

●講 座●

やさしいグラフィックモニター

大塚将秀

キーワード：人工呼吸，グラフィックモニター，モニタリング

最近の人工呼吸器にはグラフィックモニターが標準装備されるようになった。多くの情報が含まれて有用だが、慣れていなければ役に立たない。本講座ではグラフィックモニターの基本を解説し、所見の一部を紹介した。

I. 人工呼吸のグラフィックモニターとは

1. モニターのあれこれ

人工呼吸器のモニターは器械の動作や患者の状態を監視するもので、情報伝達の方法には警報音のような聴覚によるものと、ランプ・アナログメーター (図 1A)・デジタル (図 1B)・グラフ (図 1C) のような視覚によるものがある。これらのうちグラフ表示によるものをグラフィックモニターという。

2. 陽圧換気とは

陽圧換気 (図 2) は、気道に陽圧を加えることで肺にガスを送り込む。気道の抵抗 (気道抵抗、粘性抵抗) に逆らってガスを流し、肺胸郭の弾性 (弾性抵抗、エラスタンス) に逆らって肺を膨らませるためにはエネルギーを必要とするが、これらは気道に加える陽圧でまかなわれる。

陽圧換気では、気道に加えられた陽圧と肺胞内の圧の差に比例してガスが流れ、流れ込んだガスの総量が換気量となる。したがって、気道内圧・流量・換気量を知ること、換気の様子・患者の呼吸器系の状態を把握することができる。

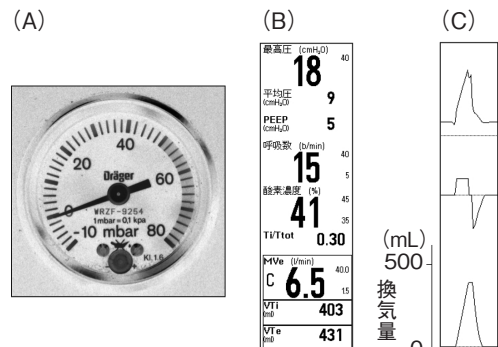


図 1 人工呼吸器のいろいろなモニター
(A) アナログメーター、(B) デジタル、(C) グラフ

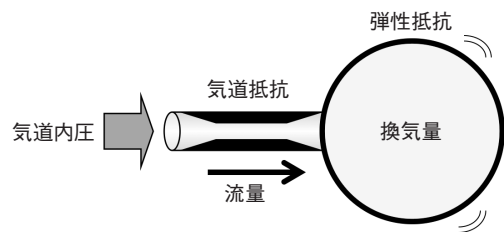


図 2 陽圧換気に必要なエネルギー
換気には、気道抵抗と肺の弾性抵抗に対する仕事が必要。気道に加えた圧にしたがってガスが流れ、流れたガスの総和が換気量となる。

3. グラフィックモニターの特徴

デジタル (数値) による表示は、非常にわかりやすく感じる。図 1B のように表示されていれば「一回換気量は 431mL」と明瞭で、記録するにも報告するにも便利である。ところが、グラフィックモニター (図 1C) ではそうはいかない。およそ 400mL であることはわかっても、431mL と細かく把握することはできない。

