

□ 特集：ユニークな換気モードの基本的動作と臨床使用の有用性と問題点 □

PAV & proportional pressure support

PAV & Proportional pressure support

Katsuhiko AYUKAWA *

* Emergency Medical Center, Iizuka Hospital, Fukuoka 820-8505

Proportional assist ventilation (PAV)/proportional pressure support (PPS) is a new ventilatory mode that was developed to enhance patient/ventilator synchrony, by providing inspiratory flow and pressure in proportion to the patient's effort. This mode is now available in 3 ventilators manufactured by Respironics, Dräger and Kawasaki. Setting and characteristics of these machines are discussed. PAV/PPS may provide higher level of respiratory comfort and better exercise tolerance than pressure support ventilation (PSV). However PAV/PPS should be given an attention to the runaway phenomenon. We need to further investigation to a suitable situation and type of respiratory failure.

1. PAV/proportional pressure support とは

そもそも私たちが普段呼吸するとき、換気量や気道内圧は周囲や生理的条件の影響を受け、1呼吸ごとに変化している。人工呼吸中であっても、意識があり、自発呼吸下であれば、自分の吸いたいように肺の悪い分だけ呼吸を助けてくれる換気モードであれば、患者は呼吸をあまり意識することなく楽に呼吸できると思われる。

PAV は proportional assist ventilation (比率補助換気) の略であり、搭載する人工呼吸器によっては、PPS (proportional pressure support) と称されている。Younes らにより開発された換気補助法であり、従来の換気量や気道内圧を規定する換気法と異なり、自発呼吸下で1呼吸ごとの呼吸(仕事量)を設定した比率で部分的に補助する換気モードである^{1)~3)}。図1にBiPAP (bi-level

CPAP) と PAV の違いを示すが、BiPAP では最高気道内圧が規定されているが、PAV では1呼吸ごとに換気量、気道内圧、流量が変化している。

図2に示すように、人工呼吸下に自発呼吸がある場合、呼吸筋の作り出す圧 (P_{mus}) と人工呼吸器が押す圧 (P_{aw}) は、気道の抵抗と肺胸郭の硬さに対抗して行われる。気道抵抗でできる圧を P_r 、呼吸器系の弾性によりできる圧を P_{el} とすると、

$$P_{mus} + P_{aw} = P_r + P_{el}$$

という式が成り立つ。 P_r はガス流量 (\dot{V}) [l/min] と気道抵抗 (R) [$cmH_2O/l/sec$] の積であり、 P_{el} は、換気量と呼吸器系のエラスタンス (E) (コンプライアンス C [ml/cmH_2O] の逆数) の積と表される。したがって、

