

□ 会長奨励賞 原著 □

呼吸筋力と換気パラメーターの関係

聖マリアンナ医科大学病院リハビリテーション部
横山 仁志

ABSTRACT

Relationship between respiratory muscle strength and ventilatory parameters

Hitoshi Yokoyama

Department of Rehabilitation Medicine, St. Marianna University School of Medicine Hospital, Kawasaki 216-8511

The purpose of this study is to examine the relationship between respiratory muscle strength and ventilatory parameters and to clarify the clinical significance of respiratory muscle strength. Subjects were 129 mechanically-ventilated patients with acute respiratory failure (67.1 ± 16.7 years). The maximum inspiratory pressure (MIP), tidal volume (V_T), respiratory rate/tidal volume (f/V_T) were measured in these subjects before extubation, and success and failure of the extubation was examined. As a result, significant correlations were observed between MIP and V_T ($r=0.51$, $p<0.01$) and between MIP and f/V_T ($r=-0.51$, $p<0.01$). In particular, in the range where MIP is below 40 cmH₂O, stronger correlations were observed both with V_T ($r=0.53$, $p<0.01$) and with f/V_T ($r=-0.61$, $p<0.01$). Further, in the range where MIP is below 30 cmH₂O, a marked increase in f/V_T was observed accompanied by a significant increase in the number of cases of extubation failure ($\chi^2=39.1$, $p<0.01$). Consequently, it was considered that respiratory muscle strength strongly affected for success of weaning from mechanical ventilation and extubation, and that it is important to have known the level of respiratory muscle strength in patients with respiratory diseases.

1. はじめに

呼吸筋力の多寡は、呼吸リハビリテーションや人工呼吸器からの離脱（以下、ウィーニング）において重要である¹⁾³⁾。呼吸筋力の低下が、一回換気量をはじめとする換気パラメーターに影響を与えることは、臨床場面において明らかである。しかし、その関係を明確に提示した検討はなされていない。そのため呼吸器疾患患者のリハビリテーションやウィーニングを実施するうえで、どの程度の呼吸筋力の低下が問題とされるかは不明確であり、臨床場面で活用可能なデータが不足しているのが現状である。

そこで本研究では、呼吸筋力と換気パラメーターの関係について検討し、呼吸筋力の臨床的意義を明らかにすることを目的とした。

2. 対象

対象は、当院リハビリテーション部がウィーニング目的で介入した挿管下人工呼吸器管理中の急性呼吸不全患者129例（男性74例、女性55例、平均年齢67.1±16.7歳、身長157.2±9.7cm、体重54.6±11.5kg、Body Mass Index 21.9±3.4kg/m²、人工呼吸器装着期間8.8±7.6日）である。対象者の人工呼吸器管理に至った疾病の内訳は、胸腹部外科術後61例、肺炎29例、循環器疾患12例、消化器疾患10例、神経筋疾患7例、熱傷5例、脊髄損傷5例であった。対象者の筋弛緩薬、鎮静薬の投与は、ウィーニングを開始した時点で可及的に中止し、抜管直前に意識が清明、指示動作が十分に可能であり、各測定に同意と協力が得られたもののみを対象とした。

