

JSEPTIC CE教材シリーズ  
対象:レベル1  
ICUで働く新人CE(1~3年目程度)

# 人工呼吸の生理学および適応

# もくじ

## 第1章 呼吸生理学

- 1-1 気道の構造と機能
- 1-2 呼吸不全の概念
- 1-3 低酸素血症の原因
- 1-4  $\text{PaO}_2, \text{SaO}_2$ の関係

## 第2章 人工呼吸の適応

- 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い
- 2-2 陽圧換気の生体への影響
- 2-3 気管挿管の目的
- 2-4 人工呼吸の目的

# 第1章 呼吸生理学

## 第1章の到達目標

- 気道の構造と機能が説明できる
- ガス交換の生理が説明できる
- 低酸素血症の原因が説明できる

# 1-1 気道の構造と機能 (1)

- 呼吸器系を大きく分けると、ガスの通り道である気道（鼻腔・口腔から呼吸細気管支まで）と、実際にガス交換という呼吸そのものを行っている肺胞に分けられる。

# 1-1 気道の構造と機能 (2)

## 呼吸器の解剖

- 上気道
  - 鼻腔
    - 全気道抵抗の50 %
    - 加湿機能
  - 口腔
  - 咽頭
- 下気道
  - 喉頭
  - 気管
  - 気管支
  - 細気管支
  - 終末細気管支
  - 呼吸細気管支
  - 肺胞管
  - 肺胞

# 1-1 気道の構造と機能 (3)

## 気道の最も狭いところ

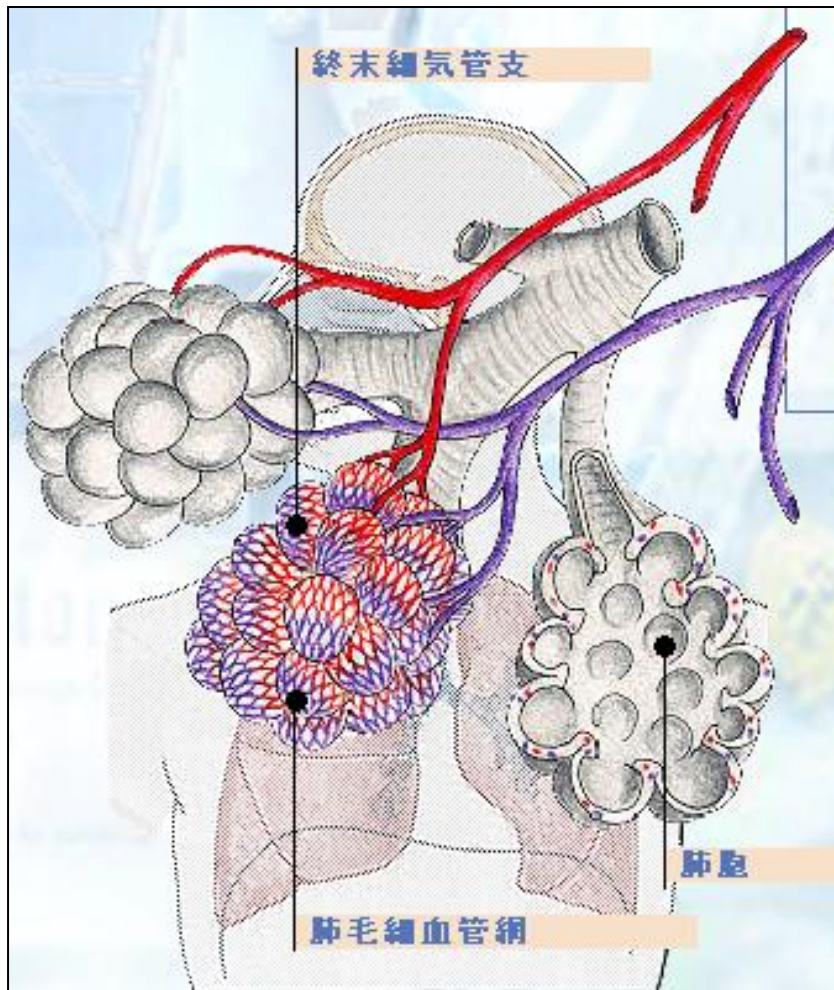
- 成人：声門部
- 小児：輪状軟骨

# 1-1 気道の構造と機能 (4)



- 鼻腔・口腔から声門までが上気道、声門以下が下気道である。
- 下気道は肺胞に至るまで23回の分岐がある。
- 気管から16分岐付近の終末細気管支までは輪状軟骨がある。
- 17分岐以下の呼吸細気管支ではこの軟骨はなくなりガス交換に関与する。

