

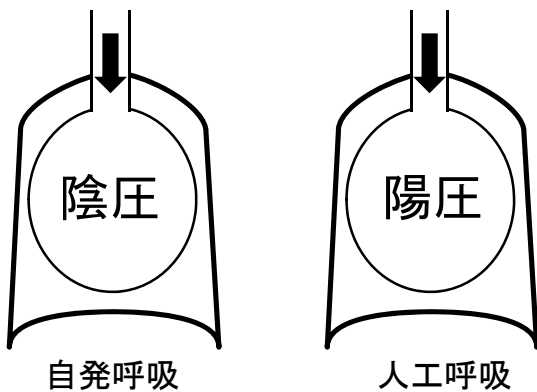
# 呼吸生理と人工呼吸管理の基礎

麻酔科 一ノ宮 大雅

## はじめに

- 「理解」を目的に、「正確でない」内容含む
- 理論的に正しいと思う個人的意見を含む
- 「最適な管理」には足りない
- 「やり方」ではなく「理解」が重要
- 決まった「やり方」は「一般的に正しい」だけ
- 「理解」できれば正しい「やり方」は出来る

## 自発呼吸と人工呼吸



自発呼吸(陰圧換気)と  
人工呼吸(陽圧換気)

どちらが良いの？



自発呼吸(陰圧換気)

※換気血流不均衡が少ないから

## 換気様式と肺の膨らみ

自発呼吸(陰圧換気)

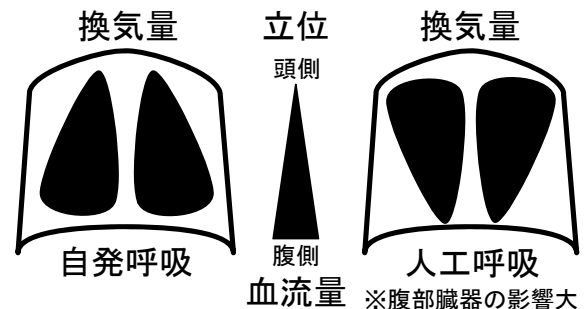
- ①胸郭拡大
  - ②胸腔内陰圧
  - ③肺膨張
- ➡ 腹側を中心に  
全体的に膨張  
※横隔膜の下方移動大

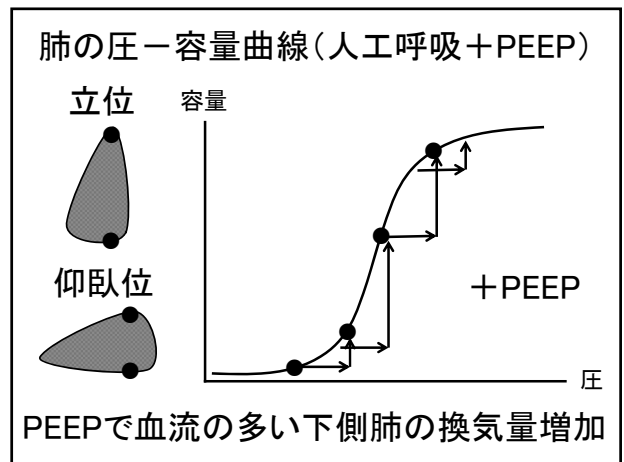
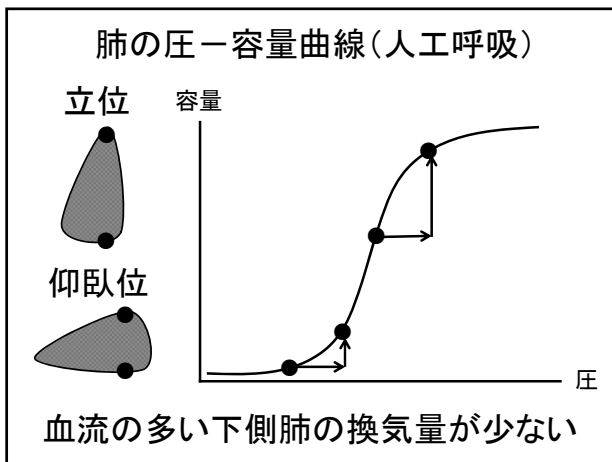
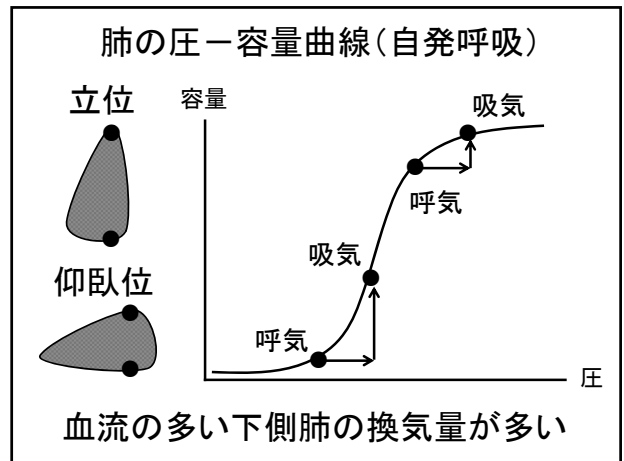
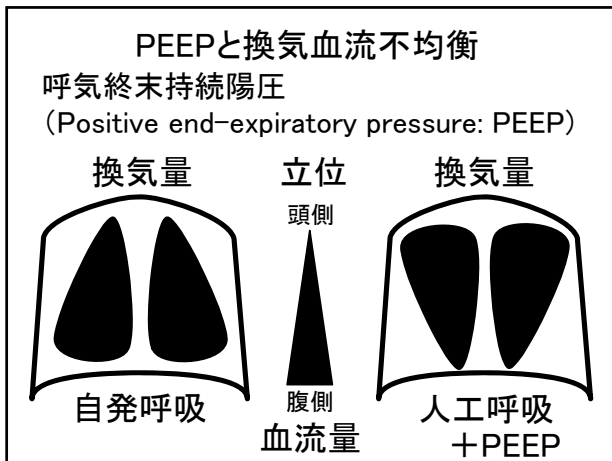
人工呼吸(陽圧換気)

- ①ガス送気
  - ②胸腔内陽圧
  - ③肺膨張
- ➡ 膨らみやすい肺を  
中心に膨らむ

## 換気様式と換気血流不均衡

- 血液が多い肺は膨らみにくい
- 血液が少ない肺は膨らみやすい





呼吸生理の基礎  
～酸素化と換気と循環と～

- O<sub>2</sub>を組織に届けるために必要な要素は？
- ①肺胞内酸素濃度
  - ②肺胞・血液ガス交換能
  - ③酸素運搬能

## 大気と気管内の酸素濃度

●各気体の圧力は濃度に比例する

大気 (760 mmHg)	
N <sub>2</sub> (79%) 600 mmHg	O <sub>2</sub> (21%) 160 mmHg

気管内 (760 mmHg)		水蒸気
乾燥気 (713 mmHg)		
N <sub>2</sub> (79%) 563 mmHg	O <sub>2</sub> (21%) 150 mmHg	

