

□原 著□

気道抵抗の高い肺でのプレッシャーサポート 換気と auto-PEEP の関係

桑 山 直 人* 高 橋 利 通** 木 村 智 政**
堀 田 壽 郎* 武 澤 純* 島 田 康 弘*

ABSTRACT

Auto-PEEP during Pressure Support Ventilation
in the Lung with High Airway Resistance

Naoto KUWAYAMA, Tomomasa KIMURA, Toshimichi TAKAHASHI,
Toshiro HOTTA, Jun TAKEZAWA and Yasuhiro SHIMADA

ICU, Nagoya University Hospital

**Department of Anesthesiology,*

Nagoya University School of Medicine

We evaluated the relationship between the auto-PEEP level and pressure support level during simulated spontaneous breathing with varied airway resistance. Two-chamber in box type lung model was used to simulate spontaneous breathing by time-cycled and jet-flow creating Venturi mechanism. A Puritan-Bennett 7200 a ventilator was used in the CPAP mode without PEEP at the varying pressure support levels from 0 to 30 cmH₂O with a sensitivity of 2 cmH₂O. Each pressure was measured by the transducer and tidal volume was measured by the hot wire flowmeter. We determined auto-PEEP level as an alveolar pressure when the pleural pressure just shifted into the negative deflection.

This paper shows that higher respiratory resistance and higher pressure support level create an unexpectedly high auto-PEEP level (maximum 18 mmHg) at a respiratory rate of 30 breath/min in the condition that both inspiratory and expiratory resistance remains same. We also found that determination of the auto-PEEP level by the occlusion method or the zero flow method could misread the real auto-PEEP level. It is concluded that significant problems remain to estimate the auto-PEEP level during partially assisted ventilation and unexpectedly high auto-PEEP may be present being undetected and ignored.

はじめに

1975年, Jonsonらによって報告された auto-PEEP は今日では, 呼吸循環管理をするうえで

重要な位置を占めることが知られている¹⁾。現在のところ auto-PEEP について明らかになっている点は, ① 時定数の大きい肺, すなわち気道抵抗やコンプライアンスの大きい肺で発生しやすい。② 調節換気するときには呼気終末に気道閉塞法で測定することができる。③ 人工呼吸器をト

* 名古屋大学医学部附属病院集中治療部

** 名古屋大学医学部麻酔科

リガーするための吸気仕事量が増加する。④ 胸腔内圧の上昇によって心拍出量が低下する。⑤ 肺動脈楔入圧 (Pcwp), 中心静脈圧 (CVP) などの値を過大評価する。⑥ auto-PEEP の発生している肺に外からの PEEP をかけると, 呼気気道抵抗は低下し, auto-PEEP レベルが低下する, の以上6点である。

次に auto-PEEP について現在未解決の問題点は, ① 自発呼吸下で auto-PEEP の測定は, 可能か, もし可能ならどのような測定法が適正なのか。② プレッシャーサポート換気 (以下 PSV) で auto-PEEP レベルは変化するか。③ PSV や CPAP の時に外から PEEP をかけると auto-PEEP レベルは更に上昇するか? ④ auto-PEEP の発生している肺に PSV や外から PEEP をかけた場合に呼吸仕事量は減少するかどうか, という4点である。

1982年, Pepe と Marini は調節換気, あるいは補助換気 of 患者で呼気気道閉塞法によって auto-PEEP の測定を行った²⁾。また1984年, Rossi らも調節換気中の患者の気道内圧を調べ, コンプライアンスを測定するその過程で人工呼吸器は吸気流の送り込みを開始しているにもかかわらず, 口元ではしばらく呼気流が続いていることを示し, 気流がゼロになり吸気相に移る時点の気道内圧を auto-PEEP (彼らは intrinsic PEEP: $PEEP_i$ と呼んでいる) と定義した³⁾。ところが自発呼吸下での auto-PEEP の測定は inductance plethysmography を用いた方法と⁴⁾, 食道内圧で胸腔内圧を代用し間接的に肺胞内圧を推察する方法しか報告がない⁵⁾。従って, PSV と auto-PEEP の関係についても現在は不明である。加えて気道抵抗の高い肺に対して, PS レベルを上昇させると, auto-PEEP が増加する危険性がある。そこで, われわれはモデル肺を使って自発呼吸下での auto-PEEP の測定が可能かどうかをまず検討した。また気道抵抗, PS レベル, 呼吸回数を変化させ, 自発呼吸下での PSV と auto-PEEP との関係をも調べた。