なお、静的肺コンプライアンス ≤ 25 ml/cmH₂O、気道

抵抗 $\geq 15\text{cmH}_2\text{O/l/sec}$ の症例、および慢性肺疾患を有する症例は対象から除外した。

3. 方法

前述した対象者の抜管直前に測定した呼吸筋力、換気パラメーター、および抜管の成否について診療記録より後方視的に調査し、検討を行った。

ウィーニングは、人工呼吸器管理に至った原疾患の改善、胸部画像所見の改善、循環動態を含む全身状態の安定、 $\text{P/F ratio} \geq 200$ 、 $\text{PaCO}_2 \leq 50\text{torr}$ を開始基準とした。それらの基準を満たした場合、人工呼吸器の設定を調節呼吸から可及的速やかに圧支持換気(Pressure support ventilation;以下、PSV)に変更、PSVの増減によるウィーニングを進めた、PSV下のウィーニングでは $\text{P/F ratio} \geq 200$ 、 $\text{PaCO}_2 \leq 50\text{torr}$ 、一回換気量(以下、 V_T)/体重 $\geq 5\text{ml/kg}$ (あるいは $V_T \geq 250\text{ml}$)、呼吸数(以下、 f) ≤ 30 回/min、 $f/V_T \leq 105$ 回/min/L、循環動態の安定、異常呼吸パターンの出現、呼吸困難感の有無を基準として進めた、そして、 $\text{PSV} \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $\text{PEEP} \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ あるいはT-ピースまで設定を減じた場合に気管チューブの抜管が検討された。

いずれの対象者も、抜管直前の $\text{PSV} \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $\text{PEEP} \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ あるいはT-ピース下で管理された状態で、一時的に人工呼吸器、T-ピースを外して呼吸筋力、換気パラメーターの測定を実施した。以下に調査・測定項



図1 呼吸筋力測定機器(Chest社製バイタロパワー KH-101)
本機器は本体とセンサー部分で構成されている。圧力センサーが内蔵されているセンサーと被検者を連結することで、被検者が吸気努力した際に生じる陰圧を圧センサーが感知し、本体より読み取ることで吸気圧の測定が可能となる。

目の詳細を示した。

1) 呼吸筋力

呼吸筋力は、吸気筋力の代替値として活用される最大吸気圧(Maximum Inspiratory Pressure;以下、MIP)を採用した。その測定には、人工呼吸器接続用の蛇腹を装着したChest社製バイタロパワー KH-101(図1)を用いた。そして、対象者に挿入された気管チューブに直接バイタロパワーを装着し、最大呼気位からの最大吸気努力によって生じる陰圧を測定した。測定には十分な休息をとりながら3回施行し、その最大値を採用した。なお、本研究におけるMIPの測定値はすべて絶対値で表示した。

2) 換気パラメーター

換気パラメーターは、 V_T および換気効率を反映する指標として汎用されている f を V_T で除した f/V_T を採用した。それらはガス流量計RM121(図2)を用いて、気管チューブに直接装着し、 f を計測しながら分時換気量を測定したり。そして、得られた分時換気量を f で除した値を $V_T(L)$ として求め、さらに f/V_T (回/min/L)を算出した。

3) ウィーニングの成否

本研究におけるウィーニングは、人工呼吸器による機械換気から離脱し、気管チューブの抜管までを示しており、MIP、各換気パラメーターの測定直後に実施し



図2 ガス流量計RM121
ガス流量計内を通過する気体(被検者の呼気)によって、内部の扁平な羽根車が回転する。その回転に対応した流量(換気量)がパネルに表示される。

た気管チューブの抜管の成否について調査した。その成否の判定は、抜管後3日以内に呼吸筋疲労によって再挿管、あるいは非侵襲的陽圧換気法を必要とした場合には不成功とした。

気管チューブの抜管の判断は、 $PSV \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $PEEP \leq 5\text{cmH}_2\text{O}$ あるいは T-ピース下において前述したウィーニングの進行基準に、意識が清明、咳嗽反射の有無、 $MIP \geq 20\text{cmH}_2\text{O}$ 、肺活量/体重 $\geq 15\text{ml/}$ 体重を加え、担当医が総合的に判断して抜管を実施した。また本研究では、各換気・換気予備能の指標が不十分な症例においても、患者家族による抜管希望や長期の挿管管理のため気管チューブ入れ替えの際に一時的に抜管し経過観察した症例を含んでいる。

以上の得られた結果から、はじめに MIP と V_T 、および f/V_T の関連について検討した。次に、その関連にウィーニングの成否を加えた。そして、 MIP を $20.0\text{cmH}_2\text{O}$ 未満、 $20.0 \sim 29.9\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $30.0 \sim 39.9\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $40.0\text{cmH}_2\text{O}$ 以上に筋力区分し、それらのウィーニング不成功例の割合から MIP とウィーニングの関連についてみた。な

