

□呼吸管理の工夫□

食道内圧および胃内圧を用いた 換気力学的モニタリングの有用性

武澤 純* 西脇 公俊* 木村 智政*

はじめに

世界の人工呼吸器市場はマイクロプロセッサを登載した第3世代人工呼吸器がその大半を制覇したあと、Demand valveや流量計などの精度は現状維持のまま、換気様式をSIMVとPSVの二種類に限定し、かつモニター部分も縮小した低価格化の過当競争に突入している感がある。人工呼吸器による呼吸管理の現在での課題としては、①自発呼吸を残した上での呼吸仕事量の軽減、②呼吸仕事量と無関係な肺でのガス交換能の改善、の2点に絞られる。呼吸仕事量の軽減の観点からはプレッシャーサポート換気(PSV)、CPAPの適正使用、高い気道抵抗に関係するAuto-PEEP(PEEPi)対策が重要である。ガス交換能の改善としてはReverse I/E Ratio Ventilation, Airway Pressure Release Ventilation・高頻度人工換気, Constant Flow Ventilationなどが話題を集めている。本稿では人工呼吸管理上の問題点の中でも、特に呼吸仕事量軽減の観点から臨床上的のような工夫がなし得るか、また更にどのような問題点が残されているかについて言及する。

1. 自発呼吸補助における呼吸仕事量軽減についての問題点

1) プレッシャーサポート換気

プレッシャーサポート換気は正常肺をDemand flow型人工呼吸器を用いて、CPAPで管理する際に呼吸器回路、気管チューブ、人工呼吸器の時間遅れなどによって患者に新たに負荷される吸気仕事量を軽減するために開発された換気

様式である。そして、その優れた患者—人工呼吸器の同調性のため、最近では比較的安定した呼吸不全患者で、自発呼吸を残したままの呼吸補助様式として、その適応が拡大されている。呼吸仕事量軽減の観点からはPSVは一回換気量と吸、呼吸時間が患者のデマンドで決定されるため、患者—人工呼吸器の同調性において大幅な改善が見られている。従って、SIMVと比較したPSVの優位性はほとんどがこの同調性の改善によるものである。しかし、呼吸仕事量軽減の観点からPSVにも未解決の問題が残っている。①初期最大吸気流速の適正流速とプレッシャーサポートレベルに達する際の減衰速度、②プレッシャーサポート停止基準、③トリガーのための吸気仕事量の残存、④適正プレッシャーサポートレベルの決定方法、⑤病的肺、特に気道抵抗の高い肺への適応などである¹⁾²⁾。①—③は人工呼吸器の機構上の問題であるので今回は触れない。

(a) 正常肺での適正プレッシャーサポートレベル
適正プレッシャーサポートレベルの決定に関してはMacIntyreが一回換気量が10-12 ml/kgになるようなプレッシャーサポートレベルをPSVmaxと名付けて適正レベルとしている³⁾。しかしながらこの適正レベルの決定方法は、15人の患者にプレッシャーサポート換気を行い、一回換気量が変化せずに呼吸回数が最も少なくなるレベルから決定したもので、PSVmaxが呼吸仕事量軽減の観点から適正であるか否かに関してはモデル肺を使用して推測しているだけであり、適正プレッシャーサポートレベルの根拠としては不十分である。