水蒸気 ≒ 47 mmHg

肺胞内酸素濃度 (PAO<sub>2</sub>) はどれくらい?  
～肺胞方程式～

$$PAO_2 = FiO_2 \times (\text{大気圧} - H_2O) - PACO_2 / R$$

※PA: 肺胞内分圧、Fi: 吸入気濃度、R: 呼吸商  
(大気圧: 760 mmHg、H<sub>2</sub>O: 47 mmHg)

$$PAO_2 = FiO_2 \times (760 - 47) - PACO_2 / 0.8$$

$$PAO_2 \doteq FiO_2 \times 713 - PACO_2 / 0.8$$

<呼吸商>

O<sub>2</sub>消費量 (VO<sub>2</sub>) に対するCO<sub>2</sub>産生量 (VCO<sub>2</sub>)  
通常、VCO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> = 200 ml/250 ml = 0.8

肺胞内二酸化炭素濃度 (PACO<sub>2</sub>) は  
どのくらい?

$$PACO_2 = K (VCO_2 / VA)$$

※K: 定数、VA: 肺胞換気量

$$PACO_2 = K (VO_2 \times R / VA)$$



酸素消費量、肺胞換気量で規定

通常、安静時は・・・

$$PaCO_2 \doteq PACO_2 \doteq 40 \pm 5 \text{ mmHg}$$

肺胞内酸素濃度 (PAO<sub>2</sub>) はどれくらい?

$$PAO_2 = FiO_2 \times (\text{大気圧} - H_2O) - PACO_2 / R$$

◇FiO<sub>2</sub>: 0.21 (21%)

◇大気圧: 760 mmHg

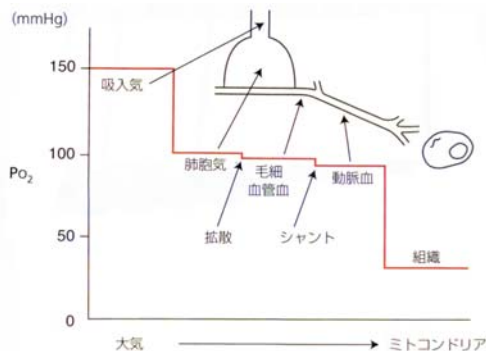
◇H<sub>2</sub>O: 47 mmHg

◇PACO<sub>2</sub>: 40 mmHg

◇R: 0.8

$$PAO_2 \doteq 100 \text{ mmHg}$$

## 各部位の酸素分圧



引用: MEDS社「ウエスト呼吸生理学入門」より

肺胞内酸素濃度を規定するのは?

●吸入気酸素濃度

➡ 高濃度酸素を吸う

●酸素消費量

➡ 代謝を抑える

●肺胞換気量

➡ 沢山換気をする

肺胞内酸素濃度を規定するのは？

●吸入気酸素濃度

➡ 高濃度酸素を吸う ○

●酸素消費量

➡ 代謝を抑える ○

●肺胞換気量

➡ 沢山換気をする ○×

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係①

<FiO<sub>2</sub> = 1.0>

$$PAO_2 = FiO_2 \times 713 - PACO_2 / 0.8$$

① PACO<sub>2</sub> = 60 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 638

② PACO<sub>2</sub> = 40 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 663

③ PACO<sub>2</sub> = 20 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 688



FiO<sub>2</sub>が高いと・・・

PACO<sub>2</sub>はPAO<sub>2</sub>に影響少ない

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係②

<FiO<sub>2</sub> = 0.21>

$$PAO_2 = FiO_2 \times 713 - PACO_2 / 0.8$$

① PACO<sub>2</sub> = 60 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 75

② PACO<sub>2</sub> = 40 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 100

③ PACO<sub>2</sub> = 20 ⇒ PAO<sub>2</sub> = 125



FiO<sub>2</sub>が高いと・・・

PACO<sub>2</sub>はPAO<sub>2</sub>に影響大きい

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係③

<例:人工呼吸が必要な重症呼吸不全>

●FiO<sub>2</sub>は高く管理されている

⇒「肺胞内酸素濃度」は高い

⇒PACO<sub>2</sub>低下の影響少ない

●酸素化悪化の原因は？

⇒「肺胞-血液ガス交換能」低下



「換気量増加=酸素化改善」

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係④

<例:エベレスト頂上近く>

(8400 mm:気圧272 mmHg)

$$PAO_2 = FiO_2 \times (\text{大気圧} - H_2O) - PACO_2 / R$$

$$PAO_2 = 0.21 \times (272 - 47) - PACO_2 / 0.8$$

$$PAO_2 = 47.2 - PACO_2 / 0.8$$

⇒「肺胞内酸素濃度」が低い



「換気量増加=酸素化改善」

8400 mにおける血液ガス  
(大腿動脈:4名の平均値)

$$PaO_2 = 25 \text{ mmHg}$$

$$PaCO_2 = 13 \text{ mmHg}$$

$$PAO_2 \doteq 30 \text{ mmHg}$$

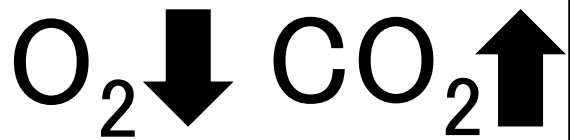
N Engl J Med 2009;360:140-9.

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係⑤  
 <鎮静薬、麻薬投与>

の前に…

鎮静薬、麻薬と呼吸抑制

なぜ呼吸するのか？



呼吸回数(RR)増加

PACO<sub>2</sub>と酸素化の関係⑤  
 <鎮静薬、麻薬投与>

鎮静薬、麻薬 ⇒ CO<sub>2</sub>呼吸閾値上昇

CO<sub>2</sub>呼吸閾値 = 60 mmHgの場合…

$$PAO_2 = FiO_2 \times (760 - 47) - 60 / 0.8$$

$$PAO_2 = FiO_2 \times 713 - 75$$

● FiO<sub>2</sub> = 0.21 … PAO<sub>2</sub> = 74

● FiO<sub>2</sub> = 0.4 … PAO<sub>2</sub> = 210



低換気(CO<sub>2</sub>貯留)では酸素投与効果大

換気量増加 = PACO<sub>2</sub>低下？

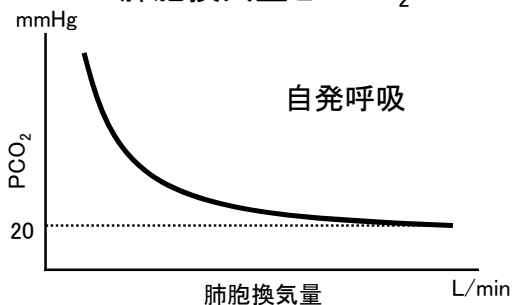
陽圧換気下で換気量が増加すると…

- 膨らみやすい肺から膨らむ  
 ⇒ 「換気 > 血流」の割合(死腔換気率)増加
- 平均気道内圧上昇 ⇒ 肺血流低下
- 呼気時間短縮 ⇒ 呼出障害(肺過膨張)