方法

今回われわれが使用したモデル肺は, double

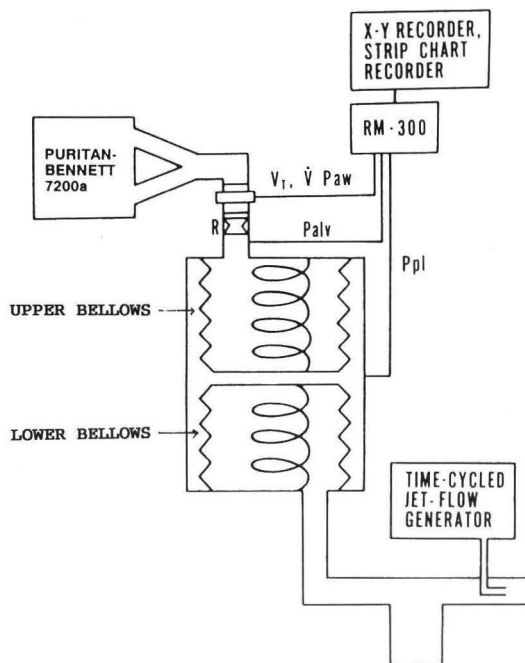


図1 モデル肺と実験系の全体図

R: 気道抵抗, V_T : 一回換気量, P_{aw} : 気道内圧
 P_{alv} : 肺胞内圧, P_{pl} : 胸腔内圧

bellows in box 法である。図1に示すように直径18 cm 高さ29 cm の円筒形プラスチックボックスを気密にし中には肺としての機能をする upper bellows と, 横隔膜の役目を果たす lower bellows を配しそれぞれの bellows につながったスプリングのバネ係数を変えることで肺コンプライアンスを $0.06 \text{ l/cmH}_2\text{O}$, 胸郭コンプライアンスを $0.12 \text{ l/cmH}_2\text{O}$ とした。ボックスの上下にはそれぞれ人工呼吸器の接続口と横隔膜 bellows を陰圧で引っ張るための穴を設けた。気道抵抗は 5, 20, $50 \text{ cmH}_2\text{O/l/sec}$ の3種類のレジスタ型抵抗を使用した。Time-cycled のジェット流が起こす Venturi 効果でモデル肺の横隔膜側の bellows を陰圧で引っ張り自発呼吸をシミュレーションし, 呼吸回数を 20, 30, 40/分と変化させた。I/E 比は 1:1 とし, Puritan-Bennett 7200 a で PS レベルを 0 から $30 \text{ cmH}_2\text{O}$ まで変化させて PSV を行ったときの気道内圧, 肺胞内圧, 胸腔内圧を測定した。気道内圧はレジスタ型抵抗の人工呼吸器側の圧, 肺胞内圧は抵抗の遠位側で

upper bellowsの内圧、胸腔内圧は upper bellows 外側の圧とした。一回換気量 (V_T) は熱線流量計 (ADT-105, ミナト医科, 大阪) で測定し、得られたシグナルをマイクロコンピューター (RM-300, ミナト医科, 大阪) に送り、レコーダー (ライフスコープ 12, 日本光電, 東京) に記録した。

auto-PEEP の測定方法

auto-PEEP の測定は、ジェット流による Venturi 効果で横隔膜側の bellows が下がり始める時を吸気の始まりとした。つまり胸腔内圧が陰圧へ移行する時点の肺胞内圧を auto-PEEP とした。Strip-chart recorder で記録した圧波形から auto-PEEP を mmHg で表した (図 2)。

結果

図 3, 4, 5 は 5, 20, 50 $\text{cmH}_2\text{O}/\text{l}/\text{sec}$ それぞれの気道抵抗における一回換気量と auto-PEEP の関係を示したものである。気道抵抗 5 $\text{cmH}_2\text{O}/\text{l}/\text{sec}$ で呼吸回数 20 回では auto-PEEP は発生していないがそれ以上の呼吸回数, または気道抵抗ではプレッシャーサポートレベルの増加に伴う一回換気量の増加にほぼ比例して auto-PEEP レベルは増加した。今回の実験では気道抵抗 50 $\text{cmH}_2\text{O}/\text{l}/\text{sec}$, 呼吸回数 30/分, プレッシャーサポートレベル 30 cmH_2O , V_T 420 ml の時に最高 18 mmHg の auto-PEEP が発生した。また auto-PEEP 発生時, 胸腔内圧曲線上, モデル肺は吸気を開始しているにもかかわらず, 一定時間, 肺胞内圧の方が気道内圧より高い状態が続き, 口元では呼気流が流れていることが明らかになった。口元での流速がゼロとなる時点では既に肺胞内圧は気道内圧と同一レベルまで低下しており, 口元の風向認識で呼気終末を決定すると