PSV下での呼吸仕事量の測定は胸腔内圧と腹腔内圧の差(経横隔膜圧)を横軸に取り、縦軸に一回換気を取って呼吸仕事量を計測する。図1-a

* 名古屋大学医学部附属病院集中治療部

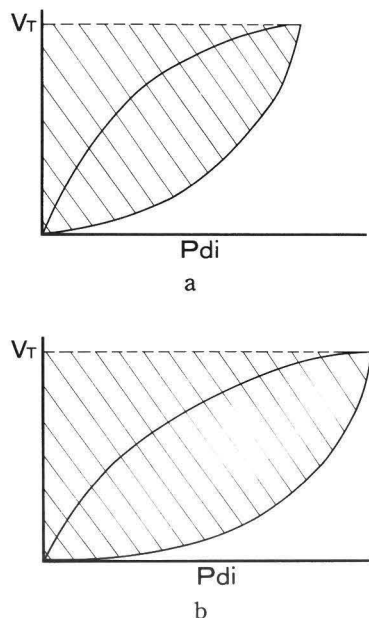


図1 吸気仕事量の測定

VT：一回換気量，Pdi：経横隔膜圧差（コンプライアンスが低いためbではより多くの吸気仕事量を必要とする）

に示した斜線部分が吸気仕事量である。コンプライアンスが低下し、気道抵抗が上昇すると、図1-bに示したように吸気仕事量は大幅に増加する。プレッシャーサポートはこの吸気仕事量を軽減するように働くが、図2に示したように、プレッシャーサポートレベルが低いと吸気仕事量を十分には軽減できない。逆にプレッシャーサポートレベルが高すぎると、機能的残気量（FRC）レベルを越して肺が進展され、患者は肺の過膨張のために不快感を覚える。プレッシャーサポートはコンプライアンスの低い肺では呼吸仕事量の軽減は不十分ながら正常肺とほぼ同様に行えるが、気道抵抗の高い肺で同じように呼吸仕事量の軽減が達成できるか否かに関しては十分に検討が加えられていない。従って、インピーダンスの高い病的肺での適正プレッシャーサポートレベルの決定の客観的指標は今のところ存在しない。この適正プレッシャーサポートレベル決定の指標として、木村らは多目的胃管を使用して食道内圧のモニタリングを行い、圧動態より適正レベルを決定する方法を報告している⁴⁾⁵⁾。この方法は従来市販さ

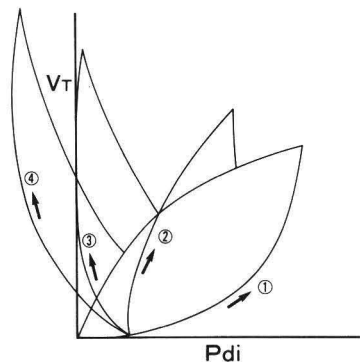


図2 プレッシャーサポートレベルと呼吸仕事量

①：プレッシャーサポートをかけない場合，②～④：プレッシャーサポートレベルを徐々に上げていった場合

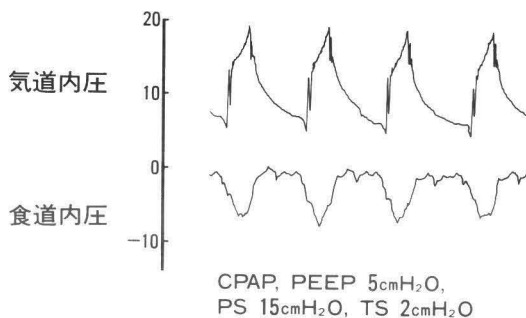


図3 インピーダンスの高い肺でのプレッシャーサポート換気

Puritan-Bennett 7200 a を用いて CPAP モードでの気道内圧と食道内圧の変化を示す（気道内圧を 2 cmH₂O 低下させるのに約 6 cmH₂O の食道内圧の低下を必要としている）。

れているサンプルチューブに胃内圧と食道内圧測定用の側孔を取りつけ Water-filled の状態で食道内圧（胸腔内圧）と胃内圧（腹腔内圧）を同時に測定するものである。これによってプレッシャーサポート換気の食道内圧と胃内圧への影響を検討し、最終的には横隔膜が肺を広げるために行う仕事量を極力少なくするようにプレッシャーサポートレベルを調節する方法である。つまり吸気トリガーのための胸腔内圧の低下、プレッシャーサポート時の胸腔内圧の変化（低下の程度）、プレッシャーサポート後半での胸腔内圧の過剰上昇の3点にわたって検討を加えて調節する。図3は