ある程度以上になると  
 「換気量増加 ≠ PACO<sub>2</sub>低下」

肺胞換気量とPaCO<sub>2</sub>



陽圧換気では死腔換気比率上昇  
 ⇒ さらに「換気量増加 ≠ PaCO<sub>2</sub>低下」

まとめると…

- 換気量増加はPACO<sub>2</sub>低下に関係
  - 陽圧換気下で換気量を増加させても  
 PACO<sub>2</sub>低下には限界がある
  - 吸入酸素濃度が低いとPACO<sub>2</sub>の影響大
  - 酸素化の悪いような患者のFiO<sub>2</sub>は高く  
 PACO<sub>2</sub>の変化はPAO<sub>2</sub>に影響少ない
- 「換気量増加 = 酸素化改善」ではない  
 平均気道内圧・FiO<sub>2</sub>上昇 = 酸素化改善

酸素療法におけるFiO <sub>2</sub>					
鼻カニューレ		フェイスマスク		リザーバー付きマスク	
酸素流量 (l/min)	FiO <sub>2</sub>	酸素流量 (l/min)	FiO <sub>2</sub>	酸素流量 (l/min)	FiO <sub>2</sub>
1	0.24	5	0.4	6	0.6
2	0.28	6	0.5	7	0.7
3	0.32	7	0.6	8	0.8
4	0.36			9	0.9
5	0.40			10	1.0
6	0.44				

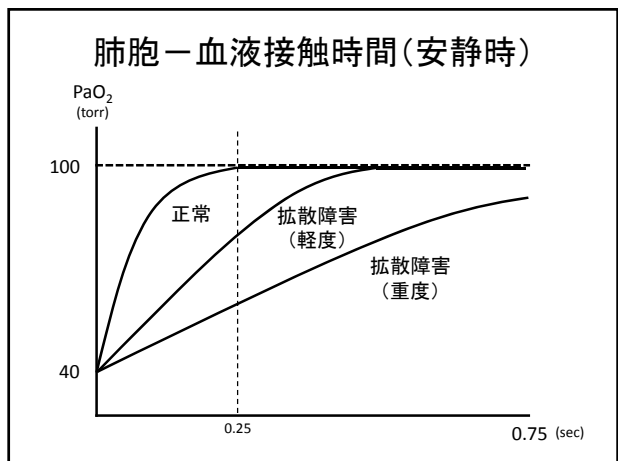
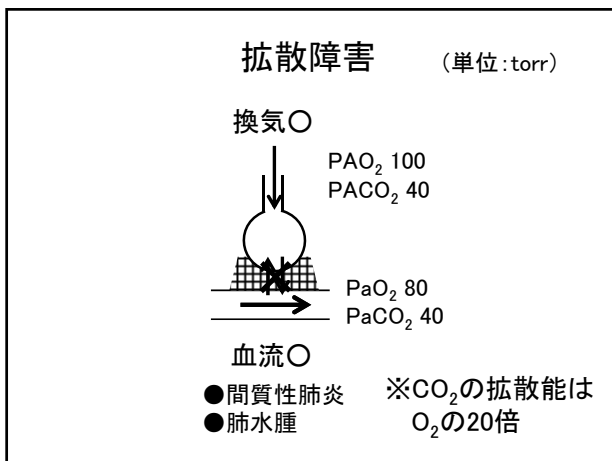
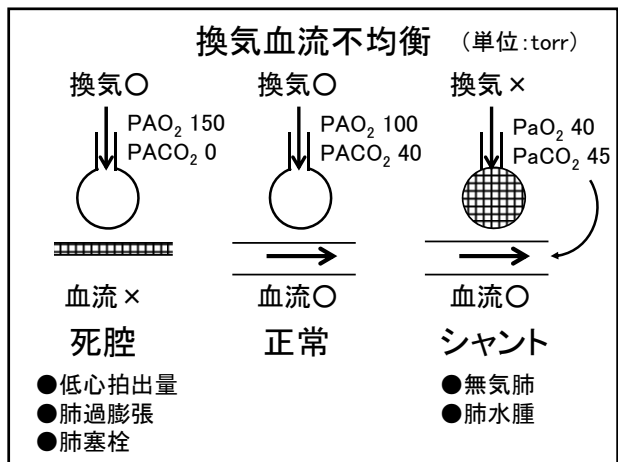
※患者吸気流速により変化  
リザーバーマスクは特に適切な密着が必要

O<sub>2</sub>を組織に届けるために必要な要素は？

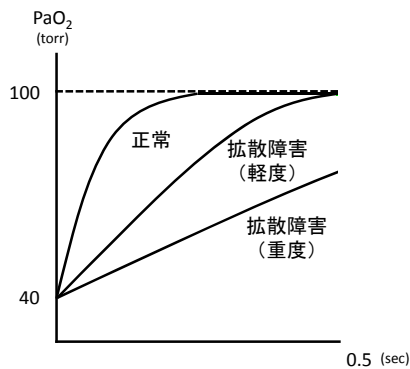
- ①肺胞内酸素濃度
- ②肺胞・血液ガス交換能
- ③酸素運搬能

肺胞・血液ガス交換能を規定するのは？

- 換気血流不均衡
  - ➡換気と血流のバランスが悪い
- 拡散障害
  - ➡酸素が肺から血液に移行しにくい
- 肺胞－血液接触時間
  - ➡酸素とHbが結合する時間が短い



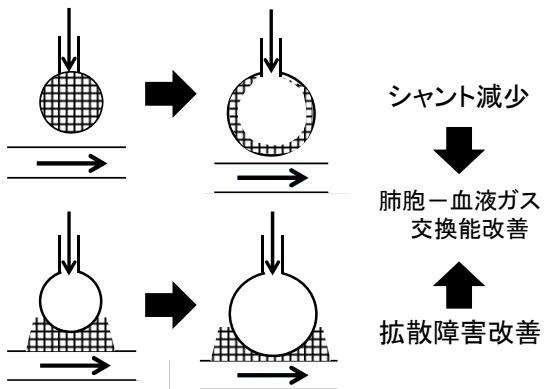
肺胞－血液接触時間(運動時)



肺胞・血液ガス交換能を改善するには？

- 換気血流不均衡
  - ➡ シヤントを減らす
- 拡散障害
  - ➡ 拡散能を改善する
- 肺胞－血液接触時間
  - ➡ 肺血流速度を低下させる

平均気道内圧を上げると・・・



肺胞気動脈血酸素分圧格差 (A-aDO<sub>2</sub>)

- 肺胞気酸素分圧 (PAO<sub>2</sub>) と 動脈血酸素分圧 (PaO<sub>2</sub>) の差
- ↓
- 肺胞・血液ガス交換能を反映  
※ 拡散障害、換気血流不均衡 etc
- $$A-aDO_2 = PAO_2 - PaO_2$$
- (正常値 ≤ 10 mmHg)

