果的であるか?<sup>63) 64)</sup>。いろいろな報告がされているが、吸気抵抗法では運動耐容能が増大するもの、運動耐容能は変わらないが吸気筋の耐久力は増大するというもの<sup>55) 56)</sup>、吸気抵抗法が運動療

表 5 耐久力トレーニング (3)運動療法

報 告 者	対 象	訓練方法	訓練時間・期間	効 果	耐運動能
Keens <i>et al.</i> (1977)	嚢胞性肺 線維症	水泳・カヌー	90分 1日1回 4週間	SVC 56.7%↑	$\dot{V}O_{2max}$ (—)
Pardy <i>et al.</i> (1981)	COPD	トレッドミル・エルゴ メーター, 階段昇降, 上肢筋力強化	1日1回 8週間	耐久時間 (—)	$\dot{V}O_{2max}$ 4%↑ 12MD 1%↑
Orenstein <i>et al.</i> (1981)	嚢胞性肺 線維症	ランニング HR <sub>max</sub> の70~80%	80分 3カ月間	SVC 50%↑ MVV (—) 肺機能 (—)	$\dot{V}O_{2max}$ 52%↑
Robinson & Kjeldgaard(1982)	健常人	ランニング HR <sub>max</sub> の 80%	40分 1日3回 20週間	SVC 15.8%↑ MVV 13.6%↑ MEP 14.4%↑ PIF 213.1%↑	
Bellman & Kendregan(1982)	COPD	上肢・下肢のエルゴメ ーター	20分 1日2回 週4回 6週間	SVC 8~11%↑ MVV (—)	$\dot{V}O_2$ (—)
Medsen <i>et al.</i> (1985)	COPD	可能な限り早い速度で 階段昇り	15分 1日3回 6週間	MIP (—)	12MD 19%↑ $\dot{V}O_{2max}$ 10%↑ 吸気流量 85%↑ 息切れ指数 44%↑

HR<sub>max</sub> : 最大心拍数

SVC : 最大持続換気量

MVV : 最大換気量

MEP : 最大呼気圧

PIF : 最大吸気流量

MIP : 最大吸気圧

 $\dot{V}O_{2max}$  : 最大酸素摂取量

12 MD : 12分間歩行距離

法より効果的であるもの<sup>42)68)</sup>, 全くその逆も報告されて  
いる<sup>63)64)</sup>。これらの相違は対象疾患の違いや評価法が  
多種に及んでいることにも起因すると考えられる。(表  
5)<sup>34)49)60)61)62)63)</sup>。

### おわりに

以上, 呼吸筋とそのトレーニングについて述べたが,  
現段階では, その方法は十分に確立されていない。今後  
トレーニングの種類, 強度, 期間など系統的な研究が望  
まれるところである。

御校閲いただいた当院リハビリテーション部の溝呂木  
忠課長, および御協力いただいた内田成男氏に深謝致し  
ます。

### 文 献

- De Troyer A., Loring, S.H. : Action of the respiratory muscles. Handbook of Physiology : The respiratory system. Macklem P.T., Mead J., eds. sect 3, vol. 3, Am Physiol. Soc. Bethesda., pp. 443-461, 1986.
- Loring, S.H., De Troyer A. : Actions of the respiratory muscles. The Thorax, Roussos C., Macklem P.T., eds., Marcel Dekker, New York, pp. 327-349, 1985.
- 菊池喜博 : 呼吸筋の力学一装置としての一。呼吸, 6 : 637-643, 1987.
- Rochester, D.F. : Respiratory muscle function in health, Heart & Lung, 13 : 349-354, 1984.
- 諏訪邦夫・他 : 呼吸筋不全, 呼吸, 6 : 8-22, 1987.
- 宮城征二郎・他 : 肺機能障害における前, 中, 後斜角筋の動向, 昭和61年度厚生省特定疾患呼吸不全調査班業績集, pp. 129-131, 1987.
- Arnold, J. S. *et al.* : Contractile properties of expiratory abdominal muscles : effect of elastase-induced emphysema, J. Appl. Physiol., 62(6) : 2314-2319, 1987.
- Sharp, J. T., Hyatt, R. E. : Mechanical and electrical properties of respiratory muscles. Handbook of Physiology : The Respiratory System, Macklem, P. T., Mead, J. eds., Sect 3, vol. 3, Am. Physiol. Soc. Bethesda, pp. 389-414, 1986.
- Edwards, R. H. T., Favlkner, J. A. : Structure and function of the respiratory muscles, The Thorax, Roussos, C., Macklem, P. T., eds., Marcel Dekker, New York, pp. 297-326, 1985.
- 有田秀穂 : 呼吸筋の力学一筋肉として, 呼吸, 6 : 515-520, 1987.
- Kararek, D. J. : Respiratory muscle function and fatigue, Pulmonary function tests in clinical and occupational lung disease, Miller A., eds., Crune & Stratton, pp. 405-411, 1986.
- Nochomovitz, M. L. *et al.* : Noninvasive evaluation of respiratory muscle function, Noninvasive respiratory monitoring, Nochomovitz, M. L. & Cherniack N. S., eds., Churchill Livingstone, pp. 167-187, 1986.
- 菊池喜博 : 呼吸筋力の指標, 呼吸, 3 : 1282-1288, 1984.
- 安本和正 : MIP と MEP, 呼と循, 32 : 1259-1264, 1984.
- Black, L. F., Hyatt, R. E. : Maximal respiratory pressures : Normal values and relationship to age and sex, Am. Rev. Respir. Dis., 99 : 696-702, 1969.
- Laporta, D. & Grassino, A. : Assessment of trans-diaphragmatic pressure in humans, J. Appl. Physiol., 58(5) : 1469-1476, 1985.
- 宮川哲夫・他 : 呼吸筋力の評価, 理学療法学, 14 (学会特別号) : 97, 1987.
- Ringquist, T. : The ventilatory capacity in healthy subjects : An analysis of causal factors with special reference to the respiratory forces. Scand. J. Clin.

