



全身麻酔中の肺機能改善を助けるための肺泡リクルートメント手技

Christopher Young, MD

Professor of Anesthesiology, Division of Critical Care Medicine, Duke University Medical Center

Introduction

手術の前に、全身麻酔(GA)の導入とともに立位から仰臥位に移行する患者は、進行性の無気肺のために肺機能を大幅に低下させる可能性があります。腹圧、胸壁の圧迫、および神経筋遮断の分布の変化はすべて、機能的残気量(FRC)として知られる、肺の安静時の呼気終末肺容量に相加的で有害な減少をもたらします。これら変化の結果、肺容量は小さくなり、圧力・容量(P-V)曲線のより平坦でコンプライアンスの低い部分で機能します。図1に示すように、同じ負荷される一回換気量を維持するために(図1.normal-lung zone volumeを参照)、肺はより大きな圧力を必要とします。

肺コンプライアンス曲線における下方へのシフトは、肥満、トレンドレンブルグ体位、気腹などの要因によって拡大されます。

麻酔中の無気肺

GAを受けている患者の90%は、進行性の無気肺のために低酸素血症を発症します。初期の研究では、12~15mL/kg 体重の一回換気量(VT)の使用が、無気肺を軽減し、手術室(OR)¹での正常な肺ガス交換のコンプライアンスを回復するのに効果的であることがわかりました。最近では、急性呼吸窮迫症候群(ARDS)患者と全身麻酔を受けている健康な肺の患者の両方で、多いVTを用いた換気での悪影響が認識されています²。その結果、手術室での肺保護換気に関する現在の推奨事項には、6~8mL/Kg、予測体重(PBW)として定義される、少ないVTを用いた換気の使用が含まれています。

VTの低下は、過膨張による肺泡損傷のリスク、つまり容量損傷または圧損傷を低減しますが、無気肺損傷と呼ばれる、肺ユニットの周期的な肺泡虚脱と再開通による肺損傷のリスクは依然として存在します。肺実質にかかる圧とひずみの概念は、肺損傷への介入や無気肺損傷の予防における無気肺、VT、FRC の役割を理解するのに役立ちます。

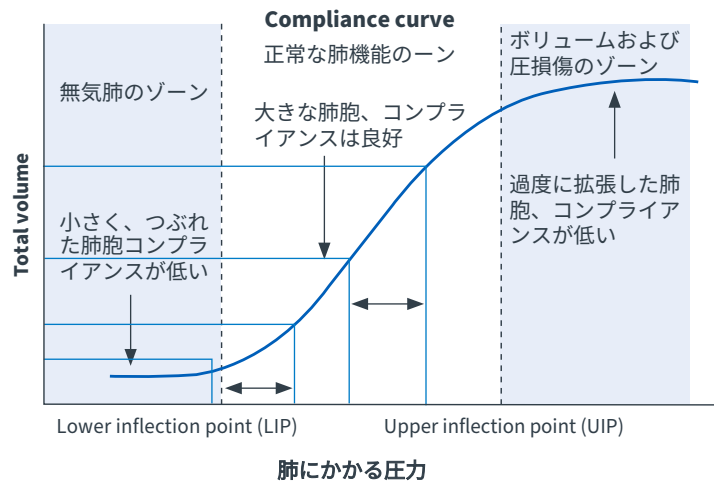


図1.肺コンプライアンス曲線。拡張中の肺圧力とボリュームをプロットすると、コンプライアンス曲線が得られます。シグモイド曲線は、肺コンプライアンスが正常に機能している肺の中間ゾーンで最適であることを示しています。無気肺と過度の拡張は曲線の平坦化に関連しており、同じ一回換気量を生成するにはより大きな圧力が必要であることを示しています。2つの等しい一回換気量が示されています。コンプライアンスが良好なゾーンで供給される一回換気量は、無気肺のゾーンで供給される同じ量よりも少ない圧力で済みます。コンプライアンスが低下したときに肺を換気すると、圧損傷を引き起こす可能性があります。