O<sub>2</sub>を組織に届けるために必要な要素は？

- ① 肺胞内酸素濃度
- ② 肺胞・血液ガス交換能
- ③ 酸素運搬能

酸素運搬能とは？

- 全身に酸素を供給する能力「循環」

酸素運搬能 (delivery oxygen : DO<sub>2</sub>)

$$= (1.34 \times Hb \times SaO_2 + 0.003 \times PaO_2) \times CO$$

Hb: ヘモグロビン濃度

SaO<sub>2</sub>: 動脈血酸素飽和度

CO: 心拍出量

PaO<sub>2</sub>: 動脈血酸素分圧

酸素運搬能力はどちらが良い？

PaO<sub>2</sub> 500 mmHg

PaO<sub>2</sub> 100 mmHg

答え：酸素運搬能力はほとんど同じ

PaO<sub>2</sub> 500 mmHg = SaO<sub>2</sub> 100%

PaO<sub>2</sub> 100 mmHg ≒ SaO<sub>2</sub> 100%

酸素運搬能(DO<sub>2</sub>)

= (1.34 × Hb × SaO<sub>2</sub> + 0.003 × PaO<sub>2</sub>) × CO

≒ 1.34 × Hb × SaO<sub>2</sub> × CO

「循環」においてPaO<sub>2</sub>はあまり意味がない

高濃度酸素は有害

酸素運搬能(「循環」)と酸素化

酸素運搬能(DO<sub>2</sub>)改善

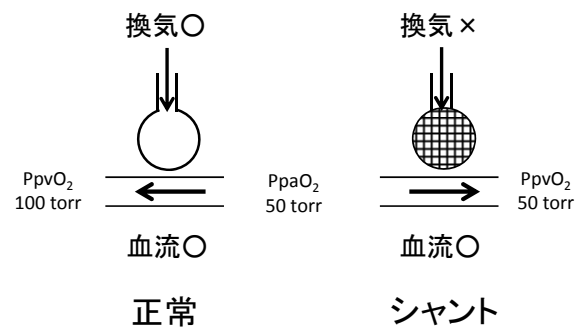


静脈血の酸素化(PvO<sub>2</sub>)改善

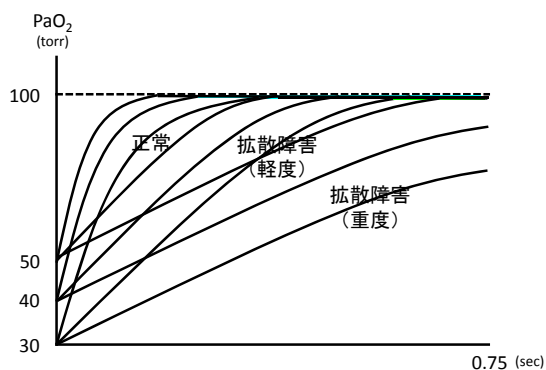


動脈血酸素化(PaO<sub>2</sub>)改善

シャントでの静脈血酸素分圧の意義



拡散障害での静脈血酸素分圧の意義



静脈血酸素分圧を上げるには？

静脈血酸素分圧 = 組織酸素需給バランス

① 需要を下げる

● 鎮静、鎮痛

● 体温低下

② 供給を上げる

● 酸素運搬能(DO<sub>2</sub>)改善

➡ Hb、SaO<sub>2</sub>、COを上げる



### 酸素化を良くするには？

#### ①肺胞内酸素濃度

- ◇吸入気酸素濃度 ➡  $FiO_2$ を上げる
- ◇酸素消費量 ➡ 鎮静、鎮痛、低体温
- ◇肺胞換気量 ➡ 換気量を増やす

#### ②肺胞・血液ガス交換能

- ◇換気血流不均衡 ➡ 平均気道内圧上昇
- ◇拡散障害

#### ③酸素運搬能

- ◇心拍出量 ➡ 心機能上昇、輸液
- ◇輸血 ➡ Hbを上げる
- ◇代謝抑制 ➡ 鎮静、鎮痛、低体温

### 人工呼吸管理 ～設定と指標と離脱と～

### 人は呼吸をなんのために行うのか？

酸素( $O_2$ )を取り込んで

二酸化炭素( $CO_2$ )を吐き出す

人工呼吸器はこれを代わりに行う

**PaO<sub>2</sub>、PaCO<sub>2</sub>を指標に  
人工呼吸器設定を決定**

### 人工呼吸器のモード

- CMV(continuous mandatory ventilation)  
: 持続強制換気=A/C (assist control)  
➡ 設定回数以上の呼吸も全て強制換気
- SIMV(Synchronized intermittent mandatory ventilation)  
: 同期式間欠的強制換気  
➡ 設定回数以上の呼吸は自発呼吸
- CSV(Continuous spontaneous ventilation)  
: 持続自発換気  
= CPAP (continuous positive airway pressure)  
➡ 全て自発呼吸

### 人工呼吸器で主に設定する項目

- 一回換気量 (TV: tidal volume)  
従量式 (VCV: volume control ventilation)  
従圧式 (PCV: pressure control ventilation)
- 換気回数 (VR: ventilation rate)
- 呼気終末陽圧 (PEEP: positive end-expiratory pressure)
- 圧支持 (PS: pressure support)
- 吸入気酸素濃度 ( $FiO_2$ : fraction of inspired oxygen)
- 吸気時間 (I:E比)

### 従量式換気

(VCV: volume control ventilation)

- 量を規定して換気
- 気道の状態に関わらず一回換気量保持
- 気道内圧が様々な環境の影響で変化  
⇒「コンプライアンス低下=気道内圧上昇」
- 吸気フローが一定のため、同調性が悪い

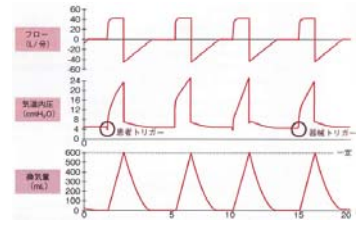
### 従圧式換気

(PCV: pressure control ventilation)

- 最高気道内圧を規定して換気
- 一回換気量は環境に影響され変化  
⇒「コンプライアンス低下＝換気量低下」
- 一回換気量が吸気時間により変化
- 吸気フローの自由度が高く、同調性が良い

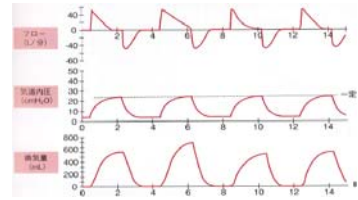
### VCV

フロー: 一定  
気道内圧: 変化  
換気量: 一律



### PCV

フロー: 変化  
気道内圧: 一定  
換気量: 変動



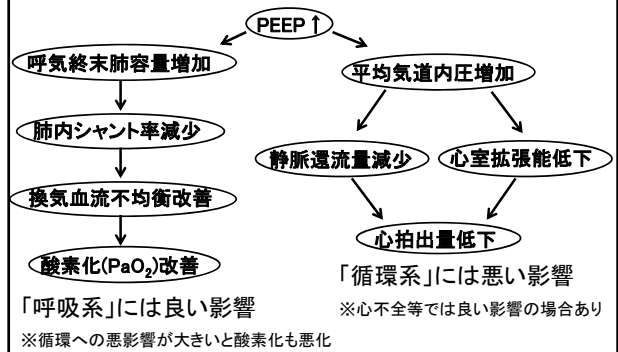
### 従量式か従圧式か？

換気量の確保か？同調性の良さか？

- 同調性が悪い＝深い鎮静・鎮痛必要  
⇒循環抑制、VAPリスク増加
- 換気量の確保が出来ない  
＝人工呼吸器使用の目的が達成できない  
⇒適切な観察、アラームの使用で対応
- PCVは・・・肺胞内圧上昇のリスク少ない  
VCVに比べ肺容量が均等に増加  
⇒病的肺に保護的、酸素化でメリット

