

特 集

人工呼吸療法—今後の展望

繊細な換気制御の今後、人工呼吸の限界について

今中秀光

キーワード：同調性，プレッシャーサポート換気，トリガー，吸気立ち上がり時間，吸気終了基準

はじめに

人工呼吸器においては、換気モードの自動化が進む一方で、専門家が患者の病態に合わせて繊細な調節を行うことができる工夫も進んでいる。たとえば、初期のプレッシャーサポート換気（pressure support ventilation：PSV）ではプレッシャーサポート（pressure support：PS）圧だけの変更可能であったが、吸気の立ち上がり時間や終了基準を設定することが可能となり、より同調性を増した換気が可能となった。しかし、吸気立ち上がり時間や終了基準をベッドサイドで適切に設定するのは難しい。PS 圧を自動的に調節してくれるモードは便利な反面、隠れたトラブルを起こす可能性もある。本稿では、PSV の利点と限界について概説する。

PSV は患者の自発呼吸に合わせて、吸気の間一定の気道内圧を保つ換気モードである（図 1）。利点は、自発呼吸との同調性に優れること、PS 圧にほぼ比例して呼吸仕事を軽減できること（図 2）である¹⁾。そのため、重症の呼吸不全から人工呼吸器離脱の場面まで広く用いられている。

PSV の 1 呼吸を 3 つのタイミング、すなわち吸気努力の感知、換気補助、補助の終了に分け、それぞれについて話を進めていく。

I. 吸気努力の感知

PSV では、患者の吸気努力を感知（トリガー）して換気補助が始まる。トリガーの方法には、気道内圧の

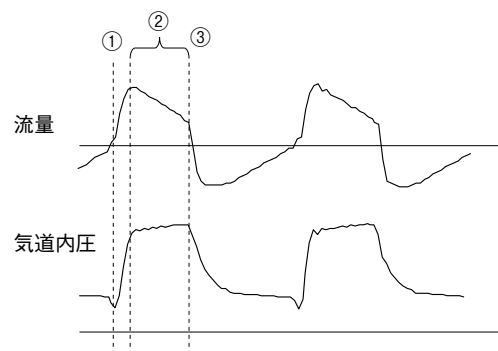


図 1 PSV の波形

上段に流量、下段に気道内圧の波形を示す。1 呼吸を 3 つのタイミングに分ける。

- ①吸気努力の感知：吸気努力により気道内圧がいったん低下する。気道内圧低下や流量変化が基準に達すると PSV が作動し、気道内圧が上昇し始める。
- ②換気補助：速やかに気道内圧を上昇させ、吸気努力のある間、設定の気道内圧を保つよう流量を調節する。
- ③補助の終了：吸気流量が吸気終了基準まで低下すると、補助が終了する。

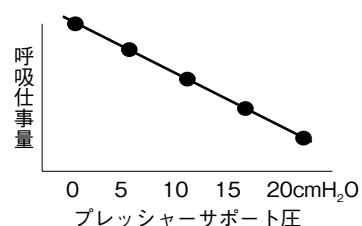


図 2 PSV の補助効果

PS 圧を上げるにつれ、呼吸仕事量が減少する。

低下を感知する圧トリガー、流量変化を感知する流量トリガーの2つがあるが、最近では後者が主流である。鋭敏で、トリガーに要する時間が短くて済むからである。

一方、流量トリガーで感度を鋭敏に設定すると、自発吸気がないにも関わらず些細なノイズによって換気補助が誤作動してしまう現象が起こる。すなわち、人工呼吸器回路内にできた結露が振動することによって誤作動が起こったり（図3）、心臓の拍動によって誤作動が起こったりする（図4）。

また、人工呼吸器回路や気管チューブ周囲のわずかなリークによっても誤作動が起こる。まずは結露やリークなど誤作動を起こす要因を可及的に取り除き、次に、誤作動が起こらない、ほどほどに鋭敏なトリガー感度を選ぶ必要がある。

