

# 呼吸器モニターのみかた

平成 15 年 9 月 11 日

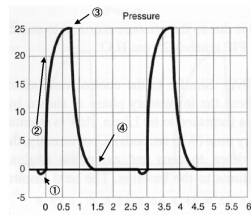
## 目次

<b>1</b>	<b>気道内圧曲線</b>	<b>2</b>
1.1	陰圧の振れ方が大きい場合	2
1.2	気道内圧の立ち上がりかた	3
1.3	ピーク気道内圧が尖っている場合	3
1.4	呼気終末に元の圧に戻らない場合	3
<b>2</b>	<b>気道内流速曲線</b>	<b>4</b>
2.1	吸気フローパターンと呼吸器のモード	5
2.2	呼気曲線が基線に戻らない場合	6
<b>3</b>	<b>圧-容量曲線</b>	<b>8</b>
3.1	inflection point	8
3.2	肺泡過伸展の同定	9
3.3	ループの傾きと肺コンプライアンス	9
3.4	気道抵抗とループの幅	11
3.5	ループが開始位置に戻らない場合	12
<b>4</b>	<b>フローボリュームカーブ</b>	<b>14</b>
4.1	吸気フロー波形	14
4.2	呼気フロー波形	16
4.3	呼気フローが原点に戻らない場合	17
4.3.1	呼気がいつまでも続く場合	17
4.3.2	換気量がゼロに戻らない場合	17
4.4	フロー波形が乱れているとき	18
<b>5</b>	<b>カプノグラム</b>	<b>19</b>
5.1	カプノグラム波形の主な変化	20
5.2	死腔換気とカプノグラム	20

# 1 気道内圧曲線

時間ごとの気道内圧の変化をグラフにしたもの。

正常では、0mmHg あるいは設定した PEEP 圧から時間とともに圧が上昇、吸気末期でピーク圧になり、呼気とともに圧力は低下。呼気終末には最初の圧と同じに戻る。



1. 波形の最初が陰圧側に振れるのは、患者の自発呼吸である。これが大きいと、患者の呼吸仕事が多い。
2. 波形の立ち上がり方を見ることで、患者がどんな換気モードで管理されているのかわかる。
3. 波形のピークは、吸気終末である。ここが尖っていないか注意する。
4. 呼気とともに気道内圧は下がり、最終的には PEEP 圧に戻る。

## 1.1 陰圧の振れ方が大きい場合

呼吸の開始を患者自身が決定している場合、吸気最初に気道内はわずかに陰圧になる。

この陰圧を感知して、人工呼吸器は換気の補助を開始する。

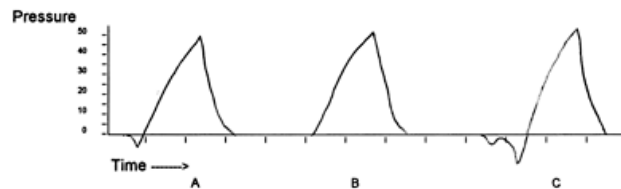


図 1: 気道内圧曲線。

図 1 の A の波形は患者自身のトリガーで呼吸しており、B の波形は完全な機械換気の波形である。

一方、C の波形は陰圧部分が極端に大きい。これは、患者の自発呼吸を感知するトリガーの感度が低すぎる場合に見られる。

トリガー感度を上げたり、あるいはフロートリガーなどのより精密なトリガー形式に変更することで、患者の呼吸努力を減らすことができる。

## 1.2 気道内圧の立ち上がりかた

流量曲線のほうがより見やすいが、気道内圧曲線の立ち上がり方を見ても、患者がどんな呼吸管理を受けているのか推定できる。図2の左側が従来型の人工換気、右側が気道内圧一定のPCVの波形であるが、以下のような違いが分かる。

