

□講座□

呼吸仕事量測定の問題点

—特に換気力学的方法について—

氏 家 良 人*

近年、人工呼吸器からのウイニング¹⁾、人工呼吸器の性能^{2)~5)}、IMV、PSV、補助呼吸などの部分換気モードの有効性^{6)~12)}、CPAPの方法の比較^{13)~15)}、PSVやCPAPレベルの決定¹⁶⁾¹⁷⁾、人工呼吸に伴い発生する負荷抵抗などの指標^{18)~22)}に“呼吸仕事量”を用いた数多くの報告がみられる。臨床の場で“呼吸仕事量”を容易に求めることができるCP-100 (Bicore社、米国)やOMR 8101 (日本光電、日本)などの換気力学的モニタも現実のものとなり、呼吸仕事量への関心が高まっている。しかし、多くの論文の中で語られ、ベッドサイドで測定されるこの“呼吸仕事量 (Work of Breathing)”という一つの言葉で呼ばれているものは必ずしも同じものではない。

呼吸仕事量を求める方法は、換気力学的方法と酸素消費量から求める方法に分けることができるが、本稿では、換気力学的な面から、呼吸仕事量の概念、測定方法、その問題点について述べ、実際に測定されている“呼吸仕事量”について解説したい。

1. 呼吸仕事量の概念

呼吸仕事量とは、呼吸に当たって肺と胸郭を動かすために必要とする仕事量であり、自発呼吸では呼吸筋 (横隔膜と肋間筋)、調節呼吸では人工呼吸器、そして補助呼吸では呼吸筋と人工呼吸器の両者がこれに携わっていると考えられる。

呼吸仕事は、

(1) Elastic forces : 肺組織と胸郭が縮まろうとする弾性抵抗

(2) Flow-resistive force : ガスの流れや肺組織の運動に伴って発生する粘性抵抗

(3) resistive force associated with tissue deformation and with the sliding of organs over one another : 肺や胸郭の変形や移動に伴う非弾性抵抗

(4) Inertial force : 組織やガスの質量の加速度変化に伴う慣性抵抗

(5) Gravitational force : Inertial forceのうち重力に関連したものなどの抵抗に対して行われる²³⁾²⁴⁾。しかし、(4)、(5)はほとんど無視でき、(3)も換気が大きくないときは無視できると考えられ、呼吸仕事量は主に(1)、(2)に対して行われる。(1)、(2)に対する仕事量はそれぞれ、弾性仕事量、粘性仕事量といわれている。

2. 換気力学的解析の基礎

(1) 換気力学における一次情報

全呼吸系は解剖学的に気道、肺、胸郭の3つに分けられる。気道入口部圧 Paoと肺胞内圧 Palvの圧差 (transairway pressure)、Palvと胸腔内圧 Pplの圧差 (alveolar distending pressure)、PaoとPplの圧差 (transpulmonary pressure)、Paoと大気圧 Patmの圧差 (transthoracic pressure)、PplとPatmの圧差 (transchestwall pressure)などを応力 (P:単位はcmH₂O)という(図1)。応力、換気量 (V:単位はlまたはml)、気流量 (V̇:単位はl/secまたはml/sec)を換気の三要素といい、気道、肺、胸郭におけるこれらの間の相互関係を検討することを換気力学的解析という。気道、肺、胸郭は直列で結合しているため、換気量は各部位で同じと考えられ、これは気流量を積分することによって求めることができ、実際に測定する一次情報としては各部位での圧と口元の気流量である。

* 札幌医科大学救急集中治療部

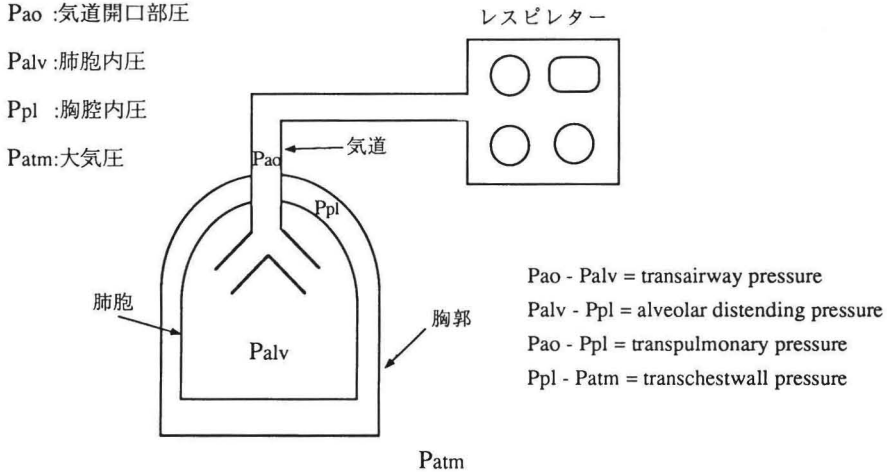


図 1 呼吸器系のメカニカルシステム

(2) 換気力学における二次情報

換気の三要素を組み合わせることによっていくつかの二次情報を得ることができる。その中で呼吸仕事量算出のためにはコンプライアンス、エラストランス、抵抗の概念を知ることが大切である。

