



GE HealthCare

「あなたは肺胞リクルートメントを 麻酔管理で活用していますか？」

—麻酔中の肺胞リクルートメントを理解する—

Anesthesia Providers' Knowledge and Use of Alveolar Recruitment

札幌南三条病院麻酔科 中山禎人先生



1 全身麻酔では、 90%の症例で無気肺が発生する！

通常の麻酔管理時においては、多くの麻酔科医は術中の無気肺について、常に意識しながら管理しているとは言い難いのではないだろうか。しかしながら、全身麻酔中の症例の90%に無気肺が発生することが知られており¹⁾、一般的な全身麻酔症例において、横隔膜付近では15-20%、肺全体では10%程度の領域が無気肺に陥っていると推測されている^{2,3)} (図1B矢印)。この無気肺は、吸入麻酔および静脈麻酔での麻酔管理のどちらにおいても、また自発呼吸・調節呼吸の何れの管理下でも発生することが知られている⁴⁾。開心術症例に至っては、術後、肺の50%以上の領域に無気肺が発生すると報告されている⁵⁾。ガス交換の障害と無気肺の総量の間には有意な相関があり⁶⁾、大きな手術の後には、この無気肺は2日間程度持続し⁷⁾、感染症や低酸素血症など肺合併症の原因となる可能性が高い。

全身麻酔時の無気肺の原因としては、肺組織や肺外組織による肺胞の圧迫、高い吸入酸素濃度や気道閉塞による吸収性無気肺、サーファクタントの喪失や不活性化などの機能低下、喀痰貯留などが挙げられる。

全身麻酔時の無気肺の影響としては、続発する術中の低酸素血症と術後肺合併症への関与が問題となる。術後の低酸素血症は、創部感染や術後せん妄のリスク因子となる。また術後肺合併症への関与としては、無気肺領域の感染防御機構の機能不全と、引き続き気管支炎、肺炎などの肺感染症の惹起が問題となる。このため、術中・術後無気肺は、その発生の防止のために有効な手段を講じることが大変重要である。

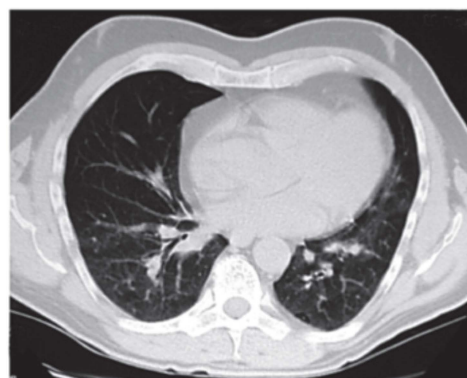


図1A 全身麻酔導入前

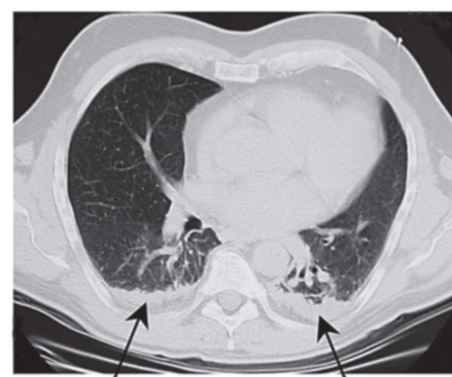


図1B 気管挿管後

(Magnusson L, Spahn DR. Br J Anaesth 2003; 91: 61-72より引用改変)

2 肺胞リクルートメント手技 (alveolar recruitment maneuver; ARM)とは？

無気肺や術中低酸素血症への対策として、肺胞リクルートメント手技は簡便に思考できて実用性が高いことが知られているが、広く一般的に行われるまでには未だ至っていない印象がある。

虚脱した肺胞を拡張することを肺胞リクルートメントと呼ぶが、肺胞リクルートメント手技とは、一時的に気道内圧、ひいては経肺圧（肺内外圧差；transpulmonary pressure）を増加させて、虚脱している肺胞や換気が不十分な肺胞のうち、再拡張が可能な肺胞を開通させる手技の全般を指すと定義できる。