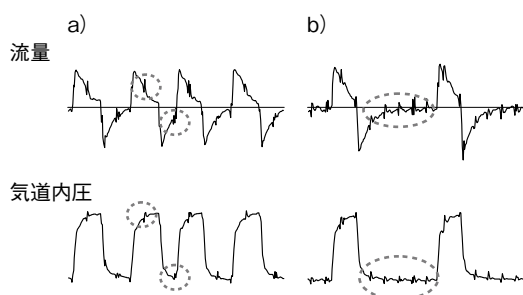


図3 結露による PSV の誤作動

人工呼吸器回路内の結露により流量・気道内圧に揺れが生じ、揺れが大きくなると誤作動が起こる。
a) 結露のために誤作動が起こっている。結露によるノイズが認められる（○の部分）。
b) トリガー感度を意図的に鈍くすると誤作動が消え、結露によるノイズが鮮明となる。

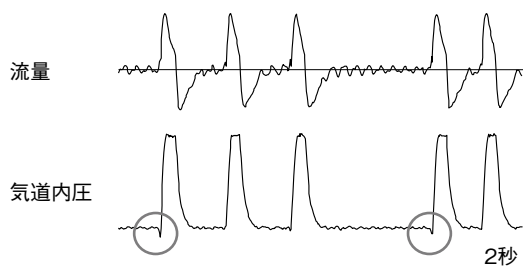


図4 心臓の拍動による誤作動

拡張した心臓が大きく拍動すると、この振動が隣り合う肺や気道に伝わり、流量や気道内圧の揺れを起こす。開心術後の患者。自発呼吸に対し PSV が作動しているように見えるが、本当の自発呼吸は気道内圧低下を伴った2呼吸（○部分）だけで、残り3呼吸は誤作動である。

Ⅱ. 換気補助

PSV では、吸気努力を感知した後、気道内圧を速やかに上昇させ、吸気の間一定の気道内圧を保つよう流量を調節する。流量供給が患者の要求に見合ったものであれば、患者と人工呼吸器間の同調性がよくなり、呼吸仕事量が軽減する。しかし、呼吸努力が著しく強い患者ではしばしば供給された流量が需要に比べ不足し、呼吸困難が増悪したり呼吸仕事量が増えてしまう。

そこで、気道内圧上昇のスピードを調節する吸気立ち上がり時間（inspiratory rise time：IRT）機能が開発された（図5）。IRT を短くすると、初期の吸気流量が増加し、患者の呼吸仕事量が減少する^{2,3)}。モデル肺で検討すると、人工呼吸器の機種に関わらず IRT を短くするにつれトリガーに要する時間、呼吸負荷が軽減し、気道内圧の低下が小さくなった（図6）⁴⁾。しかし、

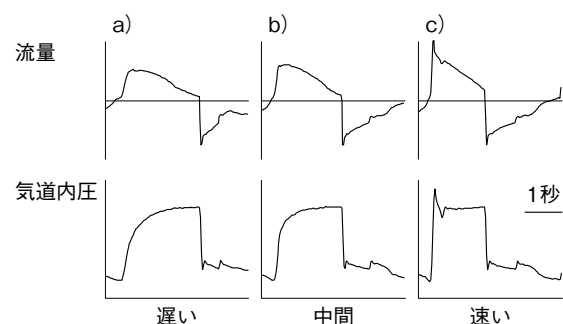


図5 IRT の吸気流量への影響

a) 長い IRT、c) 短い IRT、b) 中間の IRT である。IRT が短くなるほど、最大吸気流量が増加する。

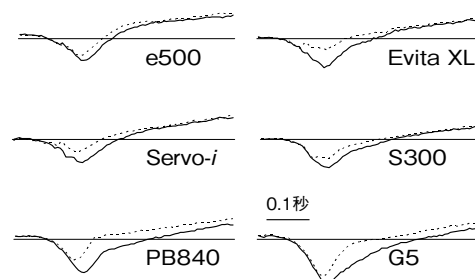


図6 IRT の気道内圧への影響

人工呼吸器6機種全てにおいて、短い IRT（破線）では長い IRT（実線）に比べ、気道内圧の低下が小さくなり、呼吸負荷が軽減される。

IRT を短くしすぎると、気道内圧が設定圧を越えたり気道内圧が振動したりするため、不快感が増大し呼吸仕事量も増加する点に注意が必要である。

IRT の調節は、グラフィックモニターや呼吸パターンから判断するしかない。吸気流量の供給が不足すると、トリガー時の気道内圧の低下が著しくなり(図6)、呼吸パターンでは肋間陥凹・下顎呼吸・鼻翼呼吸が認められる。対策としては、IRT を短めに変更することが挙げられる。調節がうまくいけば換気量が増加し、呼吸パターンも改善する。一方、IRT を短くしすぎると逆に不快感をもたらし、吸気流量が増大することで人工呼吸器関連肺損傷(ventilator-associated lung injury: VALI)の危険性が増える恐れがある⁵⁾。

