

特集 進化した呼吸管理

Topics 1

侵襲的人工呼吸管理

今中 秀光

要旨：気管挿管により人工呼吸管理を行う目的は、人工呼吸管理を容易にすること、誤嚥の危険性を減少させること、分泌物喀出を促進すること、上気道狭窄を改善することである。換気モードは、呼吸仕事のすべてを人工呼吸器が供給する調節換気と、患者の自発呼吸を温存し呼吸仕事の一部を補助する部分的換気補助とに大別できる。部分的換気補助は患者自発呼吸との同調性に優れ、広く用いられている。

キーワード：気管挿管、呼吸仕事、部分的換気補助、患者-人工呼吸器間の同調性、ボリュームコントロール換気、プレッシャーコントロール換気、プレッシャーサポート換気、同期型間欠の強制換気、アシストコントロール換気、プロポーショナルアシスト換気、NAVA、高頻度オシレーション換気、APRV
Tracheal intubation, Respiratory workloads, Partial ventilatory support, Patient-ventilator synchrony, Volume-controlled ventilation (VCV), Pressure-controlled ventilation (PCV), Pressure-support ventilation (PSV), Synchronized intermittent mandatory ventilation (SIMV), Assist-control ventilation (ACV), Proportional-assist ventilation (PAV), Neurally adjusted ventilatory assist (NAVA), High-frequency oscillatory ventilation (HFOV), Airway pressure-release ventilation (APRV)

連絡先：今中 秀光
〒770-8503 徳島市蔵本町 2-50-1
徳島大学病院 ER・災害医療診療部
(E-mail: imanakah @ tokushima-u.ac.jp)

侵襲的人工呼吸管理の目的

急性呼吸不全では、肺胞換気、血液の酸素化、組織での酸素化のいずれかが重度に障害され、患者の生命が急速に脅かされる。具体的には低酸素血症、高炭酸ガス血症、呼吸筋疲労が出現することが多い。これら急性呼吸に対して気管挿管により人工呼吸管理を行う目的は、人工呼吸管理を容易にすること、誤嚥の危険性を減少させること、分泌物喀出を促進すること、上気道狭窄を改善することである。

人工呼吸器の作動様式の基本

人工呼吸は、人工呼吸器が呼吸仕事のすべてを供給する「調節換気」と、患者の自発呼吸を温存し呼吸仕事の一部を補助する「部分的換気補助」とに大別できる。

人工呼吸器の作動様式を考えると、吸気の開始、維持、終了の3つの時相に分けて考える。まず、吸気の開始が「トリガー」である。調節換気では一定の時間が経過すると吸気が始まる（時間トリガー）のに対し、部分的換気補助では患者の吸気努力に同期して吸気が始まる（患者トリガー）。

次に吸気を維持する際、何を規定するかが「リミット」である。圧を規定する従圧式（プレッシャーコントロール、換気プレッシャーサポート換気）、容量を規定する従量式（ボリュームコントロール換気）がある。最後に吸気から呼気への切り替わりが「サイクル」で、容量、流量、圧、時間で決まる。

調節換気

調節換気（controlled mechanical ventilation：CMV）では人工呼吸器が呼吸仕事のすべてを供給する。量を規定するボリュームコントロール換気（volume-controlled ventilation：VCV）と、圧を規定するプレッシャーコントロール換気（pressure-controlled ventilation：PCV）、両者を組み合わせた dual control mode の3種類がある。

調節換気の利点と欠点を表1にあげる。まず換気回数、1回換気量、気道内圧などを意図するように調節できるため、肺保護戦略に則した人工呼吸設定が容易である。

表1 トータル換気サポートの利点と欠点

利点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 換気回数、換気量、流量波形を意図するように調節できる 2. 肺保護的な人工呼吸を設定しやすい 3. 血液ガスを希望する値に調節しやすい 4. 患者の呼吸仕事量や酸素消費量を軽減できる 5. 患者の呼吸器系メカニクスの測定が容易である
欠点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鎮静薬、筋弛緩薬の投与を必要とする 2. 自発呼吸がないため分泌物の排出が悪くなり、無気肺や肺炎を合併する危険性が増加する 3. 呼吸筋の廃用性萎縮を起こす危険性がある