気流量 0 の時点の一定の圧力変化 (Pst) に対応する肺気量の変化をコンプライアンス (C) という。

$$C = V / Pst \text{ (l/cmH}_2\text{O)}$$

コンプライアンスの逆数をエラストランス (E) という。

$$E = Pst / V \text{ (cmH}_2\text{O/l)}$$

コンプライアンスやエラストランスは肺や胸郭の弾性を示す指標であり、換気量 V における弾性に起因する圧抵抗 Pst は

$$Pst = E \times V = V / C$$

で表される。

気流の動きによって生じる圧力 (Pres) と気流速度の比を抵抗 (R) といい、呼吸系の粘性を表す。

$$R = Pres / \dot{V} \text{ (cmH}_2\text{O/l/sec)}$$

それゆえ、気流量 \dot{V} における呼吸中の粘性抵抗 Pres は

$$Pres = R \times \dot{V}$$

で表される。

また、気流の動きがあるときの圧力変化と肺気量の変化を動的コンプライアンス Cdyn という。

この時の圧の変化 P には呼吸系の弾性と粘性抵抗などが関与しており

$$P = Pst + Pres$$

となる。

呼吸運動における圧と肺気量を同時に測定し、その関係を X-Y 軸に描いたものを P-V 曲線といい、換気力学的解析に用いられる。

図 2 は通常の肺気量レベルで他動的に呼吸系に圧を加えて行ったときの P-V 曲線を描いたものである。図 2a は transthoracic pressure の変化を X 軸におき、肺気量との関係を描いたもので、この時の圧の変化は肺、胸郭を含んだ全呼吸器系の弾性抵抗 Pst(rs) と粘性抵抗 Pres(rs) によって生じる。C(rs) は気流速度を 0 としたときの肺気量と transthoracic pressure の関係を示しているが、これは直線関係にあり、x 軸に対する傾きは全肺 (肺+胸郭) コンプライアンス、y 軸に対する傾きは全肺 (肺+胸郭) の弾性を示す。加圧時には下に凸の曲線を描き肺気量を増加させ、加圧解除により上に凸の曲線を描いて肺気量は元に戻る。これら上下への彎曲は吸気時または呼気時の粘性抵抗を示す。図 2b は X 軸に transpulmonary pressure の変化をおいたものであるが、この場合の C(l) の x 軸への傾きは肺コンプライアンス、圧 Pst(l) は肺弾性抵抗、彎曲 Pres(l) は肺粘性抵抗を示す。図 2c は transthoracic pressure の変化を X 軸においた場合であるが、このと

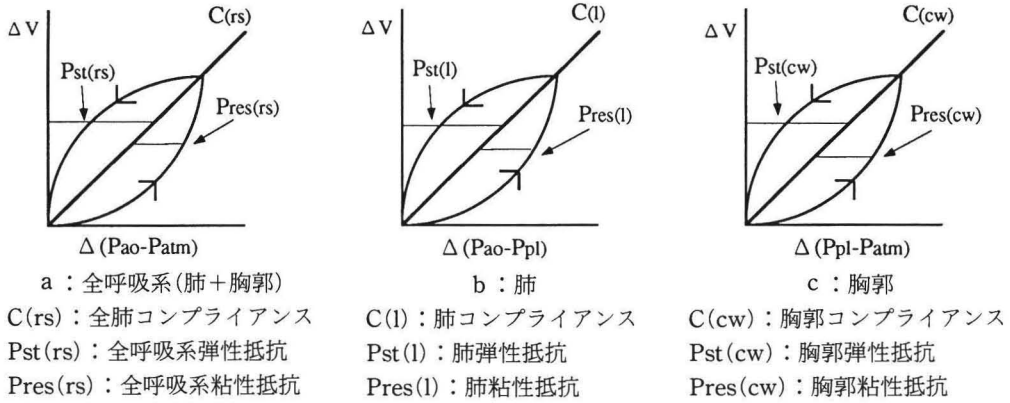


図 2 P-V 曲線と、コンプライアンス、弾性抵抗、粘性抵抗

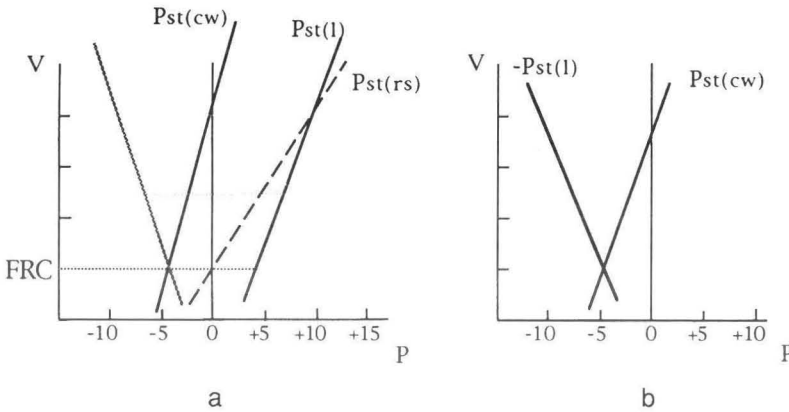


図 3 呼吸系の静的状態の P-V 曲線と Campbell のダイヤグラム

きの $C(cw)$ と X 軸のなす傾きは胸郭のコンプライアンスを示し、 $Pst(cw)$ は胸郭弾性抵抗を示す。また、彎曲 $Pres(cw)$ は胸郭粘性抵抗を示す。

