

特集

呼吸管理における最近のモニタリング

自発呼吸のモニタリング：呼吸数、一回換気量、呼吸中枢の興奮度、
食道内圧、横隔膜運動と肋間筋運動、横隔膜電位

岡原修司・森松博史

キーワード：呼吸仕事量，横隔膜運動，RSBI，人工呼吸器離脱

I. 自発呼吸とは

自発呼吸は延髄にある呼吸中枢からの刺激によって始まる。延髄から出力された信号は横隔神経や脊髄・肋間神経を介して呼吸筋に伝わり、吸気が開始される。

自発呼吸を調節する主な3つの構成要素は、

- ①呼吸に関する情報を収集し、中枢に入力する受容器（化学・伸展受容器）
- ②情報を調整し、インパルスを効果器へと出力する脳の中樞調節器（橋・延髄・皮質）
- ③換気を実行する効果器（呼吸筋）

である。このうち①に関して、化学受容器を介して低酸素血症や高二酸化炭素血症およびアシドーシスが呼吸に影響するほか、間質性肺炎や肺水腫では肺毛細血管近傍受容器により浅く早い呼吸に、運動時には関節や筋肉の受容器によって換気量が增大するなど、様々な調節が存在する¹⁾。呼吸不全に陥った場合には、この呼吸調節系により病態を代償するため、呼吸数や換気量、換気様式が変化する。

では、なぜ詳細な自発呼吸の評価が必要なのか。強い努力呼吸を患者が呈する場合、初期では多大な換気量によって血液ガスは正常に保たれることが多い。しかしながら、血液ガス分析が保たれているからといって努力呼吸を放置した場合、強い吸気努力は胸腔内圧を低下させ、左心系の前・後負荷を増大させる。さら

に進行すると、左心不全により肺水分量が増大し、肺胞虚脱を起こしやすくなり、呼吸仕事量自体も増大する²⁾。また、これらのストレスにより内因性のカテコラミンが放出され、不整脈を誘発する。このように強い呼吸努力には左心不全や呼吸不全を誘発する可能性が考えられる。逆に、自発呼吸を抑制した場合（鎮静薬や人工呼吸による過剰なサポート）、数時間の人工呼吸であっても人工呼吸誘発性横隔膜機能不全を発症し、筋原線維の損傷と萎縮を引き起こす可能性があり³⁾、適度な自発呼吸を温存しておくことも重要である。

自発呼吸を評価するうえで注意しなければならないのは、一定の条件下（評価には安静臥位もしくは安静坐位）で評価することである。呼吸はバイタルサインの中でも唯一随意調節が可能であり、容易に変動する。なるべく一定の条件で1点のみではなく、繰り返し評価していく必要がある。

II. 自発呼吸のモニタリング

ここでは患者の自発呼吸をモニタリングできる指標についてまとめる。複数の指標を組み合わせ、呼吸不全の早期発見・早期介入を行うことで予後改善につながる可能性がある。これらの指標は自発呼吸の評価から、呼吸サポートの必要性や人工呼吸器離脱の評価に応用できる。

1. 呼吸数

呼吸数は患者の評価において、我々が最も頻用する指標の1つである。なぜなら、呼吸数の測定が簡便かつ患者の状態を直接的に反映するからである。呼吸数は二酸化炭素の貯留以外に、乳酸蓄積を含む代謝性アシドーシスや心不全、そして精神的な要因でも増加する。よって呼吸数自体は呼吸に限らず患者の容態変化の初期のサインであり、様々な病態の増悪を予測できる可能性がある。Lynn らは敗血症や肺塞栓、うっ血性心不全などの臨床経過において SpO₂ 低下を示す前に代償性の頻呼吸が見られること⁴⁾を示唆している。呼吸数をモニタリングすることで重篤な状態に移行する前に察知し、対応することができる。また、それ以外にも多くの症例において急変する前に頻呼吸が先行することが示されており⁵⁾、rapid response team (RRT) の要請基準にも呼吸数が採用されている。

呼吸不全症例においても呼吸数増加は多くの場合状態悪化を示し、患者の予後判定において重要な項目である。非侵襲的陽圧換気 (noninvasive positive pressure ventilation : NPPV) 成否の予測因子の1つ⁶⁾であり、人工呼吸器離脱時の spontaneous breathing trial (SBT) の開始基準および成功基準⁷⁾としても重要な因子である。表1に人工呼吸器離脱時の予測因子を示す。

