

□最近のトピックス□

ウィーニングと呼吸筋訓練

宮川 哲夫*

はじめに

ICUで人工呼吸管理を受けている患者の90～95%は数時間から2～3日の間には離脱可能であるが、COPDなどの慢性呼吸不全や神経筋疾患では離脱不全となることもある。人工呼吸器からの離脱においては、呼吸筋に負荷を与えない部分的な換気サポートがよいのか、呼吸筋に負荷を与えるトレーニングが必要なのか、現在のところ、もっとも良い方法は確立されていない。おそらく両者の併用が有効であると思われる。ここでは人工呼吸中の呼吸筋訓練法について概説する。

1. 休息

人工呼吸器で呼吸筋を完全に休息させること(CMV)は呼吸筋の代謝を回復させる。COPDや急性呼吸不全の呼吸筋ではグリコーゲンやATPの不足が認められるが、数週間の人工呼吸管理ではそれらが回復してくる。動物による実験では呼吸筋代謝は数時間から数日間で回復するとされている。しかし、呼吸筋のオーバーロードによる呼吸筋線維の破壊がある場合には、呼吸筋の回復にはより長期の安静が必要とされる¹⁾。一方、人工呼吸器による完全な休息では呼吸筋の廃用性萎縮を起こす危険性があるが、呼吸筋の廃用性萎縮については現在のところよく知られていない。CMVで11日間行ったヒヒの実験ではPdiが46%、呼吸筋耐久力が37%低下したと報告している²⁾。

2. 部分的換気サポート

自発呼吸を残した部分的換気補助により呼吸筋の廃用性萎縮を予防し、ウィーニングによる呼吸

筋疲労を避け呼吸仕事量を軽減させることができる。補助呼吸では自発呼吸と比べ、呼吸仕事量の60%程度は存在し、呼吸中枢と呼吸筋は働いており、横隔膜筋放電が確認されている。SIMVにおいてはSIMVの数を上げると呼吸仕事量は減少するが、その程度は比例しない。SIMVの数を変えても横隔膜や胸鎖乳突筋の筋放電や呼吸中枢の吸気アウトプットは変化せず、自発呼吸、補助呼吸との差はないとされ、SIMV、補助呼吸では呼吸筋の安静度は低く、休息にはならないとされる³⁾。一方、PSVにおいては高いサポート圧では胸鎖乳突筋や横隔膜の筋放電は減少し、呼吸筋疲労を回避することができ、呼吸筋の休息という意味では自発呼吸、補助呼吸、SIMVよりも有効な換気モードである⁴⁾。そして、低いサポート圧では呼吸筋の廃用性萎縮を避けることができる。マスクによる非侵襲的陽圧換気や体外式陰圧呼吸でも呼吸筋筋放電は減少し呼吸筋の休息にはなるが、その程度は陰圧呼吸よりも陽圧呼吸のほうが大きい。

3. ウィーニングに要する期間

人工呼吸器からの離脱において、どのモードがより早くウィーニング可能かについては、PSVのほうがIMVやon-off法に比べて有意に早いという報告がある⁵⁾。また、1日1回Tピース法を試し、補助呼吸で休息を与える方法がIMVやPSVよりも有意に早く、IMVとPSVには差はなかったとの報告もある⁶⁾。しかし、1日1回の自発呼吸と十分な休息を取ることが呼吸筋のreconditioningにもっともよい刺激となったかははっきりしていない。

* 昭和大学リハビリテーション医学診療科

表 1 呼吸筋不全の原因

-
- 1) 呼吸筋, 神経の機能低下
- ① 呼吸中枢のアウトプットの低下
 - ② 横隔神経不全
 - ③ 神経筋疾患
 - ④ 呼吸筋力・耐久力の低下
 - 肺過膨脹
 - 低栄養
 - 酸素供給の不足
 - 呼吸性アシドーシス
 - 水・電解質異常
 - 腎不全
 - 内分泌疾患
 - 薬物の副作用
 - 呼吸筋萎縮
 - 呼吸筋疲労
- 2) 呼吸筋負荷の増加
- ① 換気需要の増加
 - 二酸化炭素産生の増加
 - 死腔換気の増加
 - 不適切な呼吸ドライブの増加
 - ② 呼吸仕事量の増加
-

