

auto-PEEP の測定と臨床における問題点

時 岡 宏 明* 平 川 方 久*

1. auto-PEEP の定義と発生機序

呼気ガスは、通常肺胞内圧が大気圧に達するまで流れる。これに対し、肺胞内圧が大気圧（気道内圧）に達する前に呼気が終了すると、呼気終末時の肺胞内圧は大気圧より陽圧である。この圧差

を auto-PEEP (intrinsic PEEP) という (図 1)¹⁾。

auto-PEEP は 2 つの機序によって発生する。1 つは慢性呼吸不全患者、喘息患者などにおいて気道抵抗の増加による呼気流量制限がある場合で、呼気時 dynamic airway compression が起き

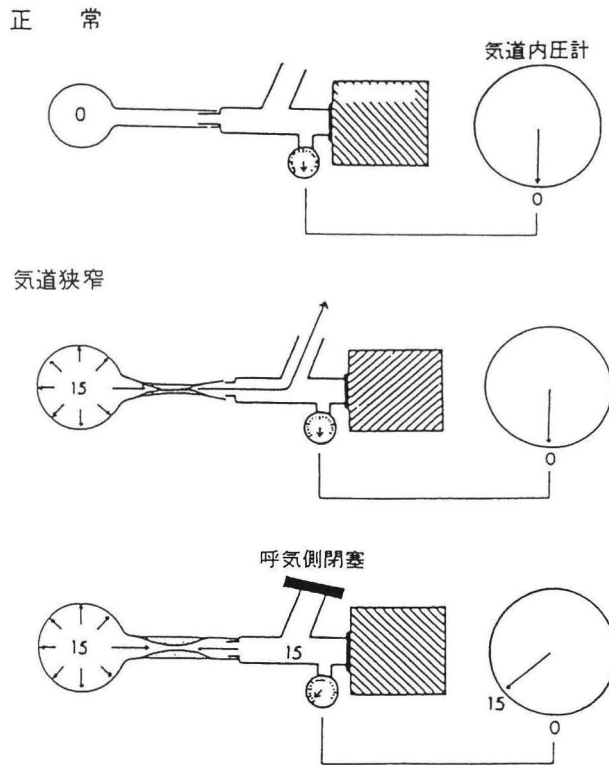


図 1 気道狭窄患者における auto-PEEP とその測定原理

上段は健常人で、呼気終末時、呼気流速は 0 で肺胞内圧は大気圧に等しい。中段は気道狭窄患者で、呼気終末時、肺胞内圧は気道内圧より高く 15 cmH₂O の auto-PEEP が生じている。下段は同じ気道狭窄患者で、呼気終末時に気道を閉塞すると、気道と肺胞は 1 つの閉塞空間となり気道内圧は 15 cmH₂O の auto-PEEP を示す。

(Pepe PE, et al : Occult positive end-expiratory pressure in mechanically ventilated patients with airflow obstruction. Am Rev Respir Dis 126 : 166-170, 1982 より引用)

* 岡山大学医学部付属病院集中治療部

て air trapping が生じる。別の機序は急性呼吸不全患者などで分時換気量が 20 l/min を越えるとき、あるいは新生児などで呼吸数が非常に多いときは、換気量に比べて相対的に呼吸時間が短いために auto-PEEP が生じる²⁾。

auto-PEEP に対し通常の PEEP (external PEEP) は気道内圧と大気圧の圧差で、肺胞内圧と気道内圧に圧差はない。

2. auto-PEEP の呼吸循環系に及ぼす影響

auto-PEEP は、external PEEP と同様、肺胞内圧の増加により肺胞の虚脱を防いで PaO₂ を増加させる。auto-PEEP を積極的に用いた換気方法として inverse ratio ventilation がある。これは吸気呼気比を逆転した呼気時間の短い換気方法で、急性呼吸不全の低酸素血症を改善するという報告がある。この酸素化能の改善の主な機序として auto-PEEP が考えられている。