無気肺の機械的影響

応力とひずみは材料工学で使用される用語です。材料に作用する動的な力を定量化します。これらの概念は、陽圧機械換気中に肺に作用する力を説明するために使用できます。応力は、面積あたりの力として定義されます。特定のVTが肺に送達されると、そのVTに関連する圧力が増加します。ひずみは、材料の長さの変化を元の長さで割った値として定義されます。例えば、ばねが負荷がかからない長さを超えて伸びた場合などです。容積ひずみは、長さではなく容量を指し、機械換気中に肺胞に作用する圧力を表すのに役立ちます。したがって、肺全体の容積ひずみは、肺容量変化(VT)を表すことができます(図2)。終末呼気量(EELV)は、陽圧換気中のFRCと同じです。GAで見られるFRC(およびEELV)の減少はORでの肥満、ポジショニング、および気腹によって増幅され、機械換気中の容積ひずみが増加します。³過度の圧力は肺胞の損傷を引き起こし、その結果、全身性炎症反応が増加し、術後の肺合併症の一因となります。FRCが大幅に低下すると、少ないVTを用いた換気でさえ有害になる可能性があります。このため、効果的な肺保護には、少ないVTを用いた換気の使用だけでなく、肺への圧力と容量変化を軽減するため適切なFRCに戻すことも必要です。

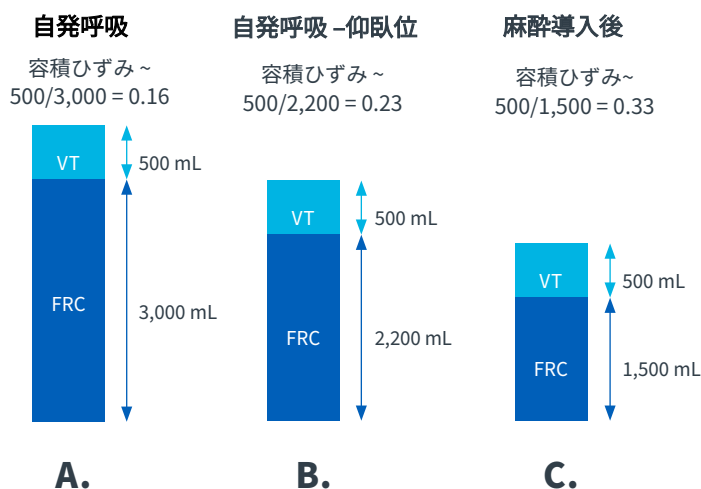


図2. 機能的残気量 (FRC) の低下が肺への圧力に及ぼす影響。パネル A は、自発呼吸中 16% に正常な容積ひずみを示しています。仰臥位による FRC の減少により、ひずみは 23% に増加します (パネル B)。麻酔を導入すると FRC がさらに減少し、ひずみが 33% に増加します (パネル C)。肺泡リクルートメント手技(ARM) と PEEP による FRC の回復により、肺の容積ひずみを軽減できます。

無気肺によるガス交換障害

肺胞が潰れると、肺を通る肺血流がシャントします。これらの肺ユニットは換気に寄与されずその結果、CO₂除去が損なわれ、酸素の不足した血液が体循環に直接戻り、吸気酸素濃度(FiO₂)の増加に反応しない高二酸化炭素症と低酸素血症が生じます。無気肺がさらに進行すると、体循環に直接シャントされる血液の量が増加し、高二酸化炭素症と低酸素血症はさらに悪化します。⁴

ドライビングプレッシャー (駆動圧・ ΔP)