おその検討からは、抜管後に原疾患の増悪、誤嚥性肺炎、中枢気道部の狭窄によって再挿管に至った症例、および再挿管予防のために抜管直後から非侵襲的陽圧換気法を併用した15例は除外した。

統計的手法はPearsonの相関係数、 χ^2 検定を用い、危険率1%を有意水準とした。

4. 結果

1) MIP と換気パラメーターの関連

図3に MIP と V_T の関係を示した。両者の間には有意な正相関を認めた ($r=0.51$, $p<0.01$)。しかし、その関係は単純な直線回帰を示さず、図中破線で示す $MIP 40\text{cmH}_2\text{O}$ 付近に変曲するポイントを認めた。 MIP が $40\text{cmH}_2\text{O}$ を上回る症例では、 V_T との間に有意な相関を認めなかった ($r=0.03$, NS)。一方、 $40\text{cmH}_2\text{O}$ を下回る症例では、 $r=0.53$ と強い正相関を認めた ($p<0.01$)。

次に MIP と f/V_T の関係を図4に示した。両者の間にも有意な相関関係を認めるものの ($r=-0.51$, $p<0.01$)、

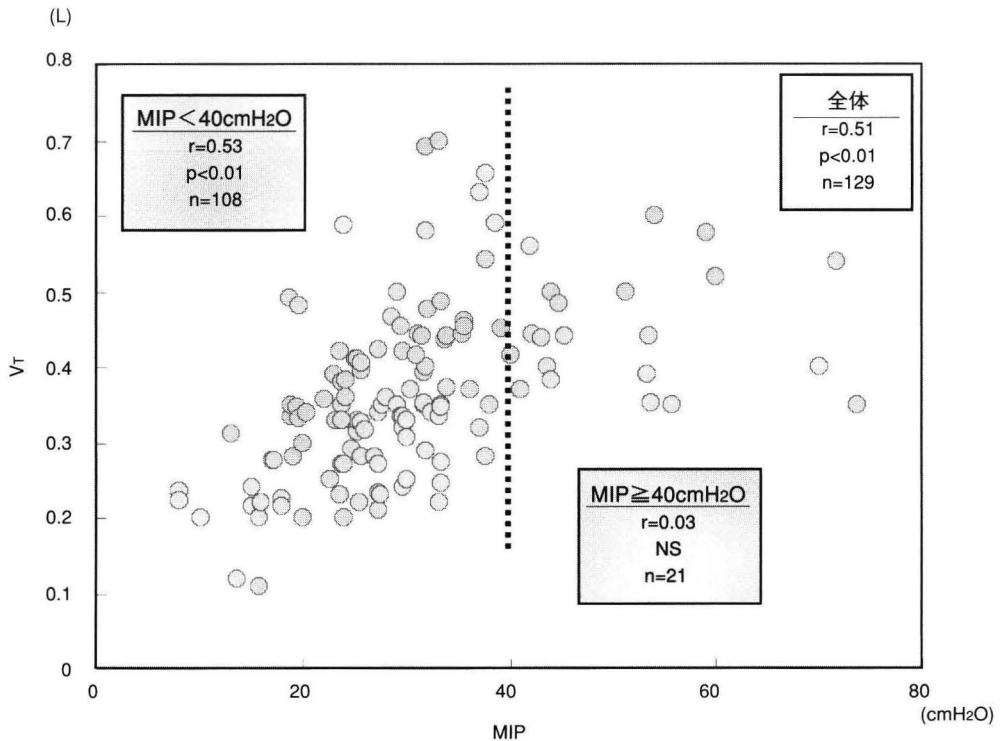


図3 MIP と V_T の関係

MIP と V_T の間には有意な正の相関を認めた。しかし破線で示す $40\text{cmH}_2\text{O}$ を上回る場合、両者の間に有意な相関は認めなかった。一方、 $40\text{cmH}_2\text{O}$ を下回る場合には有意な正相関を認めた。

