

●解 説●

換気モード

星 邦彦

キーワード：量規制換気，圧規制換気，二相性陽圧呼吸，高頻度振動換気，自動ウィーニング

換気モードとは、「人工呼吸器が患者の肺に吸気をどのような方法で送り込んでいるか」を表す言葉です。以前の人工呼吸器では、吸気の終了は、「量」または「圧」のみで決定されていましたが、最近の人工呼吸器はコンピューターと弁機構の発達により、「量+時間」、「圧+時間」または「量+圧+時間」など複雑な制御方法で吸気が決定され、それらの作動原理や設定方法には各機種独自の色打ち出されています。しかし、用語の乱造や機種間の設定操作の違い、換気制御の複雑化などを招き、人工呼吸器の操作などが理解しにくいものになってきました。本稿では、一般的人工呼吸器で主に成人に使用される基本的な換気モードについて解説したいと思います。

I. 換気モードを設定する際に用いる言葉の解説 (図1)

1. 吸気フロー波型

一定フロータイプ：流量が一定な基本的なフローパターンです。このパターンは肺がゆっくりと広がりますが、吸気終末にならないと肺が十分に広がらないため、換気の効率は悪くなります。

漸減フロータイプ：漸減波は、生理的なフローパターンに近い波形です。漸減波を用いると、吸気の初期に多くの空気が肺に流入するため、肺胞を効率よく広げられます。PCV (圧規制換気) モードでよく使

用されますが、最近の人工呼吸器では VCV (量規制換気) モードにも使用できるものがあります。

2. 吸気相

VCV モードの場合、吸入時間とプラトー時間の和が吸気相 (吸気時間) となります。

PCV モードの場合は吸入時間と吸気時間が一緒になります。

一般的に、吸気時間の設定は、0.8～1.2秒です。

3. プラトー相 (end-inspiratory plateau : EIP) = 吸気終末休止

吸気が終了してもすぐに呼気を開始しないで、そのままの高い気道内圧を保つことです。これにより肺内の吸気ガス分布が改善し酸素化が改善すると言われています。通常、吸気時間の10%をEIPとします。

ポーズ相の気道内圧をプラトー圧と言い、肺のコンプライアンスと一回換気量できまり、肺胞内圧を反映すると言われています。現在多くの施設で行われている肺保護戦略換気では、35cmH₂O以上になると圧外傷の危険が高まると言われています。しかし、787名のALI/ARDS患者でICU入室第1病日のプラトー圧と死亡率の関係を見たHagerらは¹⁾、プラトー圧と死亡率に強い相関があったことから、安全な最大吸気圧は存在しないと結論づけています。

4. 最大吸気圧 (peak inspiratory pressure : PIP)