図 3 a は呼吸系の静的状態（気流量 0 の状態）の P-V 曲線を示したもので、 $Pst(rs)$ 、 $Pst(l)$ 、 $Pst(cw)$ はそれぞれ全肺、肺、胸郭の P-V 曲線であり、圧として transthoracic pressure, transpulmonary pressure, transchestwall pressure をとっている。肺と胸郭の P-V 曲線は通常の肺気量範囲ではほぼ直線であり、FRC レベルでは胸郭の拡まろうとする弾性力 $Pst(cw)$ と肺の縮まろうとする弾性力 $Pst(l)$ は胸腔内圧 -4 ないし -5 cmH_2O でつりあっている。 $Pst(l)$ の P-V 曲線を $P_{ao} = 0$ の縦軸に反転し、x 軸に P_{pl} をとった P-V 曲線を Campbell のダイヤグラム²⁵⁾ という (図 3 b)。

3. Campbell のダイヤグラムによる呼吸仕事量の測定と問題点

(1) 呼吸仕事量の求め方

仕事量は、物理学的に (力×距離)、あるいは (圧×量) で表され、呼吸仕事量 (WOB) は呼吸中の肺と胸郭を動かすに当たって生ずる呼吸系の全抵抗 $P(rs)$ と気量 V の積で求めることができる。

$$WOB = \int P(rs) V dt$$

前述したように $P(rs)$ は主に呼吸中の肺および胸郭の粘性抵抗 $Pres(rs)$ と弾性抵抗 $Pst(rs)$ により生じる。

$$P(rs) = Pres(rs) + Pst(rs)$$

$Pst(rs)$ は肺 (気道を含めた) 弾性抵抗 $Pst(l)$

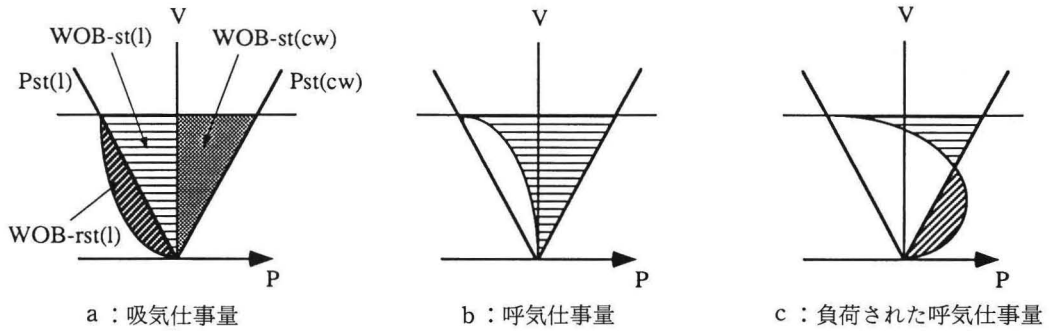


図 4 呼吸仕事量と Campbell のダイヤグラム

と胸郭弾性抵抗 $Pst(cw)$ に分けられるが、 $Pres(rs)$ は胸郭粘性抵抗が小さいので肺（気道を含めた）粘性抵抗 $Pres(l)$ のみと考えてさしつかえない。

$$Pres(rs) = Pres(l)$$

$$Pst(rs) = Pst(l) + Pst(cw)$$

よって

$$P(rs) = Pres(l) + Pst(l) + Pst(cw)$$

となる。それゆえ、 WOB は

$$WOB = \int Pres(l) V dt + \int Pst(l) V dt + \int Pst(cw) V dt$$

となる。 $\int Pres(l) V dt$ は肺粘性仕事量 $WOB-res(l)$ 、 $\int Pst(l) V dt$ は肺弾性仕事量 $WOB-st(l)$ 、 $\int Pst(cw) V dt$ は胸郭弾性仕事量 $WOB-st(cw)$ であり、

$$WOB = WOB-res(l) + WOB-st(l) + WOB-st(cw)$$

と表現できる。

いま、これを Campbell のダイヤグラムで考えてみると、吸気時の $WOB-res(l)$ 、 $WOB-st(l)$ 、 $WOB-st(cw)$ は図 4a のように表され、吸気仕事量はこれらを加えた面積である。また呼気仕事量は、通常、図 4b の斜線部で示されるが、吸気時に蓄えられた胸郭と肺の弾性により受動的に呼気が起こるため新たな仕事量は必要としない。しかし、気道閉塞などで呼気の粘性抵抗が異常に増加したときには能動的呼気が起こり余分な仕事量が必要となる (図 4c)。

実際に $WOB-res(l)$ 、 $WOB-st(l)$ 、 $WOB-st(cw)$ を求めるには

$$WOB-res(l) = \int (Pao - Palv) V dt$$

$$WOB-st(l) = \int (Palv - Ppl) V dt$$

$$WOB-st(cw) = \int (Ppl - Patm) V dt$$

で求めることができ、調節呼吸では、呼吸仕事量 WOB は

$$WOB = \int (Pao - Patm) V dt$$

で求めることができる。

自発呼吸では、調節呼吸時と同様に $WOB-res(l)$ 、 $WOB-st(l)$ は

$$WOB-res(l) = \int (Pao - Palv) V dt$$

$$WOB-st(l) = \int (Palv - Ppl) V dt$$

で求められ、肺に対する粘性仕事量と弾性仕事量の和は

$$WOB-res(l) + WOB-st(l) = \int (Pao - Palv) V dt + \int (Palv - Ppl) V dt = \int (Pao - Ppl) V dt$$