MIPと V_T の関係と同様、40cmH₂O付近に変曲するポイントが存在していた。MIPが40cmH₂Oを下回る症例においては、 $r=-0.61$ ($p<0.01$)と強い負の相関を認め、MIPの低下にともなって f/V_T の顕著な上昇を示した。

2) MIPとウィーニング成否の関連

図5にはMIPと f/V_T の関係にウィーニングの成否を加えた散布図を示した。MIPの低下にともなってウィーニング不成功例が増加する傾向を認めた。そこで図6には、MIPを20.0cmH₂O未満、20.0～29.9cmH₂O、30.0～39.9cmH₂O、40.0cmH₂O以上に区分し、その筋力区分毎のウィーニング不成功例の割合を示した。その結果、ウィーニング不成功例の割合は、順に60% (12例/20例)、14% (6例/43例)、0% (0例/35例)、0% (0例/16例)とMIPが30.0cmH₂O未満の低い筋力区分において有意に高値を示した(χ^2 値=39.1, $p<0.01$)。

5. 考察

呼吸器疾患患者の呼吸筋力低下が、臨床場面で重要視

されていることは周知の事実である^{1), 2), 5)}。しかし、ウィーニング・抜管の過程や呼吸筋力を改善する治療場面において、どの程度の呼吸筋力低下が換気量に大きく影響を及ぼすかは不明確で、問題視すべき筋力水準については十分に理解されていない。そこで、呼吸筋力の臨床的意義について呼吸筋力と換気パラメーター、さらにはウィーニングの成否との関連性から検討した。

まず、MIPと換気パラメーターの関連をみた場合、MIPと V_T の間には有意な正の相関を認め、呼吸筋力は、換気量に影響を及ぼす重要な要因であることが再確認された。しかし、この両者の関係は単純な直線回帰を示さず、MIP40cmH₂O付近を境に2つの関係を有していた。すなわち、MIPが40cmH₂O以上の症例では、MIPの大小に関わらず V_T はおおよそ一定の値を示しており、その水準は0.5L前後と正常値⁶⁾に近似していた。一方、MIPが40cmH₂O未満の症例では、MIPの多寡にともなって V_T の変動幅が大きく、両者は密接に関連していた。これらの関係からMIPが40cmH₂Oを上回る場合、呼吸筋力の変動は換気量に与える影響は少なく、正常