では実際にどの程度であれば、問題とすべきか。成人を対象とした研究の場合、呼吸数 30/分を閾値とする研究が多く、25/分以上では要注意、30/分以上の場合には精査および治療介入の必要がある。また、呼吸数は年齢によって大きく異なるため、そのことも考慮に入れなければならない。

《測定方法》

胸腹部の上下運動の診察により簡便に測定可能であるが、継続的な測定は限界がある。最近では非侵襲的に呼吸数を連続的に測定できる装置として、2つの方法が存在する。

①非侵襲的に呼気中の二酸化炭素を測定するカブノグラフィーによる評価

②呼吸流速を感知する音響トランスデューサー付きのアコースティック呼吸センサー

などが臨床応用されている。Mimoz らによればどちらも高い精度で呼吸数を示す⁸⁾ことが報告されている。

2. 一回換気量

一回換気量も呼吸調節系によりコントロールされ、呼吸数や呼吸パターンとともに大きく変化する。安静時の基準値は理想体重あたり 6～8mL 程度である。少なすぎると死亡率の上昇のため換気効率が低下し、多すぎると肺・胸郭の拡張に必要な呼吸仕事量が増大する。肺胸郭コンプライアンスと気道抵抗によって、呼吸仕事量を最適化する呼吸パターンが存在する (図1)⁹⁾。このとおり呼吸数、そして一回換気量のバランスは非常に重要であり、人工呼吸器離脱時の指標としても利用されている。

Yang らは人工呼吸器離脱において、離脱成功を予測する様々な因子について検討した¹⁰⁾。彼ら是一回換気量の他に、分時換気量、呼吸数、最大吸気力、コンプライアンス、PaO₂/FiO₂、そして呼吸数 (/分) を一回換気量 (L) で除した値である浅速呼吸指数 (rapid shallow breathing index : RSBI) の検討を行った。人工呼吸器離脱に際して RSBI が最も優れた予測因子であり、感度・特異度から算出される receiver operating characteristics (ROC) - area under the curve (AUC) は 0.89 と最高値であった。加えて様々な指標の中、ROC - AUC が2番目に高かったのは一回換気量 (0.87) であった。その後も RSBI は人工呼吸器離脱成功のカットオフ値 : 105 未満が臨床・研究において使用されている。また、ある成人モデル (分時換気量 : 4L) において RSBI が 37～59 で呼吸仕事量の最小値を示し、60 以上に上昇すると仕事量が飛躍的に上昇する¹¹⁾と

表1 人工呼吸器離脱の予測因子

人工呼吸器からの情報	人工呼吸器以外の情報
<ul style="list-style-type: none"> 最大吸気圧 分時換気量 一回換気量 Rapid shallow breathing index (RSBI) 肺コンプライアンス 気道閉塞圧 (P_{0.1}) 呼吸仕事量 	<ul style="list-style-type: none"> 酸素化 (PaO₂/FiO₂) 呼吸数 重症度スコア (APACHE II, SOFA)

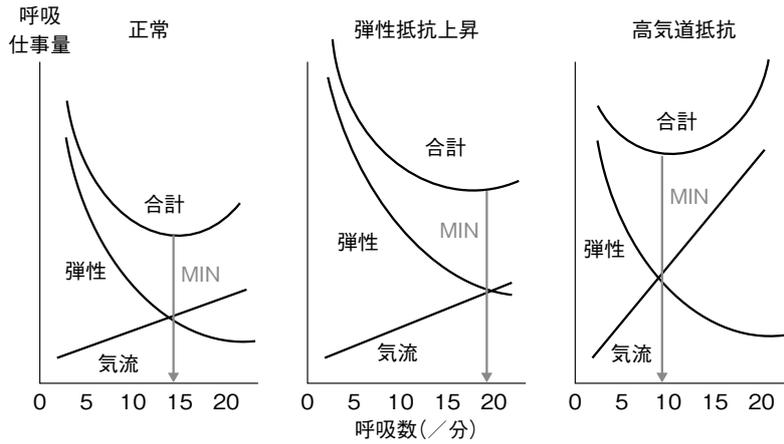


図1 肺・胸郭条件に応じた呼吸仕事量の変化と呼吸数との関係 (文献9から改変)

呼吸仕事量は気流抵抗と弾性抵抗の成分に分かれ、仕事量を最小にする呼吸数が存在する。弾性抵抗が上昇した場合には呼吸数を増やして、高気道抵抗の場合には呼吸数を減らして呼吸仕事量を減少させる。

