

自発呼吸トライアルの限界を超えて —呼吸筋予備力から考えるウィーニング

時岡宏明

KEY WORDS ... ウィーニング, 抜管, 自発呼吸トライアル, 呼吸筋

要 旨

ウィーニングは自発呼吸トライアル (spontaneous breathing trial : SBT) が標準的手段であるが、ウィーニング困難例では再挿管率が高く予後も不良である。SBTは抜管時の自発呼吸の可否を評価するが、抜管後の呼吸維持能力は評価できない可能性がある。抜管判断には、最大呼吸筋力strengthと呼吸筋負荷loadに加え、呼吸筋の持続力enduranceの観点から呼吸筋予備力を評価することを提唱する。Enduranceは、生理学的研究から現在負荷/最大能力 (load/capacity) によって推定可能であり、本稿ではその逆数である最大能力/現在負荷 (capacity/load) を『呼吸筋予備力』と定義した。呼吸筋予備力を実臨床で簡便に評価する方法として、努力肺活量 (forced vital capacity : FVC) /一回換気量 ≥ 2 およびFVC $\geq 15\text{mL/kg}$ が抜管成功と関連する可能性が示されたが、さらなる検討が必要である。呼吸筋予備力の評価はSBT後の抜管判断を補完する可能性があるが、その有用性については今後の前向き研究による評価が望まれる。

I はじめに

ICUにおいて人工呼吸はその治療の根幹をなすが、すべての人工呼吸患者は適切な時期にウィーニング・抜管を行うことが求められる。人工呼吸期間が長くウィーニングが遅れると、気道の損傷、人工呼吸器関連肺炎の増加、ICU日数も死亡率も増加する。一方、ウィーニング・抜管に失敗して再挿管した場合は、再挿管時の誤嚥や心筋虚血の合併症、ICU日数の増加、SOFAスコアの増加、死亡率の増加を認める^{1,2)}。ウィーニング・抜管までに時間を要しても、あるいは抜管に失敗しても予後は不良である。ウィーニングの最終段階である気管チューブ抜管は、失敗なく適切なタイミングで実施することが重要である。ウィーニング・抜管は自発呼吸トライアル (spontaneous breathing trial : SBT) が標準的手段となっている³⁾。しかし、ウィーニング期間を要するウィーニング困難例では、SBTに成功しても再挿管率が高いことが報告されている³⁾。このことはSBTのみでは呼吸維持能力を十分に評価できていない可能性を示唆している。

本稿ではSBT後の抜管の課題を整理するとともに、呼吸筋のstrengthとenduranceの生理学的関係をふまえ、SBTを補完する抜管の指標としての呼吸筋予備力とその臨床応用について解説する。

II SBT後の抜管の課題

ウィーニングは原則として人工呼吸を始めた原因がコントロールされれば開始される。意識レベルは応答可能が望ましく、循環器系は心不全がなく少量のカテコールアミンで血行動態が維持、呼吸器系は十分な呼吸筋力が求められる。具体的には肺感染症などの呼吸器疾患がコントロールされて、ガス交換能と横隔膜疲労を起こさない呼吸筋の機能が求められる。

ウィーニングの方法は施設により異なるが、毎朝応答可能な状態でSBTを行い、成功した場合に抜管することが標準的な方法となっている。世界50カ国のウィーニングのWEAN SAFE studyでは、抜管患者の再挿管率は14%である³⁾。ウィーニングの簡単なshort weanの再挿管率2%に対して、ウィーニング期間を要するウィーニング困難なintermediate wean、prolonged weanはそれぞれ32%、72%と高い。さらに再挿管患者の死亡率は30%

元 岡山赤十字病院 麻酔科
[受付日：2026 年 6 月 18 日 採択日：2026 年 9 月 17 日]

自発呼吸トライアルの限界を超えて —呼吸筋予備力から考えるウィーニング

と高い。ウィーニング困難例におけるSBTは抜管の判断としては十分でない可能性がある。

SBTの方法には主にpressure support ventilation (PSV)とT-pieceがある。PSVとT-pieceでの予後は変わらない^{4,5)}。ウィーニング成功率はPSVが高いとのランダム化比較試験⁴⁾がある一方で差がないとの報告もある⁵⁾。いずれの方法も注意すべき点がある。抜管時とPSV 4cmH₂O前後が同程度の呼吸仕事量なので、一般的なPSV 5～8 cmH₂OによるSBTは抜管後の呼吸仕事量を過小評価する可能性がある⁶⁾。一方、T-pieceはSBTで呼吸筋疲労を起こす危険性がある。SBTは各施設で慣れた方法で行い、その限界を知ることが大切である。