3 肺泡リクルートメント手技の実際

Open lung therapyの一環としては、hyperinflationやhyperventilationとほぼ同義であり、気管吸引の施行後に通常行われる、バッグを加圧し気道内圧を上げて行う肺の十分な伸展も、広い意味で本手技の一つと言える。

完全に虚脱した肺泡や、虚脱・再開通を繰り返している肺泡を十分に開通させるためには、高い圧を一定時間付加する必要がある。肺泡が開くための圧をcritical opening pressure(臨界解放圧)と呼ぶが、無気肺を生じている肺泡では、この圧は人工呼吸中に一般的に使用されるPEEPレベルよりかなり高いことが知られており、PEEPはこの目的のためには意味をなさない。このような肺泡を持続的に開通させる契機をもたらすためには、肺泡リクルートメント手技の施行が最適の手段であると考えられる。

肺泡リクルートメント手技は、気管挿管する全身麻酔症例の殆どに適応があると考えられるが、本手技が特に有効な症例としては、以下が挙げられる。

- 分離肺換気 (onelung ventilation; OLV)症例
- 肥満症例
- 高齢者、低酸素血症合併症例、wet case
- 腹腔鏡手術
- 長時間手術

実際の手技としては、以下の2つの方法が代表的である。

気道内圧を圧で秒数～十数秒間保つ、比較的単純な方法⁸⁻¹⁰⁾

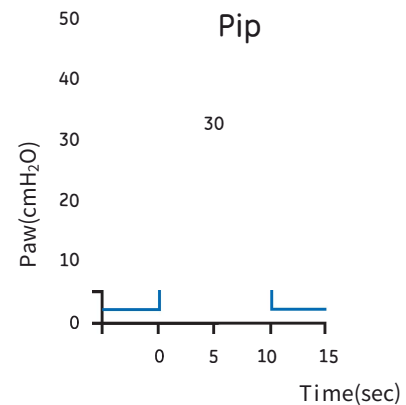


図2Aバイタルキャパジティ手技vital capacity maneuver:VCM

陽圧呼吸やPEEPの条件を複雑に変化させて行う方法¹¹⁻¹³⁾

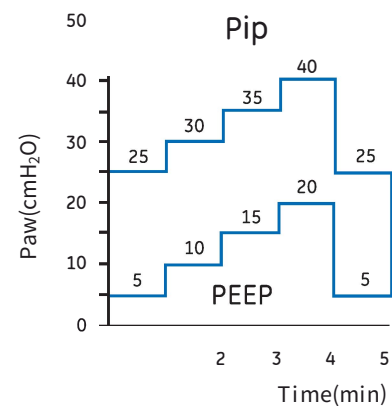


図2B狭義の肺泡リクルートメント手技; ARM



しかし、現在までに標準的な手技としてのその方法、圧や時間の最適値に合意は得られていないのが現状であり、リクルートメント手技は、諸家の報告により様々である。では、実際の麻酔管理中での肺泡リクルートメント手技で、適切な気道内圧とホールド時間はどうしたら良いのか、悩むところである。バイタルキャパシティ手技または肺泡リクルートメント手技のどちらかを選択するかについても、今は定まった見解は無いが、手技の所要時間が短く、また手動でも比較的容易に行えるバイタルキャパシティ手技の方がより理解が容易であると思われるため、本手技の適切な施行条件を以下に検討したい。

最高気道内圧については、過去の報告では、40cmH₂Oでの施行が多い印象があるが、肺泡を広げるために、短時間とはいえ、一定時間の高圧での保持をする場合に、その施行により肺の圧外傷を惹起する可能性が否めない。特に急性肺障害症例では、高すぎる陽圧による圧外傷の危険性はより大きい¹⁴⁾。また、肺泡リクルートメント手技を行う際には、気管チューブのカフ圧を超える最高気道内圧で施行した場合、カフのシールが不十分となり、リークの発生が危惧される。このため、施行の際には予めカフ圧を最高気道内圧と同等かそれ以上に調整するのが望ましいが、カフ圧が高すぎる場合には、気管粘膜の虚血症の発生や膜様部の損傷が懸念される。このリスクを回避するために、一般に気管チューブのカフ圧は32cmH₂O以下に保つことが推奨されているが、より安全な肺泡リクルートメント手技のためには、特別な事情が無い限り、最高気道内圧は32cmH₂Oを超えないのが望ましい可能性がある。