の報告があり、それらの値を目安に患者の呼吸負荷を評価することができる。

3. 呼吸中枢の興奮度

呼吸中枢は延髄に存在し、呼吸ニューロン・吸気ニューロン群がネットワークを形成し、周期的に活動電位が発生することで、呼吸のサイクルを管理している。また、大脳皮質からの信号も受けており、随意的にある程度コントロールできる。これらすべての信号は橋に存在する呼吸調節中枢にて統合され、肺・胸郭・筋肉からの情報を受け、最終的に呼吸神経活動として発射される⁹⁾。呼吸筋へは神経を介して、収縮の命令が活動電位として届けられるが、その収縮の強さは活動する筋繊維の数に比例し、それは活動電位の強さと頻度によって決定される。そして最終的に胸郭および肺の拡張、吸気の強さに反映される。また、呼吸中枢は中枢および末梢に存在する受容器からフィードバックを受ける。

このような複雑なシステムの根幹となる呼吸中枢からの活動電位を、臨床において直接的に抽出するのは不可能である¹²⁾。我々はこの呼吸中枢の興奮をその末端である呼吸数や換気量で評価するのみであった。しかしながら中枢の信号という点では横隔膜電位 (electrical activity of diaphragm : Edi) を介して評価することに期待が持たれている。

その他に呼吸中枢の出力を示す指標として、 P_{01} が挙げられ、呼吸負荷に対する呼吸中枢の反応を示す。

呼吸終末に吸気弁を閉塞し、吸気開始から 0.1 秒後の気道内陰圧を測定する。いくつかの論文では、人工呼吸器離脱の予測因子として最も信頼性が高く、成否の閾値は $3.5\text{cmH}_2\text{O}$ であると報告されている¹³⁾。

4. 食道内圧

臨床において食道内圧を測定することの意義は、

- ①呼吸仕事量の算出
- ②経肺圧の測定

の2点である。自発呼吸中の患者に対して呼吸仕事量を測定するためには胸腔内圧が必須である。胸腔内圧は食道内圧に近似することができ、吸気における食道内圧と肺気量の変化に加えて、胸郭コンプライアンスから呼吸仕事量を算出することができる¹⁴⁾。臨床的には機能的残気量位での胸腔内圧を基準として、その変化分より算出する。非挿管状態での基準値は $0.3 \sim 0.6\text{J/L}$ ¹⁵⁾ と報告されているが、呼吸不全の指標としての一定の見解はないため、絶対値だけではなく、経時的な変化を見る必要がある。

また、人工呼吸管理中では気道内圧と食道内圧を同時に測定することで、経肺圧 (= 気道内圧 - 胸腔内圧) を測定でき、呼吸器を設定するうえで有効である。努力呼吸の症例において、プラトー圧がたとえ $20\text{cmH}_2\text{O}$ であったとしても、吸気時の胸腔内圧が $-20\text{cmH}_2\text{O}$ であった場合には経肺圧は $40\text{cmH}_2\text{O}$ となり、肺障害の可能性が高くなる。このような症例では食道内圧を計測する価値がある。

《測定方法》

バルーン付きチューブを食道下部1/3（食道内の心臓の裏側辺り）に留置し、バルーンを空気で満たして測定する。カテーテルが胃内にあれば、自発呼吸時には陽圧を示す。胃内まで挿入し、徐々に抜いて胸腔内に入ると吸気時に陰圧に変化する。最終的には胸部レントゲンにて位置の確認を行う。

5. 横隔膜運動と肋間筋運動

安静時には次の3パターンの呼吸が認められる。

- 腹式呼吸：横隔膜による上腹部と下部胸郭の運動
- 胸式呼吸：肋間筋による上部胸郭の運動
- 胸腹式呼吸：胸式・腹式両方が組み合わさった運動

呼吸は肺と胸郭の弾性によって受動的に戻る。呼吸不全では努力性胸式呼吸であることが多く、呼吸補助筋（胸鎖乳突筋や中斜角筋）の緊張亢進、吸気時の鎖骨上窩陥凹、奇異性呼吸などを認める。中でも胸腹部非同期運動は、呼吸不全時の定性的な評価項目として使用されている¹⁶⁾。