駆動圧は、機械換気中に肺に供給される圧力です。これはプラトー圧/吸気圧と PEEP の差です (図3)。従量式換気では、吸気ポーズを使用して測定できます。吸気ポーズ中はフローがゼロになり、測定されたプラトー圧 (P_{plat}) は最大気道内圧よりも肺胞圧とより等しく相関します。P_{plat} は、従量式換気モード中の最大吸気圧 (PIP) を使用して推定できます。駆動圧は麻酔中に継続的にモニターでき、肺保護の目標を提供します。肺容量の減少によりコンプライアンスが低下すると、同じ一回換気量を生成するにはより高い圧力が必要になります。その結果、肺への圧力と容積ひずみが増加します。VT を減らすと効果がありますが、更なる低酸素血症や高二酸化炭素症が発生します。駆動圧の上昇は、ARDS⁵ 患者の死亡率の増加と関連しています。14~15 cmH₂O を超えるレベルは、GA⁶ 後の術後合併症の発症と有意に関連していることが示されています。駆動圧の小さな変化であっても、臨床アウトカムに重大な影響を与える可能性があります。肺保護換気に関する 17 件のランダム化比較試験のメタアナリシスでは、術後肺合併症と駆動圧の上昇、または呼気終末陽圧 (PEEP) の変化に伴う駆動圧の上昇との間に独立した関連性があることが示されました。⁷ 駆動圧が 1 cmH₂O 上昇するごとに、術後肺合併症を発症する確率が 16% 増加しました。

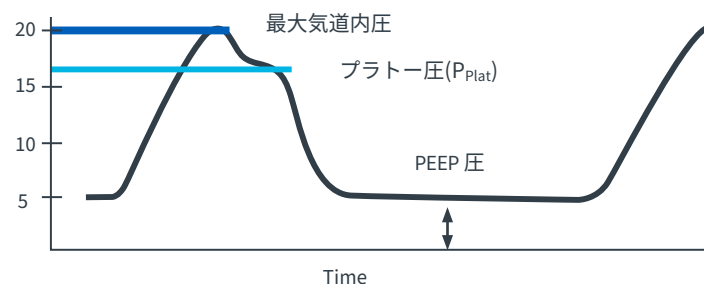


図3. 駆動圧 (ΔP)
駆動圧は、プラトー圧と PEEP (呼気終末陽圧) の差によって決まります。この例では、従量式換気が表示されています。16 cmH₂O のプラトー圧は、吸気終末のポーズ中に測定できます。PEEP は 5 cmH₂O で、駆動圧は 11 cmH₂O になります。最大吸気圧 (PIP) はガス流速と気道抵抗の影響を受けるため、駆動圧を過大評価することに注意してください。

Opening pressureと肺泡リクルートメント手技

虚脱した肺泡は、十分な陽圧を加えることで正常な機能状態に戻すことができます。肺泡または終末気道の Opening pressure(虚脱した肺泡の再開通)は、再開通をもたらす特定の陽圧です。虚脱した肺ユニットを回復させるのに必要な圧力は、肺泡ごとに異なります。適切なレベルの陽圧を適用し、再開通が達成され、短時間維持されると、肺泡リクルートメントが得られます。全身麻酔の間、虚脱した肺泡は、40 cmH₂Oで7~10秒間の肺泡リクルートメント手技(ARM)により開くことができます。⁸ BMIが高い人には、より高いレベルのリクルートメントが必要になる場合があります。⁹

リクルートメント手技はいくつかの方法で行うことができます。術中、手動換気に切り換え、APL弁(adjustable pressure-limiting valve)を使い、開放圧を調節してARMを行う方法です。ただし、この方法はいくつかの理由から推奨できません。最初に、機械換気からバッグに切り換えAPL弁を調節する際、一時的に圧力が開放された場合において、開通していた肺泡の虚脱が引き起こされる可能性があります。次に「バッグを揉む」ARMでは術後肺合併症の発生率増加との関連性があります。⁹ 他の方法として、人工呼吸器の設定を段階的に変更するマルチステップRMが推奨されます。機械換気により目標のopening pressureに達するまで、3~6回の呼吸毎で換気量および/または圧力を増加させる方法です。目標の圧力で数回換気を行った後、ベースラインの低い一回換気量(VT)で、換気を再開することができます。

