

滋賀医科大学呼吸器内科講師

長尾大志

やさしい 血ガス・呼吸管理

ベストティーチャーに教わる

人工呼吸管理の基本と病態別アプローチ

肺胞低換気

- 肺胞低換気を一言で説明すると、「肺胞にも血管系にも異常がないので、肺胞における酸素の受け渡しには問題はないが、換気量が少ないために新鮮な空気が補充されず、肺胞内の酸素が枯渇してくる」そういう病態です。

肺胞低換気で低酸素血症になる理屈

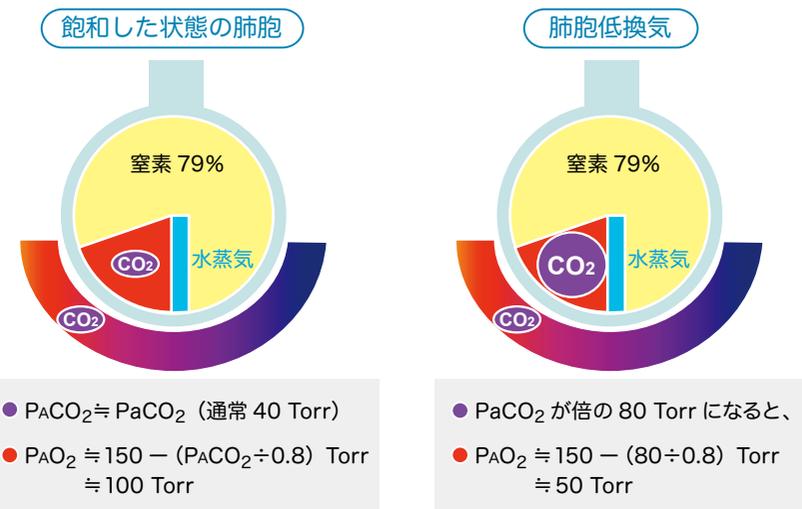
- A-aDO₂ を計算するときに使った図を思い出してみましょう (32 ページ)。あの図は、大気を吸い込んで、肺胞と血液が飽和したときの状況でした。覚えておられるでしょうか。
- 大気圧 760 Torr から 37°C の水蒸気圧 47 Torr を天引きすると、713 Torr。O₂ の割合は大気の 21% ですから、

$$P_iO_2 = 713 \times 0.21 = 150 \text{ Torr}$$

それからガス交換を経て飽和した PAO₂ は、

$$PAO_2 \approx 150 - (PaCO_2 \div 0.8) \text{ Torr}$$

PaCO₂ は通常 40 Torr 程度ですから、PAO₂ は 100 Torr 程度、と計算できます。



- ただし、この計算の大前提は「普通に換気をしていること」だったのであります。つまり呼吸数 12 回とかで、数秒ごとに新鮮な空気が供給される、それが前提。新鮮な空気が供給されなければ、酸素は減少してしまいます。
- つまり、ガス交換の結果、肺胞内の O₂ は着々と消費され、代わりに CO₂ が肺胞内に増えてきます。PaCO₂ は換気量に依存しますから (75 ページ)、例えば換気量が半分になると PaCO₂ は 40 → 80 Torr に倍増します。
- そうすると PAO₂ はその分減ることになります。上の式に PaCO₂ = 80 を代入して計算すると…

$$PAO_2 \approx 150 - (80 \div 0.8) \text{ Torr} \approx 50 \text{ Torr}$$

となります。

低 O₂ より高 CO₂ の方がヤバイわけ

- ここでの注意点は、肺胞低換気はもちろん低酸素血症の原因ではあるのですが、低換気になっているときは、低酸素よりもむしろ高二氧化碳血症の方が問題になることが多い、ということです。
- なぜか。実は肺胞低換気を起こす病態は、換気が悪い=空気の出入りが悪い、すなわち胸郭の動きが低下するものです。ということは、

- ① 呼吸中枢からの換気刺激がなくなる状態
- ② 呼吸筋が動かなくなる状態

のいずれかで、原因は肺外にあることが多い、というか、肺自体は正常である場合が多いのです。

- | | |
|---|---|
| <p>① 呼吸中枢からの換気刺激がなくなる状態</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 鎮静剤やモルヒネなどの薬剤による中枢の抑制 ● 延髄の障害 ● CO₂ ナルコーシスなど | <p>② 呼吸筋が動かなくなる状態</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 呼吸筋支配神経の障害 ● 神経筋接合部の障害 ● 呼吸筋そのものの障害 ● 上気道の閉塞 ● 胸郭異常 |
|---|---|