重症呼吸不全に対して不適切な人工呼吸管理を行うと肺損傷が発症することが明らかとなり、1回換気量の制限（6～8 ml/kg）、気道内圧の制限（ ≤ 30 cmH₂O）といった肺保護戦略が重要視されている¹⁾。そのほか、吸気時間や吸気流量などを希望どおりに設定することができ、呼吸器系メカニクスの測定も容易である。

しかし鎮静薬の投与を必要とすることが多く、分泌物の排出が悪くなり無気肺や肺炎の発生率が増加したり、呼吸筋の廃用性萎縮を起こしたりする危険性がある。そのため、調節換気は、鎮静・筋弛緩下の呼吸管理が必要な重症な急性期のみとし、速やかに部分的換気補助に移行すべきである。

1. ボリュームコントロール換気（VCV）

1回換気量、吸気流量（または吸気時間）、吸気流量パターンを設定する（図1）。1回換気量、吸気流量、吸気時間のうち2つを設定すれば残りの1つは自動的に決まる。一般に吸気流量を規定し（流量リミット）、設定した1回換気量が供給された時点で吸気が終了する（容量サイクルあるいは時間サイクル）。

最大の利点は1回換気量、分時換気量が保証されることである。吸気圧ポーズを設定すると、気道内圧パターンから呼吸器系メカニクスを求めることができる（図2）。

注意点は、片側挿管、呼吸器系メカニクスの突然の悪化、ファイティングや咳嗽時には、気道内圧が異常に上昇してしまうことである。これらを予防するために、気道内圧モニターとアラーム設定が必須である。

2. プレッシャーコントロール換気（pressure-controlled ventilation：PCV）

吸気時に一定の気道内圧を保つよう、人工呼吸器からの吸気流量を制御する。プレッシャーコントロール圧と吸気時間を設定する（図1）。PCV時の吸気流量は徐々

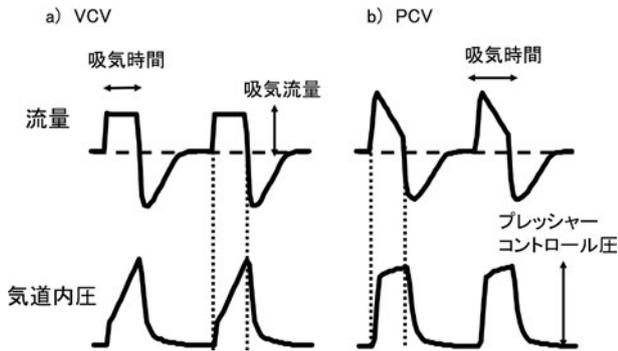


図1 VCVとPCV。(a) VCV. 吸気流量および流量パターンを規定する。ここでは一定の吸気流量を用いている。(b) PCV. 設定した吸気時間中の気道内圧を一定に保ち、吸気流量は右下がりの漸減波となる。

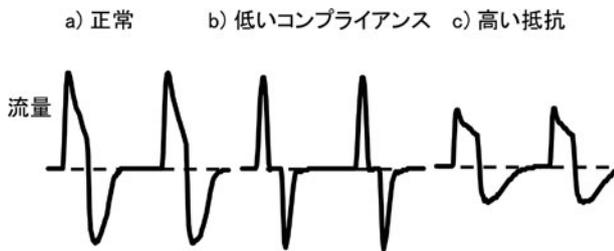


図3 呼吸器系メカニクスの違いによる流量波形の特徴的パターン。PCVでは流量パターンから呼吸器系メカニクスを判断できる。(a) コンプライアンスが正常の場合。吸気流量は右下がりの漸減波となる。(b) コンプライアンスが低い場合。流量の生じている時間が短くなり、尖ってやせた波形になる。(c) 抵抗が高い場合。流量の最高値が低くなり、低下速度も鈍くなる。