マルチステップリクルートメント手技の安全性は、複数の研究で示されています。¹⁰ ARMの最も一般的な合併症は、昇圧剤のサポートが一時的に必要なことです。RMが手術室で適切に使用された場合、重大な血行力学的影響や圧損傷の発生率は増加しないようです。

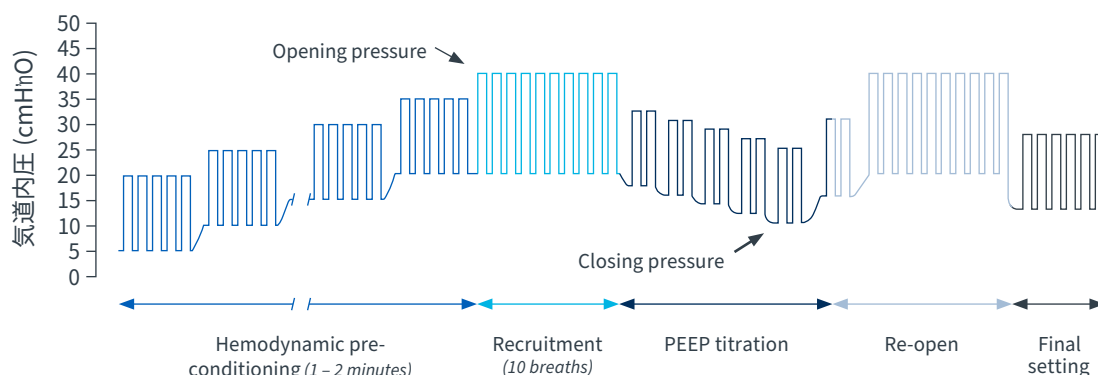


図4. 肺泡リクルートメント戦略 (ARMS)。ARMSは、駆動圧 (plateau-PEEP) 15 cmH₂OのPCVで実行されます。各長方形は一回換気を表します。Hemodynamic pre-conditioning 段階では、PEEPを5 cmH₂Oずつ増加させます。次に、PEEPと駆動圧が20 cmH₂Oまで増加し、opening pressureに達します。10回換気すると、肺泡が完全に開いた状態になります。PEEP titrationトライアルでは、駆動圧を15 cmH₂Oまで低下させ始め、その後20 cmH₂OからClosing pressureが見つかるまで2 cmH₂OずつPEEPを低下させます。リクルートメント手技が実行された後に続き、肺保護設定(低VT)で換気しますが、確立されたOpen Lung-PEEPで換気されます。

The “open lung”

ARMだけでは、潰れやすい肺泡の膨張を維持することはできません。潰れた肺泡をARMで再び開くと、open lung状態を維持するためには十分なPEEPが必要になります。¹¹ 肺泡が機能的状態に回復した後、open lungを維持するために必要なPEEPの値には個人差があります。また、体位、開創鉤の位置、気腹に伴う腹圧と胸壁コンプライアンスの動的な変化により、手術中に変化する可能性もあります。正しいPEEPレベルを決定する一般的な方法の1つは、ARMを実行してから、段階的に下げていくPEEPタイトレーションを実行することです。従量式換気中、最も低い駆動圧（または従圧式換気における所定の圧力に対する最適な一回換気量）を生み出すPEEPは、肺の最適なコンプライアンスに一致し、肺の過膨張と過少膨張との間で一回換気量のバランスをとります。次に2回目のARMが実行され、PEEPがその特定されたレベルよりも1~2 cmH₂O高い値に設定されます(図4)。体格指数(BMI)が正常な人の腹部手術中の駆動圧を最小限にするには、中央値8~10 cmH₂OのPEEPが必要であることが示されています。¹²