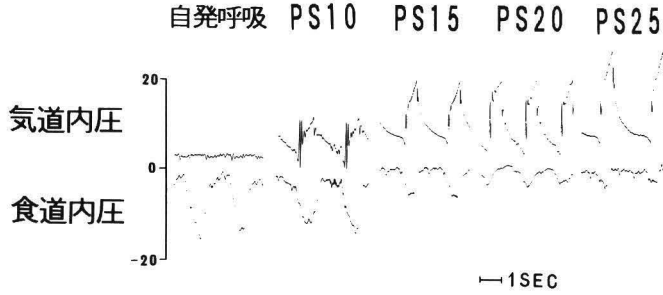


図4 病的肺でプレッシャーサポートレベルを上げていった場合（食道内圧の陰性へのふれがサポートレベルの上昇に伴って低下している）。

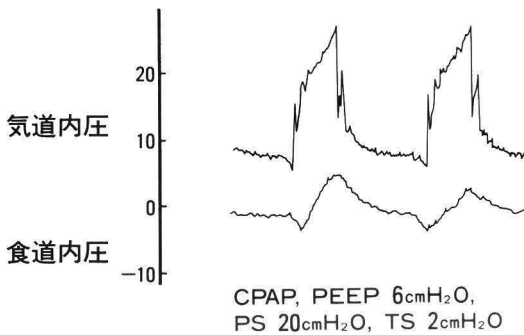


図5 過剰のプレッシャーサポートレベルを用いた場合（吸気後半で食道内圧が陽圧側に変動している）。

肺のインピーダンスが高い場合である。吸気の初期に肺を膨らませるために胸腔内圧が低下するが、肺のインピーダンスが高いために肺胞内圧を低下させて気道内圧を低下させ、それによって人工呼吸器をトリガーさせるのに時間がかかりすぎる場合である。食道内圧曲線からは吸気初期の食道内圧の過剰低下が見られる。この低下は吸気トリガーのための感度を上げることによって、ある程度の軽減は可能であるが、胸腔内圧と気道内圧の低下の間に有意の時間遅れが存在する。これは気道内圧の低下で吸気トリガーを行う人工呼吸器が抱える本質的限界である。この限界はFlow-byなどの flow sensing 方式を採用して吸気トリガーを行っても一定程度しか解決されない。図4は呼吸不全の患者にプレッシャーサポートのレベルを変えて換気を行った場合である。プレッシャーサポートレベルを上げるに従って、胸腔内

圧の陰性のふれが少なくなるのがわかる。設定が低すぎる場合は吸気全相にわたって胸腔内圧が基線より低いまま推移している。図6に示したように、逆にプレッシャーサポートレベルの設定が高すぎると、トリガー時以外、吸気相で胸腔内圧が基線を越えて上昇する。これは肺の過膨張を意味し、患者にとって不快であり、時として能動的呼吸を誘発する。この胸腔内圧の上昇は特に吸気終末にかけて上昇するため、吸気前半の胸腔内圧低下の程度とこの吸気終末の胸腔内圧の上昇のバランスを取って、プレッシャーサポートレベルを調節する⁵⁾。

(b) 病的肺での適正プレッシャーサポートレベルの設定

コンプライアンスの低い肺をプレッシャーサポート換気で管理する場合の問題点は、吸気トリガー時の時間遅れと吸気後半での胸腔内圧の再度の低下である。トリガー遅れは肺が硬いために、気道内圧を低下させるため胸腔内圧を大きく低下させる必要があり、吸気の始まりから気道内圧低下によるトリガーに時間遅れが生じることによる。そのため患者は吸気の初期に Demand flow が来ないため一時窒息状態となり、外見的にはシーソー呼吸となる⁶⁾。しかし、これは特にプレッシャーサポート換気に特有な現象ではなく、気道内圧低下をトリガーとする SIMV においても同じように見られる現象である。次にプレッシャーサポートの停止基準の問題であるが、一般的に初期吸気流速は設定されたプレッシャーサポートレベルによって事前に決定されているた