(Tobin MJ, Alex CG: Discontinuation of mechanical ventilation. Principles and Practice of Mechanical Ventilation, Edited by Tobin MJ. pp 1177-1206, New York, McGraw-Hill Inc, 1994 より引用)

4. 呼吸筋不全

人工呼吸器からの離脱失敗の原因は一つの因子だけでなく、多くの因子が複雑に絡み合っているが、なかでも呼吸筋不全によるものがもっとも多い。その原因を表 1 に示すように⁹⁾、呼吸筋機能とそれに対する負荷のアンバランスにより起こる。

呼吸筋機能からみたウィーニングのパラメータには、① $f < 30$ b/min, ② $V_T > 5$ ml/kg, > 300 ml, ③ $f/V_T < 105$ b/min/ $l^{7)8)$, ④ $VC > 15$ ml/kg, ⑤ $MV < 10$ l/min, ⑥ $MVV > 2 \times MV$, ⑦ P_{Imax} (MIP) > 20 cmH₂O, ⑧ $P_i/P_{Imax} < 0.3^9) \sim 0.4$, ⑨ pressure time index = $P_i/P_{Imax} \times T_i/T_{TOT} < 0.15^{10)$, ⑩ $WOB_p < 0.8$ J/ $l^{11)$, ⑪ $P_{0.1} < 6$ cmH₂O, $P_{0.1}/MIP < 0.09^{12)$,

⑫ $RAW < 15$ cmH₂O/ l/sec , ⑬ $C_{ST} > 25$ ml/cmH₂O, ⑭ auto PEEP < 3 cmH₂O, ⑮ $VD/V_T < 0.6$ などが報告されている。呼吸筋不全の理学的所見には、① 浅くて速い呼吸, ② abdominal paradox (吸気時に腹部が陥没し, 上胸部が膨隆する), ③ 吸気時の肋間の陥没, ④ 胸骨上窩・鎖骨上窩の陥没, ⑤ 胸鎖乳突筋・斜角筋などの吸気補助筋の活動, ⑥ respiratory alternans (胸式呼吸と腹式呼吸を交互に繰り返す) などが認められ, このような理学的所見がある場合にはウィーニング困難である。

1990 年に行われた NHLBI の呼吸筋疲労のワークショップでは呼吸筋疲労と呼吸筋筋力低下の定義は異なるとした¹³⁾。呼吸筋疲労は負荷に対する仕事により, 筋収縮力・収縮速度が低下した状態であり休息により回復する。すなわち呼吸筋の休息, 人工呼吸器が必要である。一方, 呼吸筋筋力低下は休息を与えても筋収縮力が低下した状態で, 呼吸筋の強化が必要であるとした。また, COPD の高炭酸ガス血症の原因は呼吸筋疲労ではなく, 呼吸筋筋力低下が原因であり, 呼吸筋不全の主な問題は呼吸筋疲労ではなく, 呼吸筋筋力低下であるとしている¹⁴⁾。そして, 高炭酸ガス血症では呼吸筋耐久力より, 呼吸筋力の強化が重要であるともしている¹⁴⁾。

5. 呼吸筋訓練

呼吸筋訓練には, 特異性, 過負荷, 継続性の 3 つの原則がある。特異性の原則は筋力訓練では筋力が増加し, 耐久力訓練では耐久力が増加する。過負荷の原則は安静呼吸よりも強い負荷強度でないと強化にはならない。継続性の原則は訓練を中止すると機能は低下する。

今まで報告されている人工呼吸離脱不全に対する呼吸筋訓練では, 7 日以上人工呼吸管理を行っている 40 人を対象に, 不安感の抑制に前頭筋の筋弛緩訓練とプレスチモグラフによる腹式呼吸の biofeedback 訓練を行った結果, 対照群に比べ, V_T と換気に対する横隔膜の関与度が増加し, 有意に離脱期間の短縮を認めたと報告している¹⁵⁾。biofeedback 訓練として, 人工呼吸器の V_T と f のデジタル表示をみせて深くゆっくりした腹式呼