に減少する漸減波パターンとなる。PCVでは吸気流量、1回換気量が呼吸器系メカニクスと、プレッシャーコントロール圧、患者の吸気努力などによって変化する(図3)。

PCVの利点は、最高気道内圧を制限できることであり、人工呼吸関連肺損傷を予防することが期待できる。またPCVでは換気分布が改善することも報告されている。

注意点は1回換気量、分時換気量が保証されないことである。設定した吸気時間が短すぎると、吸気が十分入

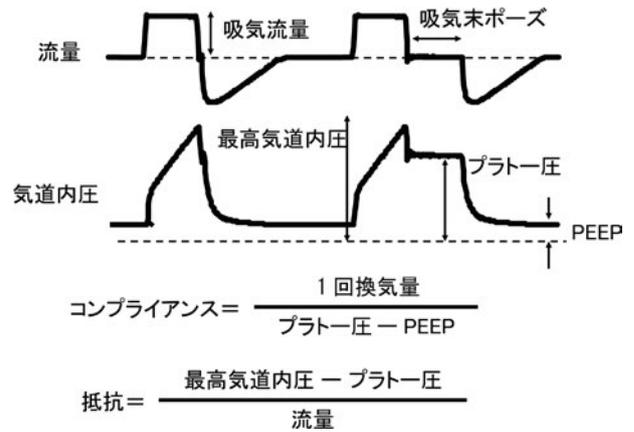


図2 呼吸器系メカニクスの測定。ボリュームコントロール換気に吸気末ポーズを加え、最高気道内圧、プラトー圧、PEEPからコンプライアンスと抵抗を求めることができる。

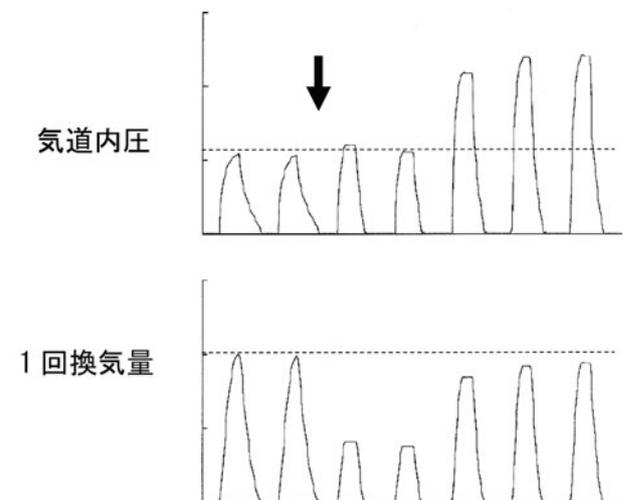


図4 Dual control mode. 患者のコンプライアンスが突然減少したときの反応を示す。1回換気量がいったん低下するが、1回換気量が確保されるまで気道内圧を高くしていく。

らないため1回換気量が減少する。呼気時間が不十分でも内因性PEEPが発生し1回換気量が減少する。さらに患者の呼吸器系メカニクスの悪化などさまざまな要因により1回換気量が変動する。したがって1回換気量、分時換気量のモニターとアラーム設定が必須となる。