となる。しかし、 $WOB-st(cw)$ は呼吸筋の収縮により正しい胸郭コンプライアンスを求めることができず、 $WOB-st(cw) = \int (Ppl - Patm) V dt$ は成立しない。そのため、自発呼吸時の $WOB-st(cw)$ は調節呼吸時の胸郭コンプライアンス $C(cw)$ を用いることになる。 $C(cw)$ は

$$C(cw) = \Delta(Ppl - Patm) / \Delta V$$

であり、 $WOB-st(cw)$ は

$$WOB-st(cw) = V \times V \times C(cw) \times 1/2 = V^2 / 2 C(cw)$$

よって、自発呼吸時の WOB は

$$WOB = \int (P_{ao} - P_{pl}) V dt + V^2 / 2 C (cw)$$

で求めることができる。

(2) 呼吸仕事量測定の問題点

1) 胸腔内圧 (Ppl) の測定

Campbell のダイアグラムを描くには肺および胸郭コンプライアンスが必要であり、そのためには Ppl 測定が必須である。Ppl を直接測定することは臨床では困難であり、実際は食道内圧 Pes を Ppl の代用とすることが多い。Milic-Emili²⁶⁾ らは Pes 測定のために内径 1.4 mm, 外径 1.8-2.0 mm, 長さ 100 cm のポリエチレン管の末端に長さ 10 cm, 周囲 3.5 cm, 厚さ 0.06 mm のラテックスゴムのバルーンを取り付けたカテーテルを用いた。このカテーテルを口から約 45 cm 挿入し、バルーンに注入する空気の量を変えて、そのとき発生した圧を結んだ直線上で注入量を 0 ml としたときの圧を真の Pes としている (図 5)。かれらの報告や関沢²⁷⁾らの報告では、注入量は 0.2 ml 程度で十分であるという。しかし、このようにして測定した Pes が真に Ppl を反映するか否かについては異論があり、座位では Ppl を反映するが臥位では反映しないとの報告もある²⁸⁾。実際は、Pes の絶対値を正確に測定することは困難であり、また呼吸仕事量測定にはその絶対値を必要としない。FRC レベルの Pes とその呼吸中の変化があればいいのであり、CP-100 では ΔP_{es} として Pes の相対的变化を測定しており、また、OMR 8101 では $-(P_{es} - P_{ao})$ の変化を測定している。

Pes が Ppl を反映していることを確認する方法は食道内カテーテルに圧トランスデューサーを接続し、気道を閉塞して自発呼吸をさせる Valsalva 操作を行う²⁹⁾。このとき $P_{ao} - P_{es}$ が一定であれば Pes が Ppl を正確に反映していることを示す。

2) 胸郭コンプライアンス

胸郭のコンプライアンスは筋肉を弛緩させ、FRC レベルから他動的に換気させたときの換気量の変化を transchestwall pressure の変化で割ることにより求める。このとき、換気量の変化と

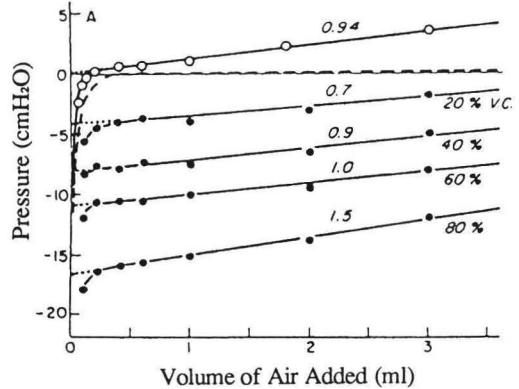


図 5 Milic-Emili²⁶⁾ による胸腔内圧の求め方

圧の変化は直線関係にある。このように、胸郭コンプライアンスを求めるためには調節呼吸を一定時間行わなければならない。調節呼吸が不可能な患者では健康成人の値を用いている場合がある⁷⁾⁸⁾¹⁵⁾。しかし、こうして得られた値も胸郭自身が呼吸筋として能動的に収縮するため、自発呼吸時には変化する可能性があり、胸郭コンプライアンスを正確に求めることは困難である。

CP-100 では現在、成人の正常な胸郭コンプライアンス値である 200 ml/cmH₂O を定数として用いている。将来的には、調節呼吸で Pes の上昇が直線の場合に胸壁が弛緩した状態と判断して、Pes の変化と換気量の変化から胸壁コンプライアンスを測定し、これを用いることになっている。

4. 種々の“呼吸仕事量”の測定

Campbell のダイアグラムによる換気力学的解析は、呼吸仕事量を肺弾性仕事量、肺粘性仕事量、胸郭弾性仕事量に分けて解析することが可能であり、換気力学的呼吸仕事量測定の基礎となるものであり、臨床的にも用いられている⁷⁾⁸⁾¹⁵⁾。しかし、論文によっては、胸郭弾性仕事量を除いたものを“呼吸仕事量”として算出している場合がある。また、人工呼吸器による仕事量と患者仕事量を分けた“呼吸仕事量”，人工呼吸器などによる負荷“呼吸仕事量”，などが“呼吸仕事量”として測定されている。