$$P_{mus} + P_{aw} = \dot{V}R + VE$$

ということになる。

呼吸器系の気道抵抗 (R) とエラスタンス (E) が測定され判っていれば、吸気流速 (\dot{V}) と吸気

* 麻生飯塚病院救急救命センター

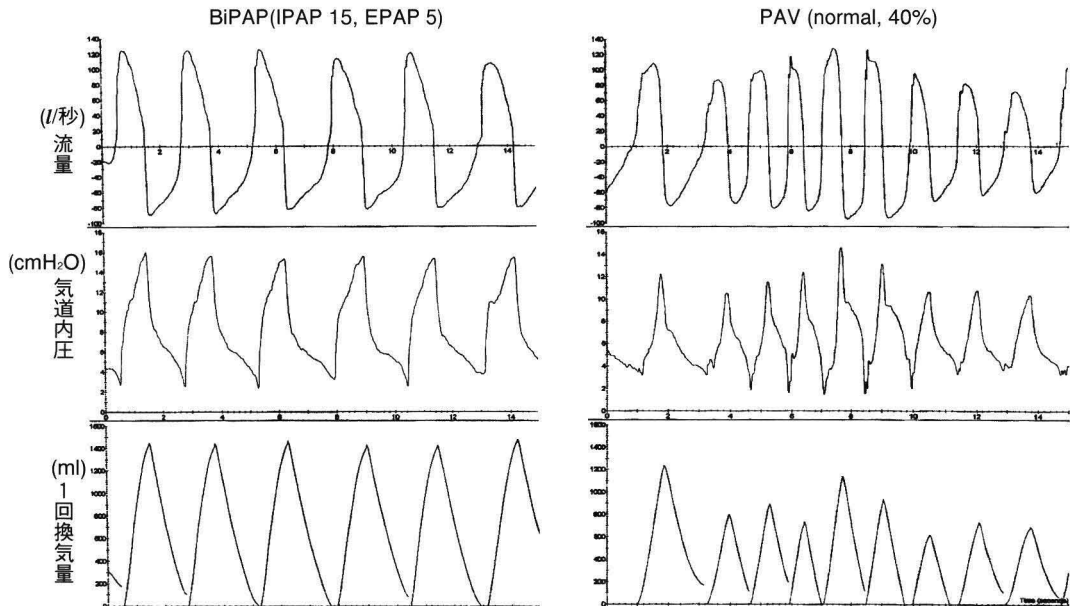


図1 BiPAP および PAV 時の流量，気道内圧，換気量の違い

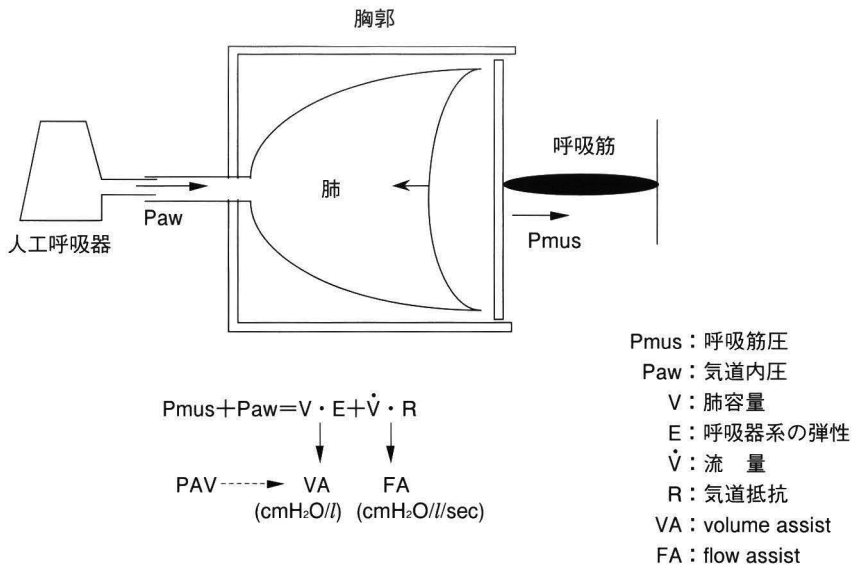


図2 呼吸筋圧 (Pmus) と PAV の補助について

容量 (V) を計測し，1呼吸ごとの Pmus + Paw を計算できる。ΔP × ΔV を積分することにより，呼吸仕事量を計算できる⁴⁾。PAV/PPS では，気道抵抗に対する調整を flow assist (FA) [cmH₂O/l/sec]，肺の弾性に対する調整を volume as-

sist (VA) [cmH₂O/l] として設定し，患者の自発呼吸に合わせて，呼吸を補助する。気道の狭さや肺の硬さに合わせて人工呼吸器の補助する比率を決めると，吸気流速，流量を調節し，その比率で呼吸を補助してくれる。

2. 機種比較および臨床使用の実際

現在 PAV/PPS を搭載した人工呼吸器は、3 機種 あり。Respironics 社 製 BiPAP Vision[®]、ドレーゲル社製 Evita 4[®]、川重防災工業社製 SSV-200[®]である。比較を表1に示す。レスピロニクス

