

特 集

特殊な状況での呼吸療法

ロボット支援前立腺手術における呼吸管理

平林 剛

キーワード：ロボット支援前立腺手術，圧規定換気，死腔，auto PEEP

I. はじめに

ロボット支援前立腺手術（robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy : RLRP）は腹腔鏡および頭低位で行われる。RLRP の麻酔管理を行うに当たり、気道内圧の上昇、無気肺の増加、頭低位と高二酸化炭素血症による頭蓋内圧の上昇、眼圧上昇による失明の危険、気道浮腫、皮下気腫、下肢コンパートメント症候群などに留意する必要がある^{1,2)}。多くの症例では問題なく呼吸管理をできと思うが、肥満患者、呼吸器疾患患者、長時間の気腹・頭低位では、著しい気道内圧上昇、低酸素および高二酸化炭素血症を来して呼吸管理に苦慮することがある。呼吸器系コンプライアンスが著しく低下しているため気道内圧は増加し、一回換気量を増やすことは困難である。PEEP 増加は低換気による高二酸化炭素血症を増長するため困難である。呼吸回数を増やすのが一般的だが、呼吸回数を増やしても呼気二酸化炭素濃度（ EtCO_2 ）は低下するが動脈血二酸化炭素分圧（ PaCO_2 ）はあまり改善せず（死腔の増加）、気道内圧はさらに上昇し（吸気流速増加による）、場合によっては低酸素血症を悪化させることがある。結局、高二酸化炭素血症を許容することになるが、高二酸化炭素血症もどこまで許容できるか明らかなではない。

このように RLRP で呼吸器系コンプライアンスが著しく低下している場合、十分な吸気時間（2～4 秒）で

行う圧規定換気（pressure control ventilation : PCV）を推奨する。本稿では呼吸器系コンプライアンスが著しく低下した RLRP の全身麻酔中の呼吸管理について述べたい。

II. 量規定換気（VCV）vs 圧規定換気（PCV）

1. 量規定換気（VCV）と圧規定換気（PCV）の特徴

量規定換気（volume control ventilation : VCV）は吸気流速を一定に制御して設定時間どおりに吸気を終了する。吸気ポーズを設定することもできるが、ポーズ設定をしなければ吸気プラトーがない（図 1）。無気肺などにより抵抗が増加した状態で吸気流速が増加した場合は、「抵抗によって生じる圧」が増加して著しい気道内圧上昇を来す。「抵抗によって生じる圧」は最高気道内圧と吸気プラトー圧の差として反映されるが、一般名がなく、以降これを垂下圧（pressure drop）として表記する。一回換気量増加、呼吸回数増加、I:E 比低下、吸気ポーズ延長は吸気流速を増加させるため、垂下圧および最高気道内圧が増加する。吸気ポーズを設定しなければ垂下圧を判別することはできないが、その場合、垂下圧は最高気道内圧増加として反映される。

PCV は吸気圧を一定に制御して設定時間どおりに吸気を終了する。特徴は垂下圧がなく、吸気プラトーを有することである（図 1）。PCV は呼吸器系コンプライアンスが低い症例（急性呼吸促進症候群〈acute respiratory distress syndrome : ARDS〉、分離肺換気、肥満）では推奨されている一方^{3,4)}、VCV による垂下圧