吸を行い離脱に成功した報告もある。27人の人工呼吸依存患者を対象にP-FLEX™を用い、8～28 cmH₂O/l/s（フローは250 ml/s）の負荷で30分負荷を行った結果、VCとP_{imax}は有意に増加し、12例は10～46日で離脱に成功し、5例は夜間のサポートのみとなった¹⁶⁾。また、体重約1200 gの未熟児に対し、鼻プロングに75～250 cmH₂O/l/s（フローは1 l/m）の負荷を、TcPco₂が5%上昇するまであるいは1時間まで、2週間行った結果、吸気時間と呼吸数が低下し吸気筋力が有意に増加したと報告している¹⁷⁾。頸髄損傷患者を対象とした離脱においても同様に報告されている¹⁸⁾。

一般に、呼吸筋筋力の評価にはVC、P_{imax}を指標にし、CPAPで30分以上自発呼吸可能な場合には呼吸筋力はあると判断する。十分なV_TならばSIMVの数を減じ、V_Tが不十分ならばPSVを追加する。呼吸筋耐力の評価にはf、V_T、P_i/P_{imax}（V_T/VCと同じ）、MVV、pressure time indexなどを指標にする。CPAPで30分以上自発呼吸に耐えうるならば、耐久力訓練としてfが30 b/min以上に増加するまで、V_Tが50 mlあるいは10%低下するまで自発呼吸を行い、2時間の自発呼吸ならば2時間の休息を与え1日1～3回行い少しずつ時間を延長する¹⁹⁾。呼吸筋疲労を起こした場合には48時間の休息を与える。

このような方法で離脱困難な場合には、呼吸筋に負荷をかける方法を用いる。一般に、吸気抵抗を負荷する方法と抵抗をかけない過換気を行う方法と運動療法に大別される。負荷強度は吸気抵抗法ではP_{imax}の30～70%、40～90 cmH₂O/l/sec、過換気法ではMVVの60%を10～30分行う。圧トリガーの人工呼吸器の場合には、トリガー圧をP_{imax}の30～70%に設定すると簡単に吸気負荷をすることができるが、フロートリガーの場合には吸気ラインにP-FLEX™や小児用気管チューブコネクターなどの小孔やincentive spirometryを取り付け吸気筋訓練を行う。運動療法は呼吸筋を含め、頸部筋、体幹筋、上肢筋の強化を行う。背臥位から開始し、坐位、立位、足踏みへと早期離床を促進させる。長期人工

表 2 呼吸筋トレーニング開始時と離脱時の呼吸機能の変化 (n=13)

	開始時	離脱時
RR (bpm)	39±6	28±7**
V _T (ml)	225±101	391±51**
f/V _T (b/ml)	175±82	89±24**
MV (l/m)	9.2±4.5	9.3±3.7
MVV (l/m)	14.7±4.1	24.8±5.2*
FVC (ml)	588±121	884±228**
FEV _{1.0} (ml)	378±124	524±273
P _{imax} (cmH ₂ O)	25.5±9.5	33.5±4.2*
P _E max (cmH ₂ O)	34.3±10.6	43.7±20.1

** : P<0.01, * : P<0.05

(宮川哲夫：慢性呼吸不全急性増悪時の呼吸管理。人工呼吸 11：192, 1994より引用)

呼吸の場合には呼吸器の蛇管を延長し、ベッド回りの歩行から開始し、自己バッグによる換気を行いながら歩行訓練を行う。

呼吸筋訓練の目標は、①一回換気に要した吸気筋力を減少、②最大吸気筋力の増大、③吸気時間の短縮、④呼吸数を低下させ、一回換気量を増加、⑤吸気呼吸補助筋から横隔膜呼吸への改善である。

離脱に難渋した慢性呼吸不全急性増悪15例を対象に呼吸筋訓練として、サーボ900C™のCPAP、PSVモードでP_{imax}の30%のトリガーを設定し吸気負荷を与えた²⁰⁾。この際には呼吸循環動態をモニターし10分から徐々に耐久時間を増加させた。その結果、15例中13例は離脱に成功し、離脱した13例の人工呼吸器装着期間は27.4±18.9 (18～79)日であった。ウィーニングのパラメータは表2に示すように有意に改善した。しかし、離脱に難渋した症例1は結核後遺症で夜間のCO₂ retentionが原因し入退院を繰り返していた。年々、人工呼吸器装着日数が増加しており、呼吸筋訓練を行うも離脱困難であった。そこで夜間鼻マスクによるBiPAP™を使用し、201日目に日中の離脱に成功し248日目に退院し、退院後の入退院は著明に減少した。症例2は肺気腫で肺炎が原因し離脱困難となった。栄養状