- 従来型の換気は、気道内圧が一定のスピードで立ち上がる。
- PCVのほうが気道内圧の立ち上がり方は鋭いが、同じ1回換気量であればピーク気道内圧は低い。

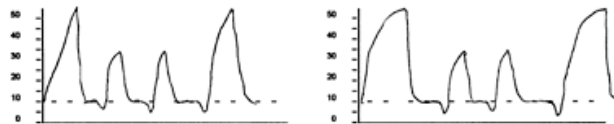


図2: 左がVCV、右がPCV。両方とも1回換気量は同じ。真ん中2呼吸は、プレッシャーサポートによる自発呼吸。

## 1.3 ピーク気道内圧が尖っている場合

患者の状態に対して1回換気量が多すぎた場合、肺は過剰に伸展される。このとき、換気量がそれほど大きくならないのに、気道内圧が急速に上昇するのが観察できる。

図3のように、ピーク気道内圧の頂点が尖っている場合、1回換気量が多すぎる可能性がある。

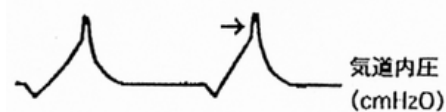


図3: 換気量過剰の波形。ピーク気道内圧の頂点が尖っている。

## 1.4 呼気終末に元の圧に戻らない場合

喘息患者やARDSの患者など、気道の状態が悪い患者では吸気をいつまでも吐き出すことができず、気道内圧が測定値以上に上昇してしまう。

この状態を AUTO-PEEP というが、放置すると危険である。

気道内圧曲線や、気道内流速曲線を観察すると、解除されていない AUTO-PEEP を見つけることができる。

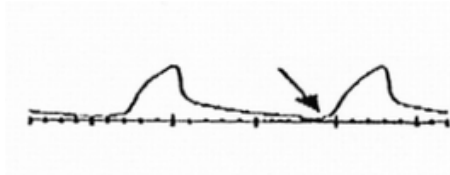


図 4: 喘息患者の例。呼気が終わっても気道内圧がゼロに戻っていない (矢印)

また、自発呼吸のない患者の場合は、患者の呼吸が終わった直後に呼吸器回路を閉鎖する (図 5) と、内因性 PEEP の圧を測定することができる。

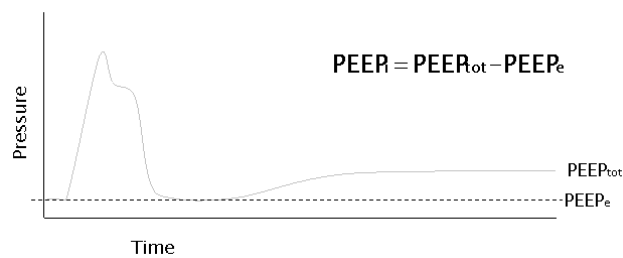


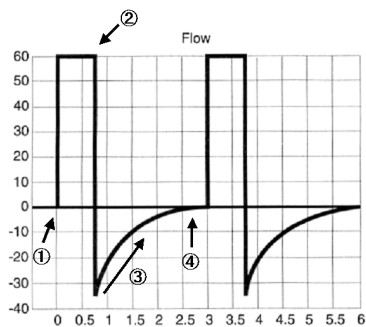
図 5: 換気終了後に回路をふさぐと、気道内圧がわずかに上がる ( $PEEP_{tot}$ )。この圧から PEEP 圧を引くと、内因性 PEEP を求められる。

## 2 気道内流速曲線

吸気、呼気に伴う呼吸器内の空気の流速をグラフにしたものが気道内流速曲線である。

吸気フローが上向きのグラフの場合、患者の吸気とともにグラフは上に振れ、吸気終末に基線に戻る。

その後、呼気の開始とともに最大呼気流速になり、呼気が終わりに近づくにつれて徐々に基線に戻る。



1. 吸気開始と同時に、波形は上向きに振れる。吸気フロー波形を観察すると、呼吸器の換気モードが分かる。
2. 吸気が終了すると同時に、波形は急速に下向きに触れる。
3. 呼気とともに、波形は再び基線に戻っていく。換気モードにかかわらず、波形は一緒である。
4. 呼気が終了すると、正常な換気を行っていれば波形は必ず基線に戻る。

## 2.1 吸気フローパターンと呼吸器のモード

呼吸器のモードには、大きく以下の2種類がある。

- 従来型の従量式換気 (VCV)
- 圧力制御式換気 (PCV)

前者は流量一定、気道内圧は換気量により変化。後者は、換気量にかかわらず気道内圧を一定に保つように呼吸器が流量を調節する。

後者のほうが、呼吸器の制御としてはより高度なことを行っている。

1回換気量を正確に決められる VCV に比べ、PCV は換気量が不確実な欠点がある。しかし、呼吸器のアラームの進歩、何よりも肺に対してより愛護的な換気ができるということで、PCV が選択される機会が増えてきている。

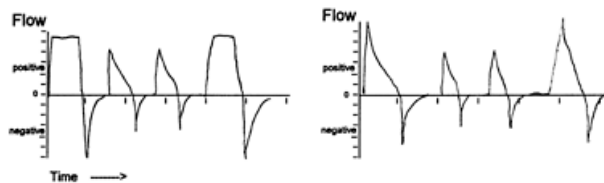


図 6: 正常な気道内流速曲線。左はフロー一定の従量式換気。右は気道内圧一定の PCV。両方とも、間にプレッシャーサポート換気が入っていることに注意。

従来型の従量式換気を行う場合でも、新しい呼吸器では患者に供給するフローのパターンを選択できる。人工呼吸器がどんなフローパターンを選択しているのかは、気道流速曲線を見ると判別できる。