また、施行時間については、30-40秒間というものが散見される^{8,9)}が、後述する如く、10秒を超えるバイタルキャパシティ手技では、施行後に循環虚脱の発生が危惧される¹⁵⁾。Rothenら⁹⁾は、40cmH₂Oのバイタルキャパシティ手技では7秒で無気肺領域でのリクルートメントが完了することを報告している。

このため、これよりもやや最高気道内圧が低い条件でも、10秒程度で一定の効果が得られることが推測される。実際に、後述する自験例¹⁰⁾において、筆者らは30cmH₂O・10秒間のバイタルキャパシティ手技で有意な効果を得ているため、まずはこの条件での施行を試みて、効果が不十分である場合には設定条件を再検討するという方法をお勧めしたい。

4 肺泡リクルートメント手技の臨床応用 分離肺換気症例を中心に

麻酔中に肺泡リクルートメント手技の恩恵を最も直接的に実感できる場面としては、分離肺換気中の低酸素血症に対する改善効果が第一に挙げられる。近年、胸腔鏡や胸腔鏡補助下での低侵襲手術の広い普及を認める一方、特に分離肺換気を必要とする症例では、術中の低酸素血症や術後無気肺の発生が問題となる。低酸素血症の発生要因としては、分離肺換気中は手術側の肺の換気を停止するため、同側の肺血流は酸素化されず、シャントとなることが最大の要因であるが、その他の要因としての換気側の無気肺なども重要であり、十分な対策を講じる必要がある。分離肺換気中の肺泡リクルートメント手技の有用性については種々の報告が認められる。手技施行のタイミングとしては、分離肺換気中¹⁰⁻¹²⁾および分離肺換気前¹³⁾のどちらにおける施行でも、酸素化を著明に改善するとの報告がされている。

分離肺換気中に肺泡リクルートメント手技を施行し、その効果を評価した研究¹¹⁾では、従圧式換気で気道内圧//PEEPを3分間かけて漸増させ、最終的に気道内圧/PEEPを40/20cmH₂Oで1分間換気する狭義の肺泡リクルートメント手技の施行群において、酸素化が著明に改善されたことが報告されている。また、分離肺換気開始前と終了直後に肺泡リクルートメント手技を施行し、その効果を評価した研究¹³⁾では、従圧式換気で気道内圧/PEEPを5呼吸毎に漸増させ、

最終的に気道内圧/PEEPを40/20cmH₂Oで10回の肺泡リクルートメント手技の施行群において分離肺換気中・後の死腔率・気道抵抗の低下と酸素化の改善が認められたことが報告されている。筆者も比較的早期から肺泡リクルートメント手技の有用性に着目し、日常の臨床において、気道内圧30cmH₂Oで10秒間ホールドというバイタルキャパシティ手技で、多くの症例において十分な効果を得ている。分離肺換気症例25例に対して分離肺換気中にこの方法を施行した自験例¹⁰⁾では、施行前のPaO₂は119±73 mm Hgであったのに対し、施行2、10分後にはそれぞれ199±85、183±93 mm Hgへの有意な増加を認めた（図3）ことを報告している。