態を改善させ呼吸筋訓練と on-off 法を併用し、183 日目に夜間の PSV のみとなった。慢性呼吸不全の離脱には、急性期には呼吸仕事量を減少させた人工呼吸器による安静が必要であるが、長期に及ぶ場合は呼吸筋の廃用性萎縮もあり呼吸筋訓練および栄養状態の改善が必要であると思われた。また、夜間鼻マスクを用いた非侵襲的人工呼吸による休息との併用も有効であると思われた。

また、神経筋疾患だけではなく、呼吸筋不全患者の呼吸筋にはセントラルコアという筋病理学的異常構造物が認められ、3 カ月以上の人工呼吸器装着患者では呼吸筋訓練により呼吸筋の破壊を招く可能性もあり、このような場合には呼吸筋訓練はかえって弊害となると示唆している²¹⁾。しかし、神経筋疾患の離脱においては、より重度な多発性神経炎を合併した場合には平均離脱期間は 136 日であるのに対し、合併しない場合は 52 日であった²²⁾。われわれの症例でも多発性神経炎の患者の離脱に難渋し、105 日目に Passy-Muir speaking valveTM を使用して会話可能となったから呼吸筋力が改善し、日中の人工呼吸からの離脱が 157 日目に可能となり、夜間みの鼻マスクによる BiPAPTM となった症例を経験した。

6. 離脱不全に対する報告

50 日以上長期人工呼吸装着患者 403 人をウィーニングセンターで集中的に離脱を行うことにより、死亡した 116 人を除いた 287 人中 212 人は平均 39 日で離脱可能となっている²³⁾。また、COPD の人工呼吸器からの離脱期間は、ICU の看護婦の技能が高ければ有意に早くなるとの報告²⁴⁾や呼吸療法士を含む呼吸ケアチームアプローチで早くなる²⁵⁾との報告がある。呼吸療法士により人工呼吸管理した場合と、医師による管理を比較すると呼吸療法士が管理した場合、有意に離脱期間の短縮がみられたとの報告もある²⁶⁾。長期人工呼吸中の患者では神経筋疾患があるとないつにかかわらず、高率に嚥下障害や誤嚥が認められる²⁷⁾。誤嚥性肺炎の危険性がない場合は、気管切開チューブのカフの空気を抜いて発声可能か調べ、可能ならば Passy-Muir speaking valveTM を用いて会話させる。人工呼吸中の会話が可能に

なることで、呼吸筋訓練や動気づけにもなり、離脱可能となることをしばしば経験する。誤嚥の危険性のある場合には会話用気管切開チューブを用いる。それはカフ上部に開口部のあるルートへ酸素または空気を流すことにより会話が可能となる。

おわりに

人工呼吸器からの離脱に苦渋する場合には安静とトレーニングの併用が有効であり、現在のところ、もっともよい方法については知られていない。しかし、安静、呼吸筋訓練、栄養、会話、などを含めた包括的チームアプローチが必要である。

参考文献

- 1) Fitting JW : Respiratory muscle during ventilatory support. *Eur Respir J* 7 : 2223-2225, 1994
- 2) Azueto A, Tobin MJ, Moore G, et al : Effect of prolonged mechanical ventilation on diaphragmatic function ; a preliminary study of baboon model. *Am Rev Respir Dis* 135 : A 201, 1987
- 3) Imsand C, Feihl F, Perret C, et al : Regulation of inspiratory neuromuscular output during synchronized intermittent mechanical ventilation. *Anesthesiology* 80 : 13-22, 1994
- 4) Brochard L, Harf A, Lorino H, et al : Inspiratory pressure support prevents diaphragmatic fatigue during weaning from mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 139 : 513-521, 1989
- 5) Brochard L, Rauss A, Benito S, et al : Comparison of three methods of gradual withdrawing from ventilatory support weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 150 : 896-903, 1994
- 6) Esteban A, Frutos F, Tobin MJ, et al : A comparison of four methods of weaning patients from mechanical ventilation. *N Engl J Med* 332 : 345-350, 1995
- 7) Tobin MJ, Alex CG : Discontinuation of mechanical ventilation. *Principles and Prac-*