フローパターンには以下の3つがある(図7)。

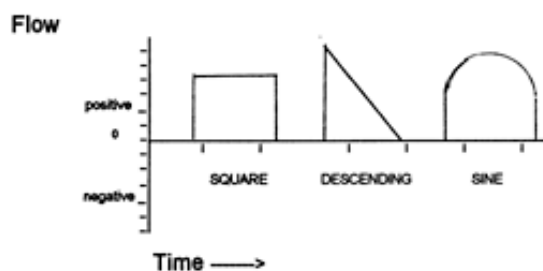


図7: 吸気フローパターンと気道内圧。左から一定流量、漸減波、サイン波。

一定流量 流量一定、あるいは方形波は最も基本的なフローパターンであるが、このパターンは肺がゆっくりと広がる。このため、平均の気道内圧を低めにすることができるが、吸気終末にならないと肺が十分に広がらないため、換気の効率は悪くなる。また、ピーク気道内圧は他の波形に比べて高くなる。

漸減波 漸減波は、生理的なフローパターンに近い波形である。漸減波を用いると、吸気の初期に最も多くの空気が肺に流入するため、換気の効率が良くなる。また、肺胞を効率よく広げられるため、同じ1回換気量でもピーク気道内圧が低くできる。反面、吸気の初期から気道内圧が高くなるため、平均気道内圧は高くなる。

近年良く用いられる圧制御換気も、フローパターンを見ると漸減波になっている。

サイン波 サイン波は、上記2者の中間の性質を持つ。一般に用いられることは少ない。

## 2.2 呼気曲線が基線に戻らない場合

正常に換気されている患者であれば、呼気曲線は次の吸気までには基線に戻る。

これが基線に戻らない場合は、次の吸気直前まで患者は息を吐き続けていることになる(図8)。これが AUTO-PEEP の状態である。

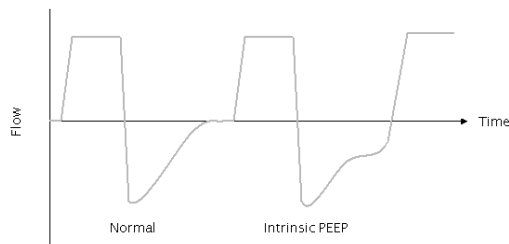


図 8: 左は正常波形。右が内因性 PEEP が高い場合のフロー波形。吸気流量一定の従量式換気の場合。

AUTO-PEEP は、患者の呼気が終了する前に人工呼吸器の吸気が始まってしまうために生じる。これを生じている状態では、患者の呼吸仕事量が増加してしまい、また患者末梢気道の内圧が上昇してしまうため、呼吸不全の増悪や気胸の原因になったりする。

具体的には喘息発作、COPD などで吸気を効率的に呼出することができない患者の場合、内因性 PEEP が高くなってしまい、患者のフロー曲線は図 9 のような波形になる。

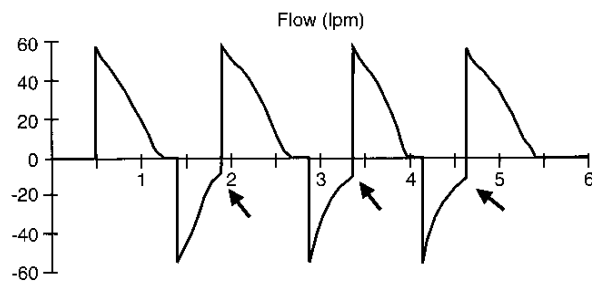


図 9: 喘息患者のフロー波形。プレッシャーサポート換気中。

こうなった場合は何らかの対処が必要である。具体的には、以下のようなことを考慮する。

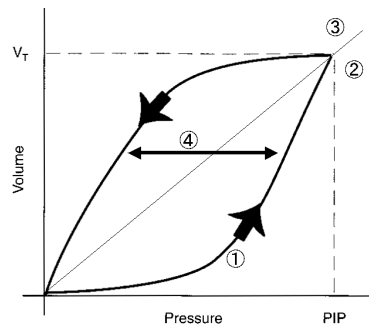
- PEEP 圧を上げる
- 換気回数を減らし、十分な呼気時間をとる
- 吸気流速を上げ、同じ 1 回換気量でも吸気時間が短くなるようにする
- 気道内分泌物の除去をはかる

- 気管支拡張薬を使用してみる
- 1回換気量を減らし、気道内圧の減少をはかる

### 3 圧-容量曲線

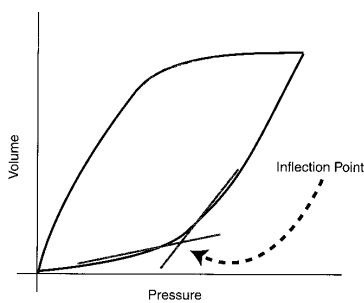
患者の気道内圧を横軸に、患者の換気量を縦軸にして曲線を描いたもの。通常の陽圧換気患者であれば、始点から反時計回りのループを描く。