いずれの方法のSBTにおいても、ウィーニング困難例では再挿管率が高く、再挿管の予後が悪い。抜管の判断はSBT以外に各施設での基準が設定されていると考えられるが、予後改善のためSBT後の抜管判断を補完する指標について、さらなる検討が必要である。

Ⅲ SBT後の抜管失敗の原因

SBTに成功しても再挿管になる原因がある。第一は意識レベルの低下である。応答できない場合は積極的な痰の喀出が困難であり、また誤嚥の危険性が高い。気管切開の適応となる場合も多い。第二は気道狭窄である。太い気管チューブ、高いカフ圧などによる。第三は反回神経麻痺である。太い気管チューブや挿管時の損傷などによる。第四は分泌物過多による痰の喀出困難である。喀痰の吸引が2時間に1回以上必要な場合は肺感染症をコン

トロールしてからの抜管が望ましい⁷⁾。これらの気道保護能や気道クリアランスに関する問題は、気管挿管下では抜管後の状態を正確に予測することが困難な場合がある。第五は循環動態の破綻で、その1例として潜在性心不全がある。PEEPを用いたSBTでは抜管後に胸腔内圧が陽圧から陰圧となり、左心系の前負荷、後負荷の増加で肺うっ血、低酸素血症を来すために、十分な評価はできない。よって、潜在性心不全がある場合はPEEP 0cmH₂OでSBTを行うことにより評価は可能となる。

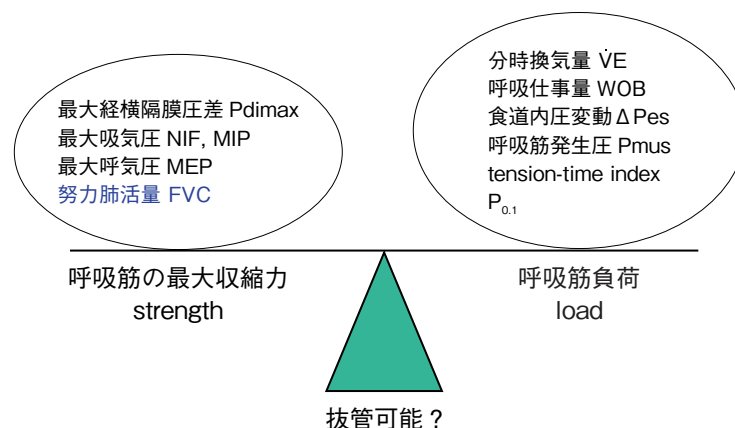
さらに、抜管後の呼吸負荷に対する呼吸筋の能力不足も抜管失敗に関与する可能性がある。SBTはその時点で自発呼吸が可能かどうかを評価するものであり、抜管後に増大する呼吸負荷に長時間耐え得るかどうかを必ずしも評価するものではない。SBT成功後の抜管失敗に呼吸筋疲労あるいは呼吸筋能力の不足がどの程度関与するかは明らかではなく、SBT成功後の患者を対象とした多施設研究でも横隔膜機能障害は抜管失敗を予測しなかった⁸⁾。本稿では、SBTでは十分に評価できない可能性のある抜管後の呼吸持続能力に着目する。

Ⅳ 呼吸筋予備力の生理学的考察と臨床応用

1. 呼吸筋の評価 (図1)

呼吸筋には横隔膜、肋間筋、腹筋およびその他の呼吸補助筋が含まれるが、安静吸気の主な担い手は横隔膜であることから、本稿では主として横隔膜の生理学的知見をもとに呼吸筋予備力について考察する。

抜管の指標として、呼吸筋の最大収縮力 (strength) を



抜管の可否は、最大収縮力 strength と呼吸筋負荷 load の評価だけでは不十分
呼吸筋の持続力 endurance の観点から呼吸筋予備力の評価を検討

図1 呼吸筋の最大収縮力と呼吸筋負荷の関係

図は呼吸筋の最大収縮力strengthと呼吸筋負荷loadの指標を列挙したが、抜管の可否は抜管時のstrengthとloadの評価だけでは不十分である。抜管後も持続的に呼吸を続けるためのenduranceの観点から呼吸筋予備力を評価することが考えられる。

自発呼吸トライアルの限界を超えて
—呼吸筋予備力から考えるウィーニング

評価する最大吸気圧、努力肺活量 (forced vital capacity: FVC)、最大経横隔膜圧差などがある。一方、呼吸筋負荷 (load) を評価する分時換気量、呼吸筋発生圧、呼吸仕事量、食道内圧の変動、tension-time index、 $P_{0.1}$ などがある。