- tice of Mechanical Ventilation, Edited by Tobin MJ. pp 1177-1206, New York, McGraw-Hill Inc, 1994
- 8) Epstein SK : Etiology of extubation failure and the predictive value of the rapid shallow breathing index. *Am J Respir Crit Care Med* 152 : 545-549, 1995
 - 9) Yang KL : Inspiratory pressure/ maximal inspiratory pressure ratio ; a predictive index of weaning outcome. *Intensive Care Med* 19 : 204-208, 1993
 - 10) Zakythininos SG, Vassilakopoulos T, Rousos C : The load of inspiratory muscles in patients needing mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 152 : 1248-1255, 1995
 - 11) Kiriton OC, DeHaven CB, Morgan JP, et al : Elevated imposed breathing masquerading as ventilator weaning intolerance. *Chest* 108 : 1021-1025, 1995
 - 12) Capdevia XJ, Pererigault PF, Perry PJ, et al : Occlusion pressure and its ratio to maximum inspiratory pressure are useful predictors for successful extubation following T-piece weaning trial. *Chest* 108 : 482-489, 1995
 - 13) NHLBI Workshop Summary : Respiratory muscle fatigue. *Am Rev Respir Dis* 142 : 474-480, 1990
 - 14) Rochester DF : Respiratory muscle weakness, pattern of breathing and CO₂ retention in COPD. *Am Rev Respir Dis* 143 : 901-903, 1991
 - 15) Holliday JE, Hyers TM : The reduction of weaning time from mechanical ventilation using tidal volume and relaxation feedback. *Am Rev Respir Dis* 141 : 1214-1220, 1990
 - 16) Aldrich TK, Karpel JP, Uhrlass RM, et al : Weaning from mechanical ventilation ; adjunctive use of inspiratory muscle resistive training. *Crit Care Med* 17 : 143-147, 1989
 - 17) Tan S, Duara S, Neto GS, et al : The effects of respiratory training with inspiratory flow resistive loads in premature infants. *Pediatr Res* 31 : 613-618, 1992
 - 18) Lerman RM, Weiss MS : Progressive resistive exercise in weaning high quadriplegics from the ventilator. *Paraplegia* 25 : 130-135, 1987
 - 19) 古賀俊彦, 宮川哲夫, DM Burns : 呼吸筋訓練の適応と実際. *Medical Practice* 9 : 1395-1398, 1992
 - 20) 宮川哲夫 : 慢性呼吸不全急性増悪時の呼吸管理. *人工呼吸* 11 : 192, 1994
 - 21) 石原傳幸 : 神経筋疾患. *内科* 71 : 703-707, 1993
 - 22) Maher J, Rutledge F, Remtulla H, et al : Neuromuscular disorders associated with failure to wean from the ventilator. *Intensive Care Med* 21 : 737-743, 1995
 - 23) Shheinhorn DJ, Artinan BM, Carton JL : Weaning from prolonged mechanical ventilation ; the experience at a regional weaning center. *Chest* 105 : 534-539, 1994
 - 24) Therons JB, Kaelin RM, Jolliet P, et al : Influence of the quality of nursing on the duration of weaning from mechanical ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Crit Care Med* 23 : 1807-1815, 1995
 - 25) Cohen IL : Weaning from mechanical ventilation—the team approach and beyond. *Intensive Care Med* 20 : 317-318, 1994
 - 26) Wood G, MacLeod B, Moffatt S : Weaning from mechanical ventilation ; physician-directed vs a respiratory-therapist-directed protocol. *Respir Care* 40 : 219-224, 1995
 - 27) Tolep K, Getch CL, Criner GJ : Swallowing dysfunction in patients receiving prolonged mechanical ventilation. *Chest* 109 : 167-172, 1996
-