- Lab. Invest., 18 (suppl. 88) : 5-179, 1966.
- 19) Mellin, G., Harjula, R. : Lung function in relation to thoracic spinal mobility and kyphosis, *Scand. J. Rehab. Med.*, 19 : 89-92, 1987.
  - 20) Kim, M. J. : Respiratory muscle training : Implications for patient care, *Heart & Lung*, 13 : 333-339, 1984.
  - 21) Leith, D.E., Bradley, M. : Ventilatory muscle strength and endurance training, *J. Appl. Physiol.*, 41(4) : 508-516, 1976.
  - 22) Nickerson, B.G., Keens, T.G. : Measuring ventilatory muscle endurance in humans as sustainable inspiratory pressure, *J. Appl. Physiol.*, 52(3) : 768-772, 1982.
  - 23) 金野公郎 : 呼吸筋, 呼吸, 3 : 1222-1232, 1984.
  - 24) Roossos, C., Macklem, P.T. : Inspiratory muscle fatigue, *Handbook of Physiology : The respiratory system*, Macklem, P. T., Mead, J., eds. Sect. 3, vol. 3, Am. Physiol. Soc. Bethesda, pp. 511-527, 1986.
  - 25) Wolfson, M. R. *et al.* : Respiratory muscle, *Cardiopulmonary physical therapy*, Irwin, S. & Tecklin, J. S. eds., C.V. Mosby, St. Louis., pp. 382-394, 1985.
  - 26) Pardy, R.L., Leith, D.E. : Ventilatory muscle training, *Respiratory Care*, 29 : 278-284, 1984.
  - 27) Sobush, D. *et al.* : Exercise prescription components for respiratory muscle training : past present and future, *Respiratory Care*, 30 : 34-42, 1985.
  - 28) Pardy, R.L., Leith, D.E. : Ventilatory muscle training, *The Thorax*, Roussos, C., Macklem, P.T., eds., Marcel Dekker, New York, pp. 1353-1370, 1985.
  - 29) Belman, J.M. : Ventilatory muscle training, *Respiratory muscles and their neuromotor control*, Sieck, G. C. *et al.* eds., Alan R. Liss, New York, pp. 363-372, 1987.
  - 30) Delhez, L. *et al.* : Modifications du diagramme pression-volume maximum de l'appareil thoraco-pulmonaire après entraînement des muscles respiratoires par des exercices statiques. *Arch. Int. Physiol. Biochem.*, 74 : 335-336, 1966.
  - 31) Lecoq, A. *et al.* : Reentrainement de la fonction motrice ventilatoire chez des insuffisants respiratoires chroniques, *Acta. Tuberc. Pneumol. Belg.*, 61 : 63-69, 1970.
  - 32) Gross, D. *et al.* : The effect of training on strength and endurance of the diaphragm in quadriplegia, *Am. J. Med.* 68., 27-35, 1980.
  - 33) Asher, *et al.* : The effect of inspiratory muscle training in patients with cystic fibrosis. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 126 : 855-859, 1982.
  - 34) Keens, T. G. *et al.* : Ventilatory muscle endurance training in normal subjects and patients with cystic fibrosis, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 116 : 853-860, 1977.
  - 35) Peress, L. *et al.* : Ventilatory muscle training in obstructive lung disease, *Bull. Eur. Physiopathol. Respir.*, 15 : 91-92, 1979.
  - 36) Belman, M. J., Mittman, C. : Ventilatory muscle training improves exercise capacity in chronic obstructive pulmonary disease patients, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 121 : 273-280, 1980.
  - 37) Martin, L.L. : Respiratory muscle function : A clinical study, *Heart & Lung*, 13 : 346-348, 1984.
  - 38) Levine, S. *et al.* : Evaluation of a ventilatory muscle endurance training program in the rehabilitation of patients with chronic obstructive pulmonary disease, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 133 : 400-406, 1986.
  - 39) Barack, A.L., Beck, G.J. : The ventilatory effects of head down position in pulmonary emphysema, *Am. J. Med.*, 16 : 55-60, 1954.
  - 40) Barack, A.L. : Breathing exercises in pulmonary emphysema and allied chronic respiratory disease, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 36 : 379-390, 1955.
  - 41) Miller, W.F. : Physical therapeutic measures in the treatment of chronic bronchopulmonary disorders : Methods for breathing training, *Am. J. Med.*, 24 : 929-940, 1958.
  - 42) Gayrard, P. *et al.* : The effects of abdominal weights on diaphragmatic position and excursion in man, *Clin. Sci.*, 35 : 589-601, 1968.
  - 43) Adkins, H.V. : Improvement of breathing ability in children with respiratory muscle paralysis, *Phys. Ther.*, 48 : 577-581, 1968.
  - 44) 金野公郎 : 呼吸訓練—その理論—, *日胸疾会誌*, 17 : 541-546, 1979.
  - 45) Merrick, J., Axe, K. : Inspiratory muscle function following abdominal weight exercises in healthy subjects, *Phys. Ther.*, 61 : 651-656, 1981.
  - 46) Detroyer, A. : Mechanical role of the abdominal muscles in relation to posture, *Respir. Physiol.*, 53 : 341-353, 1983.
  - 47) Wetzel, J. *et al.* : Respiratory rehabilitation of the patient with a spinal cord injury, *Cardiopulmonary physical therapy*, Irwin, S., Tecklin, J.S. eds., C.V. Mosby, St. Louis, pp. 359-420, 1985.
  - 48) Andersen, J.B. *et al.* : Resistive breathing training in severe chronic obstructive pulmonary disease—A pilot study—, *Scand. J. Resp. Dis.*, 60 : 151-156, 1979.
  - 49) Pardy, R.L. *et al.* : Inspiratory muscle training compared with physiotherapy in patients with chronic airflow limitation, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 123 : 421-425, 1981a.
  - 50) Pardy, R.L. *et al.* : The effects of inspiratory muscle training on exercise performance in chronic airflow limitation, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 123 : 426-433, 1981b.
  - 51) Bjerre-Jepsen, K. *et al.* : Inspiratory resistance training in severe chronic obstructive pulmonary disease, *Eur. J. Respir. Dis.*, 62 : 405-411, 1981.
  - 52) Sonne, C.J., Davis, J.A. : Increased exercise performance in patients with severe COPD following inspiratory resistive training, *Chest*, 81 : 436-439, 1982.
  - 53) Jardim, J.R. *et al.* : Inspiratory muscle conditioning training in COPD patients, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 125 (part 2 of 2) : 132, 1982.
  - 54) 白井誠一・他 : 慢性閉塞性肺疾患者の吸気抵抗負荷訓練の運動能力に及ぼす影響, *臨床呼吸生理*, 14 : 123-129, 1982.
  - 55) Larson, M., Kim, M.J. : Respiratory muscle training with the incentive spirometer resistive breathing device, *Heart & Lung*, 13 : 341-345, 1984.
  - 56) Chen, H.I. *et al.* : Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 131 : 251-255, 1985.
  - 57) Aldrich, T.K. : Inspiratory muscle resistive training