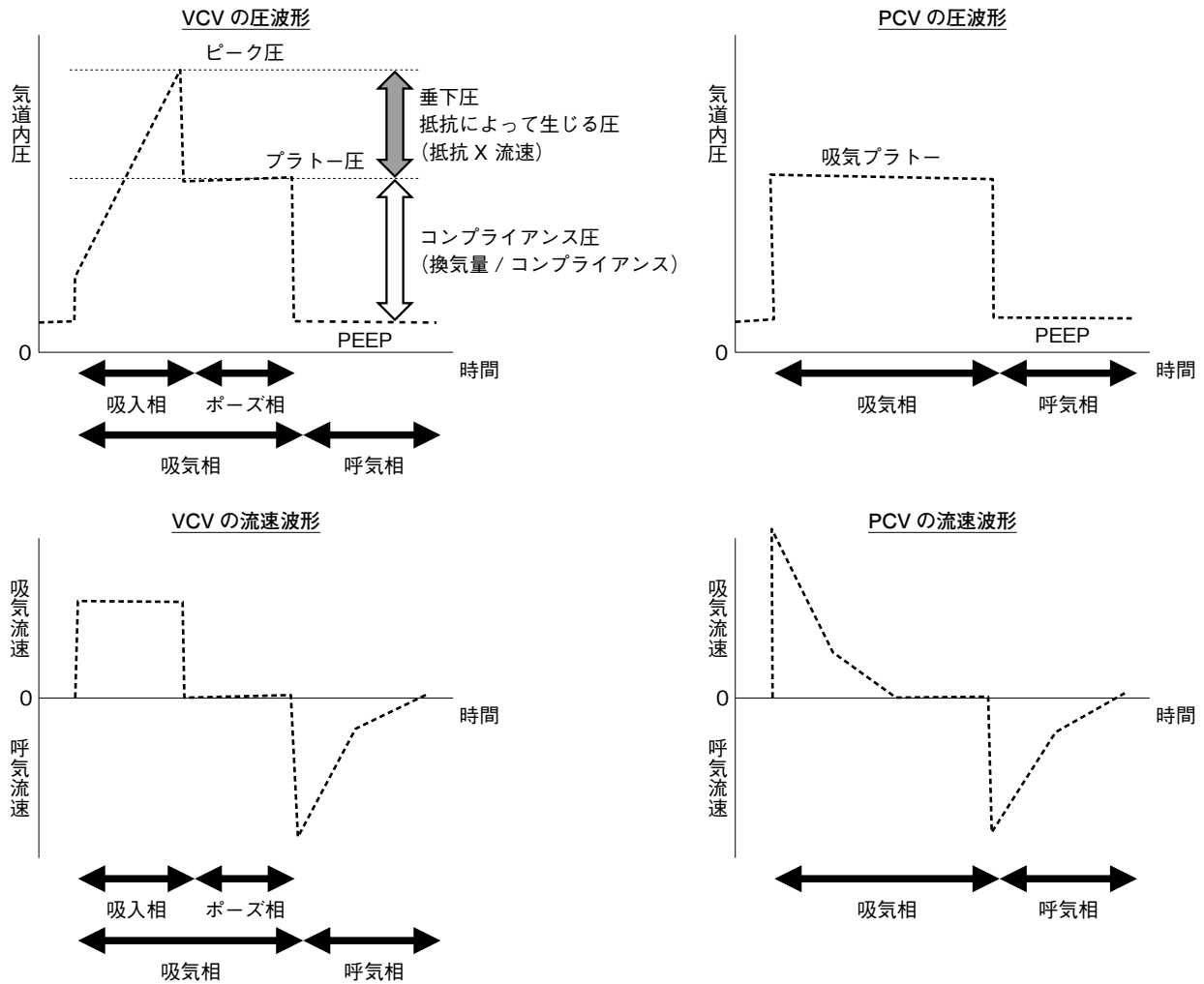


図1 VCV、PCVそれぞれの圧、フロー波形

および最高気道内圧上昇は肺泡に及ばないとしてPCVとVCVに差はないとする意見もある^{5,6)}。VCVとPCVの臨床的な有意性については議論が尽きないが、吸気プラトーに意味があるのか否か、垂下圧に肺障害性がないかどうかを明らかにする必要があるだろう。

2. 吸気プラトーに意味はあるだろうか？

PCVにおいて十分な吸気時間は死腔を減少させる。我々は、RLRP 20例において、VCV群 (I/E 0.5)、PCV群 (I/E 0.5)、逆比従圧式換気 (PC-IRV) 群 (呼気フロー波形を指標としてI:E比を設定) を30分ずつ無作為に順次行うランダム化ドブ・クロスオーバー試験を行った⁷⁾。生理学的死腔率 $\{(生理学的死腔量 / 呼気一回換気量) = (1 - \text{平均呼気 } CO_2 \text{ 濃度} / PaCO_2)\}$ はVCV $43 \pm 8.5\%$ 、PCV $35.9 \pm 3.9\%$ と比較して、PC-IRV $29.2 \pm 4.7\%$ で大幅に改善した (表1)。また、PCVにお