人工呼吸中の最高気道内圧で、圧外傷を避けるため

東北大学病院重症病棟部

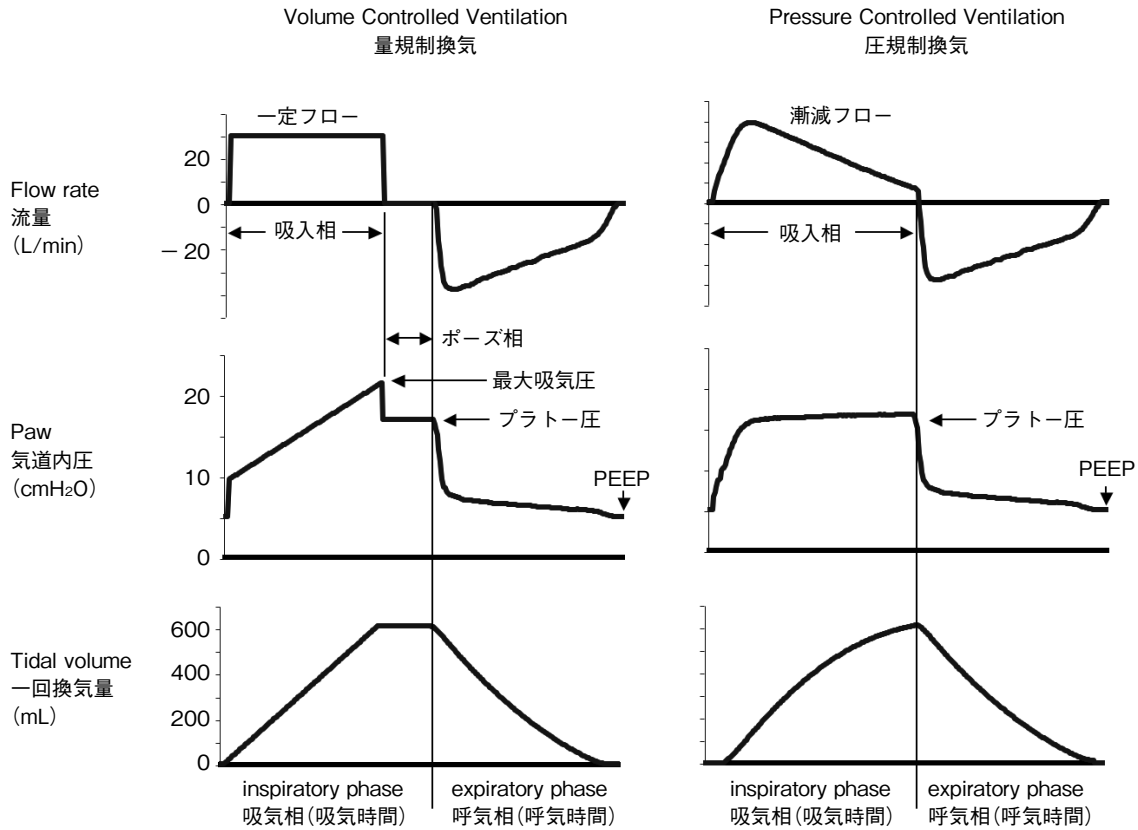


図1 換気モードを設定する際に用いる言葉

に PIP は 40cmH₂O 以下に調節することが望ましいとされています。

最大吸気圧とプラトー圧の格差は、気管チューブなどの気道抵抗と流量の大きさでできる圧です。

5. 一回換気量

日本呼吸療法医学会の「ARDS に対する Clinical Practice Guideline 第2版」²⁾では、6 mL/kg (理想体重)の低換気量が推奨されていますが、プラトー圧が 30cmH₂O を超えない程度の症例では 8 mL/kg (理想体重)程度からはじめるのがいいでしょう。

人工呼吸器によっては、分時換気量を設定し、呼吸回数で分時換気量を除して一回換気量を決定する器械があるので注意が必要です。

6. PEEP (呼気終末時陽圧 : Positive End-Expiratory Pressure)

呼気の気道内圧がゼロにならないように一定の圧を

かけることで、肺胞の虚脱を防止し、血液の酸素化を改善します。すべてのモードに適応され、特に自発換気と併用した場合を持続気道内陽圧 (Continuous Positive Airway Pressure : CPAP) と言います。

7. その他

a) 換気回数

1分間に人工呼吸器が患者に吸気を送り込む回数で、人工呼吸開始時は 15 回 / 分前後で行い、その後は、PaCO₂ の値などを参考にして決めていきます。

b) トリガ (trigger)

患者の吸気努力が人工呼吸器に伝わるサインのことで、圧トリガ (回路内圧の変動で感知) やフロートリガ (気流の変動で感知) などがあります。感度はフロートリガの方がよいです。

II. 各種の換気モード

1. 自発呼吸がない場合

a) **Volume Controlled Ventilation (VCV: 量規制換気)**
一回換気量と吸気時間（送入時間+プラトー時間）によって、吸気相が決定される換気モードです。どんな場合でも一回換気量は一定に保たれますが、コンプライアンスや気道抵抗が高くなると、プラトー圧や最高吸気圧が非常に高くなる場合があります。

b) **Pressure Controlled Ventilation (PCV: 圧規制換気)**
最高吸気圧と吸気時間によって、吸気相が決定される換気モードです。どんな場合でも最高気道内圧（プラトー圧）は保たれますが、コンプライアンスが悪くなってくると、一回換気量が維持できなくなってしまいます。

c) **Pressure Regulated Volume Controlled Ventilation (PRVC) (図2)³⁾**

PRVCはPCVを発展させた換気モードであり、測定した先行換気のコンプライアンスに基づいて、一定の一回換気量が得られるようにPCV圧を自動的に設定するモードです。

d) **Inversed Ratio Ventilation (IRV: 吸気呼気比逆転換気)**
通常、吸気と呼気の時間的比率（I/E比）は1:2～1:3と呼気時間が長く、この比率を逆転した調節換気をIRVといいます。IRVでは最高気道内圧を低く抑えつつ、高い平均気道内圧を維持でき、虚脱した肺がふくらみやすくなると言われています。