3. Dual control mode

PCVのもとで1呼吸ごとにPC圧を自動的に補正し、設定された1回換気量を維持しようとする(図4)²⁾。利点は1回換気量が保証されることで、VCVに比べ患者と

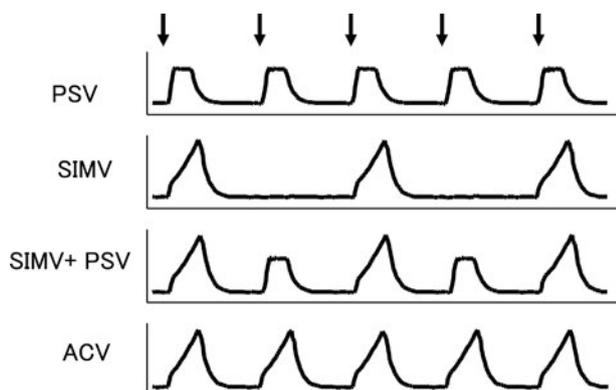


図5 部分的換気補助の気道内圧波形。PSV：自発呼吸に同期して一定の気道内圧で補助される。SIMV：自発呼吸に同期して補助換気が3回行われ、残りの自発呼吸は補助されていない。SIMV+PSV：自発呼吸に同期して補助換気が3回、PSVが2回行われている。ACV：自発呼吸に同期して5回すべてが補助換気となっている。

人工呼吸器の同調性が改善する。注意点は、呼吸器系メカニクスが悪化した場合、1回換気量を元に戻そうと気道内圧が上がりすぎる可能性があることである。

部分的換気補助

部分的換気補助は、患者の自発呼吸を温存して自発呼吸の一部を補助し、患者と人工呼吸器間の同調性の向上、呼吸仕事量の軽減を目的とする換気法である。代表的なものとして、プレッシャーサポート換気 (pressure-support ventilation : PSV)、同期型間欠的強制換気 (synchronized intermittent mandatory ventilation : SIMV)、アシストコントロール換気 (assist-control ventilation : ACV) などがあげられる (図5)。

部分的換気補助の利点と欠点を表2にあげる。まず患者と人工呼吸器の同調性がよいためファイティングなど気道内圧の異常上昇を予防できる。次に呼吸の快適性が増すため、鎮静薬の投与量が少なくて済み、鎮静・筋弛緩に関連した合併症を予防することが期待できる。さらに咳嗽、自発呼吸を温存しているため、喀痰排出を損なわない、呼吸筋の萎縮を予防する、換気分布や換気血流比の分布が悪化しにくいなどの効果が期待できる。最後に呼吸仕事量を調節できるので、円滑な人工呼吸器離脱を目指すことができる。

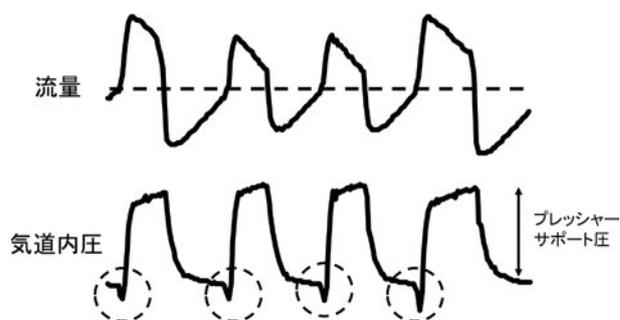


図6 プレッシャーサポート換気。PSVでは、自発呼吸にあわせ、吸気の間、気道に一定の圧を加える。点線で囲んだ丸：自発呼吸によって気道内圧がいったん下がることを示す。

表2 部分的換気補助の利点と欠点

利点	1. 患者と人工呼吸器の同調性がよく、ファイティングなど気道内圧の異常上昇を予防できる
	2. 呼吸の快適性が増すため、鎮静薬の投与量が少なくて済み
	3. 自発呼吸・自発咳嗽能を温存しており、喀痰の排出能を損なにくい
	4. 無気肺や肺炎の頻度を低く抑えることができる
	5. 換気分布や換気血流比の分布が改善する
	6. 呼吸筋の萎縮を起こしにくい
	7. 呼吸仕事量を調節できる
欠点	1. トリガー設定を適切に行わないと、誤作動が起こったり、自発呼吸が検知されず呼吸負荷が増大したりする
	2. 自発呼吸努力が強い場合、肺保護的な人工呼吸を設定しにくい