正常な圧-容量曲線は、ちょうど傾けたラグビーボールのような形をしている。



1. 患者の吸気とともに、気道内圧が上昇し、換気量が増していく。この曲線がきついと、肺胞内に虚脱している部分がある可能性がある。
2. 吸気の終了が、曲線の頂点になる。この頂点が尖っていると、肺が過伸展しているかもしれない。
3. ループ全体の傾きを見ることで、肺のコンプライアンスが推定できる
4. ループの幅を見ることで、患者の気道抵抗が推定できる。

#### 3.1 inflection point



ARDS などの病的な肺では、肺胞内分泌物などで虚脱した肺胞と正常な肺胞とが混在している。この状態で陽圧換気を行うと、気道内圧の上昇とともに虚脱した肺胞が動員され、ある圧を境に急激に換気量が増す。この気道内圧をを inflection point という。

inflection point 付近の換気量の変化が大きいと、それだけ多くの肺胞が虚脱しており、換気が不安定になる。また、一度動員された肺胞が再び虚脱することで、人工呼吸器による肺障害が進行してしまう。



重篤な肺疾患の場合、この inflection point 以上の圧の PEEP をかけると肺胞が動員された状態になり、換気を安定化することができるとともに肺に対して保護的な換気を施行することができる (図 10)。

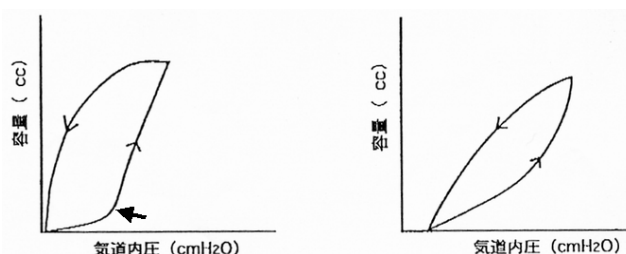


図 10: PEEP をかけないと明確な inflection point ができるが、PEEP をかけることで吸気曲線がスムーズに立ち上がるようになっている。

### 3.2 肺胞過伸展の同定

圧-容量曲線は、吸気が終了した時点で頂点を作る。この頂点の角度が鋭く、ちょうど鳥のくちばしのようなときには肺胞が過剰に伸展している可能性がある (図 11)。

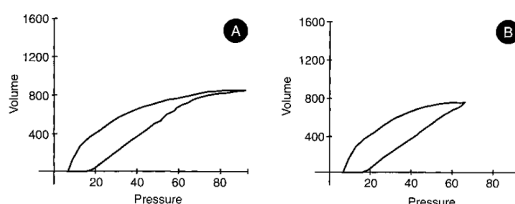


図 11: 換気量が過大の場合、左のように鋭い頂点を作る。1 回換気量をわずかに減少させるだけで、気道内圧は大幅に減少する。

このような波形を見た場合は、1 回換気量が大きすぎる可能性がある。換気量を減少させたり、あるいは圧制御式の換気モードを選択することで肺の過伸展を防止できる。

### 3.3 ループの傾きと肺コンプライアンス

ARDS や肺炎、肺線維症といった疾患では肺は硬くなり、病気の重症度に比例して肺コンプライアンスは低下する。

圧-容量曲線は、その傾きを見ることで患者の肺コンプライアンスを推定することができる。

肺コンプライアンスの正常値は 50 ~ 80 ml/cmH<sub>2</sub>O であるが、この値が低下するとループ全体が水平に傾き、コンプライアンスが増すとループ全体が垂直に近づく (図 12)。