Ⅲ. 補助の終了

PSV では、吸気流量がある既定値まで減少した時に吸気補助が終わり、呼気に移行する。これを吸気終了基準(termination criteria: TC)、あるいは呼気感度という。TC は従来の機種で 5L/min、または最大吸気流量の 25% に固定されていた。しかし、肺メカニクス、呼吸パターンによっては TC がいつも適切とは限らない。慢性閉塞性肺疾患(chronic obstructive pulmonary diseases: COPD)では気道抵抗が大きいため、最大吸気流量が小さく、減少速度もゆっくりとなり、通常の TC に達するのに時間を要し吸気時間が長くなってしまふ。換気補助の時間が不適切に長くなると、呼気努力と衝突したり呼気時間が不足する可能性が生じる。一方、急性呼吸促迫症候群(acute respiratory distress syndrome: ARDS)や拘束性換気障害などコ

ンプライアンスが低い場合、吸気流量の変化が TC にすぐ達してしまい、吸気努力の途中で補助が終了したり呼吸負荷が増大する。

そこで、TC を調節する機能が開発されている(図7)。適切に設定できれば患者と人工呼吸器間の同調性が改善し、呼吸負荷が減少するが、設定が不適切だと一回換気量(tidal volume: V_T)が減少したり呼吸負荷が増大する⁶⁾。したがって、病態に応じて TC を変更する必要がある⁷⁾。すなわち、気道抵抗の高い患者では通常の TC 設定より大きく、コンプライアンスの低い患者では通常の設定値より小さく設定する。

Ⅳ. PS 圧設定の自動化

PSV では、 V_T は保証されない。たとえば、肺の状態が悪化したり吸気努力が低下すれば V_T が減少し、吸気努力が強くなれば V_T が増加する。この欠点を補うものとして、dual control ventilation (DCV)^{8,9)}が開発された。DCV では設定された V_T を保つよう設定圧を自動的に変更する。たとえば患者のコンプライアンスが変化すると(図8) V_T がいったん変動するが、当初の換気量を維持するべく PS 圧を変更する。一方、コンピュータ自動調節モードは、呼吸数、 V_T 、呼気終末炭酸ガス濃度をモニターし、PSV の設定圧を自動的に変更する¹⁰⁾。

これらのモードには、換気量を保証する、肺メカニクスの変化に対応する、自動的に人工呼吸器離脱を進めてくれる、といった利点がある一方、次のような注意が必要である。まず、換気補助を増やすべき場面で逆に減らしてしまう現象が起こり得る。たとえば、

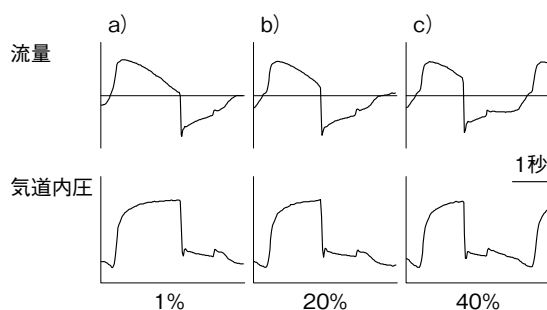


図7 TCの吸気時間に及ぼす影響

吸気流量が最大流量の a) 1%、b) 20%、c) 40%まで低下したとき吸気が終了する。TC を大きくするにつれて、PSV が早期に終了し吸気時間が短縮する。