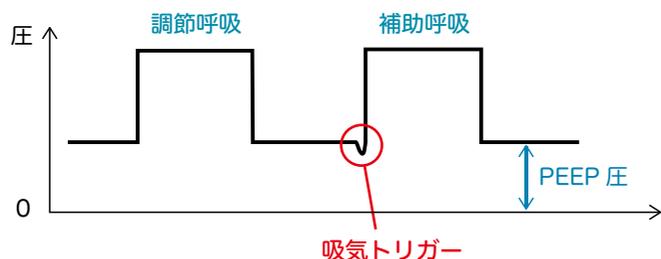
- いずれも肺の疾患ではありませんね。換気が低下する病態で有名なのは COPD で起こる CO₂ ナルコーシスですが、この場合は割と重症の COPD で

人工呼吸器のモード設定③ 補助呼吸 (A/C)

- CMV は全く自発呼吸がない場合に行う、完全に器械に乗った呼吸（**調節呼吸**）でした。それが、意識状態などが改善して、自発呼吸がチラホラ出てくるとどうなるか。自発呼吸が出てくるタイミングを利用して、器械でコントロールされた圧力、量の空気を送り込みます。
- その場合、呼吸の回数やタイミングをすべてコントロールするのではなく、**タイミングだけ自発呼吸に合わせます**。そのような状態での自発呼吸は上手くできているかどうか保証がありませんから、タイミング以外は器械に任せられた強制換気を行います。

「補助」= assist

- このような呼吸を**補助呼吸**といいます。assist = 補助、ですね。従圧式 (PCV) モードにおける波形をモニターで見ると、こんな感じです。

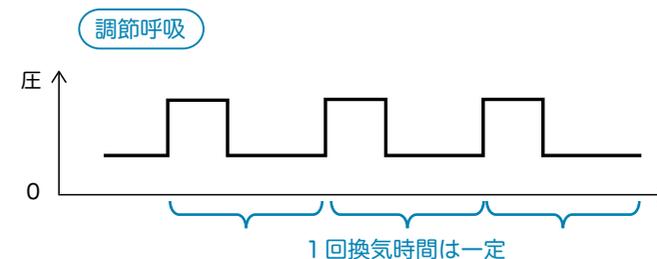


- ほとんど調節呼吸と同じですが、赤で囲んだポコンと凹んだところだけが異なります。自発呼吸をしようかというときには、横隔膜や胸郭が動いて胸腔内を陰圧にします。つまり、ベースの気道内圧から呼吸運動によって少し陰圧方向に動くためにポコンと凹むのです。

(とはいえ、PEEPがかかっていますから、多少陰圧方向に引っ張られても、まだ陽圧であることには変わりありません)

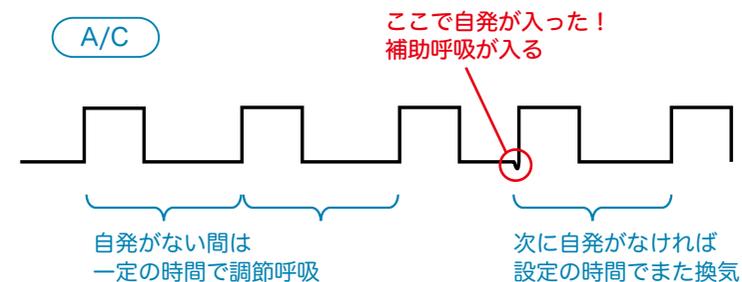
- このような圧の変化を感知すると、それが**トリガー**（引き金）になって、人工呼吸器が設定された圧力、量の空気を送り込みます。ですから、圧波形の形自体は調節呼吸とほとんど同じです。トリガーの凹みだけが異なります。

- 調節呼吸との大きな違いは、**タイミング**です。調節呼吸は、設定した呼吸回数にしたがって一定のタイミングで呼吸をしていきます。呼吸回数 10 回だったら 1 回換気時間は 6 秒で、この決めた 6 秒ごとに換気を行います。それに対して、補助呼吸では自発のタイミングで呼吸が起こります。



- 最近の器械は性能が向上して、自発がなければ調節呼吸を一定のリズムで行い、自発が出ればそれを活かして補助呼吸を行う、というように融通を利かせてどちらもやってくれます。両方を行うことから**補助/調節呼吸**といい、**A/C** : assist/control というモードで表示されます。