公立大学法人横浜市立大学附属市民総合医療センター
集中治療部

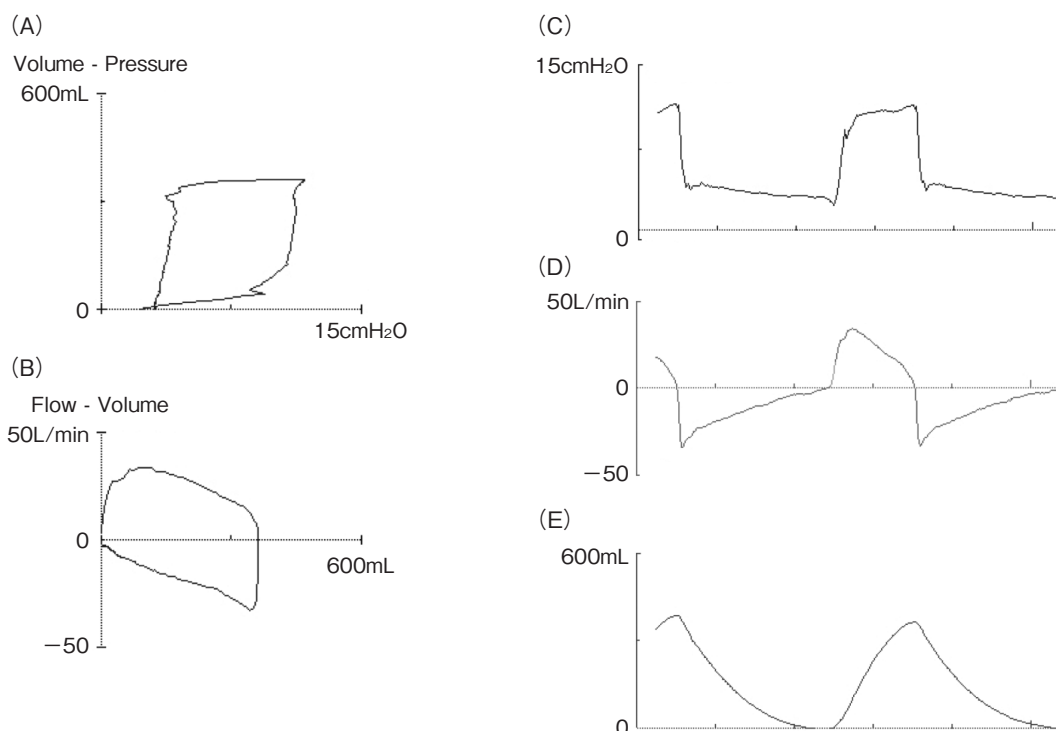


図3 いろいろなグラフィック波形

(A) 圧=量曲線、(B) 流量=換気量曲線、(C) 気道内圧波形、(D) 流量波形、(E) 換気量波形

しかし、デジタル表示で細かい値がわかっても、それはある一呼吸の値で、患者の状態を適切に表わした値であるとは限らない。自発呼吸の場合はもちろん、量規定換気でも一回換気量は変化するのが普通で、一つの値で表わすことは不適當である。その点、グラフィックモニターでは過去数秒から数十秒、トレンド機能を利用すれば時間や日単位の経過を見ることができる。経時的な変化を把握できることが大きな特徴である。

また、気道内圧の数値情報では最高気道内圧・プラトー圧（後述）・平均気道内圧など、あらかじめ決められたポイントの圧を表示するだけだが、グラフィックモニターでは気道内圧の上がり下がり波形が表示されるので、情報は無限である。

グラフィックモニターでは、気道内圧と流量あるいは換気量のように複数のパラメータを同時に評価することも可能である。一つの情報ではわからなかったことも、他の情報を併せて考えることで現象や病態が明らかになることをしばしば経験する。

II. グラフィックモニターの種類

1. 経時曲線

時間を横軸としたグラフで、時間経過とともに左か

ら右へ流れるような波形が描かれる。

①気道内圧波形（図3C）

気道内圧を縦軸にしたもの。気道内圧ゼロを基線とし、上にいくほど圧が高いことを表わす。

②流量（フロー）波形（図3D）

流量を縦軸にしたもの。流量ゼロを基線とし、人工呼吸器から患者への吸気を上向きで、患者から人工呼吸器への呼気を下向きで表わす。

③換気量波形（図3E）

肺容量を縦軸にしたもの。吸気開始直前（安静呼吸位）の肺容量を基線とし、上にいくほど肺容量が増加することを表わす。つまり、曲線が上に向かうときは吸気を、下に向かうときは呼気を表わす。

2. ループ

気道内圧・流量・肺容量（換気量）のうちいずれか二つを縦軸と横軸にしたもの。一呼吸で輪のような波形が描かれる。両者の関係を分析したいときに便利だが、解釈は経時曲線より難しい。