社の BiPAP Vision は、気管挿管を必要とせずに、マスクで PAV ができる人工呼吸器である。一方 Evita 4 の PPS および SSV-200 の PAV は、気管挿管下の使用許可を受けている。2004 年 9 月の時点では、SSV-200 は製造承認を受けてはいるが、販売には至っていない。

表 1 PAV & PPS 搭載器比較表

	BiPAP Vision	Evita 4	SSV-200
メーカー	レスピロニクス社	ドレーゲル社	川重防災工業
PAV/PPS 表示	PAV	PPS	PAV
仕様	マスク使用	気管挿管下	気管挿管下
FA, VA 設定方法	Quick start4つのパターンから選ぶこともできる	直接 Fa, Va を入力する	測定 C, R を参考に C, R を入力
補助 %	% 設定	なし	倍率設定
C, R 測定	測定しない	強制換気で測定	PAV モードで測定
最高吸気流速 (l/ 分)	240 (FIO ₂ 60% 以下)	180	300
吸気ガス供給	ブロアーモーター方式	HPSV 方式 (hyperpressure servo valve)	ベローズ方式

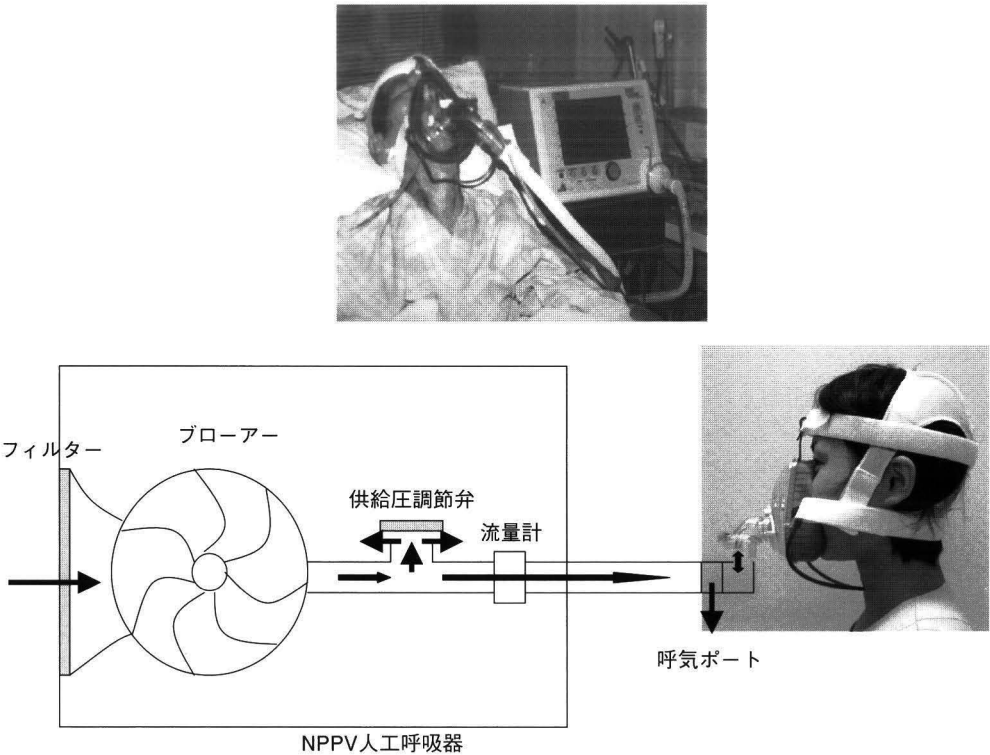


図 3 BiPAP vision および回路図

3 機種の特徴，使用法について述べたい。

表2 Quick start および custom start 時の VA およ
び FA の選択範囲

	VA (cmH ₂ O/l)	FA (cm ₂ O/l/sec)
obstructive	0 ～ 15	0 ～ 12
restrictive	0 ～ 25	0 ～ 4
mixed	0 ～ 25	0 ～ 12
normal	0 ～ 15	0 ～ 4
custom	0 ～ 60	0 ～ 40