### PEEP(呼気終末陽圧)とは

- 呼気終末に陽圧をかけ肺胞虚脱を防ぐ



### PS(圧支持)とは

- 自発呼吸に合わせ設定圧まで吸気補助換気方式

- 患者の吸気をトリガー
- 設定圧まで速やかに吸気流量増加
- 吸気流量低下(25%)⇒サポート終了

#### 特徴

- 患者自身が呼吸パターンを決定
- 同調性が非常に良い

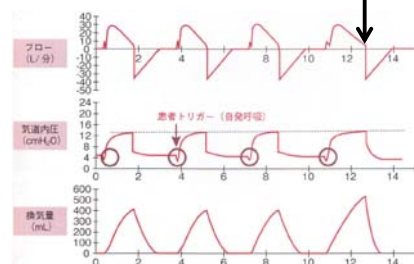
#### PSを上昇させると

- 一回換気量↑(+呼吸仕事量低下)

### PSの波形

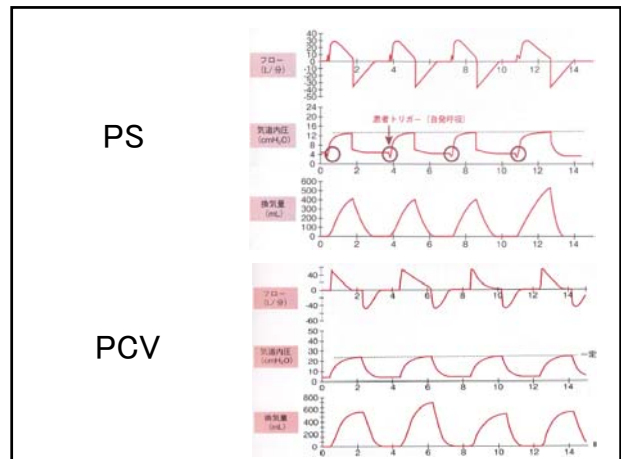
フロー: 変化  
気道内圧: 一定  
換気量: 変動

吸気流量低下(25%)でサポート終了



「羊土社:人工呼吸管理に強くなる」より

PSを上げたら換気量は増える？  
 PSは自発呼吸サポート ⇒自分の意志で呼吸  
 呼吸回数の律速因子は「PaCO<sub>2</sub>>PaO<sub>2</sub>」  
 ⇒どの程度CO<sub>2</sub>を吐き出したいか  
 ↓  
 PSを上げてCO<sub>2</sub>を出したい程度は変化なし  
 ⇒PSを上げてCO<sub>2</sub>の排出量は変化なし  
 ↓  
 PSを上げて分時換気量は増えない



PCVとPSの違い  
 PCV: 設定した吸気時間、肺に圧をかける  
 ⇒ 強制換気モード  
 PS: 吸気フロー低下すると、圧補助中止  
 ⇒ 自発呼吸モード  
 PS>PCV  
 患者の自由度高い ⇒同調性が良い  
 PCV>PS  
 平均気道内圧高い、仕事量少ない  
 ⇒酸素化が良い

吸気時間設定  
 一般的に0.7~1.2秒  
 吸気時間延長(呼気時間短縮)  
 PCV: 一回換気量増加  
 VCV: 最高気道内圧減少  
 ⇒拘束性障害○、閉塞性障害×  
 吸気時間短縮(呼気時間延長)  
 PCV: 一回換気量低下  
 VCV: 最高気道内圧上昇  
 ⇒拘束性障害×、閉塞性障害○

人工呼吸器の設定(換気と酸素化)  
 ●CO<sub>2</sub>の排出(換気)に関与するものは？  
 一回換気量(TV)、呼吸回数(RR)  
 ●O<sub>2</sub>の取込み(酸素化)に関与するものは？  
 吸入気酸素濃度(FiO<sub>2</sub>)、PEEP  
 平均気道内圧/肺容量(一回換気量)

各換気モードで設定する主な項目

	自発	TV	VR	PEEP	PS	FiO <sub>2</sub>	吸気時間
A/C	±	+	+	+	-	+	+
SIMV	±	+	+	+	+	+	+
CPAP	+	-	-	+	+	+	-

## A/Cとは？

### 換気方式

- 設定された換気回数の強制換気  
⇒ 自発呼吸があれば同期し強制換気
- 設定された回数以上の換気も強制換気

### 設定項目

- TV、VR、PEEP、FiO<sub>2</sub>、吸気時間

### 特徴

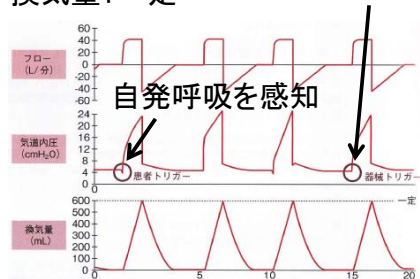
- 設定換気量を保持
- すべての呼吸が強制換気

## A/C (VC)の波形

フロー：一定

気道内圧：変化 自発呼吸がなければ

換気量：一定 勝手に強制換気



「羊土社：人工呼吸管理に強くなる」より

## SIMV (同期式間欠的強制換気)とは？

### 換気方式

- 設定された換気回数まで強制換気  
⇒ 自発呼吸があれば同期し強制換気
- 設定回数以上の換気は自発呼吸
- 自発呼吸は通常PSで補助

### 設定項目

- TV、VR、PS、PEEP、FiO<sub>2</sub>、吸気時間

### 特徴

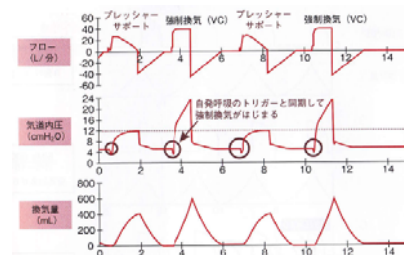
- 設定換気量を保持、それ以上は自由
- 強制換気と自発呼吸の中間

## SIMV (VC)の波形

フロー：変化 (自発呼吸時)、一定 (強制換気時)

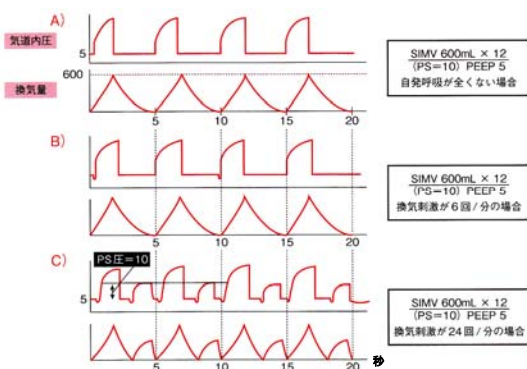
気道内圧：一定 (自発呼吸時)、変化 (強制換気時)