# 1-1 気道の構造と機能 (5)



- 肺胞は径0.1～0.2mmの囊状構造を呈し、断面で見ると蜂の巣状に並んでいる。その数は約3億個である。
- 成人肺の肺胞表面積は $143 \pm 12\text{m}^2$ 、毛細血管の表面積は $126 \pm 12\text{m}^2$ である。



# 1-2 呼吸不全の概念 (1)

## 呼吸とは

生体は必要なエネルギーを、栄養素の酸素より得ている。そのため、外界から酸素を取り込み、代謝産物である炭酸ガスを外界へ放出する。

この一連の過程のことをいう

# 1-2 呼吸不全の概念 (2)

## 診断基準

- ① 室内気吸入時の動脈血 $O_2$ 分圧が60mmHg以下となる呼吸障害またはそれに相当する呼吸障害を呈する異常状態を呼吸不全と診断する。
- ② 呼吸不全の型を2型に分け、動脈血 $CO_2$ 分圧が45mmHgを超えないものをⅠ型呼吸不全、動脈血 $CO_2$ 分圧が45mmHgを超えて異常な高値を呈するものをⅡ型呼吸不全という。
- ③ 慢性呼吸不全とは呼吸不全の状態が少なくとも1ヶ月間持続するものをいう。

# 1-2 呼吸不全の概念 (3)

## 呼吸不全の型

### I 型呼吸不全 (低酸素血症)

PaCO<sub>2</sub>が45mmHg以下のもの

O<sub>2</sub>の取り込みだけが障害

### II 型呼吸不全 (低酸素血症・高炭酸ガス血症)

PaCO<sub>2</sub>が45mmHgを超えるもの

O<sub>2</sub>の取り込みとCO<sub>2</sub>排泄も  
両方が障害

正常値	PaCO <sub>2</sub> = 40 ± 5 (mmHg)
-----	-----------------------------------

# 1-2 呼吸不全の概念 (4)

## 急性か？慢性か？

- 急性呼吸不全

呼吸不全の状態が1ヶ月未満

だいたいⅠ型が多い

- 慢性呼吸不全

呼吸不全の状態が少なくとも1ヶ月  
持続するもの

だいたいⅡ型が多い

## 1-3 低酸素血症の原因 (1)

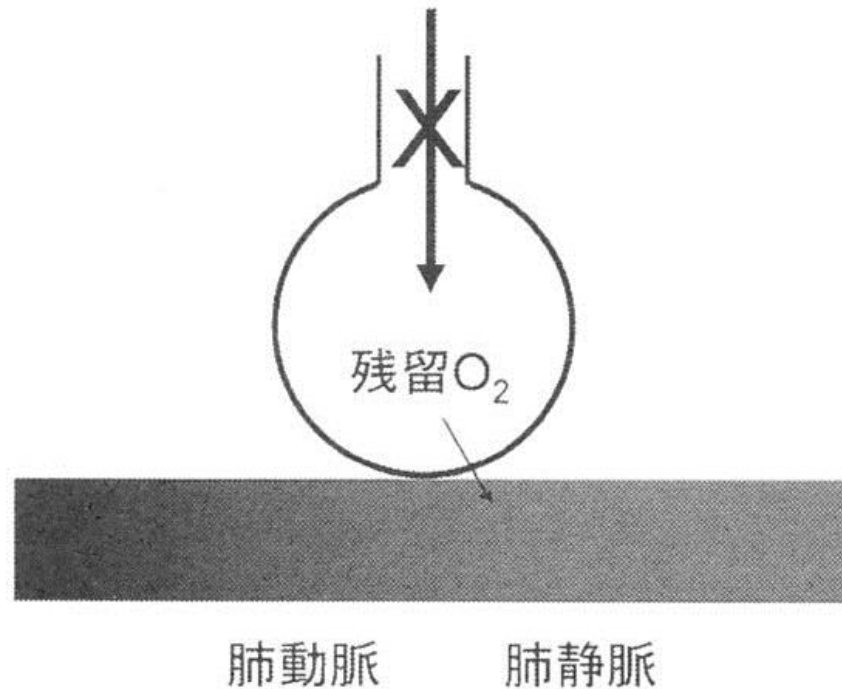
- ◆ 肺胞低換気
- ◆ 換気-血流比不均衡
- ◆ シヤント
- ◆ 拡散障害