これらを混同することなく理解されるように、

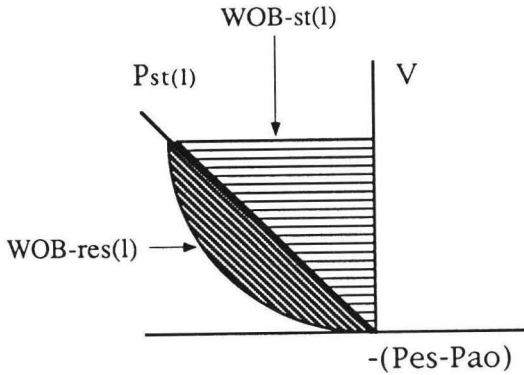


図 6 相対的呼吸仕事量の求め方

(窪田達也：肺のメカニクスと呼吸仕事量，集中治療 1：285-294，1989 より引用)

代表的なものについて解説したい。

(1) 相対的呼吸仕事量

窪田ら⁶⁾³⁰⁾は胸壁コンプライアンスの値を正確に得ることは困難であるため，Campbell ダイアグラムにおいて胸郭弾性仕事量を除いた肺弾性仕事量と肺粘性仕事量の和を相対的呼吸仕事量として算出している (図 6)。

Fiastro¹⁾，Cristie¹¹⁾，Gibney¹³⁾などの論文で，同じように呼吸仕事量として相対的呼吸仕事量を測定している。OMR 8101 もこの考え方で作られた機械と思われるが，仕事量の値が負の値で算出され，肺の立場に立って人工呼吸器や胸郭に仕事をしてもらっているという考え方で作られているようである。

(2) 呼吸器仕事量と患者仕事量

CP-100，Marini らは補助呼吸や PSV などのような部分的人工換気モードにおける呼吸器仕事量 WOB_v と患者仕事量 WOB_p を算出しており，また，山田も患者の呼吸筋発生圧 P_{mus} を求め，それから呼吸筋の仕事量 W_{mus} を算出している。

1) CP-100 による算出方法

CP-100 では食道内圧 Pes と気道内圧 Pao が基準値より上昇し，換気量 VT の増加を伴う場合を調節呼吸 CMV (図 7 a)，Pes および Pao が基準値より低下し，VT が増加する場合を自発呼吸 (図 7 b)，これらが一呼吸中に混合している場合を補助呼吸または PSV のパターン (図 7 c) として，Campbell のダイアグラムを基本として呼

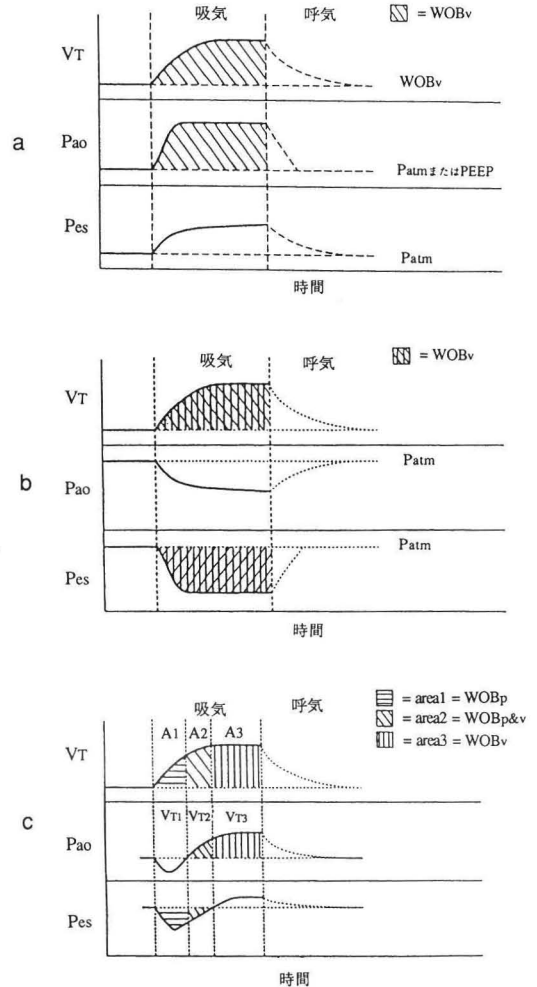


図 7 CP-100 による呼吸仕事量の求め方

吸仕事量を算出している。

(a) 調節呼吸の場合

WOB はすべて呼吸器仕事量 WOB_v であり，

$$WOB_v = \int (P_{ao} - P_{atm}) V dt$$

となる。

(b) 自発呼吸の場合

WOB はすべて患者仕事量 WOB_p である。

$$\begin{aligned} WOB_p &= WOB\text{-res}(l) + WOB\text{-st}(l) \\ &\quad + WOB\text{-st}(cw) \\ &= \int (P_{ao} - P_{es}) V dt + WOB\text{-st}(cw) \end{aligned}$$