呼吸筋機能は、瞬間的な最大収縮力のstrengthと持久力のenduranceから評価される。Strengthは最大経横隔膜圧差や最大吸気圧で比較的簡単に評価できるが、enduranceは本来、吸気抵抗下で呼吸を維持できる時間によって評価されるため、測定が煩雑であり実臨床での評価が課題となる。

横隔膜は約半数が遅筋で構成され、残りを中間筋と速筋が占める。遅筋および中間筋は疲労耐性が高いので、横隔膜は呼吸筋疲労に強い。速筋は咳嗽や喀痰の咯出に必要な瞬発的収縮を担う。抜管の可否の判断には速筋要素のstrengthだけでなく、抜管後も持続的に収縮を続けるための遅筋要素のenduranceについても考慮する必要がある。

2. 呼吸筋予備力の概念

本稿では、呼吸筋の最大能力/現在負荷 (capacity/load) を『呼吸筋予備力』と定義する。

Roussosらは、ヒトの経横隔膜圧差/最大経横隔膜圧差と横隔膜の収縮の続く時間との関連を調べ、経横隔膜圧差が最大収縮力の40%以上になると、その収縮を持続できないことを示した⁹⁾。その結果から、enduranceは本来、呼吸負荷下で呼吸を維持できる時間によって評価されるが、最大能力に対する現在負荷の比 (load/capacity) から推定できると考えられる⁹⁾。同様にHartらは、呼吸筋のenduranceが本来の呼吸の持続時間の測定を行わなくても、現在負荷と最大能力の比 (load/capacity) によって推定できることを報告した¹⁰⁾。

実臨床においても、ウィーニングの成否と呼吸筋の現在負荷と最大能力の関係 (load/capacity) との関連が報告された。Vassilakopoulosらは、ウィーニング失敗例では平均吸気圧/最大吸気圧が40%以上であることを示した¹¹⁾。ただし、この研究はSBT成功後の抜管失敗を予測することを示したものではない。

ウィーニングではstrengthのみならず、enduranceの評価も重要である。上記のように、enduranceは現在負荷/最大能力 (load/capacity) から推定可能である。本稿では、その逆数である最大能力/現在負荷 (capacity/load) を「呼吸筋予備力」と定義し、値の高いものは予備力が大きいとした。呼吸筋予備力を実臨床で簡便に評

価する方法の確立が求められる。

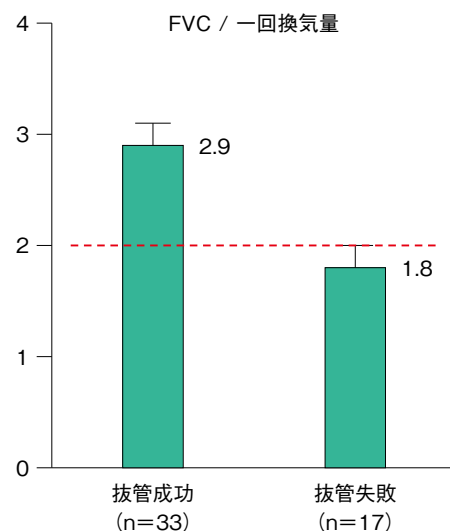
3. 呼吸筋予備力の臨床的評価

1) 生理学的概念の臨床応用

呼吸筋予備力の評価として、食道内圧あるいは経横隔膜圧差の測定は煩雑であり実臨床では限界がある。そこで呼吸筋予備力の概念を実臨床で応用するためにFVCを用いた。FVCはstrengthの近似的な臨床的指標である。また、FVC/一回換気量は最大能力/現在負荷 (capacity/load) の関係を臨床的に近似して評価する1つの方法であり、呼吸筋予備力を反映する指標となる可能性がある。さらに、FVCが増加すると、一回換気量は同じであっても全酸素消費量に占める呼吸仕事量の割合は低下することが報告されており¹²⁾、FVCを呼吸筋の最大能力を近似する指標として用いることを支持する生理学的知見の1つと考えられる。

2) FVCを用いた臨床応用

本稿では、呼吸筋予備力という生理学的概念を実臨床へ応用した例として、FVCを用いた評価法を紹介する。岡山大学病院ICUにおける単施設検討では、FVC/一回換気量 ≥ 2 、FVC $\geq 15\text{mL/kg}$ (予測体重) が抜管成功を予測する指標となる可能性が示された (図2)¹³⁾。FVC/一回換気量 ≥ 2 は最大能力の50%以下の負荷に相当し、生理



【図2】 抜管の成否と努力肺活量/一回換気量 (文献13より転載)