いて (VCVを除いて) 吸気時間と生理学的死腔率は負の相関を認め ($r = -0.52$, $p < 0.001$)、PCVにおける吸気時間延長は生理学的死腔率を改善することが示唆された。呼吸回数10回以上、呼気時間1.5～2秒以上必要であったことから、吸気時間を少なくとも2秒以上、できれば3秒から4秒とすることにより、PCVで大幅に死腔を改善することが期待できると考える。

このPCVにおける吸気プラトーおよび吸気時間延長による生理学的死腔率改善の機序は明らかではないが、PCVの早い初期吸気流速による気道・肺胞間のガス攪拌の促進、吸気プラトーおよび吸気時間延長による気道・肺胞間のガス拡散の促進、また無気肺改善によるシャント改善などが予想される。

一方で、ロボット支援前立腺全摘術および肥満患者の全身麻酔でPCVとVCVを比較した研究で、いずれも最高気道内圧を低下させる以外はPCVに臨床的メリ

表1 VCV 群 (I/E 0.5)、PCV 群 (I/E 0.5)、PC-IRV 群の結果

	VCV	PCV	PC-IRV
換気設定			
一回換気量 (mL)	517 ± 39	517 ± 39	517 ± 39
呼吸回数 (beats min ⁻¹)	11 ± 1	11 ± 1	11 ± 1
I/E 比	0.5	0.5	1.6 ± 0.3
吸気時間 (sec)	1.8 ± 0.16	1.8 ± 0.16	3.3 ± 0.46
呼吸パラメーター			
呼気一回換気量 VTE (mL)	501 ± 43	510 ± 42	529 ± 44*
最高気道内圧 PIP (cmH ₂ O)	24.7 ± 2.5	—	—
プラトー圧 Pplat (cmH ₂ O)	—	21.7 ± 2.7	20.8 ± 2.5#
平均気道内圧 (cmH ₂ O)	9.5 ± 0.7	10.5 ± 1*	14.6 ± 1.6*#
PaO ₂ /FiO ₂ 比	401 ± 88	412 ± 89	419 ± 88*
PaCO ₂ (mmHg)	48.5 ± 5.9	46.3 ± 5.3*	42.6 ± 5.1*#
EtCO ₂ (mmHg)	42.3 ± 5.4	41.4 ± 5.2	39.5 ± 5.1*#
生理学的死腔率 (%)	43 ± 8.5	35.9 ± 3.9*	29.2 ± 4.7*#
循環パラメーター			
平均血圧 (mmHg)	86.7 ± 10	86.1 ± 9.5	87.3 ± 8.8
心拍数 (beats min ⁻¹)	68.8 ± 12.2	65.1 ± 8.2	64.9 ± 8.8
Cardiac index (L min ⁻¹ m ⁻²)	2.2 ± 0.7	2 ± 0.3*	1.9 ± 0.3*
Stroke volume variation (%)	11.4 ± 3.3	12.4 ± 2.4	14 ± 3.1*

平均 ± 標準偏差 * P<0.05 vs VCV, # P<0.05 vs PCV.

ットがないと報告された^{8,9)}。しかし、いずれの研究も I:E 比を 1:2、EtCO₂ を指標に呼吸回数を調節して結果的に 18 回/分、すなわち吸気時間はおおよそ 1 秒程度で行われていた。したがって、これらの研究結果から導かれる結論は、「PCV に臨床的メリットがない」ではなく、「PCV であっても吸気時間が 1 秒程度では VCV と差がない」ということであろう。PCV のメリットは死腔を改善することであり、そのためには吸気時間を少なくとも 2 秒以上、できれば 3 秒から 4 秒とすることが必要である。

3. VCVの垂下圧(抵抗によって生じる圧)は肺障害的?

VCV では、肺胞・気道抵抗が上昇した状態で吸気流速が増加した場合は垂下圧が増加して著しい気道内圧上昇を来す(垂下圧=抵抗×吸気流速)。したがって、RLRP など肺胞・気道抵抗が上昇した低呼吸器系コンプライアンス症例において、一回換気量増加、呼吸回数増加、I:E 比低下、吸気ポーズ延長は吸気流速を増加させ、垂下圧および最高気道内圧が増加する。この著しく上昇した突発的な垂下圧および最高気道内圧上昇は、無気肺など閉塞した肺胞に到達せずに健常肺胞を過膨張させ、そのずり応力により健常肺胞を障害すると考える。