換気量：変動 (自発呼吸時)、一定 (強制換気時)



「羊土社：人工呼吸管理に強くなる」より

## SIMV: 自発呼吸回数による違い



## A/CとSIMV

### 共通点

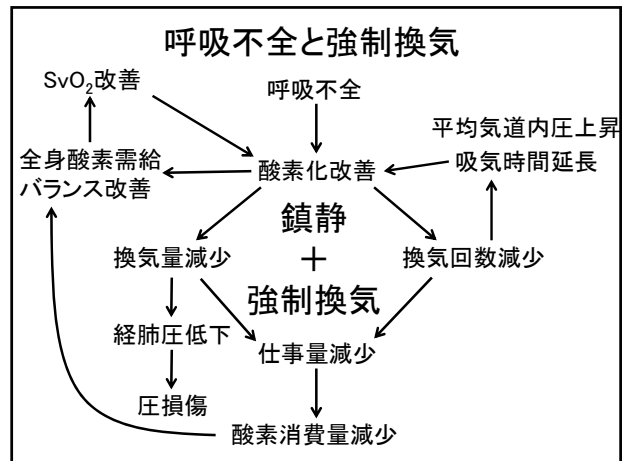
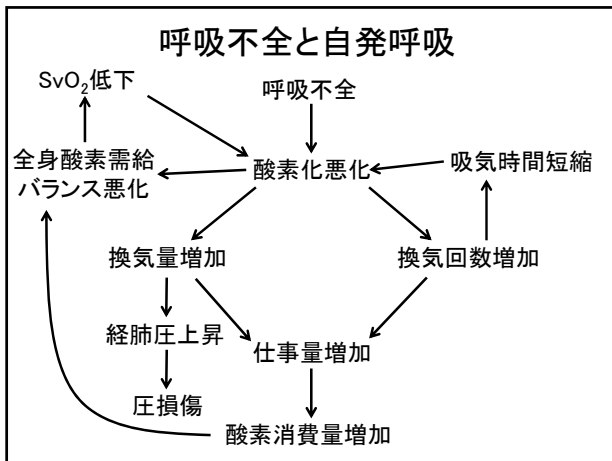
- 設定の分時換気量 (TV × VR) は保障
- 自発呼吸をトリガーに強制換気

### 異なる点

- A/Cでは設定回数以上もすべて強制換気
- SIMVでは設定回数以上は自発呼吸



違いは自発呼吸の有無



呼吸不全急性期はA/C? SIMV?  
重症呼吸不全では強制換気 > 自発呼吸

## A/C > SIMV

呼吸不全急性期を過ぎたらSIMV?  
CPAPへ移行可能

**↓**

SIMVを使う必要性はない  
※強制換気にはより深い鎮静が必要

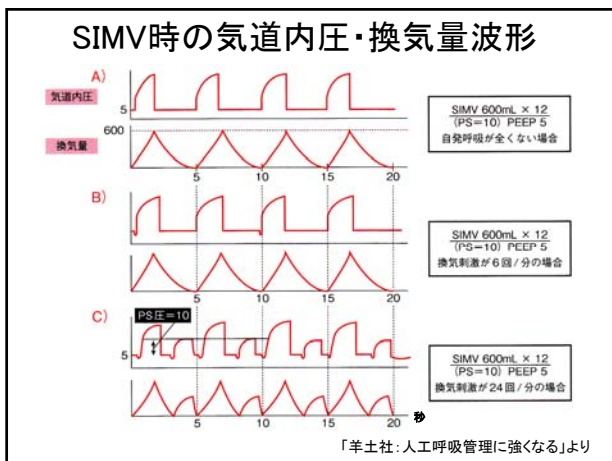
### どんな時にSIMV?

- 強制換気では同調性が悪くCPAPで管理中
- 鎮静等の影響で時々無呼吸出現
- 無呼吸アラームで看護師さんに呼ばれる (無呼吸アラームに気づかない危険性も)

⇒SIMVの換気回数を低めに設定

**↓**

完全な無呼吸を回避  
ほぼ自発呼吸で維持



### 初期換気設定時の目安

- TV 8~10 ml/kg (肺疾患 6~8 ml/kg)
- 普通の体重? ⇒「胸郭≒肺のサイズ」  
⇒身長で規定(予測体重)

**↓**

男  $50 + 0.91 \times [\text{身長(cm)} - 152.4]$   
女  $45.5 + 0.91 \times [\text{身長(cm)} - 152.4]$

※標準体重 = 身長(m)<sup>2</sup> × 22で代用

- RR 10~16 回/min
- 吸気時間 0.7~1.2 秒

### 分時換気量の調整(強制換気)

分時換気量は何を目安に調整?  $\Rightarrow$  PaCO<sub>2</sub>  
 PaCO<sub>2</sub>はどれくらいに調整?  $\Rightarrow$  40 $\pm$ 5 mmHg  
 PaCO<sub>2</sub>が上昇して何が問題?  
 $\Rightarrow$  呼吸性アシドーシス $\Rightarrow$  酸血症  
 酸血症は何が問題?  $\Rightarrow$  pH < 7.2  $\Rightarrow$  循環不全



換気量はpHを意識して調整

### 分時換気量の調整(例外)

分時換気量の調整は基本「pH > PaCO<sub>2</sub>」  
 PaCO<sub>2</sub>が上昇すると...  
 脳血管拡張  $\Rightarrow$  脳圧亢進  $\Rightarrow$  頭蓋内圧亢進症  
 肺血管収縮  $\Rightarrow$  右心負荷  $\Rightarrow$  肺高血圧、心不全  
 PaCO<sub>2</sub>が低下すると...  
 冠動脈収縮  $\Rightarrow$  冠動脈血流低下  $\Rightarrow$  冠動脈疾患  
 脳血管収縮  $\Rightarrow$  脳血流低下  $\Rightarrow$  もやもや病

### 一回換気量or回数?

一回換気量  $\uparrow$  ( $\equiv$  気道内圧  $\uparrow$ )  
 $\Rightarrow$  コンプライアンス低下、VCV etcで注意  
 呼吸回数  $\uparrow$  ( $\equiv$  呼気時間  $\downarrow$ 、吸気時間  $\downarrow$ )  
 $\Rightarrow$  閉塞性障害、PCV etcで注意



気道内圧や呼出障害etcの有無で調整

- ※気道内圧が高いと...
- 肺、気道の圧損傷  
 $\Rightarrow$  ARDSでは肺胞内圧 < 30 cmH<sub>2</sub>O 推奨
  - 同調性不良

TV 500 ml  $\times$  RR 12

= TV 600 ml  $\times$  RR 10

(一回換気量: TV、呼吸回数: RR)