しかし、auto-PEEP は酸素化能の改善以外には呼吸循環系に多くの悪影響を及ぼす。auto-PEEP は肺胞内圧の増加により肺の過伸展から barotrauma の危険性を増す。また、auto-PEEP レベルの増加に伴って患者の呼吸仕事量を増加させる。これは自発呼吸時に auto-PEEP が存在する場合、呼気時の胸腔内圧は陽圧になっているが、吸気ガスは吸気努力により胸腔内圧が陰圧になって初めて流れるためである³⁾。また、auto-PEEP 患者を、補助呼吸、synchronized intermittent mandatory ventilation, pressure support ventilation などの自発呼吸をトリガーする換気モードで人工呼吸する場合においても、呼吸仕事量を増加させる。これは人工呼吸器をトリガーするとき、トリガー設定圧レベルに auto-PEEP レベルを加えた値が必要なためである²⁾。このため auto-PEEP 値が高い場合には吸気努力があるにもかかわらずトリガーができない場合がある⁴⁾。循環系に対しては auto-PEEP は胸腔内圧の増加から前負荷の低下を来し心拍出量の低下を起す。これらの欠点により auto-PEEP はできるだけ低下させることが望まれる。

3. auto-PEEP の測定方法

1) 呼気終末時の気道閉塞下における気道内圧から測定¹⁾

調節呼吸時において、呼気終末時に人工呼吸器の回路を口元で閉塞する。閉塞することにより肺胞と気道は 1 つの閉鎖空間となり、気道内圧は速やかに増加して肺胞内圧と等しくなる。そのときのプラトー圧が auto-PEEP (static auto-PEEP) で、肺局所の auto-PEEP の平均値である (図 1, 図 2 上段, 図 5)。気道閉塞のタイミングが重要で、呼気終末時より早く気道閉塞を行えば auto-PEEP を過大評価する。

この方法は、原則として調節呼吸時にのみ行う。補助呼吸、pressure support ventilation などの自発呼吸をトリガーするモードにおいて行う場合は、吸気側回路に手動の三方向弁を入れる、あるいは気道閉塞時にトリガー感度を低下させるなどの工夫が必要である⁶⁾。

2) 調節呼吸時、流速と気道内圧の同時記録から測定⁷⁾

調節呼吸時において auto-PEEP がある場合、この弾性収縮圧に打ち勝つ圧が気道に外からかかって初めて吸気ガスが流れる。このため流速と気道内圧を同時に高速度記録計で記録すると、流速 0 の吸気開始時における気道内圧の値が auto-PEEP となる (図 2 下段)。

auto-PEEP は、個々の気道、肺胞において抵抗、コンプライアンスが異なるため、それぞれの肺胞の auto-PEEP も異なる。特に、慢性呼吸不全患者のように病変が均一でない場合は、auto-PEEP も局所によって異なる。この場合、吸気ガスが流れ始めるのは、肺全体の平均の auto-PEEP 値に打ち勝つ圧でなく、最も低い auto-PEEP 値に打ち勝つ圧である⁸⁾。このため、流速と気道内圧の同時記録から測定した auto-PEEP 値 (dynamic auto-PEEP) は、気道閉塞下での気道内圧から測定した auto-PEEP 値 (static auto-PEEP) より通常低値となる。