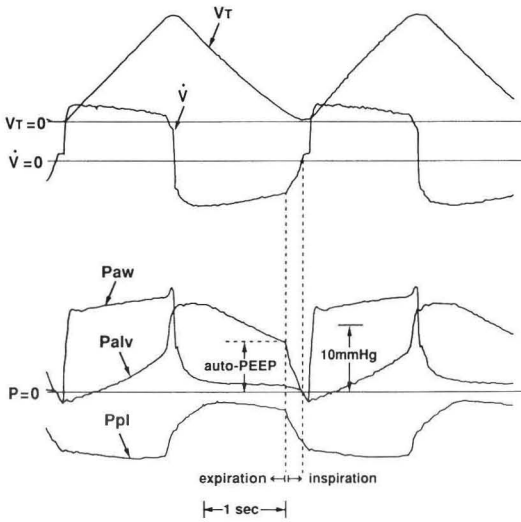


図 2 auto-PEEP の測定方法

胸腔内圧 (Ppl) が陰圧方向へ向かう時点の肺胞内圧 (Palv) を auto-PEEP と定義する。

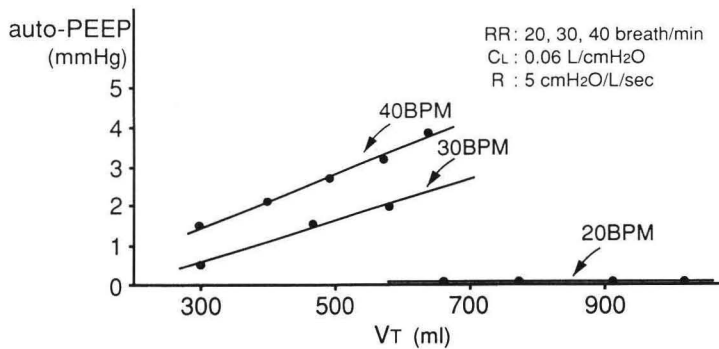


図 3 PS レベルを増加することによって V_T が増加し, それに伴って発生する auto-PEEP レベルが増加している。

RR: 呼吸回数, CL: モデル肺のコンプライアンス, R: 気道抵抗

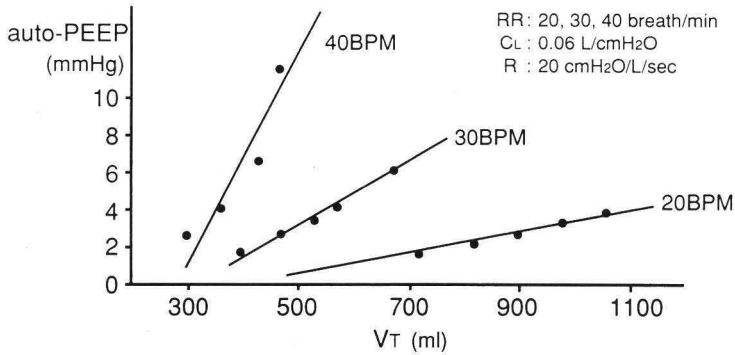


図4 気道抵抗 20 cmH₂O/l/sec の場合の PS 増加による V_T 増加と auto-PEEP の関係。呼吸回数が多いほど同じ一回換気量でも高い auto-PEEP が発生している。

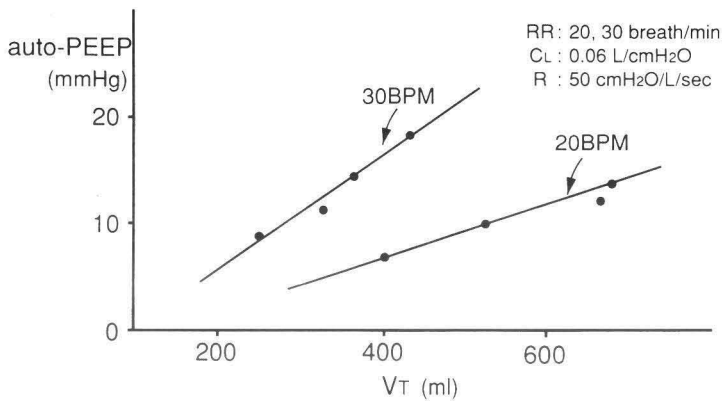


図5 気道抵抗 50 cmH₂O/l/sec の場合の PS 増加による V_T 増加と auto-PEEP の関係。

auto-PEEP を過小評価することがわかった。

考 察

今回われわれは呼気終末をモデル肺の胸腔内圧の回転で認識し、その時点での肺胞内圧を auto-PEEP とした (図2)。Rossi らの口元での風向で呼気を認識する方法は、調節呼吸下でのみ推測が可能で、自発呼吸下のような非閉鎖回路では、肺胞内圧は本来の auto-PEEP レベルより低下して過小評価するため使用できない。すなわち auto-PEEP の発生している肺では横隔膜が下がって吸気努力が開始されているにもかかわらず肺胞内圧が口元の気道内圧よりも高いためしばらくは呼気流が続く。このことは Rossi の見解と一致する。