### 基本構造(気道と肺胞)



引用: MEDSI社「ウエスト呼吸生理学入門」より

### 分時換気量と肺胞換気量

鼻・口 $\sim$ 気管 $\sim$ 終末細気管支

- ガス交換に関与しない部位

➡ 解剖学的死腔(健常人: 約150 ml)

呼吸細気管支 $\sim$ 肺胞管、肺胞

- ガス交換に関与する部位

➡ 肺胞換気

肺胞換気量 = 一回換気量 - 死腔換気量

TV 500 ml × RR 12  
= TV600 ml × RR 10

分時肺胞換気量は？

TV 500 × RR 12 ➡ 350 × 12 = 4200

TV 600 × RR 10 ➡ 450 × 10 = 4500

※死腔換気量 150 mlとすると

解剖学的死腔 生理学的死腔

※生理学的死腔は肺疾患で増大

### CPAPとは？

● 持続的気道内陽圧(吸気も呼気も)

設定項目 PS、PEEP、FiO<sub>2</sub>

特徴

● 自発呼吸モード = 同調性が良い

● 分時換気量は調節不能

● 通常PSを併用する

※PSとCPAPは異なる自発呼吸換気モード

⇒ 実際の臨床ではCPAP+PSで使用

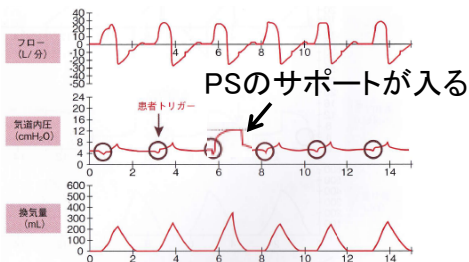
⇒ 「CPAP」として表現されることが多い

### CPAPの波形

フロー: 変化

気道内圧: 一定

換気量: 変化



### SaO<sub>2</sub> 90%はやばい！！……？

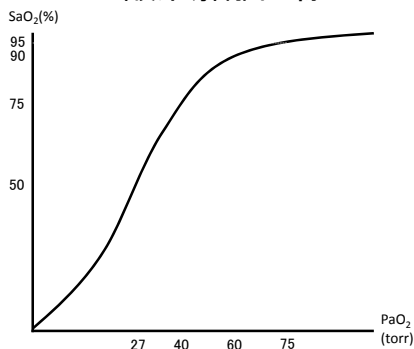
呼吸の最終目標は「組織が必要な酸素を得る」  
⇒ 需要と供給のバランスが取れる

酸素運搬能 = (1.34 × Hb × SaO<sub>2</sub> + 0.003 × PaO<sub>2</sub>) × CO

	Hb(g/dl)	SaO <sub>2</sub> (%)	CO(L/min)	運搬能(%)
ふつう	10	100	5	100
少し貧血	9	100	5	90
貧血	7	100	4	56
低酸素	10	90	5	90
超低酸素	12	80	6	115

※ただし、同じ10%の低下も「SaO<sub>2</sub>」と「Hb、CO」で  
組織にとっての意義は異なる

### Hb酸素解離曲線



SaO<sub>2</sub> < 90%では急激に低下するため危険

### SpO<sub>2</sub>/PaO<sub>2</sub>の目標値は？

① SpO<sub>2</sub> = 100% ➡ モニタリング価値なし  
⇒ PaO<sub>2</sub> ≥ 100 torr

② SpO<sub>2</sub> ≤ 90% ➡ 急激なSpO<sub>2</sub>低下リスク

● 酸素化の改善、増悪を検知可能

● 急激な酸素運搬能悪化リスク少



SpO<sub>2</sub> ≒ 95% (PaO<sub>2</sub> ≒ 75 torr)

### 人工呼吸中の酸素化の指標

FiO<sub>2</sub>変更=PaO<sub>2</sub>変化

⇒ PaO<sub>2</sub>で酸素化改善、増悪を評価不能



PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> (P/F) 比

FiO<sub>2</sub> 0.8 : PaO<sub>2</sub> 120 mmHg

➡ P/F = 120/0.8 = 150

FiO<sub>2</sub> 0.5 : PaO<sub>2</sub> 85 mmHg

➡ P/F = 85/0.5 = 170

ARDS : P/F ≤ 300 (PEEP ≥ 5 cmH<sub>2</sub>O)

※「酸素化」の指標で肺の状態評価ではない

### 人工呼吸器離脱①

●酸素はどのくらいならOK?

酸素需給バランスが取れる酸素飽和度!

実際は・・・SaO<sub>2</sub> ≒ 95% (PaO<sub>2</sub> 75 mmHg)

●フェイスマスクで作れる酸素濃度は?

O<sub>2</sub> 5~7 L/min ≒ FiO<sub>2</sub> 0.4~0.6



PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> = 75/0.4 = 187 ≒ 200

### 人工呼吸器離脱②

●二酸化炭素はどのくらいならOK?

CO<sub>2</sub>の調整=酸塩基平衡の調整!

生体に影響の出ないpH維持が重要



pH > 7.2

### 人工呼吸器離脱③

●PEEPを 0 cmH<sub>2</sub>Oにする必要は?

発声、咳嗽時に声門が閉じることで  
自ら気道に陽圧をかけている!

気管挿管時は声門閉鎖不能



生理的状态に近づける程度のPEEPは可  
※生理的PEEPは存在しない

### 人工呼吸器離脱④

●PSを 0 cmH<sub>2</sub>Oにする必要は?

挿管チューブは気道(気管)より細い、狭い!

気管挿管時は気道抵抗が高い



気道抵抗を補う圧補助を残して良い

※チューブサイズ次第で高い圧補助も可

### 抜管基準

●CPAPモード (PEEP 5 cmH<sub>2</sub>O、PS 5 cmH<sub>2</sub>O)

●P/F ≥ 200 = PaO<sub>2</sub> 80mmHg / FiO<sub>2</sub> 0.4

●RR ≤ 25 回/分

●TV ≥ 6 ml/kg (標準体重)

●pH ≥ 7.25

●重度の呼吸苦がない(副呼吸筋使用の有無)

●循環動態の安定(昇圧薬使用中でもOK)

●意識状態(指示に従えるか? 気道確保可能か?)

●咳嗽反射の有無(痰を喀出可能か?)