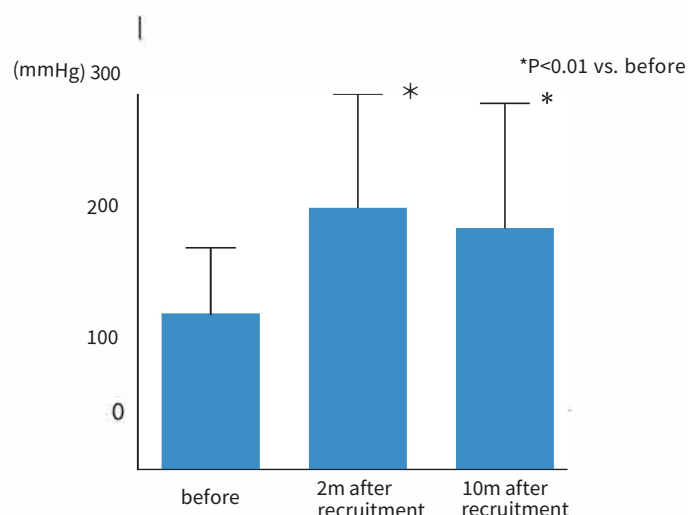


図3.0LV中の肺泡リクルートメント手技前後におけるPaO₂の推移

5 肺泡リクルートメント手技の問題点と留意点

肺泡リクルートメント手技は、殆どの症例においてその利点が欠点を上回ると考えられる。しかしながら、施行の際には、以下に挙げる留意点を十分に念頭に置いた管理を心掛けたい。

循環抑制

肺泡リクルートメント手技の施行の際の問題点として、循環抑制発生の危険性があげられる。その要因としては、気道内圧上昇により胸腔内圧が上昇し、静脈還流の低下が惹起されることにより前負荷が減少し、それによる心拍出量の減少が循環虚脱へと繋がる機序が第一に挙げられる。また、その他の要因として、膨張肺による心臓の直接圧迫も循環抑制に繋がると考えられる。特に高齢者や循環血流量減少を認めるなど全身状態の優れない症例においては、思わぬ循環変動の惹起が危惧されるため、十分な配慮が必要である。特に分離肺換気を施行した症例には、術終3時に虚脱肺の十分な再膨張が必要となる。

分離肺換気症例54例における肺泡リクルートメント手技の循環動態に及ぼす影響について検討した自験例¹⁵⁾では、気道内圧30cmH₂Oにて10秒間の片肺又は両肺の加圧を行い、加圧前および加圧後3分間の血行動態を検討した結果、両肺加圧では加圧終了後5、10秒で収縮期血圧の、5秒後で拡張期血圧の有意な低下を認めた。その一方、片肺加圧では加圧前後の血圧の有意な変化は認めなかった。両肺加圧を施行すると、一時的ではあるが高度の低血圧を惹起する一方、片肺加圧では、循環変動を最小限に抑えられた。以上より、分離肺換気時における肺の再膨張時には、特に心疾患合併症例はどでは、循環虚脱を招かないために、片肺加圧が望ましいと考えられた。また、分離肺換気以外の症例では両肺を同時に加圧せざるを得ないが、本研究の結果より、肺泡リクルートメント手技の施行時には、



分離肺換気の症例よりも更なる循環変動や循環虚脱を惹起する可能性を念頭に置く必要がある。このためには、循環虚脱を未然に防ぐために、予め最高気道内圧や施行時間の設定条件に十分な注意を払うのはもちろんであるが、施行時においても循環動態の変化を絶え間なく看視し、循環虚脱発生が疑われた場合には速やかに手技を中止し、再試行が必要な場合には、輸液負荷など、個々の症例に適した対応策を講じた上で施行すべきである。

喀痰・気道分泌物と十分な気管吸引

肺泡リクルートメント手技施行時の注意点として、喀痰や気道分泌物の除去が不十分なまま肺泡リクルートメント技を施行すると、期待する効果が得られないばかりか、逆にこれらを末梢気道まで送り込み、更なる無気肺や肺合併症の惹起に繋がる危険性がある。このため、肺泡リクルートメント手技施行前の十分かつ効果的な喀痰・気道分泌物除去は最重要と考える。

気管吸引法としては、吸引カテーテルを用いた方法が標準的であるが、気管支ファイバースコープによる丁寧な喀痰吸引は、最も確かな方法の一つである。著者は気管チューブの1-2秒間の直接吸引後に吸引カテーテルで気管吸引する方法を日常用いているが、このような気管吸引法の工夫を行うと、気管支ファイバースコープを用いた吸引に匹敵する十分な喀痰吸引が簡便に可能となる印象を得ている。