の範囲で選択できるようになっている。

VA (volume assist：肺の弾性に伴う仕事に対する補助)
FA (flow assist：気道抵抗に伴う仕事に対する補助)

1) 米国レスピロニクス社 BiPAP Vision (図
3)

この器械には，PAV を始めるのに，R や E を直接決めずに行う quick start と，R や E を設定して行う custom start の 2 つの方法がある (表 2)。

Quick start では R や E が判らなくても，病態から正常 (normal)，拘束型 (restrictive)，閉塞型 (obstructive)，混合型 (mixed) の 4 つの呼吸不全のパターンを病態から推測し，選択する。患者の呼吸努力を観察し，訴えを聞きながら補助 % を決めることができる。補助 % が高すぎると，呼気の始まりが認識できない現象であるラナウエイ (runaway) が起こりやすくなるので，低めからの設定がいい⁵⁾。最高気道内圧制限 (Pmax)，最大 1 回換気量制限 (Vmax) は必ず設定を確認しておく必要がある。

筆者らは，急性呼吸障害の 16 症例 (表 3) に対し，マスクによる PAV で呼吸管理を行った。

表 3 BiPAP Vision の PAV 使用症例の初期設定と転帰

氏名	年齢	性別	診断	開始前 P/F	パターン	%set	O ₂ %	EPAP	使用 時間	転帰
S. S.	60	女	左フレイル・チェスト	344	custom VA4.2, FA2.1	35	40	5	309	離脱
M.S.	73	男	気管支喘息	349	obstructive	40	70	5	24	離脱
K.T.	83	女	左心不全	215.4	restrictive	40	100	8	33	離脱
K.S.	69	男	左心不全，拡張型心筋症	125.9	normal	90	100	6	12	離脱
S.I.	91	女	左心不全，陳旧性心筋梗塞	133.2	restrictive	45	100	6	35	離脱
M.M.	79	女	虚血性心疾患，上気道狭窄	407	obstructive	20	30	4	137	離脱
T.N.	76	女	左心不全，急性心筋梗塞	110.3	restrictive	30	60	7	27.4	離脱
Y.K.	77	男	左心不全，心筋炎，慢性腎不全	433	restrictive	50	60	8	4	離脱
R.N.	71	男	大動脈解離 (DeBakey I 型)	137	restrictive	30	60	8	42	挿管
H.I.	92	男	左心不全，虚血性心疾患	285.7	restrictive	60	70	8	9	離脱
Y.M.	74	女	左心不全，急性心筋梗塞	90.7	restrictive	40	100	8	39	離脱
Y.S.	84	男	左心不全	216	restrictive	80	100	5	9	離脱
K.N.	61	女	左心不全	174.3	restrictive	40	100	4	6	離脱
K.M.	74	男	左心不全，冠動脈バイパス術後，慢性腎不全	179	restrictive	15	60	4	38	離脱
A.K.	91	女	左心不全，心房細動	145	restrictive	40	100	5	8	離脱
H.K.	86	男	左心不全，亜急性心筋梗塞，消化管出血	201	restrictive	20	60	6	2.3	離脱
平均				221.7		42	76	6	45.9	
標準偏差				±109.1		±20	±24	±2	±77.2	

PAV の補助パターンは 1 例のみ custom start で、他の症例では quick start を使用した。肺水腫など硬い肺であった 12 例で restrictive を使用した。気道狭窄のあった 2 例で obstructive、1 例は normal を選択した。患者の呼吸努力の変化や訴えをもとに設定した結果、最初の % セットは、 $44.7 \pm 17.8\%$ であった。16 症例中 15 症例は離脱に成功し、1 例だけは深い鎮静のため喀痰が十分排出できず気管挿管された。心不全例では restrictive パターンを選び、補助 % はまず 30~40% から始めるといふと思われた。