部分的換気補助では吸気努力に同期 (トリガー) して補助換気を開始する。鋭敏でしかも誤作動の発生しないトリガー設定が必要となる。トリガーに要する時間 (トリガー遅れ) が増大すると同調性が損なわれ呼吸仕事量が増大する。一方、トリガー設定が鋭敏すぎると、結露などで人工呼吸器が誤作動してしまう。

1. プレッシャーサポート換気 (pressure-support ventilation : PSV)

患者の自発呼吸に合わせて吸気の間、気道に一定の圧をかける (図6)。最大の利点は同調性に優れることである。さらに呼吸負荷の軽減を調節しやすいため³⁾、人工呼吸器離脱の際に広く用いられている。注意点は換気量が保証されないこと、無呼吸では作動しないことである。換気量のモニターとバックアップ換気の設定が必須である。

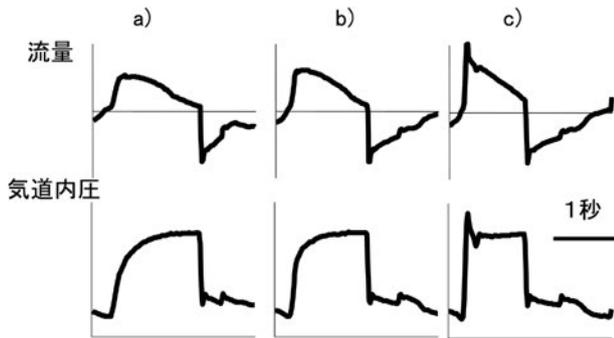


図7 吸気立ち上がり時間. PSVの吸気立ち上がりの速度を調節できる機能. (a) ゆっくりとした立ち上がり, (b) aとcの中間, (c) 素早い立ち上がり. 立ち上がりが早くなるほど最大吸気流量が増加するが, 気道内圧がオーバーシュートする現象が観察される.

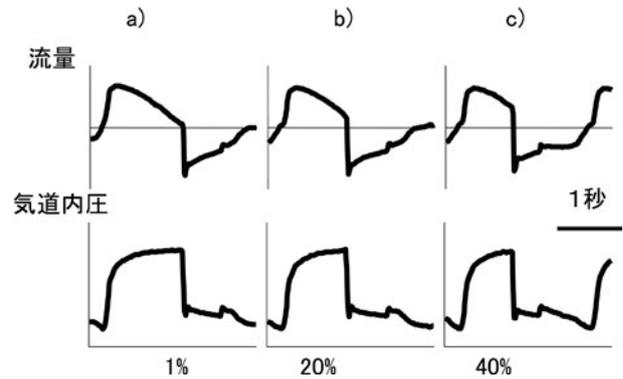


図8 吸気終了基準. 左から, 最大吸気流量の1%, 20%, 40%まで吸気流量が低下したときにPSVが終了する. それにつれて吸気時間が短くなる.



図9 SIMVとPSVの併用. VCVによるSIMV(↓)が換気量を保証し, SIMVの合間の自発呼吸に対してはPSVが補助を行う.



図10 プロポーショナルアシスト換気. 呼吸努力に比例して, 気道内圧が変動する. 最下段は胸腔内圧で, 吸気努力の指標である.

最近, 新しい付加機能が開発された. 吸気流量の立ち上がり速度を調節する「吸気立ち上がり時間」(図7)と, 吸気の終了を調節する「吸気終了基準」(図8)である. 吸気立ち上がり時間を短くすると吸気流量が増加し呼吸仕事量が減少する. 逆に短すぎると気道内圧がオーバーシュートしてしまう. 次に, PSVは吸気終了(サイクル)の同調性に優れているが, 慢性閉塞性肺疾患など呼吸器系メカニクスに異常のある患者では, 吸気がいつも適切に終了するとは限らない. 人工呼吸器の吸気時間が長くなりすぎると患者の呼吸とぶつかり, 短すぎればPSVが吸気努力の途中で終了してしまうことになる. 吸気終了基準は人工呼吸器の流量波形を観察しつつ調節する.