3) 食道内圧から測定⁹⁾

自発呼吸時の auto-PEEP は、胸腔内圧を反映する食道内圧から評価する。吸気ガスが流れるの

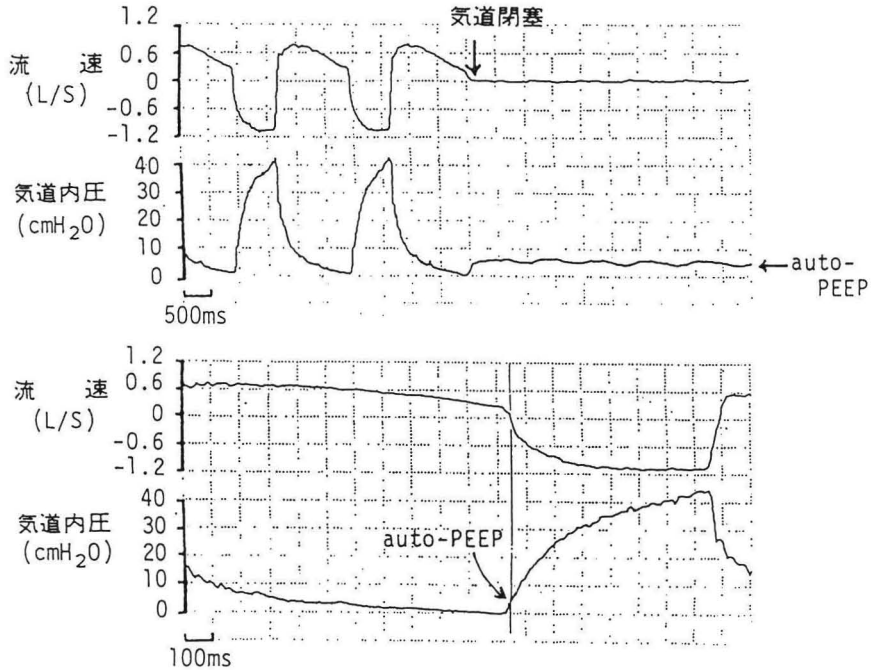


図 2 気道閉塞法および流速と気道内圧の同時記録による auto-PEEP の測定方法

上段は、調節呼吸時における流速と気道内圧曲線である。呼気終末時(↓)に気道を閉塞すると、気道内圧は増加して auto-PEEP (static auto-PEEP) を示す。下段は、同じ調節呼吸時の高速度記録である。吸気開始時(流速 0 の点線)のときの気道内圧が auto-PEEP (dynamic auto-PEEP) である。

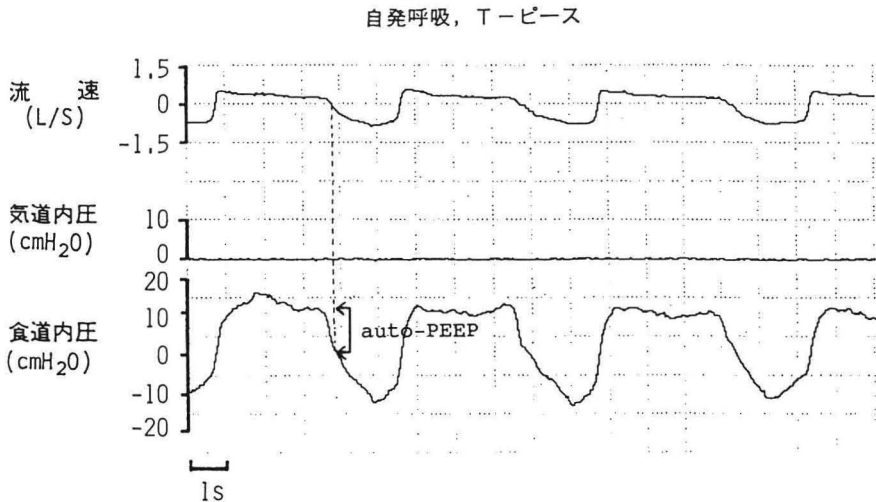


図 3 食道内圧曲線による auto-PEEP の測定方法

自発呼吸患者 (T-ピース) における流速、気道内圧、食道内圧曲線である。食道内圧の呼気プラトー圧は著しい陽圧である。この値と吸気ガスが流れ始めるとき(流速 0)の食道内圧の圧差が auto-PEEP である。吸気ガスが流れ始める以前から吸気努力が生じていることがわかる。

に必要な胸腔内圧の変化は、呼気終末時の弾性収縮圧、auto-PEEP (dynamic auto-PEEP) に打ち勝つ圧に等しいと仮定する。測定は、吸気努力開始時と実際に吸気ガスが流れ始めるときの食道内圧の圧差、すなわち食道内圧の呼気プラトー圧と吸気開始時（流速0）のときの食道内圧の圧差を読み取る（図3）。この方法は、食道バルーンを挿入しなければならないが auto-PEEP の連続測定が可能である。食道バルーンを胸腔内圧を反映する適切な位置に挿入するためには、気道閉塞下で吸気努力を行い、気道内圧と食道内圧の変動が一致する位置に調節する¹⁰⁾。