喀痰貯留を推測するためには、最高気道内圧の上昇や換気量低下、コンプライアンスの低下などの所見が参考となる。特に近年は、P-V(pressure-volume)カーブ(圧-容積曲線)およびF-V(flow-volume)カーブ(流量-容積曲線)が装備されている麻酔器やモニターが増えているが、これらを活用することにより、喀痰貯留の推測が容易になる場合がある。具体的には、喀痰貯留時はP-Vカーブで呼気時に気道内圧低下後も残気量が多く、また特に従圧式換気での場合は、F-Vカーブで吸気時に最大フロウが小さく、呼気時に線が細かく揺れる現象

が確認される(図4A矢印)が、喀痰の十分な吸引後はそれらが改善する(図4B矢印)。麻酔中のP-V・F-Vカーブの有効な使い方としては、予めP-V・F-Vカーブを画面メモしておくことにより、カーブ形状の経時的変化の診断が容易となる。またこれらカーブのモニタリングの利点としては、リーク発生や換気量の変化も一目瞭然で診断可能である点が挙げられる。これらを有効に活用して、十分かつ効果的な喀痰・気道分泌物除去を心掛けたい。

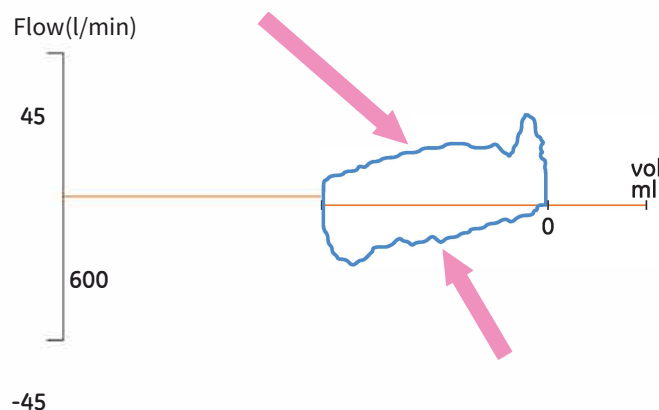


図4A 気管吸引前のF-Vカーブ

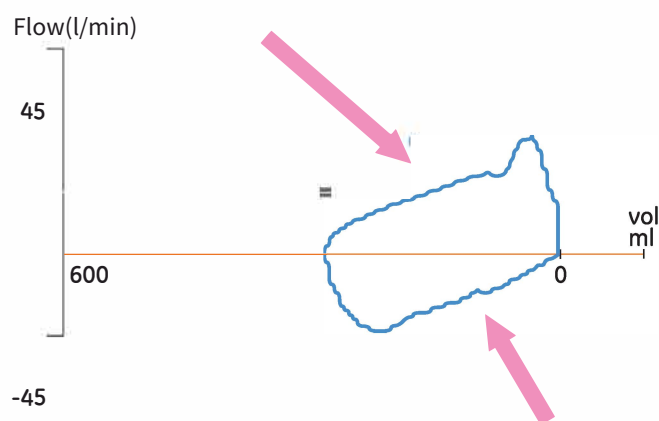


図4B 気管吸引後のF-Vカーブ

これからの術中の肺泡リクルートメント手技 ～手動から自動へ～

実際のリクルートメント手技施行における問題点として、手動でバイタルキャパシティ手技を行う場合、施術者が強い圧で麻酔バッグを一定時間キープする必要がある。この手技は、長時間ではないものの、麻酔科医の手を一定時間ふさいでしまい、また施行に際しては施術者による手技のばらつきが生じる可能性がある問題点を有する。更に、陽圧呼吸の条件を複雑に変化させて行う狭義の肺泡リクルートメント手技については、手動の施行は理論上では可能であるが、実際の臨床では困難を伴うことが容易に推測される。また、麻酔器に付属する一般的な人工呼吸器を用いての施行も、頻繁な設定条件変更が必要であり、このために少なからぬ時間と労力を注がざるを得ない。