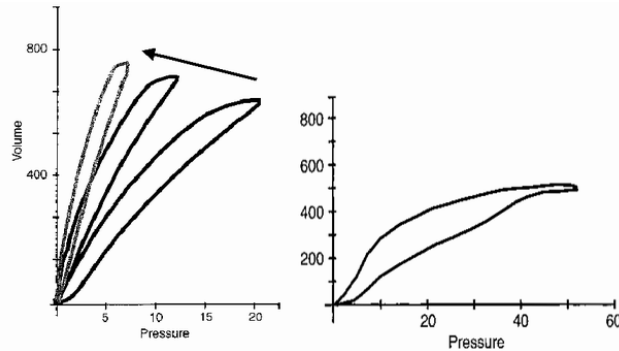


図 12: 左側:矢印の方向に向かってコンプライアンスは高くなる。右は ARDS の症例で、肺コンプライアンスは極端に低い。

病気の進行、あるいは治療の成功により肺のコンプライアンスが変化すると、ループの傾きはその変化を反映して変わっていく。

一方、圧制御換気を行っている場合は、肺のコンプライアンスの変化はそのまま換気量の増加につながる (図 13)。

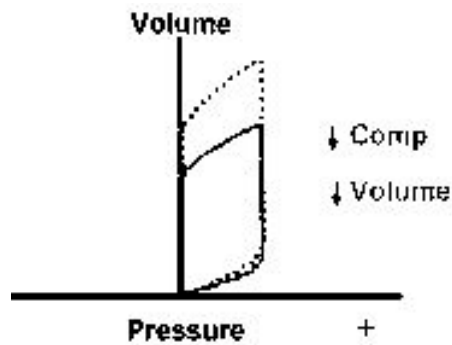


図 13: PCV 中のコンプライアンス変化。コンプライアンスが下がると、そのまま換気量が減少する。

### 3.4 気道抵抗とループの幅

1 回換気量、肺コンプライアンスがともに同じであっても、気道抵抗が変化した場合はループの形は変化する。

具体的には、気道抵抗が高くなるほどループの幅が広がり、治療により気道抵抗が減少すると、ループの幅が狭くなる。

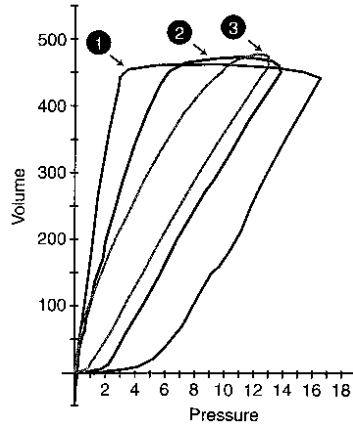
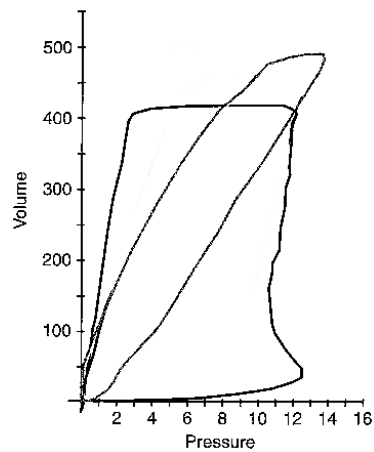


図 14: 吸気、呼気とも気道抵抗が増した場合のループの変化。1 が一番気道抵抗が高く、3 はほぼ正常な状態。



気道抵抗によるループの幅の変化は、圧制御換気を行っている場合はより顕著である。

図は PCV 中に気道内圧が変化した例であるが、気道内圧が高いケースでは、吸気の開始時に極端に気道内圧が上がり、吸気とともに逆に気道内圧が下がってきている。

例えば喘息患者などの場合、気管支拡張剤の効果が出てくると圧-容量曲線の幅が狭くなり、気道抵抗が減ってきたのが分かる(図 15)。

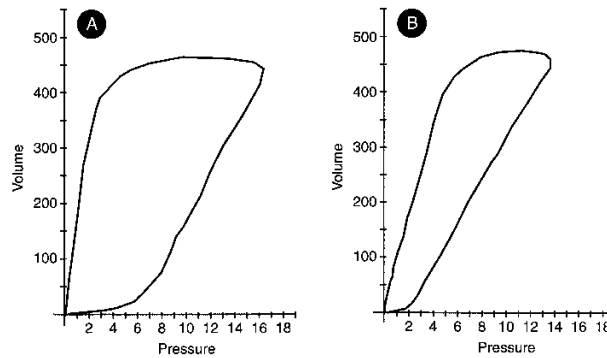


図 15: 気管支拡張剤の効果。挿管直後 (A) に比べて、気管が開いた後 (B) ではループの幅が狭くなる。

### 3.5 ループが開始位置に戻らない場合

理論的には、吸った空気はすべて呼出される。このため、圧-容量曲線は必ずループになるが、これがそうならない場合がある。

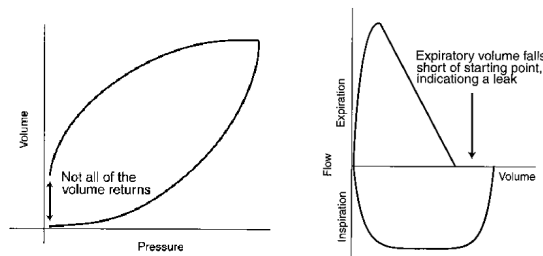


図 16: 回路内にエアリークがある場合。ループが閉じず、空いてしまっている。

図 16 のように、ループが閉じない場合は吸気に比べて呼気の量が少ない場合に生じる。これは、呼吸器回路のどこかにエアリークがある場合で、リーク個所を探さなくてはならない。