①圧=量曲線（図3A）

気道内圧を横軸に、肺容量を縦軸として描いた波形。

②流量=換気量曲線（図3B）

肺容量を横軸に、流量を縦軸として描いた波形。流

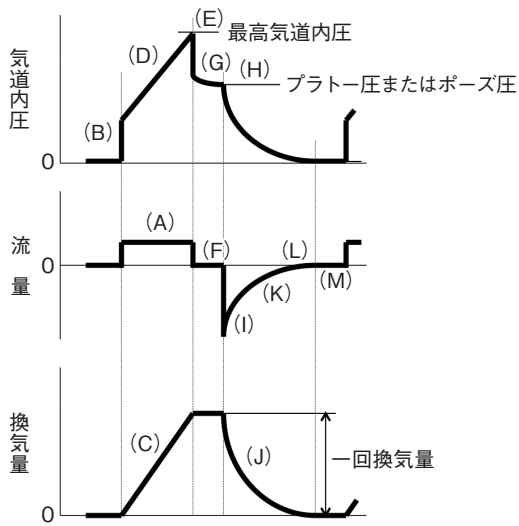


図4 量規定換気の標準的な波形
記号は本文参照

量は、経時曲線と同様に上向きが吸気、下向きが呼気を表わす。

Ⅲ. 標準的な波形を知る

1. 量規定換気 (volume controlled ventilation : VCV)

VCVの標準的な波形を図4に示す。吸気開始と共に一定流量のガスが人工呼吸器から肺に流れる(A)。気道抵抗に打ち勝つまで気道内圧は急上昇(B)する。一定の流量で肺にガスが入るので、換気量は直線的に増加し(C)、それとともに上昇する肺胞内圧にあわせて気道内圧も上昇する(D)。気道内圧は、規定量のガスを送り終わる瞬間に最も高くなる。これを最高気道内圧(E)という。続くポーズ相では流量がゼロとなり(F)、気道抵抗のために発生していた圧がなくなるので、気道内圧は急激に低下する(G)。この圧の低下は吸気開始時の圧上昇(B)と等しい。その後、肺胞内ガスの不均等分布が是正されるため、気道内圧はやや低下して安定する(H)。このときの気道内圧をプラトー圧またはポーズ圧といい、肺胸郭の弾性で作られる肺胞内圧に近似する。ポーズ時間が終了すると人工呼吸器の呼気弁が開放されて呼気相になる。肺胞内圧の力で一気に呼気流量が流れ(I)、肺容量が減少する(J)。肺胞内圧の低下とともに呼気流量が減少するので、呼気の流量波形は指数曲線の漸減波形となる(K)。肺胞内圧がゼロになると呼気の呼出は終了する(L)。次の吸気開始まで呼気相は続くが、ガスの流れはない(M)。

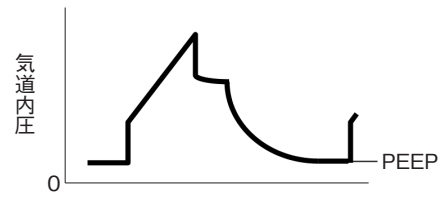


図5 PEEPを加えた量規定換気の気道内圧波形

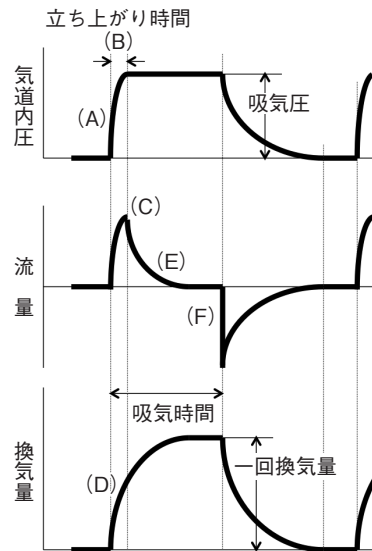


図6 圧規定換気の標準的な波形
記号は本文参照

2. 呼気終末陽圧 (positive end-expiratory pressure : PEEP)