- A/C では、自発呼吸がないときは設定した呼吸数になるよう、一定の時間で換気が行われます。呼吸回数 10 回だったら 1 回 6 秒。で、ひとたび自発呼吸っぽい動作（回路の圧が下がる）が起こると、それがトリガーになって補助呼吸が入ります。



人工呼吸器のモード設定⑤

間欠的強制換気 (IMV・SIMV) の実際

IMV (間欠的強制換気)

- 自発呼吸を促していくために、器械による至れり尽くせりの換気（強制換気）を間引いていく、そんなモードを**間欠的強制換気 (IMV: intermittent mandatory ventilation)** といいます。
- CMV (A/C) との違いは、自発が出たとき。CMV だと、調節呼吸の間に自発が出る（出ようとする）と補助呼吸がしっかり入りますので、自発呼吸が出れば出るほど器械による呼吸回数が設定よりも増えてしまいます。
- IMV では、器械による換気はあくまでも当初設定した回数だけです。それ以外に自発が出たときは、器械はちょっとした後押し（プレッシャーサポート）をするのみ。それで自立を促すわけです。

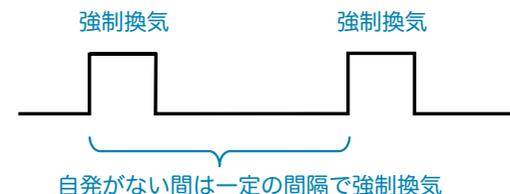
SIMV (同期式間欠的強制換気)

- 初期の IMV は、自発とは全く関係なく調節呼吸を行っていました。その後、器械が進歩し、自発呼吸を感知してそのときに器械換気をするという、補助呼吸と同じようなことができるようになりました。それを、自発呼吸に同期して補助呼吸を入れる、という意味で**同期式間欠的強制換気 (sIMV/SIMV: synchronized intermittent mandatory ventilation)** と名付けたのです。
- だんだんややこしくなってきましたね。といっても、SIMV 自体は名称から何となく理解できるかと思います。「**間引いた強制換気を自発に同期させる**」わけですから。

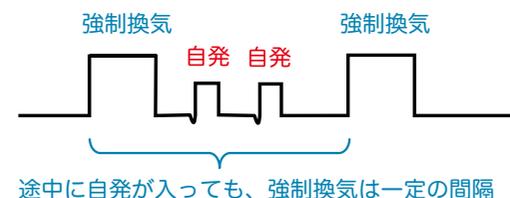
返す返すも残念なのは、「補助呼吸」というネーミングです。この名前には「同期」とか「強制」の意味合いがなく、支持呼吸との区別がはっきりしません。

- もう 1 つややこしいのは、補助/調節呼吸 (A/C) と SIMV における強制換気のあり方です。A/C では、自発が出るとそのたびに補助呼吸が入り、強制換気の回数は増えていきます。SIMV では、強制換気は設定した回数以上になりません。というのも、強制換気と強制換気の間には一定の間隔が空くようになっているからです。

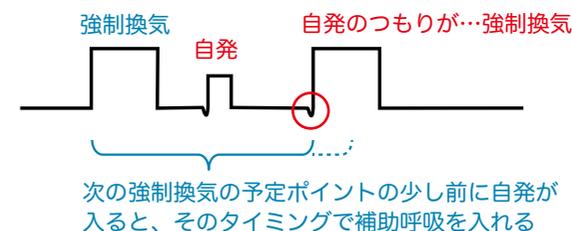
- 例えば呼吸回数を 10 回に設定すれば、6 秒ごとに強制換気が入ります。これは A/C と同じ。



- 途中で自発が入ると、次に予定されている強制換気（前回の強制換気から 6 秒後）までに充分間が空いていれば、その自発は自発として尊重されます。無理やりの強制換気は行いません。プレッシャーサポートがかかるだけです。



- 次に予定されている強制換気の少し前に自発が入れば、そのタイミングを活かして強制換気（補助呼吸に相当）が行われます。自発と強制換気がかち合わないようタイミングを調整しているのです。