一方、ループが閉じないのとは逆に、ちょうど”知恵の輪”のようになってしまうことがある(図 17)。

この現象は、吸気に比べて呼気のほうが多くなる場合、具体的には患者

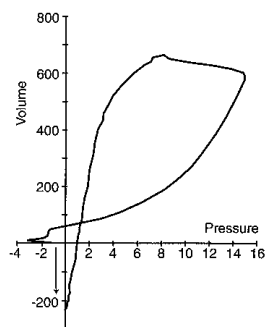


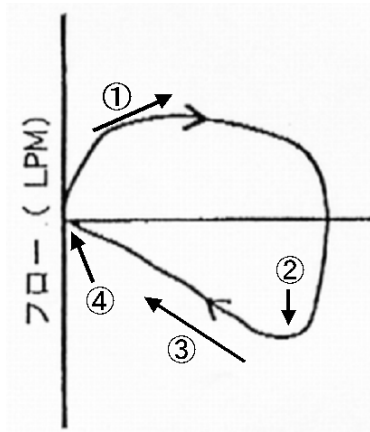
図 17: 吸気よりも呼気のほうが多い場合。患者が咳をしたときなどに見られる。

が咳をしたとき、体位変換を行ったときなどに一過性に見られるが、このような波形が常に見られるならば病的である。

圧-容量曲線が常にこのような波形になる場合は、肺のどこかにエアートラッピングを生じている。患者のフロー波形を見ても内因性 PEEP が高まっている波形をしているはずで、対策を考える必要がある。

## 4 フローボリュームカーブ

患者の1回換気量を横軸に、患者の気道流量を縦軸にして曲線を描いたもの。機械によってどちらが上に来るかさまざまであるが、ここでは吸気波形が上側、呼気波形が下側に來るものとして解説する。



1. 吸気の立ち上がりフローを見ると、呼吸器のモードが分かる。また、患者の吸気抵抗を推定することができる。
2. 患者の呼気のピークは、呼気直後に生じる。このフローを見ることで、患者の呼気抵抗の変化が分かる。
3. 呼気フローは、徐々に減少していく。この減少の仕方、気道抵抗によって変化する。
4. フローボリュームカーブは、必ず最後はゼロに戻る。これがゼロに戻らないのは病的である。

### 4.1 吸気フロー波形

患者が吸気を開始すると同時に、フローボリュームカーブは時計回りに曲線を描く。

従来型の、フロー一定の従量式呼吸を行っている場合、吸気フロー波形は図のようにほぼ水平の直線になる。

患者の気道抵抗が変化すると、フローボリュームカーブの形は変化するが、従量式換気の場合はほとんど影響を受けない(図 18)。

一方、圧制御式換気、あるいはプレッシャーサポート換気の場合は波形が変わる。

圧制御式換気の吸気フロー波形は図のように吸気直後がもっとも速く、以後漸減していくが、気道抵抗が上昇すると吸気流速はそれに伴い落ちていく(図 19)。

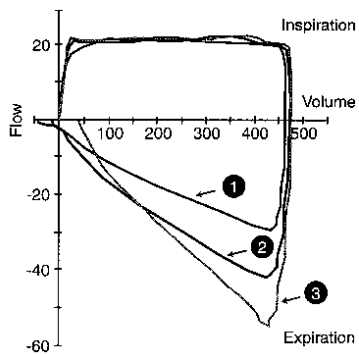


図 18: 従量式呼吸のフローボリュームカーブ。気道抵抗が変化しても、吸気フローはあまり影響を受けない。

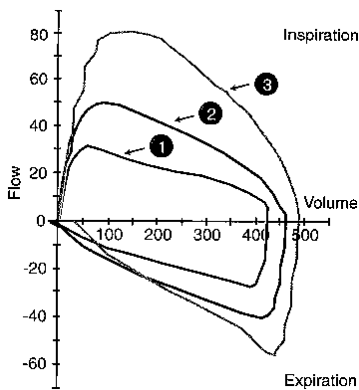


図 19: 圧制御式換気フローボリュームカーブ。3 ⇒ 2 ⇒ 1 の順で気道抵抗が上昇している。

## 4.2 呼気フロー波形

換気モードいかにかわらず、患者の呼気は呼出した瞬間が最もフローが速く、呼気終末に向けて漸減していく。通常、このフローの減少のしかたは一定であるが、喘息患者や COPD 患者など、呼気の抵抗が増している患者の場合、図 20 のように呼気フロー波形が変化する。

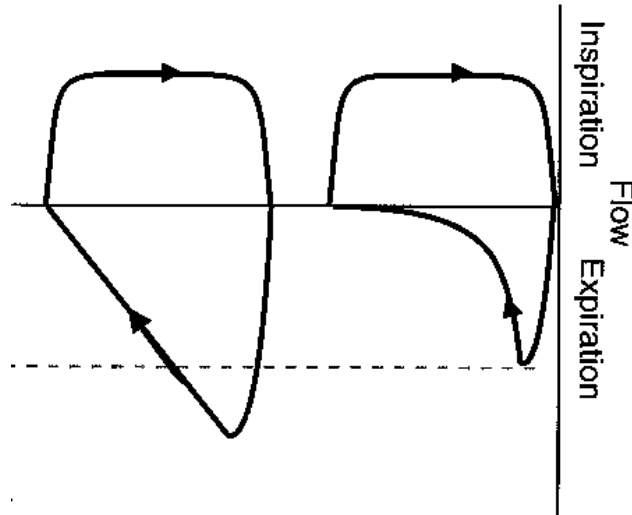
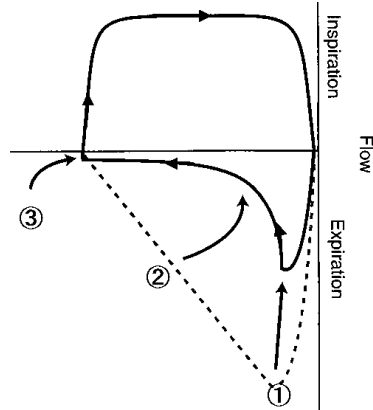