Winck らは custom start を使い、最適の VA および FA を次のように決めている⁶⁾。まず VA と FA を最少の 2 と 1 に設定し、FA を固定し、VA を患者が不快と感じるまで、2 ずつ上げていく。不快とした最大値から 2 低い値を最高許容値とする。今度は VA を 2 に固定し、FA を 1 ずつ上げていき、同様にきつくなる値から 1 低い値を最高許容値とする。これらの 80% の値をそれぞれ

VA、FA 値として設定している。

2) ドレーゲル社 Evita 4 (図 4)

ドレーゲル社 Evita 4 では、強制換気時に C と R を測定できる。測定した C と R を参考に、FA、VA を直接入力する。

筆者らは、表 4 に示す 5 例の急性肺障害の症例に PPS を使用した。5 症例とも問題なくウィーニングできた。FA、VA の調節に当たっては、①正常肺では、FA 3、VA3、病的肺では測定した R や C に拘らず、FA 5、VA 5 にまず初期設定する、② VA は 1 回換気量 (V_T) 7ml/kg、FA は、 $P_{0.1}$ 2~3cmH₂O を目標に設定しなおす必要がある。ウィーニング時は呼吸状態の改善を観察しながら、FA、VA を次第に下げそれぞれ 3、3 まで落とせば、ウィーニング完了ということになる⁷⁾。現在努力呼吸の評価に、胸鎖乳突筋筋電図強度を測定し、FA、VA の調節に対する有用性を検討中である。

3) 川重防災工業社製 SSV-200 (図 5)

Younes らの理論にもとづき、PAV モードでのみ R、C を計測できる^{8)~10)}。その測定値を参考に、R と C を入力し、補助の割合は倍率として入力する。

VA はデフォルトの 1.3 倍から開始し、 V_T を 7ml/kg 程度になるように調整し、FA は VA と同じ倍数で開始し、圧波形の立ち上がりなどを見ながら調整する。

食道癌および小腸損傷術後症例のウィーニング時 34 時間及び 36 時間使用した。R、C の入力がしやすく、気道や肺の状態が把握しやすいので、汎用性が高いと思われた。

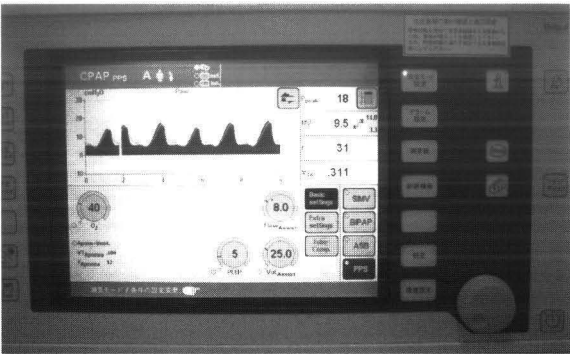


図 4 ドレーゲル社 Evita 4 の設定画面

表 4 ドレーゲル社 Evita 4 の PPS 使用症例：初期設定と転帰
(SIMV から PPS へ変更時の初期設定)

	症例	年齢	性別	診断	R	FA	$P_{0.1}$	C	E	VA	PEEP	転帰
1	S.Y.	80	F	イレウス術後	12	5	0.1	40	25	20	8	成功
2	K.K.	73	F	AVR 術後	16	5	1.6	39	26	15	5	成功
3	M.T.	78	M	熱傷 (気道熱傷)	18	8	0.9	42	24	25	5	成功
4	K.W.	66	M	大動脈解離心不全	24	5	1.8	21	48	6	3	成功
5	K.S.	65	M	熱傷 (気道熱傷)	16	3	2.1	59	17	3	5	成功