適切な横隔膜の運動は自発呼吸において非常に重要であり、超音波を用いた横隔膜機能の評価が試みられている。定量的に吸気・呼気の横隔膜の厚みの変化（delta diaphragm thickness： Δtdi ）を測定したり、吸気・呼気での横隔膜の移動距離を測定する。人工呼吸器離脱においてこの Δtdi とRSBIを比較した論文では、抜管成功に対する Δtdi （30%以上をカットオフ）の感度が88%、特異度が71%と非常に高い特異度を示した。その研究でのRSBI（105未満をカットオフ）の感度は87%、特異度は33%であった¹⁷⁾。 Δtdi は簡便さではRSBIに劣るが、特異度の高さから今後の可能性が期待されている。

6. 横隔膜電位（Edi）

Ediの歴史はSinderbyらのチームが1998年に専用の経鼻胃管を用いてEdiを測定したことに始まり、健常者と慢性閉塞性肺疾患（chronic obstructive pulmonary diseases：COPD）症例での電位差を報告した¹⁸⁾。その翌年に彼らはEdiを応用した神経制御の人工呼吸モードを発表した¹⁹⁾。この概念をもとにneurally adjusted ventilatory assist (NAVA)が開発されることとなった。

NAVAは横隔膜の活動電位をもとに換気補助を行い、患者と人工呼吸器の同調性を改善する。Edi & NAVAは同調性だけでなく、最近ではEdi自体を呼吸中枢の興奮度の指標として臨床応用しようとする動きもある。

Ediの強弱や経時的な変化が我々に提供してくれる情報は、以下の3点である。

- 呼吸回数
- 呼吸パターンや呼吸努力の強さ（横隔膜の興奮度）
- 神経換気効率（Ediに対する一回換気量）

臨床におけるEdi評価に関する報告は限られている。人工呼吸離脱失敗群で抜管前のEdiが有意に高値であったと示されている²⁰⁾。また絶対値だけでなく、SBT開始前からTピースに変更後のEdiの急上昇が呼吸器離脱失敗と関連しているとも報告されている²¹⁾。我々も人工呼吸患者にEdiモニタリングを行っているが、呼吸負荷と連動しているように思われる（図2）。Edi値の基準値としては健常者で $10\mu V$ 、COPDでは $20\sim 30\mu V$ が目安であり、安静時においてこれを大きく逸脱する症例や継続的なEdi上昇は呼吸不全の増悪を示唆する所見として注意すべきである。しかしながらEdi自体が専用カテーテルの位置や鎮静、中枢神経系の異常などの影響を受け、その評価は他の指標との組み合わせで考える必要がある。

《測定方法》

専用の電極付き胃管カテーテルを使用し、経食道的にEdiを測定する。深さの目安は鼻から耳、耳から剣状突起までの距離を参考にして算出される。最終的には電極からの心電図波形を参考にして調節を行う。我々の施設では、人工呼吸器離脱困難症例では抜管前からEdiを測定し、さらに抜管後24時間はEdiモニタリングを継続し、呼吸状態の評価の参考としている。

Ⅲ. ま と め

自発呼吸をモニタリングするためのツールも技術の進歩とともに増加しており、様々な角度からより正確に評価できるようになってきている。ただ、自発呼吸の評価をただ1つの指標のみで完全に行えるものはいまだ存在しない。呼吸不全をより早期に発見するために様々な指標を複合的に評価し、より正確に把握し重症化を未然に防ぐ必要がある。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