●気道狭窄の有無(咽喉頭浮腫等)



## SBT (Spontaneous breathing trial)

### 開始基準

- $FiO_2 \leq 0.4$ 、 $PEEP \leq 8$  cmH<sub>2</sub>O
- PEEP、 $FiO_2$ が前日より改善
- 自発呼吸が十分か
- 昇圧薬を使用せずにSBP  $\geq 90$  mmHg

### 方法

- $FiO_2 \leq 0.5$ でTピース or CPAP  $\leq 5$  cmH<sub>2</sub>O (PS  $\leq 5$  cmH<sub>2</sub>O)
- この設定で成功基準を30分~2時間評価

### 成功基準

- $SpO_2 \geq 90\%$ かつまたは $PaO_2 \geq 60$ mmHg
- 自発呼吸一回換気量  $\geq 4$ ml/kg (予測体重)
- 呼吸回数  $\leq 35$ 回/分
- pH  $\geq 7.3$
- 以下の兆候がない  
HRが基準の120%以上  
重度の副呼吸筋使用、奇異性腹筋使用  
冷汗、重度の呼吸苦

ARDSネットワーク

## SBTは意味がある？

目的「人工呼吸離脱」、SBT「手段」



目的が達成できればSBTは必要ない

人工呼吸器管理に熟知した医師が  
管理していれば不要

※人工呼吸器離脱の判断が出来ない

➡ 1回/日のSBTは呼吸器離脱を促進  
不要な人工呼吸器期間短縮

## まとめ①

まず強制換気(A/C or SIMV)で開始

強制換気の設定は・・・

- 従量式(同調性悪ければ従圧式へ)
- TV、RRを設定(TV 8~10 ml/kg、RR 10~16 回/min)  
⇒ 最高気道内圧(<30 cmH<sub>2</sub>O)を目安
- 分時換気量の設定⇒ $PaCO_2$ (40±5 mmHg)を目安
- PEEP(5~10 cmH<sub>2</sub>O)、 $FiO_2$ ⇒酸素化、循環動態を目安
- PS(10 cmH<sub>2</sub>O) ※SIMVの場合
- 吸気時間 1.0秒

## まとめ①(今回の内容を理解した場合)

まず強制換気(A/C>SIMV)で開始

強制換気の設定は・・・

- 従圧式>従量式
- TV、RRを設定  
(TV 8~10 ml/kg(標準体重)、RR 10~16 回/min)  
⇒ 肺胞内圧(<30 cmH<sub>2</sub>O)を目安に調整
- 分時換気量の設定⇒ $PaCO_2$ (pH)を目安に調整
- PEEP(5~15 cmH<sub>2</sub>O)、 $FiO_2$ ⇒酸素化、循環動態
- PS(5~20 cmH<sub>2</sub>O) ⇒ 自発呼吸の回数(SIMVの場合)
- 吸気時間0.7~1.2秒⇒肺の病態や同調性を目安に調整

## まとめ②

自発呼吸出現(同調性不良、呼吸状態改善)  
⇒ CPAPへ変更

CPAPの設定は・・・

- $FiO_2$ 、PEEP⇒酸素化、循環動態
- PS(5~20 cmH<sub>2</sub>O)  
⇒ TV(>6 ml/kg)、RR(<25 回/min)を目安

CPAPモード(PEEP 5 cmH<sub>2</sub>O、PS 5 cmH<sub>2</sub>O)  
P/F( $PaO_2$ / $FiO_2$ ) > 200  
 $PaCO_2$ 適正 = 40±5 mmHg  
その他: 循環、意識、咳嗽、気道確保  
⇒ 人工呼吸器離脱

## まとめ②(今回の内容を理解した場合)

自発呼吸出現(同調性不良、呼吸状態改善)  
⇒ CPAPへ変更

CPAPの設定は・・・

- $FiO_2$ 、PEEP⇒酸素化、循環動態
- PS(5~20 cmH<sub>2</sub>O)  
⇒ TV(>6 ml/kg)、RR(<25 回/min)を目安  
※ $PaCO_2$ (pH)のコントロールは出来ない

CPAPモード(PEEP 5 cmH<sub>2</sub>O、PS 5 cmH<sub>2</sub>O)  
P/F>200  
 $PaCO_2$ 適正 ≒ pH > 7.25~7.3  
その他: 循環、意識、咳嗽、気道確保  
⇒ 人工呼吸器離脱

## 人工呼吸管理における 適切な鎮静・鎮痛の意義

- 呼吸仕事量の軽減⇒酸素需要の減少⇒酸素化改善
- 心拍数低下⇒肺胞-血液接触時間延長⇒酸素化改善
- 同調性改善⇒酸素化改善、肺・気道の圧損傷回避
- ストレス軽減⇒循環動態改善、高血糖や尿量低下改善

### 鎮静・鎮痛のデメリット

- 人工呼吸器関連肺炎リスク増加
- 呼吸筋委縮、廃用性症候群
- 循環抑制、尿量低下、腸管機能低下

## 鎮静スケール(RASS: Richmond Agitation-Sedation Scale)

- +4 明らかに闘争的であり、暴力的; スタッフへの危険が差し迫っている
- +3 チューブ、カテーテルを引っ張ったり抜いたりする。または、スタッフに対して攻撃的な行動がみられる
- +2 頻繁に目的の無い動きがみられる、または人工呼吸器との非同調がみられる
- +1 不安や恐れが存在するが、動きは攻撃的であったり活発であったりはしない
- 0 完全に覚醒はしていないが、10秒を超えて覚醒し、声に対し目を合わせることができる
- 1 短時間(10秒に満たない)覚醒し声に対し目を合わせることができる
- 2 声に対してなんらかの動きがある(しかし、目を合わせることができない)
- 3 声に対し動きはみられないが、身体刺激で動きが見られる
- 4 声、身体刺激で反応は見られない

## 「自発呼吸」は「出る」ではなく「出す」

- 自発呼吸下での換気量はPaCO<sub>2</sub>に依存
- 深い鎮静では呼吸閾値(PaCO<sub>2</sub>)上昇
- 強制換気でPaCO<sub>2</sub>正常値を維持  
⇒自発呼吸なし
- 人工呼吸期間延長  
⇒廃用性症候群、VAP発生etc



PaCO<sub>2</sub>を意識した人工呼吸器設定  
適切な鎮静コントロールが重要

## 触れないけど大事なこと

- 具体的な鎮静、鎮痛管理
- 循環管理
- 詳しい呼吸生理
- トリガー感度、吸気フロー等
- 呼吸筋疲労、リハビリ、栄養
- 各病態に合わせた人工呼吸器調節(肺保護換気)
- 人工呼吸器関連感染症
- Auto-PEEP
- 酸素需給バランス
- アラームの設定
- 気道内圧(プラトー圧、ピーク圧、経肺圧)
- 減らすのor増やすのはPEEPかFiO<sub>2</sub>か?(酸素毒性)
- グラフィックモニターの見方
- 喉頭浮腫(カフリークテストetc) などなど(順不同)

## 注意

- 呼吸不全で「自発呼吸>強制換気」の状況あり  
※「自発呼吸⇒強制換気」で酸素化悪化あり
- PS上昇で分時換気量が増加することもある
- SIMVが絶対的にダメなわけではない
- 「換気量増加 ≠ 酸素化改善」だが無関係ではない
- 「P/F<200=抜管できない」ではない
- 自発呼吸と強制換気では「TV×RR」が同じでも換気効率が異なるためPaCO<sub>2</sub>は同じではない

## 最後に

- 手段が目的にはなりません
- 「やり方の順守」ではなく「目的の達成」が重要
- どんなやり方、手段も必ずメリット・デメリットが存在する
- マニュアルやガイドラインを知ることは非常に大事だが所詮「多数にとって正しいもの」でしかない
- やり方に囚われず、選んだ手段のメリット・デメリットを考慮しながら、患者状況に合わせた最適な管理を考えられる医師になりましょう

人工呼吸管理で困ったら  
ICU (or 麻酔科)に相談を