4) respiratory inductive plethysmography を用いる方法¹¹⁾

respiratory inductive plethysmography は、コイルを付けた伸縮自在のバンドを胸壁と腹部に巻き、呼吸運動によるコイルのインダクタンス変化から換気量あるいは機能的残気量 (FRC) を非侵襲的に連続測定する。気道抵抗増加により流量制限のある場合、呼気時に dynamic airway compression が発生しているが、auto-PEEP レベル以下の PEEP は airway compression を解除しない。そのため auto-PEEP レベル以下の PEEP は FRC を変化させない。一方、auto-PEEP レベル以上の PEEP は、airway compression を解除して FRC を増加させる。図4は auto-

-PEEP のある患者に対し、PEEP を 0, 4, 8 cmH₂O とかけたときの inductive plethysmography である。図の中段は胸郭、下段は腹部の動きによる換気量変化で、上段はその合計の1回換気量を表す。呼気時の換気量レベルの変化は FRC の変化を表す。この症例では、FRC は 8 cmH₂O の PEEP がかかったとき初めて増加しており、この FRC を増加させるときの値が auto-PEEP に等しい。

respiratory inductive plethysmography を用いることにより、非侵襲的に自発呼吸時においても auto-PEEP が測定できる。しかし、auto-PEEP の発生が、換気量の増加あるいは呼気時間の短縮などで呼気流量制限によらない場合には、auto-PEEP レベル以下の PEEP も肺胞に対して back pressure となる²⁾⁷⁾¹²⁾¹³⁾。このため PEEP レベルの増加に応じて FRC は増加し、この方法では auto-PEEP を測定することはできない。

5) 呼気時の flow interruption technique¹⁴⁾

調節呼吸時、吸気終末時に口元で人工呼吸器回路を閉塞すると呼吸筋は弛緩しているため気道内圧はプラトー圧を示す。次に短時間の回路の閉塞 (0.1-0.2 秒) と解除を、呼気が受動的に終了するまで定期的に繰り返し行う。この気道閉塞下での気道内圧と換気量の関係を XY 座標に表す。