R : cmH₂O/l/sec, C : ml/cmH₂O, E : cmH₂O/l

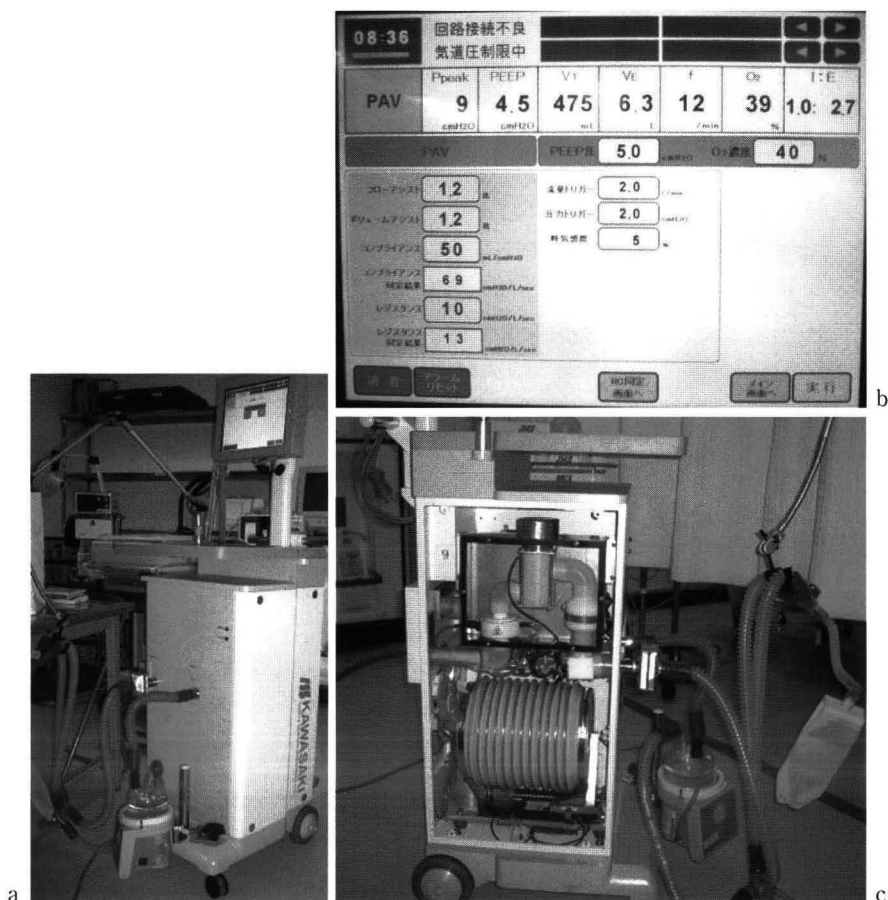


図5 川重防災工業社 SSV-200

- (a) 全景
- (b) PAV 操作パネル
- (c) 内部構造

ガス供給にペローズ方式を採用し、最大吸気流速を 300l/分 にしているの、頻呼吸を伴う重症呼吸不全症例にも対応できる可能性がある (表 1)。

3. 利点と使用上の問題点

PAV/PPS を使用するうえで、呼吸中枢の機能が保たれていることが必要である。これに加えて、NPPV で使用する場合は気道が確保されていることと、痰の咯出が可能なことが条件となる。

1 呼吸ごとに吸気努力 (Pmus) に合わせ、補助圧を調整してくれるため、患者に受け入れられやすいモードと言える。PSV と PAV において快適度においても差がないとする論文もある⁶⁾が、

PSV より PAV の方が快適性において優れているとする研究は多い¹²⁾¹³⁾。われわれの経験でも多くの急性呼吸不全患者において PAV は使用可能だが、PSV ではうまくいかず、PAV でなければいけない症例はほとんどなかった。PAV が最も有効な病態を絞り込む必要がある。現時点では、意識清明で呼吸困難感の強い、比較的軽い呼吸不全の患者の中に、PAV の適応患者がいると考えている。急性の高炭酸ガス血症¹⁴⁾や健常人の胸壁にバンドを巻いた実験¹⁵⁾で、吸気の負荷が加わったときに、PSV と比較して、PAV の方が容認性が高いとする論文もある。呼吸筋疲労のある患者のリハビリ時の補助には有用度が高いかもしれない