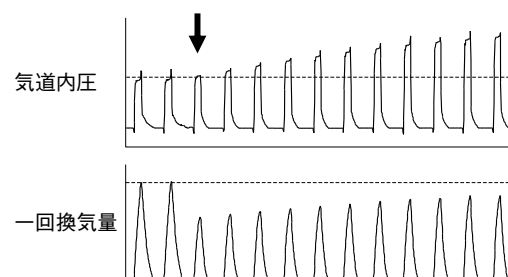


図8 DCVでコンプライアンスが低下した時の波形

患者のコンプライアンスが3呼吸目で突然低下した。一回換気量がいったん低下した後、PS圧が徐々に増加し、一回換気量は元の設定値に戻っていく。

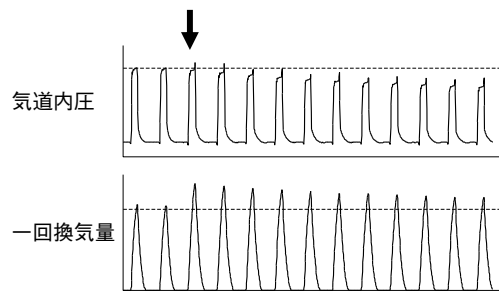


図9 DCVで患者の呼吸努力が増加して時の波形

患者の呼吸努力が、3呼吸目から突然増大した。一回換気量がいったん増加した後、PS圧が徐々に低下し、一回換気量は元の設定値へ戻っていく。

発熱、喀痰貯留、興奮、呼吸苦などのために急激に吸気努力が増えた場合、当然 V_T は増える (図9)。しかしDCVでは V_T を保とうとしてPS圧を下げてしまう。つまり、補助を増やすべきところで逆に補助を減らしてしまうことが起こり得る¹¹⁾。次に、DCVで V_T を高く設定しすぎた場合、補助が多すぎるために呼吸努力が育ちにくく、人工呼吸器離脱の妨げとなる可能性も考えられる。さらに片肺挿管など急激に肺メカニクスが悪化した場合、上限アラーム設定次第でPS圧が危険なレベルまで上がるかもしれない。

おわりに

以上、PSVにおける進歩について述べた。患者や医療スタッフの負担を減らすべく、新しい機能が開発されているが、人工呼吸器が賢くなっても、それを有効に利用できるかどうかはわれわれにかかっている。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) Uchiyama A, Imanaka H, Taenaka N, et al : Comparative evaluation of diaphragmatic activity during pressure support ventilation and intermittent mandatory ventilation in animal model. *Am J Respir Crit Care Med.* 1994 ; 150 : 1564-8.
- 2) Bonmarchand G, Chevron V, Ménard JF, et al : Effects of pressure ramp slope values on the work of breathing during pressure support ventilation in restrictive patients. *Crit Care Med.* 1999 ; 27 : 715-22.
- 3) Chiumello D, Pelosi P, Croci M, et al : The effects of pressurization rate on breathing pattern, work of breathing, gas exchange and patient comfort in pressure support ventilation. *Eur Respir J.* 2001 ; 18 : 107-14.
- 4) Murata S, Yokoyama K, Sakamoto Y, et al : Effect of inspiratory rise time on triggering work load during pressure-support ventilation : a lung model study. *Respir Care.* 2010 ; 55 : 878-84.
- 5) Maeda Y, Fujino Y, Uchiyama A, et al : Effects of peak inspiratory flow on development of ventilator-induced lung injury in rabbits. *Anesthesiology.* 2004 ; 101 : 722-8.
- 6) Tokioka H, Tanaka T, Ishizu T, et al : The effect of breath termination criterion on breathing patterns and the work of breathing during pressure support ventilation. *Anesth Analg.* 2001 ; 92 : 161-5.
- 7) Yamada Y, Du HL : Analysis of the mechanisms of expiratory asynchrony in pressure support ventilation : a mathematical approach. *J Appl Physiol.* 2000 ; 88 : 2143-50.
- 8) Branson RD, Johannigman JA, Campbell RS, et al : Closed-loop mechanical ventilation. *Respir Care.* 2002 ; 47 : 427-51.
- 9) 今中秀光 : 換気モード②パーシャル換気サポート. *呼吸.* 2001 ; 20 : 293-9.
- 10) Dojat M, Harf A, Touchard D, et al : Clinical evaluation of a computer-controlled pressure support mode. *Am J Respir Crit Care Med.* 2000 ; 161 : 1161-6.
- 11) Jaber S, Delay J-M, Matecki S, et al : Volume-guaranteed pressure-support ventilation facing acute changes in ventilatory demand. *Intensive Care Med.* 2005 ; 31 : 1181-8.