一方で、気管チューブの圧損失により、VCV による

突発的な最高気道内圧上昇は気管支および肺胞には到達しないとする意見もある。Philip らは、婦人科手術における気腹・頭低位手術において、気管チューブ内に圧センサーを通して気管支レベルでの圧を測定し、Y ピースでの圧と比較した⁶⁾。VCV では、Y ピースでの最高気道内圧が著しく上昇したが、気管支レベルでの圧はゆっくりとプラトー圧に達した。VCV による突発的な最高気道内圧上昇は 40cmH₂O 以上でも気管支・肺胞に到達するわけでもなく、肺障害を来すわけでもなく、PCV に劣るわけでもないとして述べている。しかし、その研究では気管チューブは細めのチューブを使用し(φ6.5～7.5mm)、さらにチューブ内の圧センサーによる圧損も無視できるものではなかった。チューブ内径が狭いダブルルーメンチューブ使用時の一側肺換気や⁵⁾、細いチューブを使用した時などは気管チューブによる圧損失は大きなものであるかもしれない。しかし、通常の気管チューブ使用時には圧損失も大きなものではなく、したがって VCV での高い気道内圧が気管支および肺胞に到達しないというわけでもないと考える。

PCV では VCV のような垂下圧はないため、垂下圧による肺障害性はない。プラトー圧が高い場合は肺障害性が増加する可能性はある。しかし十分な吸気時間の PCV では死腔が改善し、必要換気量も減少し、プラ

トー圧もより低くなる。長時間の低いプラトー圧は健常肺胞の過膨張の危険性が低く、側副細気管支を通じてじっくりと閉塞肺胞を開通させることに貢献すると考える。

PCV と VCV の肺障害性については明らかでなく、VCV における垂下圧による肺障害性については今後の研究課題である。

Ⅲ. PC-IRV を安全に行うために

1. expiratory-flow initiated inflation

PCV のメリットは死腔を改善することであり、そのためには吸気時間を少なくとも 2 秒以上、できれば 3 秒から 4 秒とすることが必要である。吸気時間を延長するには呼気時間を短縮する必要があるが、呼気時間短縮による肺過膨張リスクを考慮しなければならない。一方、呼気時間短縮は auto PEEP 効果を期待でき、設定 PEEP はオフでよい。つまり、肺過膨張リスクを軽減しつつ auto PEEP 効果を期待できる適切な呼気時間（吸気開始ポイント）が存在する（図 2）。

図 2 に示すように、呼気フローが存在している時点では肺胞圧は気道内圧よりも高く（auto PEEP が存在）、予想基線復帰点との間にできる面積が Δ 残気量となる。 Δ 残気量が設定 % 一回換気量となるポイントで吸気を開始する機構を expiratory-flow initiated inflation とした。設定 Δ 残気量を増加させれば呼気時間は短縮し、auto PEEP 効果は大きくなるが、肺過膨張リスクは増加する。しかし、このような機構を有する麻酔器は存

在せず、我々の研究では吸気開始ポイントが呼気変曲点と予想基線復帰点のおよそ中間となるように I : E 比を個々に設定した。似たようなものとして、ドレーゲル社製 Evita® に備わる auto release がある。ドレーゲル社製 Evita® で気道圧開放換気（airway pressure release ventilation : APRV）を行う際、呼気フローが最大呼気フローの 40% ぐらいに復帰した時点で吸気を開始する機構を auto release という。APRV では呼気時間はおよそ 0.5 ~ 1 秒と短いのにに対し、我々の研究では 1.6 ~ 2.5 秒と長いものであった。健常肺・重症 ARDS、肥満などの患者要因と、手術操作、気腹・頭低位の影響、筋弛緩薬の有無などの手術・麻酔要因によって呼気フローは影響を受ける。また、重症 ARDS 患者ではより高い auto PEEP 効果を必要とするが、健常肺の RLRP ではそれほど高い auto PEEP を必要としない。したがって、auto release が RLRP の呼吸管理に有効か疑問である。より繊細な呼吸管理を可能とする expiratory-flow initiated inflation 機構を有する麻酔器の開発を望む。