また、Pepe らの、気道閉塞法は調節呼吸においては、次の吸気の始まりがある程度予測可能であるから測定することはできるが、風向での呼気認識ができない自発呼吸下では、いつもそれを予測できるとは限らず、また調節呼吸時でも、Smith と Marini が行っているように少なくとも 500 msec 以上の余裕をもって予測される吸気の前に気道を閉塞するために、図2 に示すように、常に auto-PEEP を過大評価することになる⁶⁾。受動的呼気の場合、呼気相の肺胞内圧は下降線をたどるからである。従って、これらの conventional method での auto-PEEP の測定は不可能である。

Rossi らは口元の気流がゼロになる時点で測定した彼らの値と、Pepe らの呼気開始直前に気道

を閉塞する方法で得られた値に有意差を認めなかったといっている。調節呼吸下の閉鎖回路では、呼気終末から実際の測定時までには流れる expiratory volume がごく僅かなため zero-flow method と occlusion method が有意差なく近い値を示したと考えられる。Pepe らの行っている閉塞のタイミングは全く検者の手技に頼ることになり、最大吸気時よりも早い段階で閉塞させれば過小評価することにもなりかねない。

気道抵抗と PS レベルを変化させた時の auto-PEEP をみると、気道抵抗 $5 \text{ cmH}_2\text{O}/\text{l}/\text{sec}$ 、呼吸回数 20/分では PS レベルを上昇させ一回換気量が増加しても、auto-PEEP は発生しなかったが、その他では PS レベルをあげたことによる一回換気量の増加と、呼吸回数（呼気時間）に比例し auto-PEEP は上昇した。また当然のことではあるが、気道抵抗が高いほど auto-PEEP は高い傾向にあり、気道抵抗 $50 \text{ cmH}_2\text{O}/\text{l}/\text{sec}$ 、呼吸回数 30/分、PS レベル $30 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、 V_T 420 ml で最高 18 mmHg の auto-PEEP が発生した。今回の実験系では、呼吸は常に受動的だが、自発呼吸で能動的呼吸をしている場合は auto-PEEP は当然更に高い値をとると思われる。また気道抵抗の高い肺やコンプライアンスの低い、いわゆる病的肺では吸気相より呼気相で高い肺胞内圧を示していることが明らかになった。圧損傷の指標となる trans-pleural pressure も呼気に移行した直後に最高となり、圧損傷が吸気相ではなく呼気相に起きている可能性が高い。

気道抵抗の高いモデル肺で PS レベルの上昇による一回換気量の増加と auto-PEEP に直線的相関関係がみられたことは Marini らの報告と、一見矛盾するようであるが、本モデル肺では吸気、呼気ともに気道抵抗が変化しないためと思われる。喘息重積発作の患者にプレッシャーサポートを使用して auto-PEEP の軽減ができたとの報告があるが⁷⁾、これは一回換気量の増加に伴って呼吸回数が減少し呼気時間が延長したことが大きな要因と思われる。すなわち PS レベルの増加がそのまま auto-PEEP の増加にはつながらない。一回換気量の増加は確かに auto-PEEP 発生の大きな要因にはなるがそれに伴って呼吸回数が減少す

れば呼気時間が長くなり auto-PEEP は増加しない。

結 論

Double bellows in box type のモデル肺を使って自発呼吸下での PS レベルと auto-PEEP の関係を調べた。呼気気道抵抗が変化しないかぎり、また呼吸回数が増え変化しないかぎり PS レベルの増加に伴って一回換気量は増加し auto-PEEP レベルも増加した。

Expiratory port occlusion method や zero-flow method では自発呼吸下の auto-PEEP を正確に測定することはできず、それぞれ過小、過大評価することがわかった。自発呼吸下での auto-PEEP を、簡単かつ正確に臨床で測定することはいまのところ困難であるが、病的肺では自発呼吸下でも相当高い auto-PEEP が発生していることがモデル肺を使用することで明らかになった。

(1991.5.29 受)

参考文献

- 1) Jonson B, Nordstrom L, Olsson SG, et al : Monitoring of ventilation and lung mechanics during automatic ventilation, A new device. Bull Eur Physiopathol Respir 11 : 729-743, 1975
- 2) Pepe PE, Marini JJ : Occult positive end-expiratory pressure in mechanically ventilated patients with airflow obstruction, Am Rev Respir Dis 126 : 166-170, 1982
- 3) Rossi A, Gottfried S.B, 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
- 4) 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
- 5) Haluszka J, Chartrand DA, Grassino AE, et al : Intrinsic PEEP and arterial P_{CO_2} in stable

- patients with chronic pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 141 : 1194-1197, 1990
- 6) 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
- 7) 仁熊敬枝, 齊藤清子, 佐伯晋成, ほか : pressure support ventilation が auto-PEEP の低下に有効であった喘息発作症例. *人工呼吸* 7 : 183, 1990
-