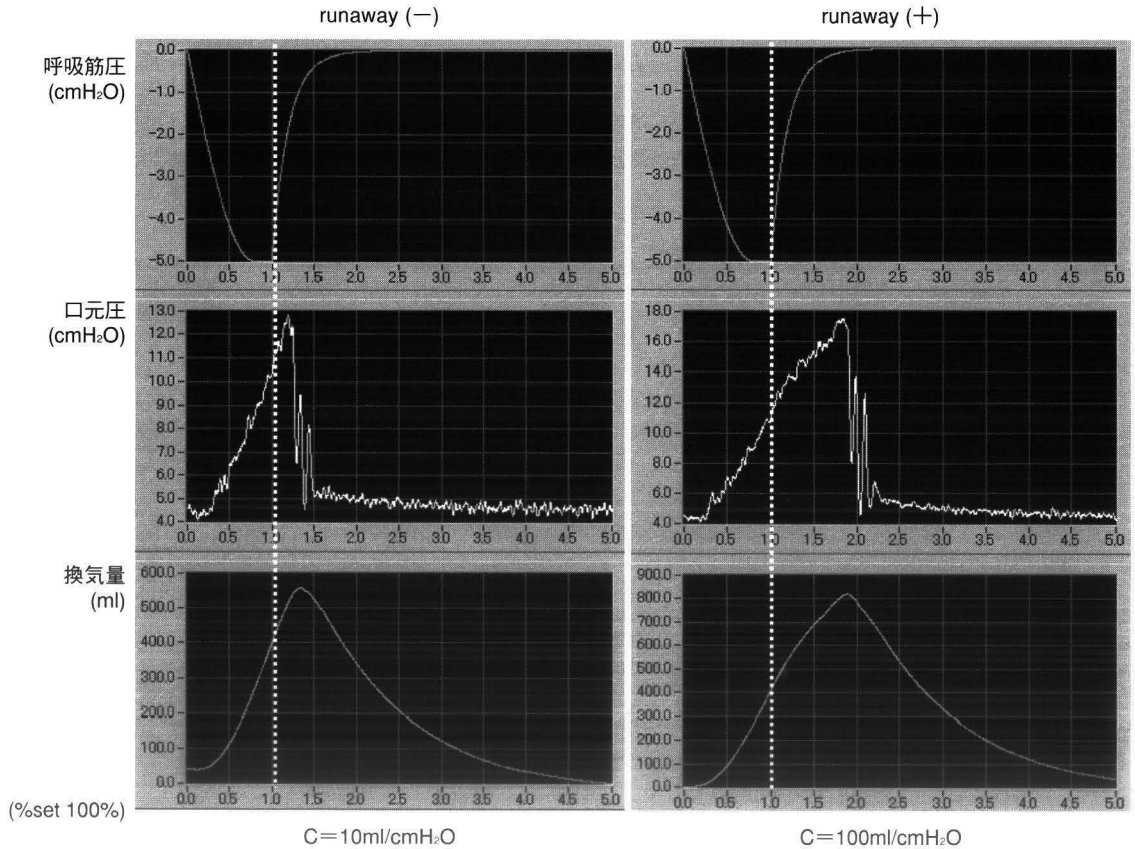


図6 Runaway 現象

テスト肺 ALS5000 で再現した runaway。呼吸筋圧、口元圧、換気量の変化を示す。Runaway では、呼吸の認識が遅れ、過剰なガス供給が行われている。硬い肺 ($C=10\text{ml}/\text{cmH}_2\text{O}$) より、やわらかい肺 ($C=100\text{ml}/\text{cmH}_2\text{O}$) の方が runaway が起こりやすい傾向にあった。