2. 同期型間欠的強制換気 (synchronized intermittent mandatory ventilation : SIMV)

強制換気と自発呼吸を組み合わせたモードで, 強制換気の合間に自発呼吸ができる. 強制換気のタイミングは近傍の自発呼吸と同期させている. SIMVでは強制換気回数を増やせば呼吸仕事は減少するが, 自発呼吸との同調性には問題がある.

そこで, SIMVの換気量保証, PSVの優れた同調性という利点の両方をねらって, SIMVとPSVを併用することが多い(図9). VCVやPCVで強制換気の内容を設定し, SIMVの換気回数を設定する. 自発呼吸回数がSIMV換気回数設定を上回る場合PSVが作動する. 人工呼吸器からの離脱を図る場合, まずSIMV換気回数を下

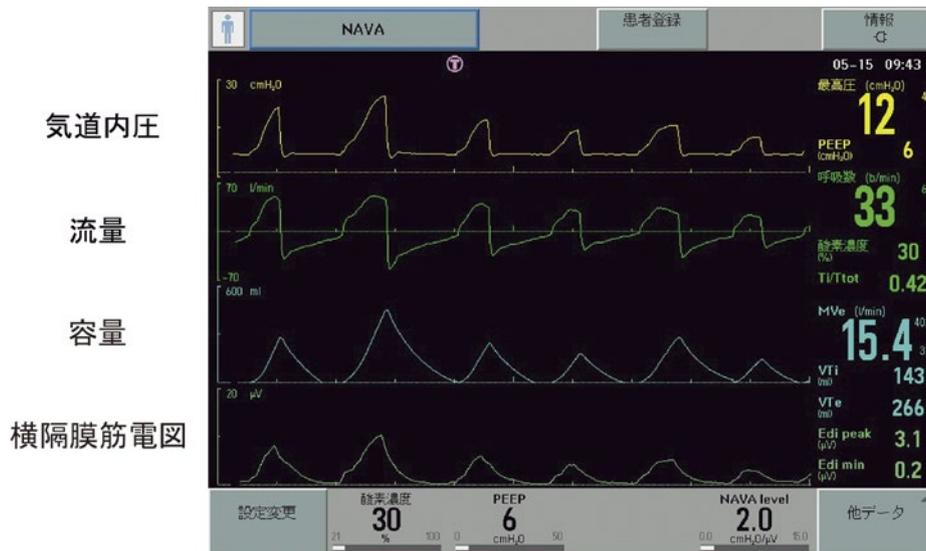


図 11 Neurally adjusted ventilatory support (NAVA). 横隔膜筋電図は吸気努力の指標であり、これに比例するよう換気補助(气道内圧)が調節される。

げて、最終的に少数回数の SIMV (毎分 1~3 回)、もしくは PSV 単独とする。

3. アシストコントロール換気 (assist-control ventilation : ACV)

ACV は強制換気と補助呼吸が混在する換気様式である。強制換気は PCV あるいは VCV で行う。自発呼吸がない場合調節換気となり、設定した呼吸回数だけ強制換気が行われる。自発呼吸がある場合、自発呼吸に同調して補助換気が行われる。

4. プロポーショナルアシスト換気 (proportional-assist ventilation : PAV)

患者の呼吸努力に比例して气道内圧を制御する換気モードである⁴⁾。患者の吸気努力は、呼吸器系エラストランス (コンプライアンスの逆数) と抵抗、肺容量、吸気流量から算出され、必要な呼吸仕事の一定割合を補助する (図 10)。

PAV を適切に設定すれば快適性が増し、違和感が少なく、同調性にも優れる。气道内圧が低く抑えられ、他の換気モードに比べ血行動態への影響が少ない。また患者の吸気努力を温存し、呼吸仕事を一定の割合で残すことから、呼吸筋の廃用性萎縮が起こりにくい。

しかし、PAV は広く用いられるには至っていない。換気モードの理論や設定方法が従来のもものと異なっており慣れにくいこと、健全な自発呼吸努力が必須であること、不適切な設定で气道内圧が異常上昇する危険性があるこ