- in respiratory failure, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 131 : 461-462, 1985.
- 58) Belman, M.J., Lewis, M.I. : Resistive breathing training in patients with chronic obstructive pulmonary disease, *Chest*, 90 : 662-669, 1986.
  - 59) Larson, J.L. *et al.* : Inspiratory muscle training with a threshold breathing device in patients with COPD, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 133 : A100, 1986.
  - 60) Orenstein, D.M. *et al.* : Exercise conditioning and cardiopulmonary fitness in cystic fibrosis, *Chest*, 80 : 392-398, 1981.
  - 61) Robinson, E.P., Kjeldgaard, J.M. *et al.* : Improvement in ventilatory muscle function with running, *J. Appl. Physiol.*, 52(6) : 1400-1406, 1982.
  - 62) Belman, M.J., Kendregan, B.A. : Physical training fails to improve ventilatory muscle endurance in patients with chronic obstructive pulmonary disease, *Chest*, 81 : 440-443, 1982.
  - 63) Madsen, F. *et al.* : Inspiratory resistance versus general physical training in patients with chronic obstructive pulmonary disease, *Eur. J. Respir. Dis.*, 67 : 167-176, 1985.
  - 64) Jones, D.T. *et al.* : Physical exercise and resistive breathing training in severe chronic airways obstruction—are they effective? *Eur. J. Respir. Dis.*, 67 : 159-166, 1985.
  - 65) Bell, C.W. : Exercise test evaluation and training, Home care and rehabilitation in respiratory medicine, Bell, C.W. *et al.* eds., Lippincott, New York, pp. 35-49, 1984.
  - 66) Martyn, J.B. *et al.* : Measurement of inspiratory muscle performance with incremental threshold loading. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 135 : 919-923, 1987.
  - 67) Tobin, M.J. *et al.* : Does rib cage-abdominal paradox signify respiratory muscle fatigue? *J. Appl. Physiol.* 63(2) : 851-860, 1987.
  - 68) Ries, A.L., Moser, K.M. : Comparison of isocapnic hyperventilation and walking exercise training at home in pulmonary rehabilitation. *Chest*, 90 : 285-289, 1986.