め、コンプライアンスの低い肺ではプレッシャーサポートの停止基準である最大吸気流速の25%、または5 l/minという停止基準にすぐ達してしまい、プレッシャーサポートが停止してしまう。しかし、患者の方は遅い吸気流速でまだ吸気を続行しているため、プレッシャーサポートが停止した後で、胸腔内圧が再度低下することになる⁶⁾。従って、コンプライアンスの低い肺でのプレッシャーサポート換気が原理的に抱えている限界に関しても食道内圧をモニタリングすることによって、呼吸仕事量軽減の臨床的限界を推定することができる。

一方、気道抵抗の高い肺に対するプレッシャーサポート換気の限界に関してはモデル肺を用いて西脇らが報告している⁷⁾。それによると高い気道抵抗に打ち勝って肺を膨らませるためにはそれ相当の高いプレッシャーサポートレベルを必要とし、それによって患者の吸気仕事を軽減することができるが、問題はプレッシャーサポートレベルが高いために吸気終了時にかけて高い気道内圧が肺に伝わり胸腔内圧が過剰に上昇する現象が見られることである。これはコンプライアンスの低い肺同様に食道内圧をモニタリングすることによってその上昇の程度を伺うことができる。この吸気終了時の胸腔内圧の過剰上昇は、患者にとって不快であり、さらには予想以上のAuto-PEEPの発生を招き、特に心機能の落ちた患者では危険ですらある。

2) SIMV

プレッシャーサポート換気に比べてSIMVは呼吸回数と一回換気量が保証されている点で臨床医にとっては極めて都合がよい換気様式であるが、患者にとっては一回換気量と吸気流速が事前に設定されているため同調性(synchrony)が悪く、そのため呼吸仕事量の予想外の増加をもたらすことがある⁸⁾。しかし、一方では気道抵抗の高い肺に対しては同調性を保証すればプレッシャーサポート換気に比べて有効に呼吸仕事量を軽減することができる。この同調性をモニタリングするにはやはり食道内圧の連続モニタリングが有効である。

2. CPAPにおける負荷された呼吸仕事量についての問題点

1) コンプライアンスの低い肺でのCPAPの適応

CPAPは本来FRCを増加させ、そのことによって肺におけるガス交換能の改善をはかるために用いられてきた。そのため最適PEEPレベルの設定に関しては血液ガスや酸素運搬能からの検討が多く、Suterが最初に報告した⁹⁾コンプライアンス曲線からの最適PEEPレベルの決定法はほとんど省みられなくなっている。しかし、呼吸仕事量軽減の観点からはこのSuterの提起は極めて重要な意味を持つ。確かにCPAPは吸気時にも気道内圧が陽圧になっているため、一見、吸気仕事量を軽減するよう見えるが、同じ一回換気量を患者が得るためには、もしコンプライアンス曲線が直線であれば胸腔内圧の変動幅は同じである。従って、コンプライアンス曲線の寝たところで自発呼吸をすることになると、吸気仕事量はさらに増えることになる。つまり、CPAPにおける呼吸仕事量(吸気仕事量)軽減は安静呼吸の際の肺のコンプライアンス曲線の傾きを変えるか、または同じコンプライアンス曲線上でも、より傾きの急峻なところを使用して自発呼吸を行えるようにすることによってのみ間接的に吸気仕事量を軽減することができる。

従来はDemand-flow型の人工呼吸器のCPAPモードは、吸、呼気弁の性能やトリガーの時間遅れのために人工呼吸器によって負荷される呼吸仕事量が増加するため定常流型のCPAPが優れているとされていた。しかしプレッシャーサポート換気とFlow-byなどのトリガー方式は定常流型のCPAPに比べてほとんど遜色ないところまで改善されており、逆にモニターやアラームを既に搭載しているため、より安全にCPAPを行える。

CPAP時の呼吸仕事量の測定に関して、明石らは口元での一回換気量と経横隔膜圧差(Pdi)を測定し、横隔膜が肺を膨らませるためにした呼吸仕事量を測定して呼吸仕事量からの適正CPAPレベルを決定する試みを行っている¹⁰⁾。これもCPAP時の呼吸仕事量モニターとして新