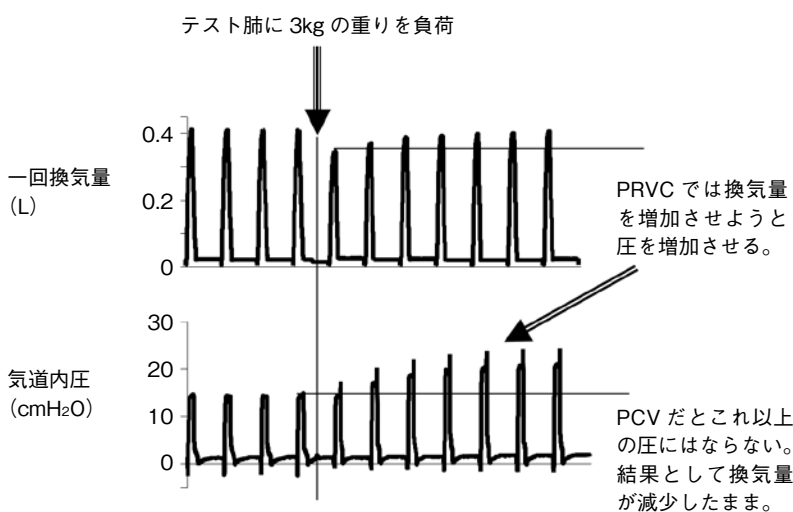


図2 Pressure-Regulated Volume Control とは

2. 自発呼吸との共存

a) **間欠的強制換気 (Intermittent Mandatory Ventilation : IMV)**

自発換気と強制換気の組み合わせで、強制換気が間欠的に行われ、強制換気のあいだに自発換気が入ります。強制換気の設定は、一回換気量（or 最高吸気圧）と吸気時間、呼吸回数です。

強制換気による吸気が患者の吸気努力で開始するものを同期型（synchronized）IMV（SIMV）と呼んでおり、自発換気と補助換気の組み合わせと言えます。設定された時間間隔の次の強制換気の始まる前に一定の待機時間（トリガーウィンドウ）を設け、その間の患者の吸気努力をトリガーにして補助換気がなされます。

b) **二相性陽圧呼吸 [APRV, Bi-Level, Bi-Vent, DuoPAP]**

高PEEPと低PEEPを設定し、その圧を維持する時間を決めます（図3）⁴⁾。自発呼吸は高PEEP相及び低PEEP相などの相でも可能で、機種によってはPSVが可能です。しかし、基本的概念は、高PEEP相で酸素化の改善を図り、高PEEP時のFRCと低PEEP時のFRCの差で、二酸化炭素の排出を行うものと考えたほうがわかりやすいです。

3. 自発呼吸の補助

a) **持続性気道内陽圧 (CPAP)**

換気モードというよりは、自発呼吸下において、気道が常に陽圧になるようにしておくことです。

b) **圧支持換気 (Pressure Support Ventilation : PSV)**

自発換気の吸気努力をトリガーにして、設定した圧まで回路内にフローを送り吸気を補助する換気様式です。設定圧に達しても吸気から呼気に切り換わることなく、患者の吸気努力が続くかぎり吸気補助が続き、吸気流速がある値（Termination Criteria：一般的には最大吸気流速の25%）になると、補助は終了します⁵⁾。