図 20: 呼気フロー波形の変化。右側は正常波形。左側は気管支攣縮があり、気道抵抗が増している場合。

この変化のしかたというのは、細かく述べると以下のとおりである。



1. 呼気フローのピークが、気道抵抗の増加により低下する。
2. 呼気直後から呼気フローが急激に減少する。
3. 呼気フローが原点に戻らず、次の吸気の瞬間まで呼出が続く。



### 4.3 呼気フローが原点に戻らない場合

患者の呼気が終了すると、呼気フローは必ずゼロに戻る。このとき換気量もゼロに戻っているため、PEEP の値にかかわらず、呼気フローは必ず原点に戻る。

呼気フローが原点に戻っていないときは、患者の換気に異常がある。

#### 4.3.1 呼気がいつまでも続く場合

換気量がゼロに戻っても呼気フローが続いている場合は、肺にエアートラッピングがあり、呼出ができない状態になっている (図 21)。

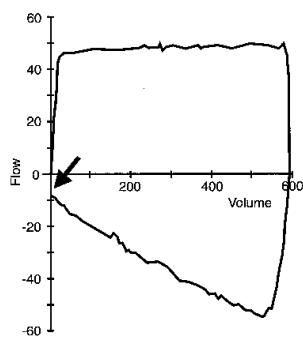


図 21: 換気量がなくなっても呼気が続いている (矢印)。

気管支喘息、ARDS、心不全急性期など、AUTO-PEEP の状態になっている患者でこうした波形がよく見られる。この場合、PEEP 圧を上昇させたり、患者の呼気時間を延長させたり、といった対策が必要である。

#### 4.3.2 換気量がゼロに戻らない場合

吸気量よりも呼気量が少ない場合、図 22 の右のような波形が観察される。これは、人工呼吸器回路にリークを生じているときに見られる。

一方、吸気量のほうが呼気量よりも多い場合、図 22 の左のような波形が観察される。これは、患者が咳をしたとき、体位変換などで患者の 1 回換気量が変化したときに一過性に見られる波形である。

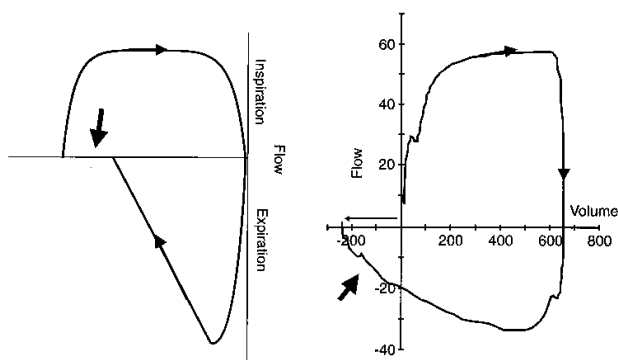


図 22: 左側:回路内にリークがあるときの波形。右側:患者が咳をしたときの強制呼出時の波形。

#### 4.4 フロー波形が乱れているとき

通常、フローボリュームカーブはなだらかな曲線を描く(図 23)。これが細かくゆれているときは、気道内に分泌物が多く貯留しているときのサインである。

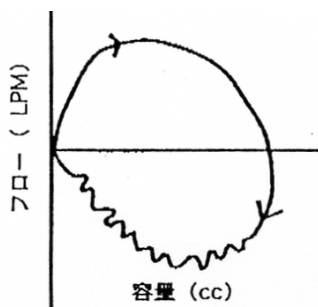


図 23: 気道分泌物貯留時の波形

波形を見なくても、臨床的にこれを把握することはできるはずだが、知っておくと何かと便利。

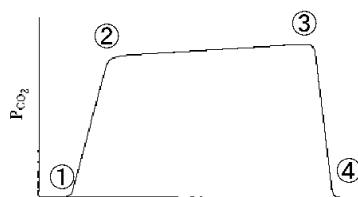
## 5 カブノグラム

カブノグラムは、患者の呼気中の CO<sub>2</sub> 濃度を測定するものであるが、最近の人工呼吸器はカブノグラムを標準で装備するものが増えてきた。

カブノグラムを連続測定することで、おおよそ以下のようなことが分かる。

- 患者血液中の CO<sub>2</sub> 濃度の推定
- 挿管チューブの位置が適正かどうか
- 気道閉塞の有無
- 死腔換気量の推定

正常波形は、以下のとおり。



1. 患者呼気の開始とともに、CO<sub>2</sub> 濃度が上昇していく。
2. このあたりから、肺胞中の CO<sub>2</sub> が呼出されはじめる
3. 呼気が終了する。この時点での CO<sub>2</sub> 濃度が、血液中の CO<sub>2</sub> 濃度にほぼ等しい。
4. 呼気の終了とともに、カブノグラムの曲線はゼロに戻る。