術後および急性呼吸不全50例の抜管前あるいはウィーニング中止時に、努力肺活量 (FVC)/一回換気量を測定した。FVC/一回換気量は抜管成功群2.9に対して失敗群1.8、FVCは平均で成功群17.2mL/kg、失敗群12.0mL/kgであり、FVC/一回換気量 ≥ 2 は抜管成功と関連することが示されている。FVCはstrengthの臨床的代用であり、本稿ではFVC/一回換気量を最大能力/現在負荷 (capacity/load) の関係、すなわち呼吸筋予備力を臨床的に近似する指標となる可能性があると考えられる。なお、FVCは患者を人工呼吸器から一時的に外して自発呼吸の状態でWrightのスプライロメーター (British Oxygen Company、英国) により測定した。

自発呼吸トライアルの限界を超えて
—呼吸筋予備力から考えるウィーニング

学的研究で示された「横隔膜は最大収縮力の40%以上の収縮を持続できない」Roussosらの結果とも整合する⁹⁾。なお、一施設での臨床応用例として岡山赤十字病院救命救急センターICUでは、FVC/一回換気量 ≥ 2 を基準とし、一回換気量の基準値7mL/kgをもとに、SBTに加えてFVC ≥ 15 mL/kgを抜管判断の参考とした。ただし、COPDなどでFVC ≥ 15 mL/kgを満たすことが困難な場合は、FVC ≥ 12 mL/kgを目安として、呼吸数、分時換気量、分泌物の過多など他の指標も併せて総合的に評価して抜管した。単施設後方視的検討では、この方法を用いた再挿管率はT-pieceによるSBTでは6%、PSVによるSBTでは8%であった¹⁴⁾。しかし、これらの値は現時点では確立した抜管基準ではない。

FVCを呼吸管理に応用した報告は他にもある。Chevroletらは、Guillain-Barré症候群において、肺活量15mL/kg以下が人工呼吸管理を要する1つの目安となる可能性を示した¹⁵⁾。乳児においても、抜管成功例の多くで号泣時の換気量crying vital capacityが一回換気量の2倍以上、15mL/kg以上であった¹⁶⁾。Crying vital capacityはFVCに相当する。これらは限られた施設での臨床応用例であり、現時点では十分なエビデンスは確立されていない。その有用性については今後の前向き研究による評価が待たれる。

FVCの測定は、図2の研究では患者を一時的に人工呼吸器から外して自発呼吸の状態でWrightのスパイロメーターを用いたが、現在は人工呼吸器の換気量モニターを使用し、PSV 0cmH₂O、PEEP 0cmH₂Oで行っている。測定に際して、患者の協力や努力の得られない場合は、閉鎖吸引回路から生理的食塩水2mLを注入して咳を誘発し、咳嗽時の換気量をFVCの代用とした。

注意が必要な例外として、横隔神経麻痺でも外肋間筋、呼吸補助筋の収縮でFVCが15mL/kg以上となることがある。明らかな胸式呼吸を呈する場合は、横隔神経麻痺の有無を、横隔膜エコーで呼吸性の横隔膜運動を観察することにより評価する。

V 抜管成功率の向上のための補足

1. 抜管の可否に迷うときは患者に聞く

SBT後の抜管の判断にユニークな論文がある。SBTに成功した患者のうち、抜管の自信ありと答えた群の抜管成功率90%に対して、自信なし群45%、コントロール群78%であった¹⁷⁾。患者自身の感覚も呼吸筋予備力を反映している可能性があり、患者の訴えも抜管判断に重要な

情報となる。

2. 横隔膜疲労からの回復

Laghiらは横隔膜疲労を起こすと経横隔膜圧差は低下、その後緩やかに回復するが24時間後も前値の85%までしか戻らないことを報告した¹⁸⁾。横隔膜疲労の回復には十分な換気補助が必要である。SBTに関しても、SBT後に1時間人工呼吸器に戻すと抜管の成功率が86%から95%に上がるとされた¹⁹⁾。またSBTは1日1回に比べて複数回行っても抜管の成功率は改善しないばかりか、PSVのSBTでは抜管成功までの時間が長くなることも報告された⁵⁾。SBTで横隔膜を疲労させない、もしも疲労した場合は十分な換気補助を行うことが重要である。