設定圧が低いときは患者の吸気努力を軽減するように働きますが、設定が高くなると図4のように換気量の補助に働きます⁶⁾。

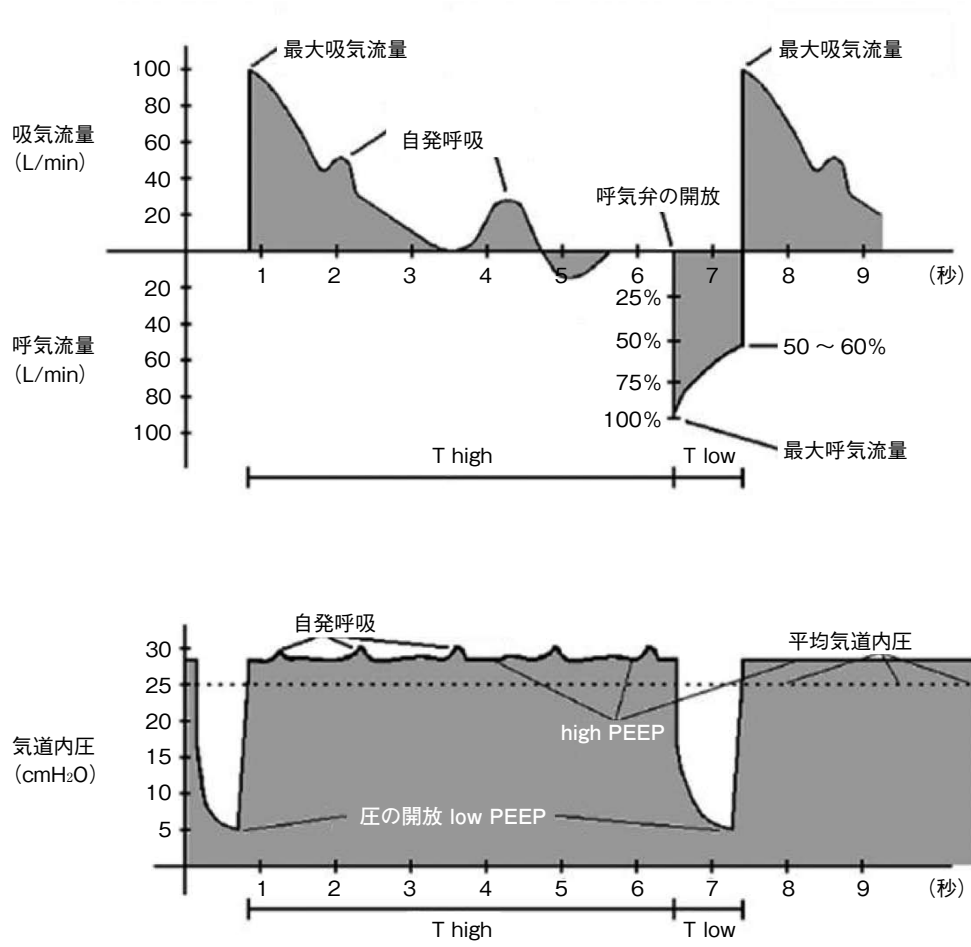


図3 APRVの流量と気道内圧 (文献4より改変)

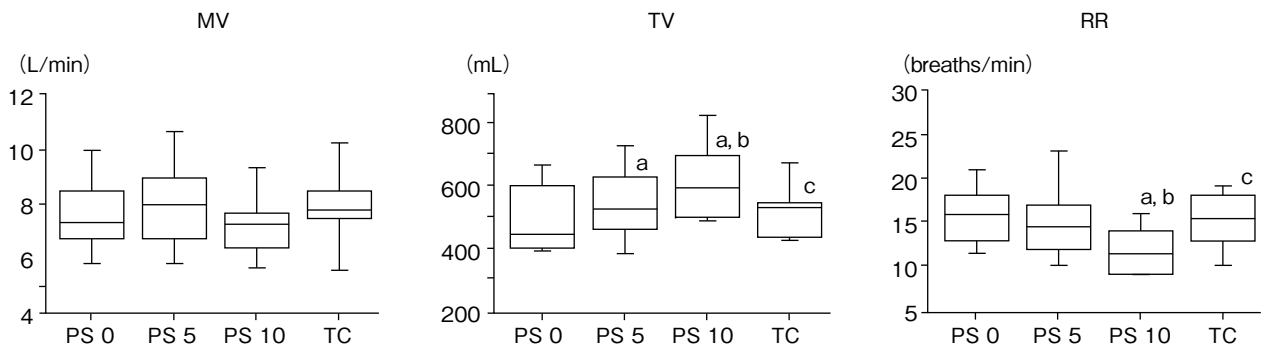


図4 PSVの換気補助

PS : Pressure Support Ventilation TC : Tube Compensation

a vs PSV 0 cmH₂O (p < 0.05)

b vs PSV 5 cmH₂O (p < 0.05)

c vs PSV10cmH₂O (p < 0.05)