開腹手術中の駆動圧を最小限に抑えることによって決定される個別のPEEPは、術中の無気肺を減少させ、術中および術後の酸素化を改善し、術後の肺合併症を大幅に軽減することが示されています。¹³ 腹腔鏡手術を受ける正常なBMI患者の研究では、最適なPEEPは10~14 cmH₂Oであり、トレンデレンブルグ体位とchest injection時にはさらに2~4 cmH₂Oが必要であることがわかりました。¹⁴ 開腹手術を受けるBMIが高い人では、FRCを維持し、酸素化を改善し、駆動圧を下げるために、最大26 cmH₂Oのより高いレベルで個別のPEEPが必要であることがわかっています。¹⁵

失われたFRCを回復し、FRCの喪失による悪影響を軽減する肺リクルートメントには、ARMとPEEPとの両方の使用が必要です。

専門家委員会のコンセンサス

術中人工呼吸器の国際専門家委員会は最近、ARMに関する合意声明を発表しました。¹⁶手術室におけるARMに関する33症例の研究がGRADE法を使用して選択されDelphi guidelinesに基づいて議論されました。パネルでは以下のように結論づけました。

- ARMは患者回路から外した後も、患者のヘモグロビン飽和度が常に94%以下である場合に実行する必要があります。
- ARM後の呼吸器系コンプライアンスと駆動圧の変化を評価し、リクルートメントが効果的でないと評価された場合は、より長い吸気ホールドまたはより高い圧力でARMを繰り返す必要があります。
- ARMは、最も低く有効となる吸気最大気道内圧と最も短い実行時間または最も少ない呼吸数を使用して実行する必要があります。

結論

肺容量を回復することは、手術室(OR)で機械換気を安全に管理するための基礎として次第に認識されるようになってきています。健康な肺は、FRCの低下により、手術室内での機械換気中において、日常的に著しい圧力や容量変化にさらされている可能性があります。肥満、頭低位、気腹などは、呼吸終末肺気量をさらに損なう可能性がある要因の1つです。FRCまたはEELVの回復は、リクルートメント手技(RM)と組み合わせた呼吸終末陽圧(PEEP)を個別に適用することで安全に達成できます。これにより、潰れた肺胞と末梢気道は、正常に膨張した「open lung」状態に安全に戻すことができ、人工呼吸器の駆動圧を下げられます。さらに、open-lung approachによる術中の呼吸機能の改善により、手術後の肺合併症が軽減される可能性があるというエビデンスが増えています。