PEEPを加えたVCVの気道内圧波形を図5に示す。PEEPは呼気終末(吸気開始直前)の気道内圧を陽圧にする換気モードだが、呼気終末の圧だけでなく、PEEPがないとき(図4)の気道内圧波形をそのまま上に平行移動した波形となる。最高気道内圧もプラトー圧も上昇する。PEEPはすべての換気モードに併用可能である。

3. 圧規定換気 (pressure controlled ventilation : PCV)

PCVの標準的な波形を図6に示す。吸気開始と共に気道内圧が設定吸気圧まで上昇する(A)。立ち上がり時間(B)は上昇に要する時間を規定するもので、大きくすればゆっくり時間をかけて上昇する。ガスは気道内圧と肺胞内圧の差に比例した流量で肺に流れるが、はじめは肺胞内圧が低いので大きな流量が流れ(C)、肺容量も急激に増加する(D)。肺容量の増加とともに肺胞内圧が上昇するので、吸気流量はしだいに減少する(E)。設定された吸気時間が経過すると、吸気相から呼

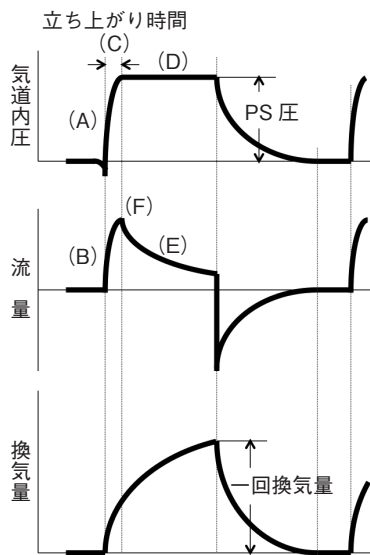


図7 プレッシャーサポート換気の標準的な波形
記号は本文参照

気相に移る (F)。呼気時のガスの流れや波形は VCV と同じである。

4. プレッシャーサポート換気 (pressure support ventilation : PSV)

自発呼吸の吸気を補助する PSV の標準的な波形を図 7 に示す。自発吸気 (A) を認識した人工呼吸器はガスを送り始める (B)。立ち上がり時間 (C) をかけて、気道内圧は設定サポート圧に達する (D)。この部分は PCV と同じである。設定された吸気時間の経過で PCV の吸気相は終了するが、PSV では肺に流れる吸気流量の減少 (E) で吸気終了を判断している。吸気終了の判断基準は人工呼吸器の機種で異なるが、最大の吸気流量 (F) に対する割合で判断するものが多い。この割合を吸気終了基準やサイクルオフ値という。たとえば終了基準の設定が 10% で、その吸気最大の流量が 1 L/秒だった場合、吸気流量が徐々に減少して 0.1 L/秒になったときに人工呼吸器は吸気相を終了して呼気相に移る。

5. 間欠的強制換気 (intermittent mandatory ventilation : IMV)

IMV の標準的な気道内圧波形を図 8 に示す。IMV は強制換気と自発換気が混在したモードで、強制換気には VCV と PCV を用いることができる。自発換気にはプレッシャーサポート (pressure support : PS) の補助を加えることができる。図 8 は、強制換気に VCV を用い、自発換気に PS を加えたものである。