麻酔中に肺泡リクルートメント手技をより手軽に行うために、麻酔器の人工呼吸器に組み込まれたリクルートメント手技を用いる方法がある。あらかじめ定義したリクルートメント手技プロトコルをワンタッチで自動的に施行しうる麻酔器（AisysCS²およびCarestation650/750シリーズで一部の機種にオプション）を用いることにより、麻酔中のリクルートメント手技を簡便かつ確かに行うことが可能となる。本麻酔器の procedure/recruitment maneuver メニューの中の Vital Capacity(single step)手技では、吸気圧とホールド時間を自在に設定可能であり、設定後にワンタッチで手技が可能となる（図5A）。また、同じく Cycling(multi step)では、PCV条件（吸気圧、PEEP、換気回数、I:E比など）をステップ毎に設定し、狭義の肺泡リクルートメント手技を1つのプログラムとしてデフォルト設定可能であり、こちらも設定後にワンタッチで狭義の肺泡リクルートメント手技が可能となる（図5B）。従来までは、肺泡リクルートメント手技を行う際には、人工呼吸器の操作のために麻酔科医が数分間付ききりになる必要があったが、自動化により、このような複雑なプロトコルもワンタッチで施行が可能となる。

これら、麻酔中のリクルートメント手技の自動化により、以下のリットを享受できると考えられる。

- 術中の低酸素血症の回避がより簡便に可能となる。
- 施術者をハンズフリーにする。→ ストレスも軽減。
- 狭義の肺泡リクルートメント手技が自動化されることにより、今後は麻酔中にもバイタルキャパシティ手技のみならず本手技が広く行われ、有用性の検討が進む可能性がある。
- 手技の煩雑さ、施術者による手技のばらつきが解消され、簡便・確かな肺泡リクルートメント手技が可能となる。
- 将来的な肺泡リクルートメント手技の標準的手技確立にも役立つ可能性がある。

今後の展望としては、生理的な自発呼吸では、呼吸サイクルの何度かに一回、比較的大きな換気を行い、肺をある程度伸展させることが知られているが、全身麻酔時の調節呼吸モードにおいても、無気肺防止のために定期的な肺泡リクルートメント手技を取り入れた呼吸モードが登場するかも知れない。



図5A Vital Capacity /single step

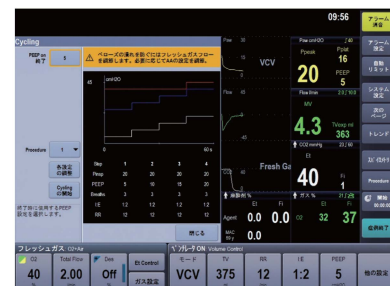


図5B Cycling/multi step



おわりに

全身麻酔では、90%の症例で無気肺が発生する。無気肺が術後持続すると、肺感染症や低酸素血症等の合併症の温床となりうる。肺泡リクルートメント手技は、術中無気肺の減少や低酸素血症の改善方法として有用である。特に分離肺換気においては、両肺・片肺換気時の双方において術中低酸素血症の改善に効果的である。自験例では、30cmH₂O、10秒間のバイタルキャパシティ手技で十分な効果を得ているので試されたい。

肺泡リクルートメント手技の有用性の反面、現在、残念ながら実臨床で広く応用されているとは言い難いが、その理由としては手技の煩雑さ等が挙げられる。肺泡リクルートメント手技が自動で施行可能な麻酔器を用いることにより、更に簡便で確かな肺泡リクルートメント手技が可能となり患者管理に恩恵をもたらす可能性がある肺泡リクルートメント手技は、術中・術後の無気肺・肺合併症の防止のために、分離肺換気はもちろん、ほとんどの気管挿管下全身麻酔症例に積極的に用いるべき手技と考える。その概念と意義を十分に理解し、適切な肺泡リクルートメント手技を用いて、より良い周術期管理に役立てて頂くことを願い、稿を終える。