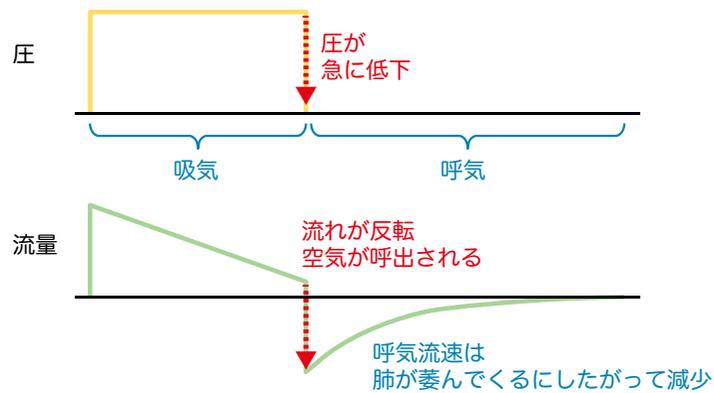


- タイミングを調整する（自発と同期する）強制換気 SIMV と、自発を支持するプレッシャーサポート PSV の組み合わせなので、**SIMV + PSV** というモードで表示されることが多いです。
- それに対して **PCV + PSV** は、強制換気 PCV とプレッシャーサポート PSV の組み合わせです。よく似た頭文字なので混同しやすいですが、**PCV は器械がほとんどやる換気、PSV は自発の手助け**、と覚えましょう。

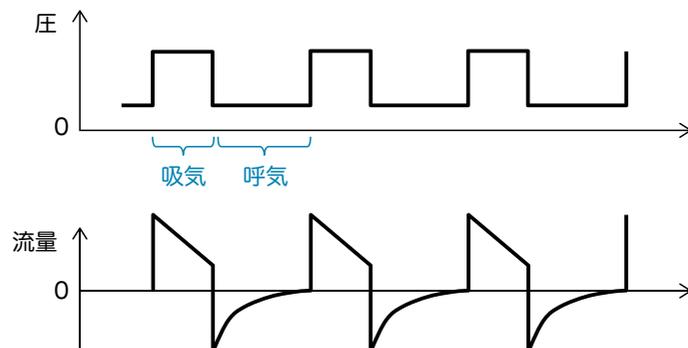
オート PEEP を発見する方法

- オート PEEP が生じているかどうかを見る手っ取り早い方法は、流量の波形を見ることです。従圧式における流量の波形を考えてみましょう。
- 吸気時には一定の圧をかけていたのを、吸気相が終わると一気に開放して圧を下げます。すると、空気の流が反転し、空気が呼出されます。
- 呼気相の間、圧はゼロ、というか PEEP レベルに落ちてそのまま維持されます。呼気の流速は、肺が萎んでくるにしたがって減少してゼロに近づきます。

従圧式の圧・流量波形

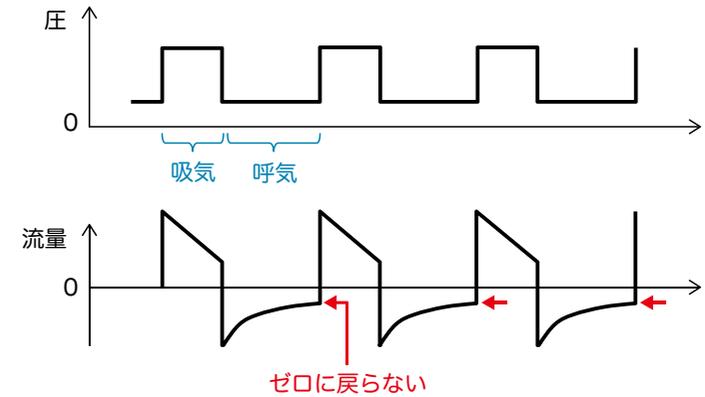


- モニターっぽく描くと下図のようになります。



- オート PEEP が生じているということは、息を吐ききらないうちに、つまり呼気の流速がゼロにならないうちに吸気相に転じてしまうということですね。だから、流量（フロー）の波形を見て、呼気の終末時にゼロまで戻っていない、そういう波形がオート PEEP の存在を示唆します。

オート PEEP が生じると…



- さらに、オート PEEP が生じているということは、空気が出きらない、すなわち気道内に空気が余っている状態です。このとき患者さんが自発呼吸をしようと吸気努力をして（胸腔内圧を陰圧にしても）、気道内に余っている空気がまた肺胞に流れ込んでしまい、中枢の気道にまで陰圧が届きにくくなります。
- 人工呼吸器のトリガーは中枢気道の内圧が陰圧になることを感知してかかりますから、**オート PEEP があるとトリガーがかかりにくくなる**、ということになります。