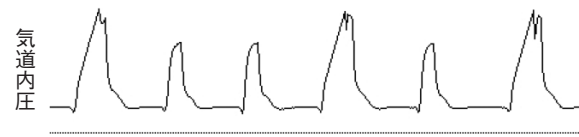


図8 間欠的強制換気の標準的な気道内圧波形

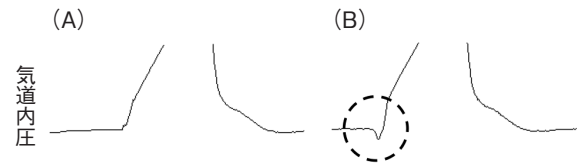


図9 自発呼吸の有無による気道内圧波形の変化
(A) 自発呼吸なし
(B) 自発呼吸があると吸気開始時に低下 (丸印) がある。

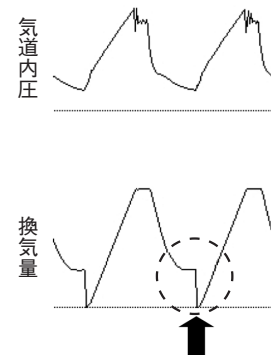


図10 リークがあるときの気道内圧と換気量波形
呼気時に基線まで戻らず (丸印)、次の吸気開始時にゼロにリセットされる (矢印)。

IV. いろいろな所見

1. 各モード共通の所見

①自発呼吸の出現

自発呼吸があると、気道内圧が吸気開始時に低下する (図 9B)。

②回路リーク

回路リークがあると、人工呼吸器が送り出した換気量 (吸気一回換気量) の一部が回路外に漏れるため、人工呼吸器に戻る換気量 (呼気一回換気量) が減少する。リークがなければ吸気一回換気量と呼気一回換気量はほぼ等しいので、換気量波形は呼気終了時に基線に戻るが、リークがあると図 10 のように基線に戻らない。次の吸気開始時に波形はゼロにリセットされるので、特徴的な波形 (図 10 の矢印) も見られる。流量 = 換気量

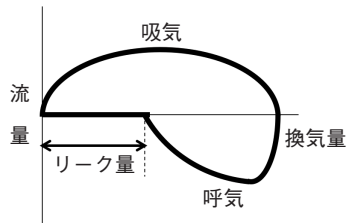


図 11 リークがあるときの流量=換気量曲線
きれいな輪にならない。

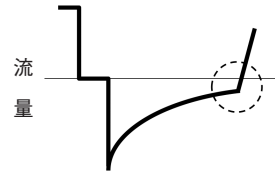


図 12 オート PEEP が発生しているときの流量波形
吸気開始時に基線に戻らない (丸印)。

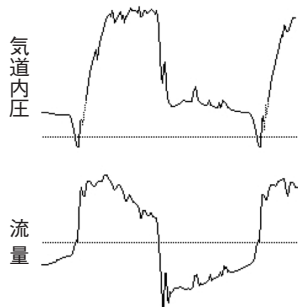


図 13 呼吸回路に結露水が貯留したときの気道内圧波形
振動がみられる

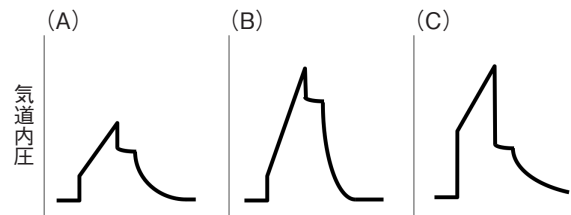


図 14 VCV で換気した健常肺と病的肺の気道内圧波形
(A) は健常肺。病的肺の最高気道内圧はいずれも上昇するが、弾性抵抗増大時 (B) のプラトー圧は上昇し、気道抵抗増大時 (C) は変化しない。

曲線では図 11 のような波形になる。

③オート PEEP の発生

通常は吸気開始時までには呼気は終了しているが、患者に呼出障害がある場合や呼気時間が短すぎる設定の場合は終了していないこともある。この場合の肺胞内圧は、人工呼吸器の設定 PEEP 値より高い。これをオート PEEP または内因性 PEEP という。オート PEEP の値を簡単に知ることはできないが、その発生は呼気の流量曲線がゼロに戻らない (図 12) ことでわかる。オート PEEP は循環抑制や圧外傷の原因になることがあるので、発生の有無を知ることは重要である。