2. 循環動態への影響

肺リクルートメント操作で循環が虚脱して酸素飽和濃度が著しく低下することがある。PC-IRV でも同様に循環抑制作用がある。循環が適切に管理されていない状態で PC-IRV を行った場合、換気肺胞の肺血流が減少して換気血流比（ \dot{V}_A/\dot{Q} ）ミスマッチによる死腔増加を来し、また非換気肺胞の血流増加（シャント増加）による死腔増加を来す可能性がある。我々の研究では PC-IRV は VCV と比較して心係数（cardiac index : CI）が低下し、一回拍出量変化率（stroke volume variation : SVV）が増加した。特に VCV および PCV から PC-IRV に変更した直後に、SVV 増加・CI 低下を認めたが、輸液負荷およびカテコラミン投与などを積極的に行い、全例で平均血圧を 60cmH₂O 以上に管理するなど、適切に循環管理をした。また、肺過膨張を来さないよう、吸気開始ポイントが呼気変曲点と予想基線復帰点のおよそ中間となるように I : E 比を設定したことも適切な循環管理に貢献したと考える。我々の研究では全例で PC-IRV の生理学的死腔率が著しく改善したが、適切な呼気時間で行われ、適切な循環管理が行われていることが前提であることは強調しておきたい。

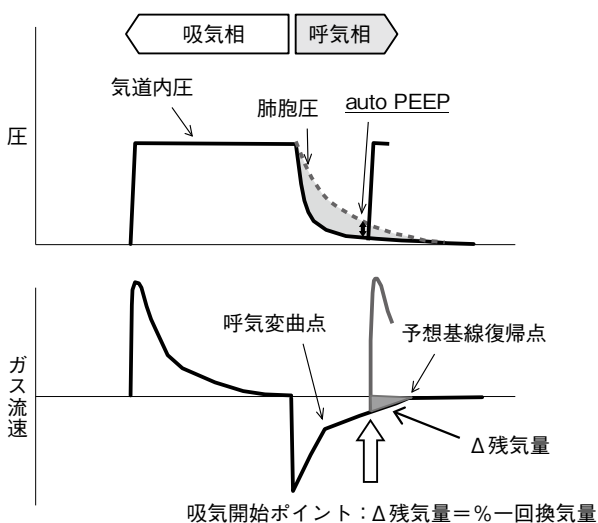


図 2 expiratory-flow initiated inflation

3. PC-IRV を行うための条件

患者要因、手術要因などにより呼気フローは様々に変化し、また必要 auto PEEP も様々であることから、安全に PC-IRV を行うためには expiratory-flow initiated inflation 機構を有する麻酔器が望ましい。しかし、そのような麻酔器は存在しないため、安全に PC-IRV を行えるものではない。しかし、肥満患者、長時間の気腹・頭低位など、著しい気道内圧上昇、低酸素および高二酸化炭素血症を来たして呼吸管理に苦慮する場合は以下の点に注意して PC-IRV を行ってもよい。

1) 呼気フロー波形をモニターできる麻酔器か？

肥満、気腹・頭低位で呼気フローは速くなる。気腹を解除し、水平位になると呼気フローは遅くなる。それぞれの患者、それぞれの手術手技に応じて、肺過膨張を来たさぬよう適切な吸気開始とするために呼気フロー波形モニターは必須である。呼気フロー波形モニターを備えていない麻酔器で PC-IRV を行うことを推奨しない。

2) 適切な循環管理

適切な循環管理は必須条件である。必要ならフロートラックセンサーを用いて適切な輸液管理およびカテコラミン投与を行う。

3) 患者適応

原則的に PEEP 適応患者であれば PC-IRV は可能である。しかし著しい 1 秒率低下患者、気胸・肺外科手術既往患者、心不全患者などでは PC-IRV を推奨しない。また、多くの症例は通常の呼吸管理で十分可能であり、そのような場合は PC-IRV を行う必要はない。