しい試みであり今後の展開が期待される。

2) 気道抵抗の高い肺での CPAP の適応

気道抵抗の高い肺に対する陽圧換気は主に呼吸抵抗による時定数の高い肺胞において肺胞内圧が上昇し、設定した PEEP 圧より遙かに高い PEEP 圧が発生することが報告されており、Auto-PEEP または PEEPi と呼ばれている¹¹⁾。特に患者が能動的呼吸を行っている場合は、より高い Auto-PEEP が発生する。これに対して呼吸に一定の気道内圧をかけることは細気管支の内径を広げ、胸腔内圧により外から圧迫されて閉塞される気管支がより内径の大きな気管支の方へと移動することになる (Equal pressure point の移動)。つまり呼吸抵抗が低下する¹²⁾。従って呼吸仕事量軽減の観点からの適正 PEEP レベルの設定があってもおかしくはない。この Auto-PEEP の測定を自発呼吸下に行うのは極めて難しく、現在のところ Impedance plethysmography を用いた方法しか報告されていない¹³⁾。しかし、肺胞内圧の上昇が食道内圧で捉えられれば Bed-side での Auto-PEEP の発生をモニタリングすることは可能と思われる。

おわりに

以上、呼吸管理の上で呼吸仕事量をモニタリングすることの重要性を述べてきた。そして呼吸仕事量軽減の観点から CPAP やプレッシャーサポート換気を含めた従来からの人工呼吸管理がいかに不十分であるかについても言及した。今回紹介した呼吸仕事量のモニタリングのための食道内圧と胃内圧の測定が、呼吸仕事量軽減を目的とした呼吸管理の一助になれば幸いである。

文 献

1) 島田康弘, 磨田 裕, 武澤 純ほか: Pressure Support Ventilation と呼吸仕事量—人工呼吸の新しい潮流—. 呼吸 9 : 914-929, 1989
 2) MacIntyre NR, Shimada Y, Takezawa J, et al : System design and patient-ventilator interaction during pressure support ventila-

tion. Chest (印刷中)
 3) MacIntyre NR : Respiratory function during pressure support ventilation. Chest 89 : 677-683, 1986
 4) 木村智政, 貝沼関志, 武澤 純ほか: 温度センサーおよび食道胃内圧測定用ポート付きの多用途胃管の作成. ICUとCCU 13 : 112, 1989
 5) Kimura T, Takezawa J, Nishiwaki K, et al : Patient-ventilator synchrony monitoring during pressure support ventilation by a newly developed multi-lumen esophago-gastric catheter. Crit Care Med (投稿中)
 6) 武澤 純, 佐野敏郎, 高橋利通ほか: 呼吸仕事量からみたプレッシャーサポート換気. 麻酔 38 : S48, 1989
 7) Nishiwaki K, Takezawa J, Kimura T, et al : Limitation of pressure support ventilation in the lung with high resistance. Crit Care Med (投稿中)
 8) Takezawa J, Kimura T, Sano T, et al : Comparison of the work of breathing between pressure support ventilation and SIMV. Crit Care Med 17 : S33, 1989
 9) Suter PM, Fairlay HB, Isenberg MD : Optimal end-expiratory airway pressure in patients with acute pulmonary failure. N Engl J Med 292 : 284-389, 1975
 10) 明石 学, 坂中清彦, 野口 宏ほか: 呼吸仕事量からみた最適 PEEP レベルの決定および PEEP レベルのウィーニング. ICU と CCU (投稿中)
 11) Pepe PE, Marini JJ : Occult positive end expiratory pressure in mechanically ventilated patients with air-flow obstruction. Am Rev Respir Dis 126 : 166-170, 1982
 12) Smith TC, Marini JJ : Impact of PEEP on lung mechanics and work of breathing in severe airflow obstruction. J Appl Physiol 65 : 1488-1499, 1988
 13) Hoffman R, Ershowsky P, Krieger B : Auto-positive end-expiratory pressure in intubated patients without obstructive pulmonary disease. Crit Care Med 17 : S25, 1989