参考文献

- 1) Lundquist H, Hedenstierna G, Strandberg A, et al. CT assessment of dependent lung densities in man during general anaesthesia. *Acta Radiol* 1995; 36: 626-32
- 2) Magnusson L, Spahn DR. New concepts of atelectasis during general anaesthesia. *Br J Anaesth* 2003; 91: 61-72
- 3) Duggan M, Kavanagh BP. Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity *Anesthesiology* 2005; 102: 838-54
- 4) Strandberg A, Tokics L, Brismar B, et al. Atelectasis during anaesthesia and in the postoperative period. *Acta Anaesthesiol Scand* 1986; 30: 154-8
- 5) Tenling A, Hachenberg T, Tyden H, et al. Atelectasis and gas exchange after cardiac surgery. *Anesthesiology* 1998; 89: 371-8
- 6) Hedenstierna G, Tokics L, Strandberg A, et al. Correlation of gas exchange impairment to development of atelectasis during anaesthesia and muscle paralysis. *Acta Anaesthesiol Scand* 1986; 30: 183-91
- 7) Lindberg P, Gunnarsson L, Tokics L, et al. Atelectasis and lung function in the postoperative period. *Acta Anaesthesiol Scand* 1992; 36: 546-53
- 8) Futier E, Constantin M, Paugam-Burtz C, et al. A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. *N Engl J Med* 2013; 369: 428-37
- 9) Rothen HU, Sporre B, Wegenius G, et al. Reexpansion of atelectasis during general anaesthesia: a computed tomography study. *Br J Anaesth* 1993; 71: 788-95
- 10) Nakayama Y, Omote K, Honma E, et al. The effects of alveolar recruitment maneuver on arterial oxygenation during one-lung ventilation. *Anesthesiology* 2006; 105: A1515
- 11) Tusman G, Bohm SH, Melkun F, et al. Alveolar recruitment strategy increases arterial oxygenation during one-lung ventilation. *Ann Thorac Surg* 2002; 73: 1204-9
- 12) Tusman G, Bohm SH, Sipmann FS, et al. Lung recruitment improves the efficiency of ventilation and gas exchange during one-lung ventilation anesthesia. *Anesth Analg* 2004; 98: 1604-9
- 13) Unzueta C, Tusman G, Suarez-Sipmann F, et al. Alveolar recruitment improves ventilation during thoracic surgery: a randomized controlled trial. *Br J Anaesth* 2012; 108: 517-24
- 14) Meade MO, Cook DJ, Griffith LE, et al. A study of the physiologic responses to a lung recruitment maneuver in acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. *Respir Care* 2008; 53: 1441-9
- 15) Nakayama Y, Omote K, Fujita S, et al. Effects of Bilateral and Single Lung Inflation during One-Lung Ventilation on Hemodynamic Changes. *Anesthesiology* 2004; 101: A1537



Carestation 600 シリーズ
B650 モニタ搭載例



Carestation 750 シリーズ
Canva シリーズモニタ搭載例



エイシス CS2
Canvas シリーズモニタ搭載例

※本資料に掲載されている内容は、使用者の感想であり、仕様値として弊社が保証するものではありません。

販売名称: Carestation 600 シリーズ 医療機器承認番号: 22700BZX00422000
販売名称: エイシス 医療機器承認番号: 21900BZX00741000

販売名称: Carestation 750 シリーズ
販売名称: Tec7 気化器 セボフルレン
販売名称: Tec7 気化器 イソフルレン

販売名称: CARESCAPE ベッドサイドモニタシリーズ
販売名称: Tec800 シリーズ 気化器 セボフルレン
販売名称: Tec800 シリーズ 気化器 イソフルレン
販売名称: CARESCAPE ベッドサイドモニタ Canvas シリーズ
販売名称: CARESCAPE ONE モニター

医療機器承認番号: 30200BZX00223000
医療機器承認番号: 21500BZY00166000
医療機器承認番号: 21500BZY00167000
医療機器承認番号: 231ADBZX00011000
医療機器承認番号: 23000BZX00190000
医療機器承認番号: 23000BZX00189000
医療機器承認番号: 305ADBZX00092000
医療機器承認番号: 231ADBZX00022000



GE HealthCare

製造販売業者名: GEヘルスケア・ジャパン株式会社

記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。
© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.
Rev.1.0 2018/6 8F・BB-B2(KM・KM) Bulletin N1F24 J810618JA