IMV、CMV や自発換気と組み合わせが可能で、吸気仕事を軽減するために使うほか、設定圧を徐々に下げていくことで人工呼吸からの離脱（ウィーニング）過程にも使用が可能です。

c) 量支持換気 (Volume Support Ventilation : VSV)

VSV は吸気終了が換気量で規定された支持換気モードです⁷⁾。VSV では気道抵抗や肺胸郭コンプライアンスの変化があると、設定換気量を保証するようにサポート圧が自動的に変化します。VSV は、呼吸回数は正常であるが一回換気量が少ない換気不全が適応になります。自発呼吸の大きさにより機械側で補助換気量を調節しますので、ウィーニング時に適しています。

d) Tube Compensation : TC

TC (チューブを代償する) とは、気管チューブによる流量依存性の圧較差 (図5) を、吸気時には陽圧補助で呼気時には陰圧補助で、代償することです。100%代償すれば、理論的には抜管している状態と同じこととなります。

e) Proportional Assist Ventilation : PAV⁸⁾

人は自発呼吸で一回換気量を得るためには、 $P_{mus} = R \times flow + E \times V_T$ なる圧を横隔膜などの吸気筋が形成しなければなりません。健常者では、 P_{mus} が大きいほど吸気ガス量 (V_T) が大きくなりますが、肺障害患者では、気道抵抗 (R) の増加あるいはコン

プライアンス低下 (E の増加) のために換気量当たりの呼吸仕事量が増加し、同じ吸気努力を払っても吸入ガス量は少なくなります。このような患者でも、呼吸努力を増加させて (P_{mus} を大きくして) 十分な換気量を得ようとしますが、この状態が持続すると呼吸筋が疲労してしまう可能性が高くなります。

人工呼吸管理中に患者の呼吸器系システムに付加される圧 (P_{aply}) は、人工呼吸器が作る圧を P_{vent} とすると、 $P_{aply} = P_{vent} + P_{mus}$ なる式で表わされます。自発呼吸の時は、 $P_{vent} = 0$ だから $P_{aply} = P_{mus}$ となり、完全に自発呼吸がない時は、 $P_{mus} = 0$ だから $P_{aply} = P_{vent}$ となります (図6)。

式を $P_{vent} = P_{aply} - P_{mus}$ と書き換えると、 P_{aply} は古典的に $P_{aply} = K1 \times flow + K2 \times V_T$ なる式 ($K1$: $cmH_2O/L/sec$; $K2$: cmH_2O/L) で表わすことができますから、 P_{aply} と P_{mus} に代入すると、

$$P_{vent} = [K1 \times flow + K2 \times V_T] - [R \times flow + E \times V_T] = (K1-R) \times flow + (K2-E) \times V_T$$

なる式が得られます。つまり流量と一回換気量の係数を患者の粘性抵抗 (R) と弾性抵抗 (E) に一致させれば、人工呼吸器の形成する圧 P_{vent} は、患者の呼吸筋が形成する P_{mus} と一致し、呼吸仕事を軽減することになります。この理論から考えられたのが PAV という新しい換気モードの概念です。