$$WOB\text{-st}(cw) = V^2 / 2 C(cw)$$

であり、

$$WOB_p = \int (P_{ao} - P_{es}) V dt + V^2 / 2 C(cw)$$

となる。

(c) 補助呼吸, PSV の場合

この場合、呼吸器仕事量と患者仕事量が混合しており、 P_{ao} と P_{es} 両方が、FRCレベルのこれらの圧より低い部分は自発呼吸のみの仕事 (area 1), P_{ao} がFRCレベルの圧を越えるが P_{es} が低い部分は患者と呼吸器の両方の仕事 (area 2), P_{ao} , P_{es} ともに陽圧の部分は呼吸器のみの仕事となされている (area 3) と考えている。

$$WOB = WOB_v + WOB_p$$

$$WOB_p = \text{area 1} + \text{area 2 の 1部}$$

$$WOB_v = \text{area 2 の 1部} + \text{area 3}$$

area 1 は

$$WOB_p = \int (P_{ao} - P_{es}) V dt_1 + V^2 / 2 C(cw)$$

area 3 は

$$WOB_v = \int (P_{ao} - P_{atm}) V dt_3$$

area 2 は

$$WOB_p = \int (P_{ao} - P_{es}) V dt_2 + V^2 / 2 C(cw) - \int (P_{ao} - P_{atm}) V dt_2$$

$$WOB_v = \int (P_{ao} - P_{atm}) V dt_2 - \int (P_{ao} - P_{es}) V dt_2$$

で求められる。

CP-100の問題点は、area 1が完全に自発呼吸で、area 3が機械呼吸だけであるという仮定がなりたつ保証がないことである。また、 $C(cw)$ を現在正常成人の値である200/cmH₂Oを定数として用いていることも問題となるかもしれない。

2) Marini らの患者仕事量 (図8)

Marini ら⁹⁾¹⁰⁾は吸気流量と換気量が同じ場合、調節呼吸の仕事量と補助呼吸の全仕事量 (呼吸器と患者の仕事量の和) は等しいと仮定した。この場合、吸気流量を調節呼吸と補助呼吸で一定にして、両者の一回換気量が等しくなるような条件でP-V曲線を作成すると、調節呼吸の仕事量から

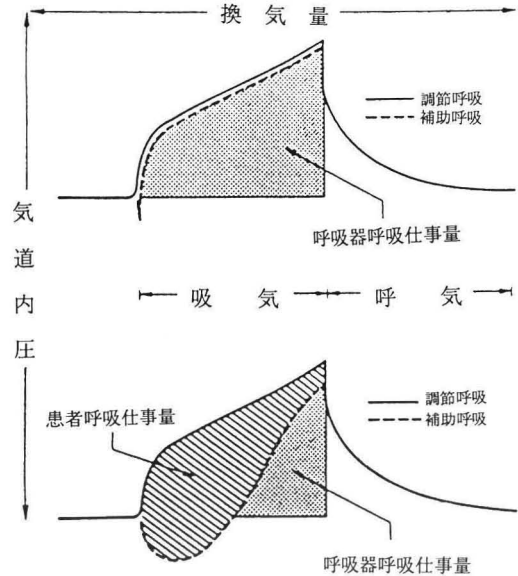


図8 Marini ら⁹⁾¹⁰⁾による、患者呼吸仕事量の求め方

補助呼吸の仕事量を引いたものが患者仕事量となる。

この算出方法が成り立つには、調節呼吸と補助呼吸における流量と換気量が一定であるという条件が必要であり、さまざまな状態における患者仕事量を求めることは容易なことではない。また、補助呼吸では人工呼吸器や回路による粘性抵抗の負荷が生じ、調節呼吸単独時より全体の呼吸仕事量が増加すると考えられ、調節呼吸の仕事量と補助呼吸の全仕事量は等しいという仮定が成り立つのかどうか疑問である。

3) P_{mus} と W_{mus}

物理学的に考えると、呼吸運動は呼吸中に発生する全負荷抵抗 P_{rs} に対する逆向きの圧力ということになる。自発呼吸では呼吸筋が圧 P_{mus} を発生し

$$P_{mus} = P_{rs} = P_{res}(rs) + P_{st}(rs)$$

となる。

また、機械呼吸では、人工呼吸器が圧 P_{vent} を発生し、

$$P_{vent} = P_{rs} = P_{res}(rs) + P_{st}(rs)$$

である。

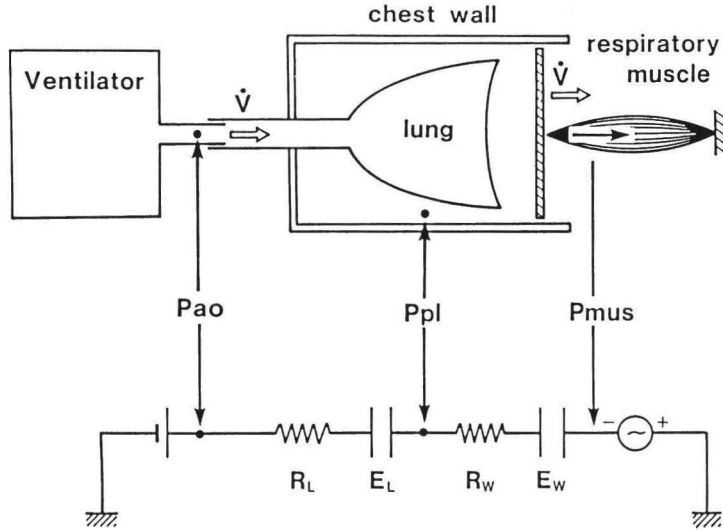


図 9 呼吸系電氣的等価回路

(山田芳嗣：PSV の理論. 呼吸と循環 40：845-851, 1992 より引用)