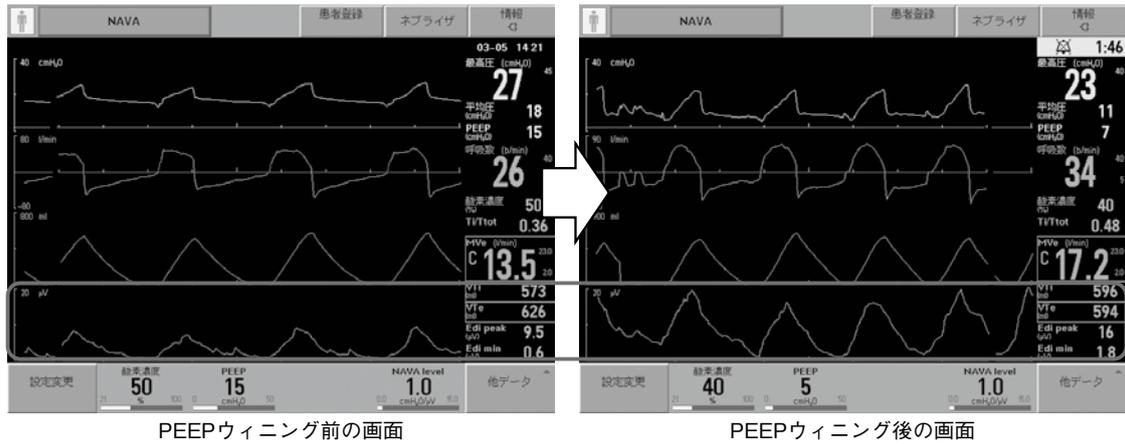


図2 呼吸器設定に応じた横隔膜電位 (Edi) の変化

NAVA モードで補助換気施行中。自発呼吸を Edt にて感知し、補助換気。

呼吸器設定をウィニングしていく過程で、PEEP 減量後に呼吸努力を認めた。それに伴い、Edt の上昇を確認。PEEP を戻すことで、低下した。

参考文献

- West JB : 第2章 正常の生理学：低酸素症。ウエスト呼吸の生理と病態生理－症例から考える統合的アプローチ。堀江孝至編。東京，メディカル・サイエンス・インターナショナル，2002，pp26-32.
- 竹内宗之，橋 一也：離脱困難患者の基礎医学。Intensivist. 2012；4：779-87.
- Levine S, Nguyen T, Taylor N, et al : Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. N Engl J Med. 2008；358：1327-35.
- Lynn LA, Curry JP : Patterns of unexpected in-hospital deaths : a root cause analysis. Patient Saf Surg. 2011；5：3.
- Bossink AW, Groeneveld J, Hack CE, et al : Prediction of mortality in febrile medical patients : How useful are systemic inflammatory response syndrome and sepsis criteria? Chest. 1998；113：1533-41.
- Liesching T, Kwok H, Hill NS : Acute applications of noninvasive positive pressure ventilation. Chest. 2003；124：699-713.
- 日本集中治療医学会・日本呼吸療法医学会・日本クリティカルケア看護学会：人工呼吸器離脱に関する3学会合同プロトコル：http://www.jsicm.org/pdf/kokyuki_ridatsu1503b.pdf Accessed July 29, 2015.
- Mimoz O, Benard T, Gaucher A, et al : Accuracy of respiratory rate monitoring using a non-invasive acoustic method after general anaesthesia. Br J Anaesth. 2012；108：872-5.
- Lumb AB : Pulmonary ventilation. Nunn's Applied Respiratory Physiology, 7th ed. Edinburgh, Churchill Livingstone Elsevier, 2010, pp83-98.
- Yang KL, Tobin MJ : A prospective study of indexes predicting the outcome of trials of weaning from mechanical ventilation. N Engl J Med. 1991；324：1445-50.
- Tobin MJ, Laghi F, Brochard L : Role of the respiratory muscles in acute respiratory failure of COPD : lessons from weaning failure. J Appl Physiol. 2009；107：962-70.
- Verbrugghe W, Jorens PG : Neurally adjusted ventilatory assist : a ventilation tool or a ventilation toy? Respir Care. 2011；56：327-35.
- 村田克介，大竹一栄，窪田達也：新しいウィニングの指標の臨床的検討－呼吸筋エネルギー消費の立場から－。日本集中治療医学会雑誌。1994；1：31-6.
- 鮎川勝彦，財津昭憲：特殊モニター－2〔呼吸仕事量，respiratory index〕。診断と治療。1995；83：1039-46.
- Ballantine TV, Proctor HJ, Broussard ND, et al : The work of breathing : potential for clinical application and the results of studies performed on 100 normal males. Ann Surg. 1970；171：590-4.
- Sztrymf B, Messika J, Bertrand F, et al : Beneficial effects of humidified high flow nasal oxygen in critical care patients : a prospective pilot study. Intensive Care Med. 2011；37：1780-6.
- DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, et al : Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. Thorax. 2014；69：423-7.
- Sinderby C, Beck J, Spahija J, et al : Voluntary activation of the human diaphragm in health and disease. J Appl Physiol. 1998；85：2146-58.
- Sinderby C, Navalesi P, Beck J, et al : Neural control of mechanical ventilation in respiratory failure. Nat Med. 1999；5：1433-6.
- Dres M, Schmidt M, Ferre A, et al : Diaphragm electromyographic activity as a predictor of weaning failure. Intensive Care Med. 2012；38：2017-25.
- Barwing J, Pedroni C, Olgemöller U, et al : Electrical activity of the diaphragm (EAdi) as a monitoring parameter in difficult weaning from respirator : a pilot study. Crit Care. 2013；17：R182.