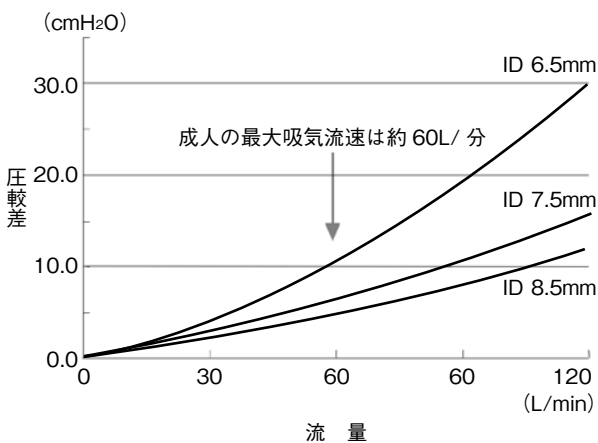


図5 計算で求めたチューブによって生じる圧較差

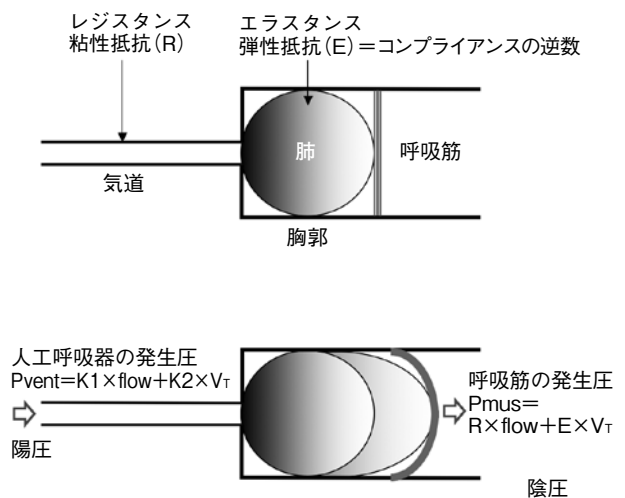


図6 肺を広げようとする圧

4. その他

a) Auto Flow

「AutoFlow[®]に関する質疑応答 20、PDF 版」には、「AutoFlow[®]は付加機構であって換気モードではありません」と明記されていますが、エビタ4を使用なさっている施設ではよく使われていると思われます。

AutoFlow[®]では、量調節型換気モードにおいて、設定された一回換気量（ V_T ）と直前の肺コンプライアンスに基づいて、吸気流量を自動的に調節します（PRVCに似ていますがPRVCは自発呼吸がないPCVの延長）。その特徴は、設定された一回換気量が常に最小の気道内圧で供給されること、機械的換気の吸気相、呼気相を問わず自由に自発呼吸が可能な（弁が開いている）こと、吸気流量が漸減波であるため最高気道内圧は軽減され、肺コンプライアンスが変化すれば、これを感知し即応することです。

b) 高頻度振動換気（High Frequency Oscillatory

Ventilation : HFO)

HFOは、150回/分以上（2.5Hz以上）の高頻度で、死腔より少ない100～200mL程度の容量（一回換気量）を押し引きすることにより、気道内にガス振動を生じさせて換気を行う人工換気法です。その利点としては、気道内圧変動が小さいことから肺損傷を最小限に抑えることと、血圧、頭蓋内圧の呼吸性変動を抑制することがあります。

成人用に開発されたHFO人工呼吸器R-100（メトラン社製）では、平均気道内圧は通常換気時の平均気道内圧 + 5 cmH₂O、stroke volume が100%、振動数は10Hzぐらゐから始め、血液ガスを見ながら適宜変更していきます。

5. 自動ウィーニングモード

a) Mandatory Minute Ventilation : MMV（図7）

患者自身の分時換気量が一定値以下になった場合に、設定された強制換気を開始する換気モードです。

設定項目は、分時換気量（一回換気量×呼吸回数）です。自発換気量と人工呼吸器換気量の差から、IMVの回数を自動調整します。

b) SmartCare

人工呼吸器Evita-XLに搭載された自動ウィーニング機能SmartCareは、総呼吸回数・ETCO₂・一回換気量をもとにあらかじめ設定された「Zone of Comfort」