しかし、部分的人工換気モードでは呼吸筋と人工呼吸器の両者が協力して圧を発生する。山田ら¹⁷⁾は呼吸器中の呼吸器、肺胸郭系、呼吸筋モデルを図 9 のような電気等価回路で示した。この考えでは、補助呼吸中は呼吸器と呼吸筋に対応する 2 つの電源が肺胸郭系の負荷（粘性抵抗、弾性抵抗）をはさんで直列につながり、両側から呼吸器が押し、呼吸筋が引っ張っている状態であり、

$$P_{vent} - P_{mus} = Pres(rs) + Pst(rs)$$

が成立する。この式を変形すると

$$P_{mus} = P_{vent} - Pres(rs) - Pst(rs)$$

となる。

山田らは P_{vent} は人工呼吸中に発生する気道入口部の圧 P_{ao} と等しいと仮定し、その場合

$$P_{mus} = P_{ao} - Pres(rs) - Pst(rs)$$

となり、これを前提として、 P_{mus} を求めている。呼吸筋の仕事量 W_{mus} は P_{mus} と換気量変化の P-V 曲線上へのプロットにより、また、呼吸器仕事量 W_{vent} は P_{ao} と換気量のプロットから求めることができる。山田らはこの式における $Pres(rs)$ 、 $Pst(rs)$ を求める方法として、まず、調節呼吸下の気流量 \dot{V} と P_{ao} の変化から全呼吸系の粘性抵抗 Rrs 、換気量 V の変化と P_{ao} の変化から全呼吸系の弾性抵抗 Ers を定数として求め、それから

$$Pres(rs) = Rrs \times \int (\dot{V} dt)^2$$

$$Pst(rs) = 1/2 \times Ers \times V^2$$

の式で算出している。

それゆえ、 W_{mus} は

$$W_{mus} = \int (P_{ao}) V dt - Rrs \times \int (\dot{V} dt)^2 - V^2 \times Ers / 2$$

となる。

この方法では、食道内圧の測定を必要とせず、 P_{ao} と気流量、換気量の時間的変化を追うことにより、 P_{mus} という通常では計り知れない患者呼吸筋発生圧を知ることができ、患者呼吸仕事量を連続的に測定することができる。最近、かれらは OMR 8101 を利用して、 P_{mus} 、 W_{mus} 、 W_{vent} を測定しており、その臨床的評価が期待されている。

この考え方の問題点は、全呼吸系の粘性抵抗、エラスタンスを調節呼吸時の定数を用いていることである。自発呼吸では、これらが変化する可能性があり、これで臨床的には問題がないのかという疑問が残る。

(3) 負荷/軽減仕事量

部分的人工換気や CPAP などでは患者は呼吸器により呼吸仕事量を軽減される一方で、弁や回

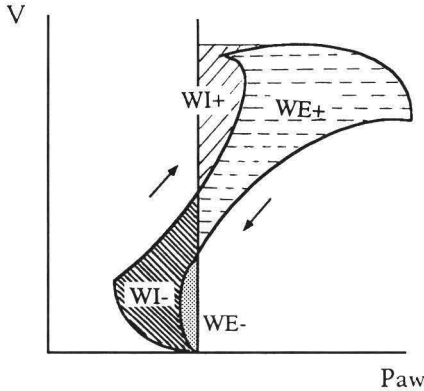


図 10 呼吸器による負荷仕事量と軽減仕事量

路の粘性抵抗で仕事量を負荷されることがある。Katzら²⁾、窪田ら³⁾、明石ら⁵⁾、Vialeら¹¹⁾、Moranら²⁰⁾は人工呼吸器による負荷/軽減仕事量を図10における P_{aw} と換気量のP-V曲線から求めている。吸気時において気道内圧が基線より陰圧部分WI-が呼吸器により負荷された仕事量、陽圧部分WI+が呼吸器により軽減された仕事量であり、また、呼気時はWE+の部分が負荷された仕事量、WE-が軽減された仕事量であると考えている。

この考え方は、あくまでも負荷または軽減仕事量の指標であり、患者や人工呼吸器による全体の呼吸仕事量をみているものではない。また、負荷に関しては問題ないと思うが呼吸器による軽減が患者仕事量の軽減と平行して行われるかどうかはわからない。

最後に

換気力学的分析による自発呼吸や部分的人工換気モードにおける患者呼吸仕事量の算出は、厳密に考えるといまだ完成されたものはない。自発呼吸の存在により生体の胸郭コンプライアンスや粘性抵抗がどのように変化するのが明確でないことが大きな要因である。今後、換気力学的測定理論から得られた患者呼吸仕事量と精密な患者の酸素消費量の測定結果との検討がその理論の妥当性を証明するかも知れない。