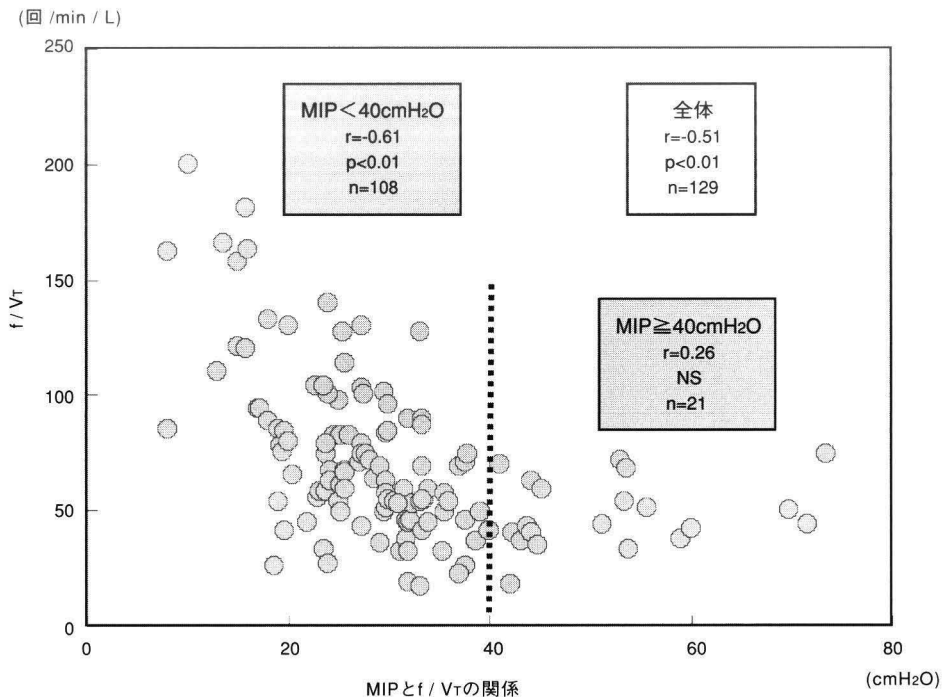


図4 MIPと f/V_T の関係

MIPと f/V_T の間には40cmH₂O(破線)を上回る場合には有意な相関を認めなかったが、40cmH₂Oを下回る場合に強い負の相関を認めた。

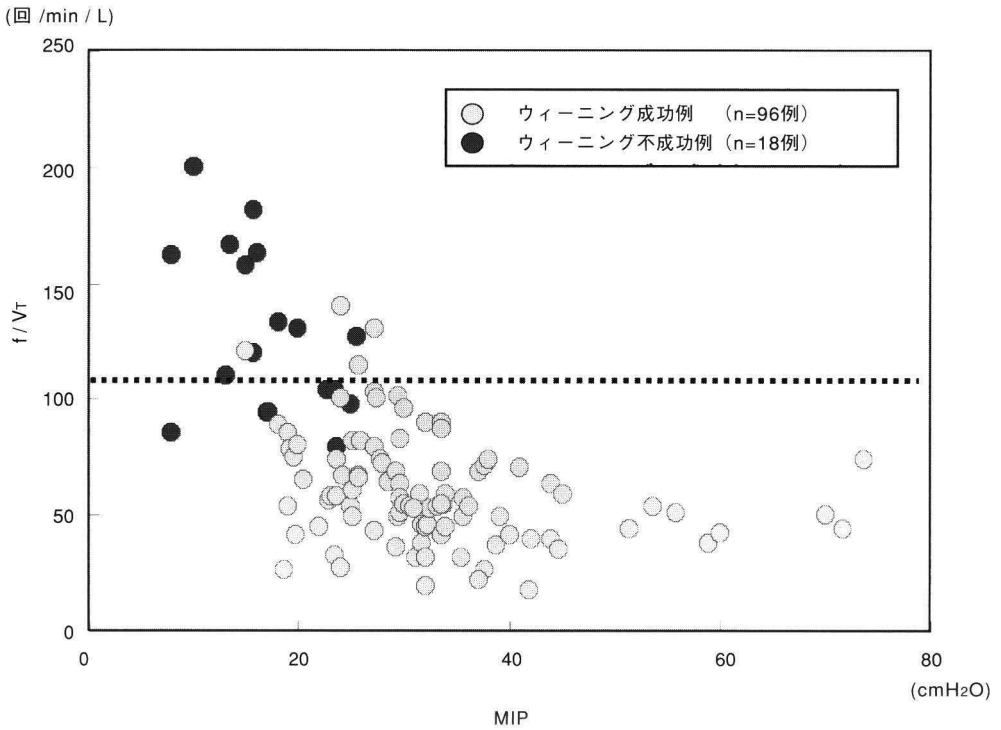


図5 MIP と f/V_T およびウィーニング成否の関係

MIP と f/V_T の関係にウィーニングの成否を加えた散布図で、図中破線は f/V_T からみたウィーニング成否のカットオフライン (105 回/min/L) を示した⁷⁾。MIP が 30cmH₂O 付近を下回る場合、 f/V_T がカットオフラインを上回る症例が急増し、それにともなってウィーニングの不成功例が増加する傾向にあった。