VI まとめ

SBTはウィーニングの標準的手段であるが、ウィーニング困難例ではSBTをクリアしても再挿管率が高いので、SBT後の抜管判断には課題が残されている。本稿では、呼吸筋の最大収縮力strengthと呼吸筋負荷loadに加えて、呼吸筋の持続力enduranceの観点から、最大能力/現在負荷(capacity/load)を「呼吸筋予備力」と定義し、SBTを補完する可能性のある抜管指標として提唱した。呼吸筋予備力を臨床的に近似する方法の1つとしてFVCおよびFVC/一回換気量を用いた評価法を紹介したが、呼吸筋予備力の臨床的有用性やSBTを補完する指標としての有用性は現時点では確立されていない。今後、前向き臨床研究による評価が望まれる。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) Thille AW, Harrois A, Schortgen F, et al : Outcomes of extubation failure in medical intensive care unit patients. Crit Care Med. 2011 ; 39 : 2612-8.
- 2) Béduneau G, Pham T, Schortgen F, et al : Epidemiology of weaning outcome according to a new definition the WIND study. Am J Respir Crit Care Med. 2017 ; 195 : 772-83.
- 3) Pham T, Heunks L, Bellani G, et al : Weaning from mechanical ventilation in intensive care units across 50 countries (WEAN SAFE) : a multicentre, prospective, observational cohort study. Lancet Respir Med. 2023 ; 11 : 465-76.
- 4) Subirà C, Hernández G, Vázquez A, et al : Effect of pressure support vs T-piece ventilation strategies during spontaneous breathing trials on successful extubation among patients receiving mechanical ventilation : A randomized clinical trial. JAMA. 2019 ; 321 : 2175-81.
- 5) Burns KE, Wong J, Rizvi L, et al : Frequency of screening and

自発呼吸トライアルの限界を超えて
—呼吸筋予備力から考えるウィーニング

- spontaneous breathing trial techniques : A randomized clinical trial. *JAMA*. 2024 ; 332 : 1808-21.
- 6) Brochard L, Rua F, Lorino H, et al : Inspiratory pressure support compensates for the additional work of breathing caused by the endotracheal tube. *Anesthesiology*. 1991 ; 75 : 739-45.
 - 7) Epstein SK : Decision to extubate. *Intensive Care Med*. 2002 ; 28 : 535-46.
 - 8) Vivier E, Muller M, Putegnat JB, et al : Inability of diaphragm ultrasound to predict extubation failure : A multicenter study. *Chest*. 2019 ; 155 : 1131-9.
 - 9) Roussos CS, Macklem PT : Diaphragmatic fatigue in man. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1977 ; 43 : 189-97.
 - 10) Hart N, Hawkins P, Hamnegard CH, et al : A novel clinical test of respiratory muscle endurance. *Eur Respir J*. 2002 ; 19 : 232-9.
 - 11) Vassilakopoulos T, Zakynthinos S, Roussos C : The tension-time index and the frequency / tidal volume ratio are the major pathophysiologic determinants of weaning failure and success. *Am J Respir Crit Care Med*. 1998 ; 158 : 378-85.
 - 12) Shapiro BA, Harrison RA, Trout CA : The mechanics of ventilation. In : *Clinical Application of Respiratory Care*. Shapiro BA, Harrison RA, Trout CA (Eds). Chicago, Year Book Publishers, INC, 1975, pp57-89.
 - 13) 時岡宏明 : ICUにおける呼吸管理の諸問題—ウィーニングの問題点—. *日本臨床麻酔学会誌*. 1985 ; 5 : 44-7.
 - 14) 赤澤杏奈, 塩原健太郎, 宮澤慶子ほか : 自発トライアルにおけるTピースとpressure support ventilationとの比較検討 : 単施設後方視研究. *日集中医誌*. 2025 ; 32 : R6.
 - 15) Chevrolet JC, Deléamont P : Repeated vital capacity measurements as predictive parameters for mechanical ventilation need and weaning success in Guillain-Barré syndrome. *Am Rev Respir Dis*. 1991 ; 144 : 814-8.
 - 16) Shimada Y, Yoshiya I, Tanaka K, et al : Crying vital capacity and maximal inspiratory pressure as clinical indicators of readiness for weaning of infants less than a year of age. *Anesthesiology*. 1979 ; 51 : 456-9.
 - 17) Perren A, Previsdomini M, Llamas M, et al : Patient's prediction of extubation success. *Intensive Care Med*. 2010 ; 36 : 2045-52.
 - 18) Laghi F, D'Alfonso N, Tobin MJ : Pattern of recovery from diaphragmatic fatigue over 24 hours. *J Appl Physiol*. 1995 ; 79 : 539-46.
 - 19) Fernandez MM, González-Castro A, Magret M, et al : Reconnection to mechanical ventilation for 1 h after a successful spontaneous breathing trial reduces reintubation in critically ill patients : a multicenter randomized controlled trial. *Intensive Care Med*. 2017 ; 43 : 1660-7.