と、などが理由である。

5. Neurally adjusted ventilatory assist (NAVA)

横隔膜筋電図のシグナルを利用して、自発呼吸を補助する換気モードである⁵⁾ (図 11)。複数の電極を埋め込んだ特殊な栄養チューブを用いて横隔膜筋電図をモニターする。自発呼吸との同調性に優れ、吸気の開始 (トリガー)、換気補助の割合 (リミット)、吸気の終了 (サイクル) とともに患者の横隔膜運動に応じた換気補助ができる。

ただし、栄養チューブ留置のない場合、神経筋の信号伝達に問題のある場合、自発呼吸がないなど呼吸中枢に異常がある場合には、用いることができない。

特殊な人工呼吸

1. High-frequency oscillatory ventilation (HFOV)

リアモーターで振動するピストンなどを用いて、高頻度 (成人で 1 分間 100 回以上) のサイン波の气道内圧を作り出す。吸気も呼気も積極的に行われ、新鮮ガスの定常流を呼吸回路に流すことで呼気中の CO₂ を洗い流す。1 回換気量が死腔よりも小さいことから、究極の肺保護の人工呼吸と考えられる。呼吸不全の新生児に昔から用いられていたが、成人で利用可能な機種が開発された。

重症呼吸患者の生存率や予後を改善するかはまだ不明である。ARDS患者では、HFOV開始直後に酸素化能が改善したが、30日後死亡率に有意差は認められなかった⁶⁾。

2. Airway pressure-release ventilation (APRV)

比較的高いPEEPによるCPAPに、非常に短い時間だけ気道を大気圧に開放する時相を加えた換気モードである。気道内圧を危険域まで上昇させることなく、高いPEEPを設定することが可能である。自発呼吸を温存するため、荷重域の換気分布、ガス交換が改善すると提唱されている⁷⁾。

APRVの長いCPAP相は肺泡含気を維持し酸素化を改善すると期待される。圧開放は大気に対して行われ、通常0.4~0.7秒と短く、1分間に5~10回程度行う。圧開放の時間が十分短ければ、肺泡虚脱を回避できるだけでなく、高PEEPによる静脈還流低下を軽減し、CO₂蓄積を軽減する効果があると期待される。しかし、APRVが従来の換気様式と比較して予後を改善したという証拠はない。

著者のCOI (conflicts of interest) 開示：本論文発表内容に関して特に申告なし。

引用文献

- 1) The Acute Respiratory Distress Syndrome Net-

work. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2000; 342: 1301-8.

- 2) Branson RD, et al. Closed-loop mechanical ventilation. *Respir Care* 2002; 47: 427-51.
- 3) Uchiyama A, et al. Comparative evaluation of diaphragmatic activity during pressure support ventilation and intermittent mandatory ventilation in animal model. *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 150: 1564-8.
- 4) Younes M. Proportional assist ventilation, a new approach to ventilatory support: theory. *Am Rev Respir Dis* 1992; 145: 114-20.
- 5) Kacmarek RM. Proportional assist ventilation and neutrally adjusted ventilatory assist. *Respir Care* 2011; 56: 140-8.
- 6) Derdak S, et al. High-frequency oscillatory ventilation for acute respiratory distress syndrome in adults: a randomized, controlled trial. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; 166: 801-8.
- 7) Putensen C, et al. Long-term effects of spontaneous breathing during ventilatory support in patients with acute lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 2001; 164: 43-9.

Abstract

Invasive mechanical ventilation

Hideaki Imanaka

Emergency and Disaster Medicine, Tokushima University Hospital

Objectives of mechanical ventilatory support with tracheal intubation are to make ventilatory management easy, to decrease risk of aspiration, to promote the removal of sputum, and to relieve upper airway obstruction. Ventilatory modes are divided into total ventilatory support and partial ventilatory support. Partial ventilatory support assists a part of patient's respiratory workloads, and demonstrates good patient-ventilator synchrony.