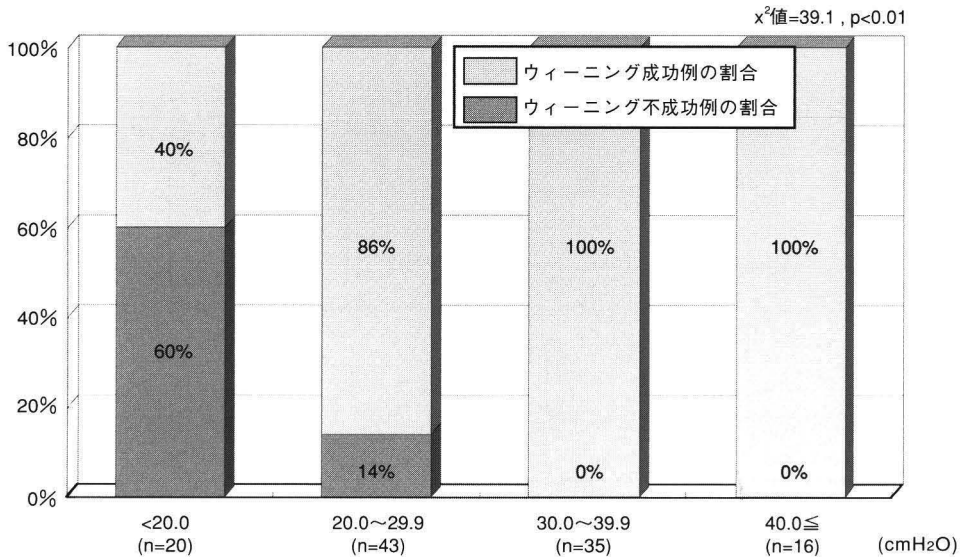


図6 筋力区分ごとのウィーニング成否の割合

MIP を 4 つの筋力区分に分類し、ウィーニングの成否の割合をみた結果、ウィーニング不成功例の割合は低い筋力区分で有意に高値を示した。

に近似した換気量が維持されることが推察された。しかしMIPが40cmH₂Oを下回る場合には、呼吸筋力の低下が換気量の制限に大きく寄与するものと考えられた。同様に、MIPと換気効率を反映するf/V_Tの関連においても、MIPの低下に伴ってf/V_Tは高値を示し、換気効率の悪化を生じていた。その影響は、前述したV_Tが低下しはじめる40cmH₂O付近に一致して顕著であった。この背景には、呼吸筋力の低下を契機にV_Tが制限され、低下した換気量を呼吸数の上昇で代償する機序が作用したものと考えられた。以上の点から、呼吸筋力と各換気パラメーターの間には密接な関連を認め、特に40cmH₂O付近のMIPは、換気量や換気効率に影響をおよぼし始める重要な筋力水準であることが明らかとなった。

また、f/V_Tは換気効率を反映するのみでなく、ウィーニングの成否を判断する優れた感度をもった予測因子である。100～105回/min/Lをカットオフラインとしてその水準を上回る場合には、ウィーニングが困難になることが報告されている^{3),7)}。本研究では、MIPとf/V_Tの関係にウィーニングの成否を加えて検討した結果、MIPが30cmH₂O未満の症例において、そのカットオフラインを上回る症例が増加し、それにもなつてウィーニング不成功例が急増していた。これらの関係から30cmH₂Oを下回るMIPでは、ウィーニングの成否に関連する顕著な換気効率の悪化を生じはじめるものと推察された。また、MIPの面からみたウィーニングの成否判定には、20～30cmH₂O程度であることが先行研究で示されている^{3),8)}。それらは今回の結果とおおよそ一致していたことより、従来から成否判定に用いられているMIPの水準には、呼吸筋力低下を契機として換気パラメーターに悪影響を及ぼしている背景が存在するものと推察された。

以上のことより、呼吸筋力には40cmH₂O未満で換気量の低下・換気効率の悪化を生じ始め、30cmH₂O未満でウィーニングに関連する顕著な換気効率の悪化を示すという重要な臨床的意義を含んでいる。そのため、呼吸器疾患患者における呼吸筋力水準の把握は重要であると考えられた。また、呼吸器疾患患者において低下した呼吸筋力の改善は不可欠である。本研究で示した筋力水準を下回る症例の呼吸筋力の改善は、換気量の増大に大きく寄与する可能性が示唆され、その重要性がより高いものと考えられた。低下した呼吸筋力の改