open-lung managementを手術直後まで広げることで、より、有益なアウトカムをもたらす可能性があります。¹⁷

References

1. Bendixen, H. H., Whyte, H., & Laver, M. B. (1963). Impaired oxygenation in surgical patients during general anesthesia with controlled ventilation: a concept of atelectasis. *New England Journal of Medicine*, 269(19), 991-996.
2. Futier, E., Constantin, J. M., Paugam-Burtz, C., Pascal, J., Eurin, M., Neuschwander, A., ... & Jaber, S. (2013). A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. *New England Journal of Medicine*, 369(5), 428-437.
3. Brunner, J. X., & Wysocki, M. (2012). Is there an optimal breath pattern to minimize stress and strain during mechanical ventilation? In *Applied Physiology in Intensive Care Medicine* 1 (pp. 25-29). Springer, Berlin, Heidelberg.
4. Hedenstierna, G., & Rothen, H. U. (2000). Atelectasis formation during anesthesia: causes and measures to prevent it. *Journal of clinical monitoring and computing*, 16(5), 329-335.
5. Guérin, C., Papazian, L., Reignier, J., Ayzac, L., Loundou, A., & Forel, J. M. (2016). Effect of driving pressure on mortality in ARDS patients during lung protective mechanical ventilation in two randomized controlled trials. *Critical Care*, 20(1), 1-9.
6. Ladha, K., Melo, M. F. V., McLean, D. J., Wanderer, J. P., Grabitz, S. D., Kurth, T., & Eikermann, M. (2015). Intraoperative protective mechanical ventilation and risk of postoperative respiratory complications: hospital-based registry study. *Bmj*, 351.
7. Neto, A. S., Hemmes, S. N., Barbas, C. S., Beiderlinden, M., Fernandez-Bustamante, A., Futier, E., ... & PROVE Network Investigators. (2016). Association between driving pressure and development of postoperative pulmonary complications in patients undergoing mechanical ventilation for general anaesthesia: a meta-analysis of individual patient data. *The Lancet Respiratory Medicine*, 4(4), 272-280.
8. H. U. Rothen, P. Neumann, J. E. Berglund, J. Valtysson, A. Magnusson and G. Hedenstierna. Dynamics of re-expansion of atelectasis during general anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia* 82 (4): 551-6 (1999).
9. Ball, L., Hemmes, S. N. T., Neto, A. S., Bluth, T., Canet, J., Hiesmayr, M., ... & Pelosi, P. (2018). Intraoperative ventilation settings and their associations with postoperative pulmonary complications in obese patients. *British Journal of Anaesthesia*, 121(4), 899-908.
10. Tusman, G., & Belda, J. F. (2010). Treatment of anesthesia-induced lung collapse with lung recruitment maneuvers. *Current anaesthesia & critical care*, 21(5-6), 244-249.
11. Lachmann, B. (1992). Open up the lung and keep the lung open. *Intensive care medicine*, 18(6), 319-321.
12. Ferrando, C., Suarez-Sipman, F., Tusman, G., León, I., Romero, E., Gracia, E., ... & Belda, F. J. (2017). Open lung approach versus standard protective strategies: Effects on driving pressure and ventilatory efficiency during anesthesia-A pilot, randomized controlled trial. *PloS one*, 12(5), e0177399.
13. Zhang, C., Xu, F., Li, W., Tong, X., Xia, R., Wang, W., ... & Shi, X. (2021). Driving Pressure-Guided Individualized Positive End-Expiratory Pressure in Abdominal Surgery: A Randomized Controlled Trial. *Anesthesia & Analgesia*, 133(5), 1197-1205.
14. Pereira, S. M., Tucci, M. R., Morais, C. C., Simões, C. M., Tonelotto, B. F., Pompeo, M. S., ... & Amato, M. B. (2018). Individual positive end-expiratory pressure settings optimize intraoperative mechanical ventilation and reduce postoperative atelectasis. *Anesthesiology*, 129(6), 1070-1081.
15. Simon, P., Girrbach, F., Petroff, D., Schlieue, N., Hempel, G., Lange, M., ... & Wrigge, H. (2021). Individualized versus Fixed Positive End-expiratory Pressure for Intraoperative Mechanical Ventilation in Obese Patients: A Secondary Analysis. *Anesthesiology*, 134(6), 887-900.
16. Young, C. C., Harris, E. M., Vacchiano, C., Bodnar, S., Bukowy, B., Elliott, R. D., ... & Sprung, J. (2019). Lung-protective ventilation for the surgical patient: international expert panel-based consensus recommendations. *British Journal of Anaesthesia*, 123(6), 898-913.
17. Futier, E., Constantin, J. M., Pelosi, P., Chanques, G., Massone, A., Petit, A., ... & Jaber, S. (2011). Noninvasive ventilation and alveolar recruitment maneuver improve respiratory function during and after intubation of morbidly obese patients: a randomized controlled study. *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, 114(6), 1354-1363.

© 2023 GE HealthCare – 無断複写・転載を禁じます。

GEは、商標ライセンスに基づいて使用される General Electric Company の商標です。

GEからの事前の書面による許可がない限り、いかなる形式の複製も禁止されています。この記事で表明されている意見、見解、視点は著者のみのものであり、必ずしもGE HealthCareの意見、見解、視点を反映しているわけではありません。著者はGE Healthcareのコンサルタントであり、この記事の作成に対して報酬を受けています。無許可での使用は固く禁じられています。この資料には臨床概念と定義が含まれている場合があります。お客様の使用経験および文献に基づく記載です。仕様値として保証するものではありません。



GE HealthCare