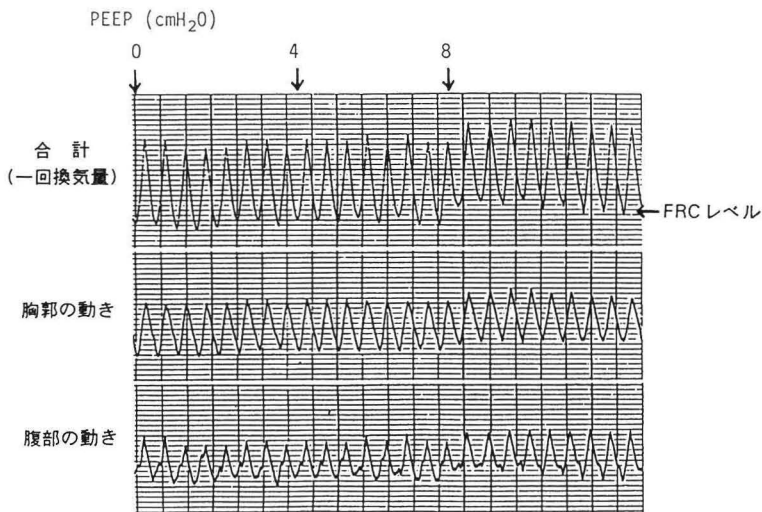


図4 respiratory inductive plethysmography による auto-PEEP の測定方法

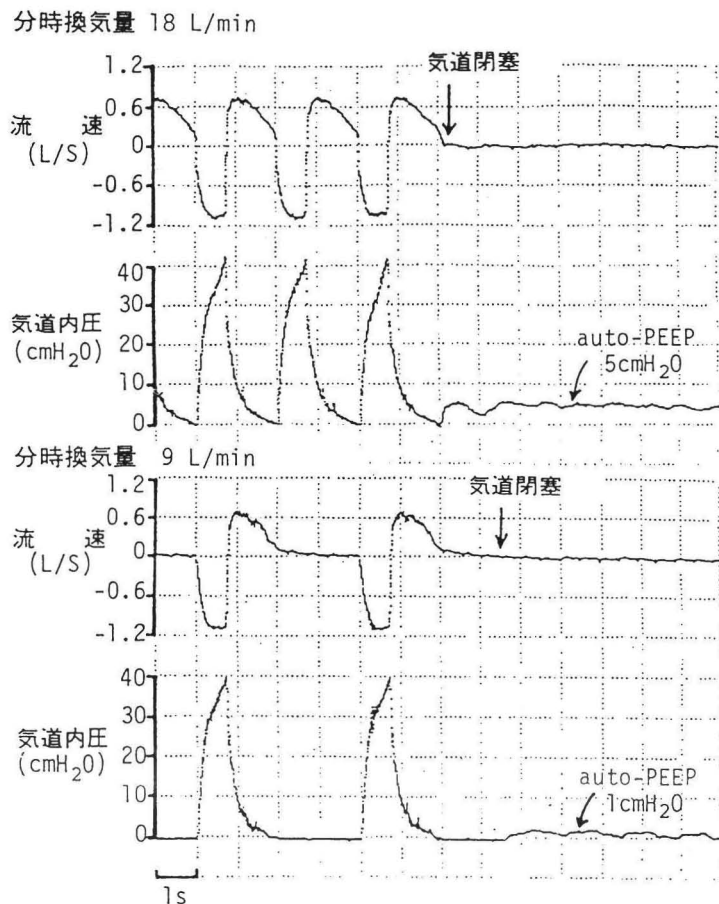


図 5 換気量変化が auto-PEEP に及ぼす影響

喘息患者の調節呼吸時における流速と気道内圧曲線で、上段は分時換気量が 18 l/min、下段は 9 l/min である。分時換気量を低下させると、気道閉塞法による auto-PEEP は、5 cmH₂O から 1 cmH₂O に著明に低下した。

呼気終末時における換気量が 0 のときの気道内圧は、呼吸器系の弾性収縮圧を表しており auto-PEEP である。

その他の方法として、肺をモデル化して数学的方法により 1 呼吸ごとに auto-PEEP を算出する方法が報告された¹⁵⁾。また、臨床の場合において auto-PEEP が存在するかどうかの定性的な評価は、流速のモニタリングから可能である。auto-PEEP が存在する場合、呼気流速は速やかに低下するが、auto-PEEP が存在する場合、流速は呼気終末時まで 0 にならない。この場合に auto-PEEP を測定する必要がある。

4. auto-PEEP 患者の換気方法

auto-PEEP は、胸腔内圧増加による循環系の抑制、肺の過伸展による barotrauma の危険性、呼吸仕事量の増加、人工呼吸器のトリガーを困難にさせるなどの欠点を持つため、auto-PEEP を低下させる換気方法が望まれる。

換気パターンは、吸気流速を増加させて呼気時間を延長させる、あるいは換気量を低下させることにより auto-PEEP を低下させる (図 5)。換気モードの選択では、pressure support ventilation が pressure support レベルの増加に伴い、呼吸数と duty cycle の低下により auto-PEEP

を低下させる¹⁶⁾¹⁷⁾。また、PEEPは前述したように、呼気流量制限により生じた auto-PEEP に対して、FRC レベル (auto-PEEP+PEEP) を増加させることなく auto-PEEP レベルを低下させる。しかし、呼気流量制限のない場合は auto-PEEP を低下させない。また、肺病変が不均一である場合、auto-PEEP はさまざまな肺胞において異なるため、auto-PEEP レベル以下の PEEP においても局所の肺胞の過伸展を起こす²⁷⁾。

慢性呼吸不全患者で auto-PEEP を有する患者においては、auto-PEEP レベル以下の PEEP を用いることにより、気道抵抗の低下、呼吸仕事量の低下により人工呼吸器からの離脱が容易になる⁸⁾。一方、喘息発作患者の人工呼吸においては、呼吸仕事量の軽減より barotrauma を避けることの方が重要であるため、肺の過伸展を助長する可能性のある PEEP は原則的には用いるべきでない²¹⁾⁸⁾。しかし、auto-PEEP によりトリガーが困難な場合は 5 cmH₂O 以下の低レベルの PEEP が有効である。