い。

PAV がうまくいかなかった症例は、胸腔ドレーンからのエアリークが激しく、圧調整がうまくできなかった症例と呼吸中枢の障害を甘く見てしまい低換気になった症例であった。

PAV の最大の欠点は、呼吸の認識ができず吸気が持続する、ラナウエイ (runaway) 現象である (図6)。高い補助%にしたり、1呼吸ごとに変化が激しいときに発生しやすい。ただし最高気道内圧や1回換気量に制限を加えることにより、肺損傷は回避できる。

4. 今後の展望

呼吸中枢が機能している患者では、PAV/PPS

は自発呼吸に合わせてサポートしてくれる比較的快適な換気モードといえる。使いやすくするためには、適応や調節の指標を明確にする必要がある。

最大吸気流速を 300l/分 にすることにより、自発呼吸の吸気流速に遅れず、重症呼吸不全時にも比較的快適に使用できるかどうか、今後の評価に期待したい。

引用文献

- 1) Gallagher CG, Younes M : Effect of pressure assist on ventilation and respiratory mechanics in heavy exercise. J Appl Physiol 66 : 1824 - 1837, 1989

- 2) Younes M : Proportional assist ventilation, a new approach to ventilatory support. Theory. *Am Rev Respir Dis* 145 : 114-120, 1992
- 3) Younes M : Proportional assist ventilation. In *Principles and practice of mechanical ventilation*. Edited by Tobin MJ. Hightstown, McGraw-Hill, 1995, pp 349-369
- 4) 山田芳嗣：人工呼吸中の呼吸仕事量. *呼吸* 12 : 31-37, 1993
- 5) 鮎川勝彦, 且元美緒子：BiPAP Vision に搭載された PAV モード使用時の runaway について. *人工呼吸* 17 : 187, 2000
- 6) Winck JC, Vitacca M, Morais A, et al : Tolerance and physiologic effects of nocturnal mask pressure support vs proportional assist ventilation in chronic ventilatory failure. *Chest* 126 : 282-288, 2004
- 7) 鮎川勝彦, 前田雅之, 西嶋正樹：ドレーゲル Evita4 に搭載された, PPS (proportional pressure support) モードの使用法. *人工呼吸* 20 : 191, 2003
- 8) Younes M, kun J, Masiowski B, et al : A method for noninvasive determination of inspiratory resistance during proportional assist ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 163 : 829-839, 2001
- 9) Younes M, Webster K, Kun J, et al : A method for measuring passive elastance during proportional assist ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 164 : 50-60, 2001
- 10) 山内順子, 丸川征四郎, 平田淳一ほか：快適な自発呼吸の温存—連続測定したコンプライアンス, レジスタンスにもとづく PAV. 第 26 回日本呼吸療法医学会学術総会抄録集. 45, 2004
- 11) Porta R, Appendini L, Vitacca M, et al : Mask proportional assist vs pressure support ventilation in patients in clinical stable condition with chronic ventilatory failure. *Chest* 122 : 479 - 488, 2002
- 12) Fernandez-Vivas M, Caturla-Such J, Gonzalez de la Rosa J, et al : Noninvasive pressure support versus proportional assist ventilation in acute respiratory failure. *Intensive Care Med* 29 : 1126-1133, 2003
- 13) Wysocki M, Richard JC, Meshaka P : Nonsinvasive proportional assist ventilation compared with noninvasive pressure support ventilation in hypercapnic acute respiratory failure. *Crit Care Med* 30 : 323-329, 2002
- 14) Ranieri VM, Giuliani R, Mascia L, et al : Patient-ventilator interaction during acute hypercapnia : Pressure-support vs. proportional-assist ventilation. *J Appl Physiol* 81 : 426-436, 1996
- 15) Wysocki M, Meshaka P, Richard JC, et al : Proportional-assist ventilation compared with pressure-support ventilation during exercise in volunteers with external thoracic restriction. *Crit Care Med* 32 : 409-414, 2004