正常な肺であれば、カブノグラムの波形はほぼ同じ形がずっと続く (図 24)。これが不安定に上下する場合、何らかの病的な状態が考えられる。

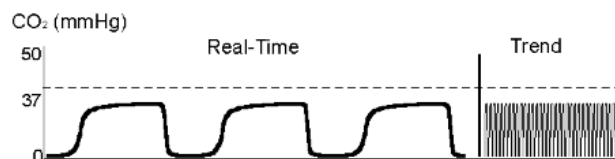


図 24: 正常なカブノグラムは同じ波形が続く

## 5.1 カプノグラム波形の主な変化

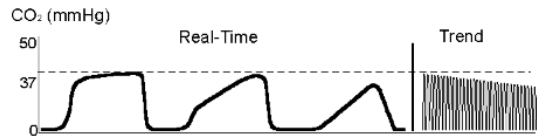


図 25: 挿管チューブに閉塞が見られるときのカプノグラム

気道の攣縮や、挿管チューブの閉塞といった所見が見られる場合、呼気のカプノグラムがなだらかに立ち上がるようになり、また呼気終末のCO<sub>2</sub>濃度が徐々に減少していく。

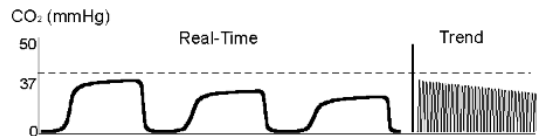


図 26: 過換気の際のカプノグラム

患者が過換気になっているとき、カプノグラム波形は正常のまま、CO<sub>2</sub>濃度が徐々に減少していく。

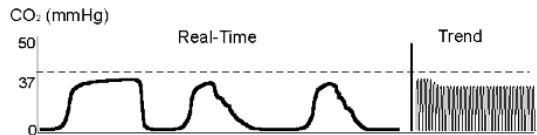


図 27: エアリークがあるときのカプノグラム

人工呼吸器回路にリークがあるときもまた、カプノグラムのピーク値が減少していく。

気管内挿管直後、あるいは体位変換後に呼気中のCO<sub>2</sub>濃度がほとんどゼロに近くなってしまった場合、気管内挿管チューブが気管から外れてしまった可能性がある。

## 5.2 死腔換気とカプノグラム

呼気終末のCO<sub>2</sub>濃度は、実際に測定した血液ガス中CO<sub>2</sub>濃度よりもわずかに低い。

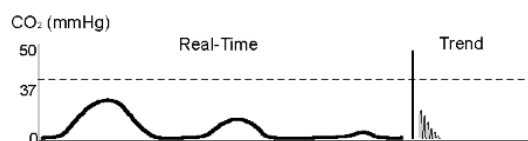


図 28: 食道挿管のときのカブノグラム

これは、気管支内に止まっていた空気や、換気にかかわっていない肺胞からの呼気が混合するために呼気中の CO2 濃度が薄まるためであるが、これを利用して、患者の死腔換気量を求めることができる。

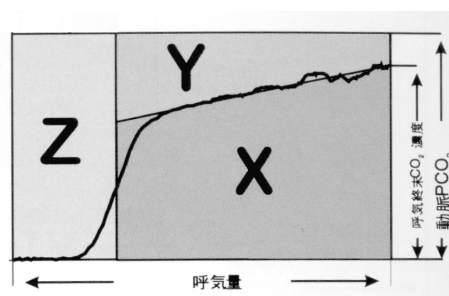


図 29: カブノグラムと動脈血 CO2 の関係。図の Y の部分が死腔換気量を示している。死腔換気の正常値は、 $Y/(X + Y)$  が 0.3 以下とされている。

肺塞栓やショック、敗血症、ARDS といった病態の患者では、肺の循環が障害される。病気の重症度が強いと、換気はできても血液の来ない肺胞が増加してくるため、動脈血液中 CO2 濃度に比べて呼気終末の CO2 濃度が大幅に減少する。言い換えると死腔換気が増加するわけであるが、死腔換気量の増加は肺の循環障害の程度を反映するため、病気の予後の推定に用いることができる。

実際、動脈血中 CO2 濃度に比べて呼気終末 CO2 濃度の低い ARDS 患者は、そうでない患者に比べて明らかに予後が悪化することが報告されている。