文 献

- 1) Fiastro JF, Habib MP, Shon BY, et al : Comparison of standard weaning parameters and the mechanical work of breathing in mechanically ventilated patients. *Chest* 94 : 232-238, 1988
- 2) Katz JA, Kraemer RW and Gjerde GE : Inspiratory work and airway pressure with continuous positive airway pressure delivery systems. *Chest* 88 : 519-526, 1985
- 3) 窪田達也, 小野寺文雄 : 成人用人工呼吸器の最近の進歩. *ICUとCCU* 10 : 631-642, 1986
- 4) 西村匡司, 今中秀光, 妙中信之, その他 : 人工呼吸器の性能の客観的比較の一方法—呼吸仕事量の面よりみた比較—. *麻酔* 38 : 1017-1029, 1989
- 5) 明石 学, 坂中清彦, 野口 宏, その他 : 負荷呼吸の仕事量による人工呼吸器の性能の評価. *ICUとCCU* 14 : 439-444, 1990
- 6) 小野寺文雄, 窪田達也, 清水禮壽 : IMVモードにおける呼吸仕事量と人工呼吸器の負荷について. *呼吸と循環* 35 : 569-576, 1987
- 7) Brochard L, Rua F, Lorino H, et al : Inspiratory pressure support compensates for the additional work of breathing caused by the endotracheal tube. *Anesthesiology* 75 : 739-745, 1991
- 8) Van de Graaff WB, Gordey K, Dornseif SE, et al : Pressure support-changes in ventilatory pattern and components of the work of breathing. *Chest* 100 : 1082-1089, 1991
- 9) Marini JJ, Capps JS, and Culver BH : The inspiratory work of breathing during assisted mechanical ventilation. *Chest* 87 : 612-618, 1985
- 10) Marini JJ, Rodriguez M, and Lamb V : The inspiratory workload of patient-initiated mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 134 : 902-909, 1986
- 11) Christie JM and Smith R : Pressure support ventilation decreases inspiratory work of breathing during general anesthesia and spontaneous ventilation. *Anesth Analg* 75 : 167-171, 1992
- 12) Takahashi T, Takezawa J, Kimura T, et al :

- Comparison of inspiratory work of breathing in T-piece breathing, PSV, and Pleural pressure support ventilation (PPSV). *Chest* 100 : 1030-1034, 1991
- 13) Gibney RN, Wilson RS and Pontoppidan H : Comparison of work of breathing on high gas flow and demand valve continuous positive airway pressure system. *Chest* 82 : 692-695, 1982
 - 14) 明石 学, 坂中清彦, 野口 宏, その他 : 流量制御 CPAP と定常流型の CPAP における負荷呼吸の仕事量の比較. *ICU と CCU* 14 : 253-259, 1990
 - 15) Sassoan CH, Giron AE, Ely EA, et al : Inspiratory work of breathing on flow-by and demand-flow continuous positive airway pressure. *Crit Care Med* 17 : 1108-1114, 1989
 - 16) 高橋英嗣, 立石 勲 : 計算機シミュレーションによる至適 PSV の探索. *呼吸と循環* 39 : 573-577, 1991
 - 17) 山田芳嗣 : PSV の理論. *呼吸と循環* 40 : 845-851, 1992
 - 18) Viale JP, Annat G, Bertrand O, et al : Additional inspiratory work in intubated patients breathing with continuous positive airway pressure system. *Anesthesiology* 63 : 536-539, 1985
 - 19) Bersten AD, Rutten AJ, Vedig AE, et al : Additional work of breathing imposed by endotracheal tubes, breathing circuits, and intensive care ventilators. *Crit Care Med* 17 : 671-677, 1989
 - 20) Moran JL, Homan S, O'Fathartaigh M, et al : Inspiratory work imposed by continuous positive airway pressure (CPAP) machines : the effect of CPAP level and endotracheal tube size. *Intensive Care Med* 18 : 148-154, 1992
 - 21) Fawcett W, Ooi R, and Riley B : The Work of Breathing Through Large-bore Intravascular Catheters. *Anesthesiology* 76 : 323-324, 1992
 - 22) Beatty PC and Healy TE : The additional work of breathing through Portex Polar 'Blue-Line' pre-formed paediatric tracheal tubes. *European J Anesthesiology* 9 : 77-83, 1992
 - 23) Otis AB, Fenn WO and Rahn H : Mechanics of Breathing in Man. *J Appl Physiol* 2 : 592-607, 1950
 - 24) 鈴木俊介 : 呼吸仕事負荷のモニタリング—換気能力の測定を含む—. *呼吸* 10 : 1042-1047, 1991
 - 25) Campbell EJM : The respiratory muscles and mechanics of breathing. *Cicago : Year Book Publishers ; 1958*
 - 26) Milic-Emili J, Mead J, Turner JM, et al : Improved technique for estimating pleural pressure from esophageal balloons. *J Appl Physiol* 19 : 207-211, 1964
 - 27) 関沢清久, 飛田 涉, 佐々木孝夫ほか : 食道内測定用バルーンの特性と静肺圧量曲線. *呼吸と循環* 25 : 471-475, 1980
 - 28) Drummond GB, Wright ADG : Inaccuracy of oesophageal pressure for pleural pressure estimation in supine anesthetized subjects. *Br J Anaesth* 55 : 585-593, 1983
 - 29) Baydur A, Behrakis OK, Zin WA, et al : A simple method for assessing the validity of the esophageal balloon technique. *Am Rev Respir Dis* 126 : 788-791, 1982
 - 30) 窪田達也 : 肺のメカニクスと呼吸仕事量. *集中治療* 1 : 285-294, 1989
-