動脈血酸素分圧: PaO<sub>2</sub>

正常値は90～95mmHg

# 1-3 低酸素血症の原因 (2)

## 肺胞低換気



呼吸中枢機能低下、胸郭・横隔膜損傷、分泌物貯留などで換気量が減少し、CO<sub>2</sub>が肺静脈血・動脈血に蓄積

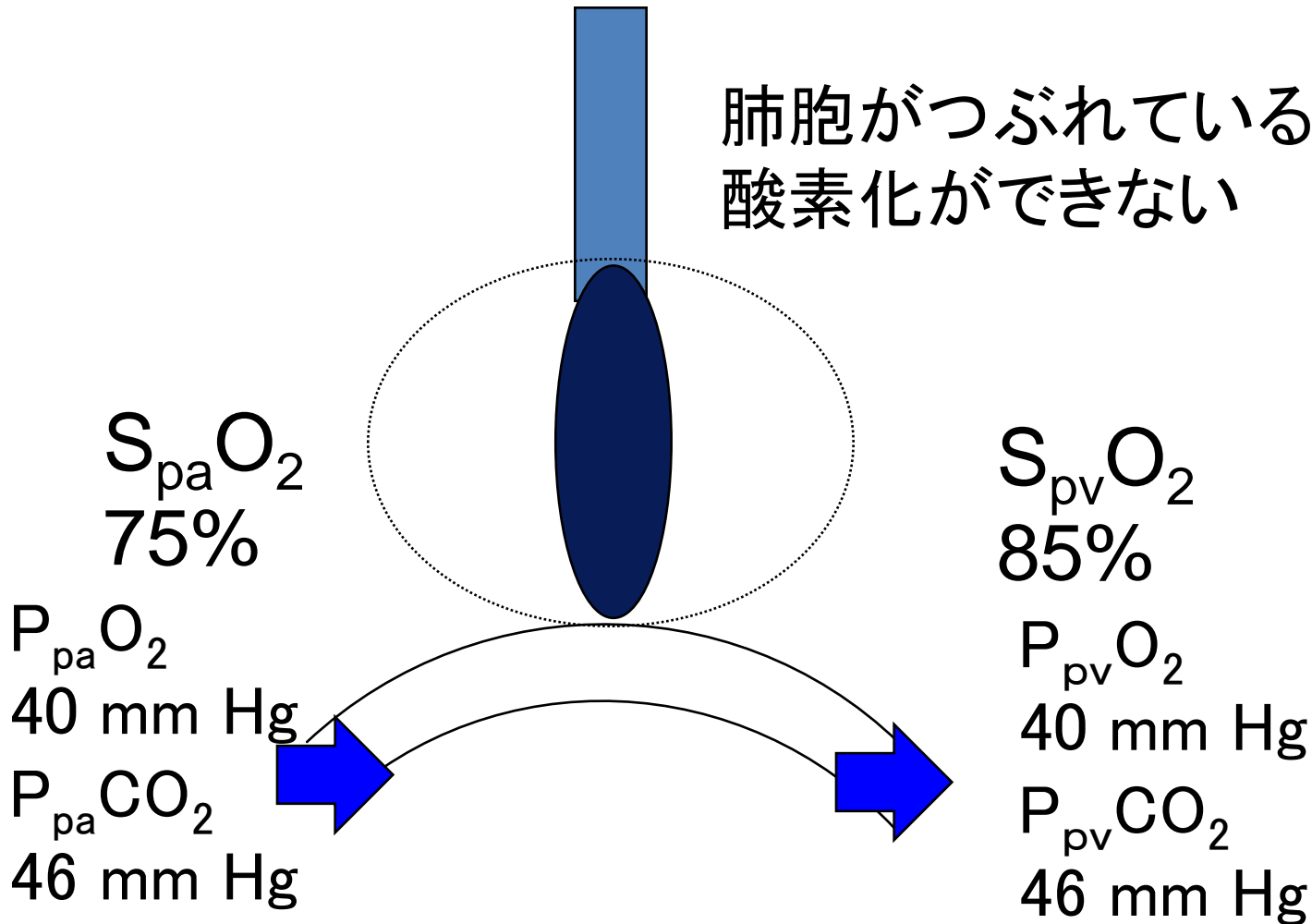
$$\text{PaCO}_2 \text{ 上昇 } \uparrow \Rightarrow \text{PaO}_2 \text{ 低下 } \downarrow$$