IV. RLRP における呼吸管理の実際

1. まずは PCV・I:E 比 1:1 から始めてみよう

expiratory-flow initiated inflation 機構を有する麻酔器が存在しない現在、まずは PCV・I:E 比 1:1 から始めることを推奨する。多くはこれで対応できると考える。手順を以下に示す。

1) 呼吸モードの選択

換気量を目標とした圧規定式 volume targeted pressure control: PC^{vt} (ドレーゲル社では Auto flow、GE 社では pressure control ventilation volume guarantee: PCV-VG) が便利であり、PC^{vt} を備えた麻酔器を使用する場合、全ての症例で PC^{vt} を行ってもよい。PC^{vt} を備えていない場合は PCV を推奨するが、PCV は呼吸

器系コンプライアンスの変化に応じて換気量が変化するのが煩雑である。呼吸器系コンプライアンスが高く、問題がない場合は VCV でも構わない (VCV が優れるというわけではない)。ここでは PC^{vt} あるいは PCV モードを選択したものとする。

2) I:E 比の設定

I:E 比を 1:1 に設定する。呼気フロー波形モニターを麻酔器が備え、肺過膨張を来たさないよう随時 I:E 比を調節するならば PC-IRV を行ってもよい。

3) 換気量および吸気プラトー圧の設定

PC^{vt} モードでは目標換気量を設定し、PCV モードでは吸気圧を設定する。VCV では低一回換気量 6~8mL/kg で最高気道内圧を 30~35cmH₂O 以下で行われるが、VCV の最高気道内圧と PCV の吸気プラトー圧は異なるものであり、PCV で吸気プラトー圧 30cmH₂O というのは高すぎるようである。エビデンスはないが、筆者は吸気プラトー圧 25cmH₂O 以下で行っている。死腔率が改善しており、また一回換気量にこだわる必要性を感じないが、吸気プラトー圧 25cmH₂O 以下となる範囲内で一回換気量 6~10mL/kg で行う。

4) 呼吸回数の設定

十分な吸気時間 (2~4 秒) で行いたい。そのため呼吸回数の初期設定は 10~12 回/分とする。吸気時間および呼気時間ともに十分確保でき、死腔率は低下しながらも肺過膨張のリスクが少ない設定である。EtCO₂ を指標に呼吸回数を調節する。呼吸回数は 15 回/分以下が望ましい。それ以上の呼吸回数増加は吸気時間および呼気時間を短縮し、十分な吸気時間 (2~4 秒) を得られない。呼吸回数 15 回以上では死腔率の改善が少なく、肺過膨張のリスクが増加する。さらに呼吸数を増加させる際は呼気時間が短縮するため、随時 I:E 比を調節する必要がある。EtCO₂ を指標に呼吸回数を調節する際、生理学的死腔率の程度により EtCO₂ と PaCO₂ が解離していることを留意する必要がある。動脈血液ガス分析をすることで EtCO₂ と PaCO₂ の解離の程度を把握し、目標の PaCO₂ となるように EtCO₂ を指標として換気設定を行うのが望ましい。どこまで高二酸化炭素血症を許容していいのかわからないが、筆者は目標 PaCO₂ を 50cmH₂O 以下として行っている。

5) PEEP の設定

呼気フロー波形モニターを麻酔器が備え、肺過膨張

を来たさぬよう随時適切に I : E 比を調節する場合は適切な auto PEEP が期待され、PEEP 設定はオフでよい。しかし、PCV・I : E 比 1 : 1 では必ずしも適切な auto PEEP が存在するとは限らない。呼吸回数が増加した場合は auto PEEP が高すぎることもある。auto PEEP を直接測定することは臨床では困難であり、呼気フロー波形から適切な I : E 比・呼吸回数であることを判断するしかない。大雑把ではあるが、呼吸回数が 10 ~ 12 回 / 分であれば PEEP 設定は 3 ~ 5cmH₂O の範囲内であれば問題ないであろうと考える。呼吸回数を増加する場合は PEEP 設定はオフでよい。ただし、1 秒率低下症例、呼気ガスモニターで EtCO₂ が右肩上がりが増加する症例では肺過膨張のリスクがあるため、呼気フロー波形をモニターできる麻酔器が必須である。