善方法は呼吸筋トレーニングが代表的である^{1),5)}。COPDの領域では、その有用性や適応範囲が明らかとなりつつある⁹⁾。しかし、ウィーニング・抜管過程の症例に至っては、方法や有用性に関する臨床データが不足しているのが現状である。また、呼吸筋力を改善する方法のひとつに機械換気を用いた“呼吸筋の休息”も近年注目されつつあるが、十分な科学的根拠の検証にまでは至っていないのが現状である^{10),12)}。今後、低い呼吸筋力水準の症例に対する呼吸筋力の改善方法の模索が重要な課題となるものと考えられた。

最後に、今回換気パラメーターに与える影響を呼吸筋力の面から検討したが、換気量に影響を与える要因には、呼吸筋力以外にも肺コンプライアンスや気道抵抗も重要である^{13),14)}。しかし、本検討から、それらに問題を有する症例や慢性肺疾患患者は除外した。臨床では、そのような症例でウィーニングやリハビリテーションに難渋する症例がより多く存在する。今後はそのような要因を加味して詳細な検討を行い、より臨床場面に活用可能なデータを提示していく必要があると考えられた。

引用文献

- 1) American Thoracic Society/European Respiratory Society: ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med* 166: 518-624, 2002
- 2) MacIntyre NR, Cook DJ, Ely EW, et al: Evidence-based Guidelines for weaning and discontinuing ventilatory support. A collective task force facilitated by the American college of chest physicians; Association for respiratory care; and the American college of critical care medicine. *Chest* 120: S375-S395, 2001
- 3) Maeda MO, Guyatt GH, Cook DJ, et al: Predicting success in weaning from mechanical ventilation. *Chest* 120: S400-S424, 2001
- 4) 相馬一亥: 非侵襲的な呼吸モニタリング, チーム医療のための呼吸循環管理マニュアル. 塚本玲三, 相馬一亥編. 東京, 医学書院, 2002, pp82-94
- 5) Lisboa C, Borzone G: Ventilatory muscle training, In *Rehabilitation of the Patients with Respiratory Disease*. Cherniack NS, Altose MD. New York,

McGraw-Hill, 1999, pp519-527

- 6) 田村昌士：肺の呼吸機能とその異常(2), 呼吸器病学(第3版). 本間日臣編. 東京, 医学書院, 1990, pp117-128
 - 7) Yang KL, Martin J, Tobin MJ : A prospective study of indexes predicting the outcome of trials of weaning from mechanical ventilation. *New England J Med*324: 1445-1450, 1991
 - 8) Leitch EA, Moran JL, Grealley B : Weaning and extubation in the intensive care unit:clinical or index-driven approach? *Intensive Care Med*22:752-759, 1996
 - 9) Lotter F, Tol BV, Kwakkel G, et al: Effect of controlled inspiratory muscle training in patients with COPD: a meta-analysis. *Eur Respir J*20:570-576, 2002
 - 10) 飛田渉:呼吸筋疲労の治療. *ICUとCCU*21:547-550, 1997
 - 11) 神津玲, 山崎裕司, 浅井政治ほか:人工呼吸管理下の理学療法とウィーニング. *理学療法*20:953-962, 2003
 - 12) 横山仁志:長期人工呼吸管理と離脱困難. *呼吸器ケア* 2005 夏季増刊: 250-260, 2005
 - 13) Tobin MJ:Respiratory monitoring in the intensive care unit. *Am Rev Respir Dis*138:1625-1642, 1988
 - 14) 横山仁志, 近藤美千代, 安井奈津子ほか:肺コンプライアンスと換気量の関係. *理学療法学* 32(suppl): 371, 2005
-