おわりに

auto-PEEP の臨床的に大きな問題点は、通常の気道内圧のモニタリングからは評価できないことにある。auto-PEEP の測定方法も多くあるが、煩雑であったり問題点もあるため、日常的には測定されていないのが現状である。しかし、auto-PEEP がかかっているのにもかかわらずその評価ができていない場合、循環抑制に対して誤った解釈を行う危険性がある。例えば、実際の前負荷は低下しているにもかかわらず auto-PEEP により肺動脈楔入圧は増加しているため、輸液の制限あるいは不必要な血管作動薬の投与を行う。呼吸に対しても、人工呼吸器のトリガー困難による非同調性の換気のために不必要な鎮静薬、筋弛緩薬を投与する。コンプライアンスを過小評価する⁷⁾、あるいは barotrauma の危険性を見のがしてしまう可能性などがある。このため、喘息、慢性閉塞性肺疾患患者などで呼気流速が呼気終末まで続いている場合、あるいは換気量が非常に増加している患者においては auto-

-PEEP の測定が重要である。

文献

- 1) Pepe PE, Marini JJ : Occult positive end-expiratory pressure in mechanically ventilated patients with airflow obstruction. *Am Rev Respir Dis* 126 : 166-170, 1982
- 2) Marini JJ : Should PEEP be used in airflow obstruction? *Am Rev Respir Dis* 140 : 1-3, 1989
- 3) Fleury B, Murciano D, Talamo C, et al : Work of breathing in patients with chronic obstructive pulmonary disease in acute respiratory failure. *Am Rev Respir Dir* 131 : 822-827, 1985
- 4) Smith TC, Marini JJ : Impact of PEEP on lung mechanics and work of breathing in severe airflow obstruction. *J Appl Physiol* 65 : 1488-1499, 1988
- 5) Fernandez R, Benito S, Blanch LI, et al : Intrinsic PEEP : a cause of inspiratory muscle ineffectivity. *Intensive Care Med* 15 : 51-52, 1988
- 6) Gottfried SB, Reissman H, Ranieri M : A simple method for the measurement of intrinsic positive end-expiratory pressure during controlled and assist modes of mechanical ventilation. *Crit Care Med* 20 : 621-629, 1992
- 7) Rossi A, Gottfried SB, Zocchi L, et al : Measurement of static compliance of the total respiratory system in patients with acute respiratory failure during mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 131 : 672-677, 1985
- 8) Petrof BJ, Legare M, Goldberg P, et al : Continuous positive airway pressure reduces work of breathing and dyspnea during weaning from mechanical ventilation in severe chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 141 : 281-289, 1990
- 9) Haluszka J, Chartrand DA, Grassino AE, et al : Intrinsic PEEP and arterial PCO₂ in stable patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 141 : 1194-1197, 1990
- 10) Baydur A, Behrakis PK, Zin WA, et al : A simple method for assessing the validity of

- the esophageal balloon technique. *Am Rev Respir Dis* 126 : 788-791, 1982
- 11) Hoffman RA, Ershowsky P, Krieger BP : Determination of auto-PEEP during spontaneous and controlled ventilation by monitoring changes in end-expiratory thoracic gas volume. *Chest* 96 : 613-616, 1989
 - 12) Gay PG, Rodarte JR, Hubmayr RD : The effects of positive expiratory pressure on isovolume flow and dynamic hyperinflation in patients receiving mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 139 : 621-626, 1989
 - 13) Tobin MJ, Lodato RF : PEEP, auto-PEEP, and waterfalls. *Chest* 96 : 449-451, 1989
 - 14) Gottfried SB, Rossi A, Higgs BD, et al : Noninvasive determination of respiratory system mechanics during mechanical ventilation for acute respiratory failure. *Am Rev Respir Dis* 131 : 414-420, 1985
 - 15) Eberhard L, Guttman J, Wolff G, et al : Intrinsic PEEP monitored in the ventilated ARDS patients with a mathematical method. *J Appl Physiol* 73 : 479-785, 1992
 - 16) Tokioka H, Saito S, Saeki S, et al : The effect of pressure support ventilation in a patient with asthma. *Chest* 101 : 285-286, 1992
 - 17) 時岡宏明, 斎藤清子, 佐伯晋成ほか : ウイニング中の患者における auto-PEEP 値, および pressure support ventilation が auto-PEEP に及ぼす影響. *ICU と CCU* 15 : 141-145, 1991
 - 18) Tuxen DV : Detrimental effects of positive end-expiratory pressure during controlled mechanical ventilation of patients with severe airflow obstruction. *Am Rev Respir Dis* 140 : 5-9, 1989
-