④呼吸回路・気道の異物

呼吸回路や気道に異物があると、図 13 のように気道内圧や流量波形に細かい振動が見られる。呼吸回路内の凝結水や痰の貯留以外に、気道内の腫瘍や血腫の場合もある。

2. VCV の場合

①圧の上昇

VCV は一回換気量を決めて換気するので、患者の気道や肺の状態は気道内圧に現れる。図 4 の (H) は肺胸郭の弾性で生じ、(B) と (G) は気道抵抗によって生じる。実際に肺胸郭の弾性が増大すると図 14B のよ

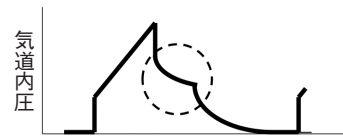


図 15 リークがある VCV の気道内圧波形
ポーズ相で圧の低下が見られる (丸印)。

うに変化し、気道抵抗が増大すると図 14C のように変化する。最高気道内圧はどちらも上昇するので、デジタル表示の数値では区別できないが、波形を見れば違いは明らかである。

②回路リーク

VCV モードでリークがあると、ポーズ相の圧低下 (図 15) が見られる。

3. PCV の場合

①吸気時間の不足

3 億ある肺胞は、そのすべてが同じペースで拡張収縮を繰り返しているわけではない。たとえば、気道抵抗が小さい気管支の肺胞は速く拡張するが、気道抵抗

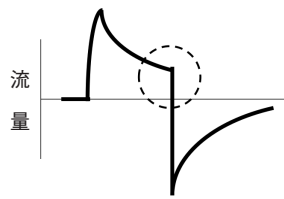


図16 吸気時間が不十分なPCVの流量波形
吸気終了時に基線に戻らない(丸印)。



図17 立ち上がりが急すぎるPSVの気道内圧波形
振動が見られる。



図18 PSVの二段吸気
患者の1回の吸気中に人工呼吸器が2回サポートしている



図19 サイクルオフが小さすぎるPSVの気道内圧波形
吸気後半に圧上昇が見られる。

が大きい気管支の肺胞は拡張に時間を要する。VCVは決められた換気量を強制的に送り込むが、PCVは一定の圧を加えて肺胞が拡張するのを待つというモードなので、吸気時間を十分長く設定しないと拡張の遅い肺胞の換気が不十分になる可能性がある。吸気終了時の流量波形がゼロになっていないとき(図16)は、肺胞への吸気の流れが続いていることを意味し、まだ拡張不十分な肺胞があることを示している。

4. PSVの場合

①速すぎる立ち上がり

PSVでは吸気開始とともに気道内圧が上昇して設定PS圧に達するが、この立ち上がり時間が短すぎると回路内に振動を生じることがあり(図17)、不快感や咳反射の誘因になることがある。

②大きすぎるサイクルオフ

サイクルオフの設定が大きいと、呼気相に早く移行するので吸気時間が短くなる。このとき患者がまだ自発吸気を行っていると、気道内圧が低下して吸気トリガーレベルに達し、人工呼吸器は再度吸気相になって気道内圧を上昇させる(図18)。これを二段吸気という。患者の側からみれば、一回の吸気中に人工呼吸器

の補助を二度受けることになる。吸気中に補助が中断する時間があり、補助が不十分になるだけでなく、不快感を生じる原因にもなる。

③小さすぎるサイクルオフ

サイクルオフの設定が小さいと吸気時間は長くなるが、あまりに長くなりすぎると患者は努力呼気を行う。これは、吸気相後半の気道内圧上昇(図19)で発見できる。呼気時に無用なエネルギーを消費している状態で、呼吸困難を感じさせる原因にもなる。

V. おわりに

～グラフィックモニターをマスターするには～

波形に慣れることが大切なので、できるだけグラフィック画面を表示するように心がける。つぎに、標準的な波形をマスターし、患者の波形と比較する。波形が異なるときは何らかの問題があることを示している。また、経過中に波形が変化したら何かが起きている証拠である。それはいいことかもしれないが、悪いことかもしれない。重大な問題が生じる前兆かもしれない。即座に原因を検討する必要がある。これらの積み重ねが理解を深める近道である。