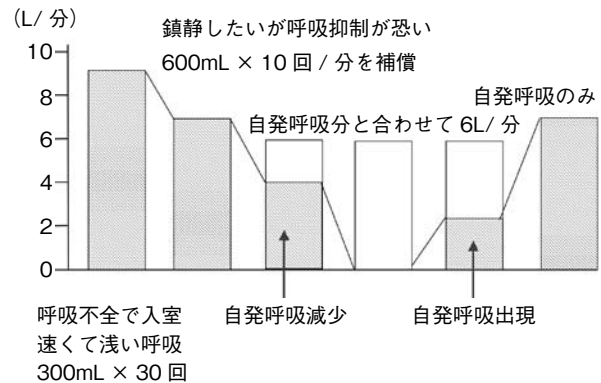


図7 MMV

の中でPSレベルを自動調節し設定されたPSレベルに達すると「抜管可能」とメッセージで知らせてくれます。

Zone of Respiratory Comfort（快適な呼吸域）

12 < 呼吸数 < 28 回/min

$V_t > 300\text{ml}$ または 250mL （体重 < 55kg）

$\text{PetCO}_2 < 55\text{mmHg}$ または 65mmHg （COPD）

c) Adaptive Support Ventilation : ASV

ASVでは通常の設定項目以外に、 P_{max} 、理想体重（IBW）、分時換気率（% MinVol）と3つのパラメータ設定を行います。ASVでは、使用者側の設定した最小分時換気量を維持することを目指しながら、最小呼吸仕事量になるように最適な呼吸パターンを導き出すために、Otisの式⁹⁾により最適な呼吸回数を求め、そこから一回換気量を導きだします。

d) AutoMode

Servo iにはPRVC、Volume Control、Pressure Controlの3つの強制換気モードが用意されていますが、これらの3モードを選択した際に、AutomodeスイッチをONにすると2回連続して自発呼吸をトリガーすればcontrol modeよりsupport modeに切り替わります。support modeにおいて一定の時間自発呼吸をトリガーしなければ自動的にcontrol modeに替わります。PRVC/Supportでは、PRVCの最終の換気圧がそのままVolume Supportの換気圧の初期値になります。Volume Control/Supportでは、最終のVolume ControlでのEIP圧がVolume Supportの換気圧の初期値になります。Pressure Control/Supportでは、それぞれの設定圧が換気圧になります。

最後に

一般的人工呼吸器で主に成人に使用される基本的な換気モードについて解説したと思いますが、まだまだ抜けているものが多いと思われます。一度は自分が使用している換気モードが、どのような制御法でコントロールされているか調べてください。その結果、もっといい呼吸管理が行われるかもしれません。

参考文献

- 1) Hager DN, Krishnan JA, Hayden DL, et al : ARDS Clinical Trials Network. Tidal volume reduction in patients with acute lung injury when plateau pressures are not high. *Am J Respir Crit Care Med.* 2005 ; 172 : 1241-1245.
- 2) 日本呼吸療法医学会・多施設共同研究委員会 : ARDS に対する Clinical Practice Guideline 第2版. *人工呼吸.* 2004 ; 21 : 44-61.
- 3) 星邦彦, 斎藤浩二 : [小児周術期管理の諸問題] *人工呼吸. 麻酔.* 2007 ; 56 : 542-553.
- 4) Stawicki SP, Goyal M, Sarani B : Analytic reviews : High-frequency oscillatory ventilation (HFOV) and airway pressure release ventilation (APRV) : A practical guide. *J Intensive Care Med.* 2009 ; 24 : 215-229.
- 5) 佐藤弘健, 長谷川隆一, 江島豊ほか : Termination criteria の変化が呼吸パターンに与える影響. *ICUとCCU.* 2000 ; 24 : 761-765.
- 6) Sasaki C, Hoshi K, Wagatsuma T, et al : Comparison between tube compensation and pressure support ventilation techniques on respiratory mechanics. *Anaesth Intensive Care.* 2003 ; 31 : 371-375.
- 7) 星邦彦, 斎藤浩二, 佐々木規喜 : [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] 容量支持換気及び圧補正従量式換気 Servo i (Volume Support & Pressure-regulated volume control ventilation Servoi). *人工呼吸.* 2004 ; 21 : 105-108.
- 8) 星邦彦, 松川周 : Automatic Tube Compensation と Proportional Pressure Support. *人工呼吸.* 2002 ; 19 : 89-96.
- 9) Otis AB, Fenn WO, Rahn H : Mechanics of breathing in man. *J Appl Physiol.* 1950 ; 2 : 592-607.