2. 十分な吸気時間 (2 ~ 4 秒) で行う PCV の効能

十分な吸気時間で行う PCV の最大のメリットは生理学的死腔率の改善である。しかし、生理学的死腔率の改善は臨床では重要視されていないようである。実際、健常肺で通常の麻酔管理を行う場合、VCV・I : E 比 1 : 2 で行っても全く問題なく、PCV の生理学的死腔率改善のメリットは感じられない。また、低呼吸器系コンプライアンス症例でも一回換気量が同一であれば、PCV の生理学的死腔率改善で PaCO₂ が低下しても、高二酸化炭素血症は許容しても構わないと思われるかもしれない。しかし、視点を変えてもらいたい。生理学的死腔率が改善するということは、目標の PaCO₂ を達成するために必要な換気量が減少するということである。例えば目標 PaCO₂ < 50cmH₂O として、VCV・I : E 比 1 : 2 で一回換気量が 500mL 必要だったとする。十分な吸気時間で行う PCV では 400mL 程度で同等の換気効率を得られるのである。この生理学的死腔率改善、必要換気量の減少は、RLRP など低呼吸器系コンプライアンス症例では大きなメリットになる。

VCV・I : E 比 1 : 2 で呼吸管理に苦慮する低呼吸器系コンプライアンス症例に対し、十分な吸気時間で行う PCV を試してもらいたい。VCV・I : E 比 1 : 2 から十分な吸気時間で行う PCV に変更した直後は一過性に EtCO₂ が上昇するかもしれない。生理学的死腔率が改善して二酸化炭素排出量が増えたためであり、時間とともに EtCO₂ と PaCO₂ は低下する。さらに、必要換気

量の減少は気道プラトー圧をさらに減少させ、肺保護的であることも期待される。

V. ま と め

RLRP など低呼吸器系コンプライアンス症例では、十分な吸気時間 (2 ~ 4 秒) で行う PCV は生理学的死腔率を改善して必要換気量を減少させ、さらに気道プラトー圧を減少させるなど、極めて有効な手段となる。

本稿の著者には規定された COI はない。

参考文献

- 1) Danic MJ, Chow M, Alexander G, et al : Anesthesia considerations for robotic-assisted laparoscopic prostatectomy: a review of 1,500 cases. *J Robot Surg.* 2007 ; 1 : 119-23.
- 2) Kalmar AF, Foubert L, Hendrickx JF, et al : Influence of steep Trendelenburg position and CO(2) pneumoperitoneum on cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory homeostasis during robotic prostatectomy. *Br J Anaesth.* 2010 ; 104 : 433-9.
- 3) Rittayamai N, Katsios CM, Beloncle F, et al : Pressure-controlled versus volume-controlled ventilation in acute respiratory failure : a physiology-based narrative and systematic review. *Chest.* 2015 ; 148 : 340-355. Downloaded From : <http://journal.publications.chestnet.org/>
- 4) Lohser J : Evidence-based management of one-lung ventilation. *Anesthesiol Clin.* 2008 ; 26 : 241-72.
- 5) Roze H, Lafargue M, Batoz H, et al : Pressure-controlled ventilation and intrabronchial pressure during one-lung ventilation. *Brit J Anaesth.* 2010 ; 105 : 377-81.
- 6) James HP : Airway pressure monitoring and ventilator control. http://etherweb.bwh.harvard.edu/education/PHILIP/2009_TTP_Tube_Tip_Pressure_Ventilator_Control_Lecture_2009-08-19_J_Philip.pdf#search=%27James+H+Philip.+Airway+Pressure+Monitoring%27
- 7) Hirabayashi G, Ogihara Y, Tsukakoshi S, et al : Effect of pressure-controlled inverse ratio ventilation on dead space during robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *Eur J Anaesth.* 2017. inpress.
- 8) Choi EM, Na S, Choi SH, et al : Comparison of volume-controlled and pressure-controlled ventilation in steep Trendelenburg position for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *J Clin Anesth.* 2011 ; 23 : 183-8.
- 9) Cadi P, Guenoun T, Journois D, et al : Pressure-controlled ventilation improves oxygenation during laparoscopic obesity surgery compared with volume-controlled ventilation. *Brit J Anaesth.* 2008 ; 100 : 709-16.