PaCO<sub>2</sub> × 肺胞換気量 ÷ 一定

# 1-3 低酸素血症の原因 (2)

## 肺胞低換気

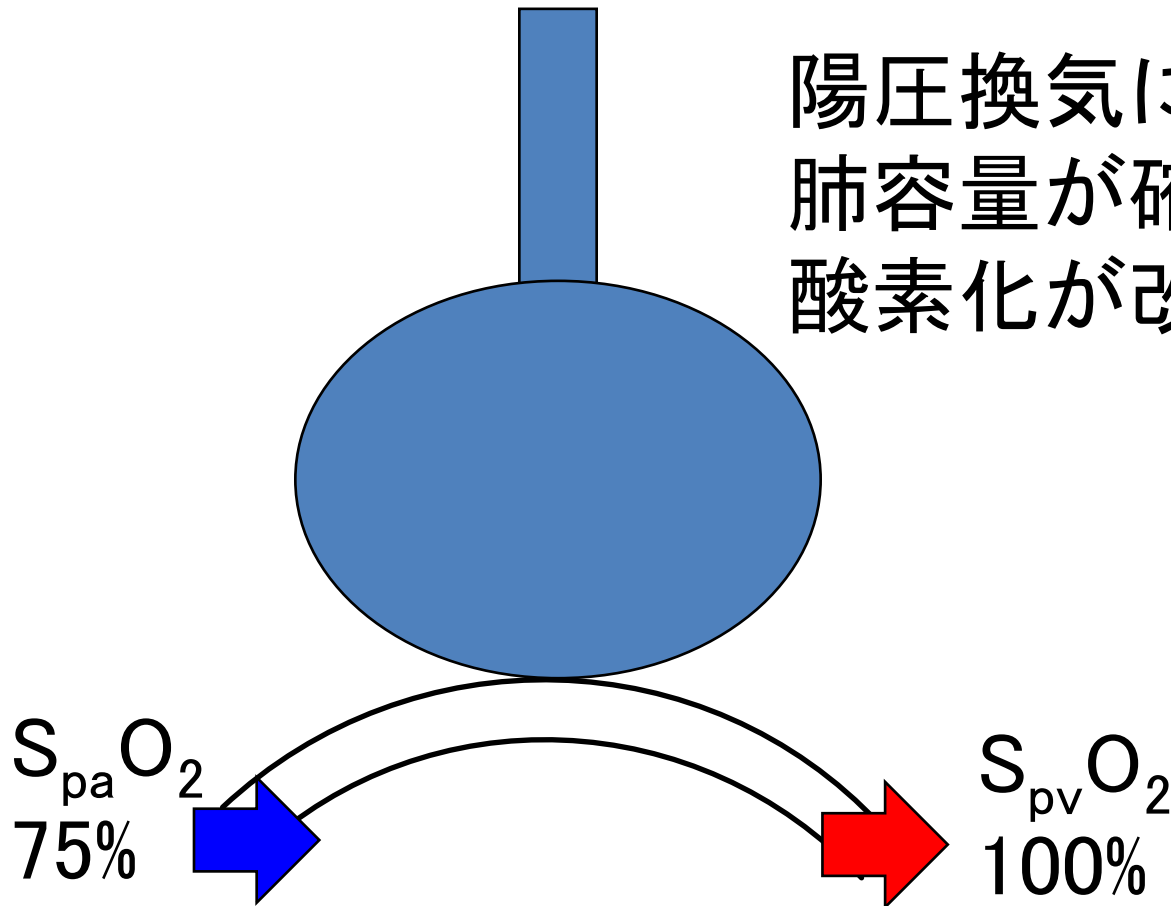
肺胞がつぶれているとガス交換・酸素化ができない



# 1-3 低酸素血症の原因 (2)

## 肺胞低換気

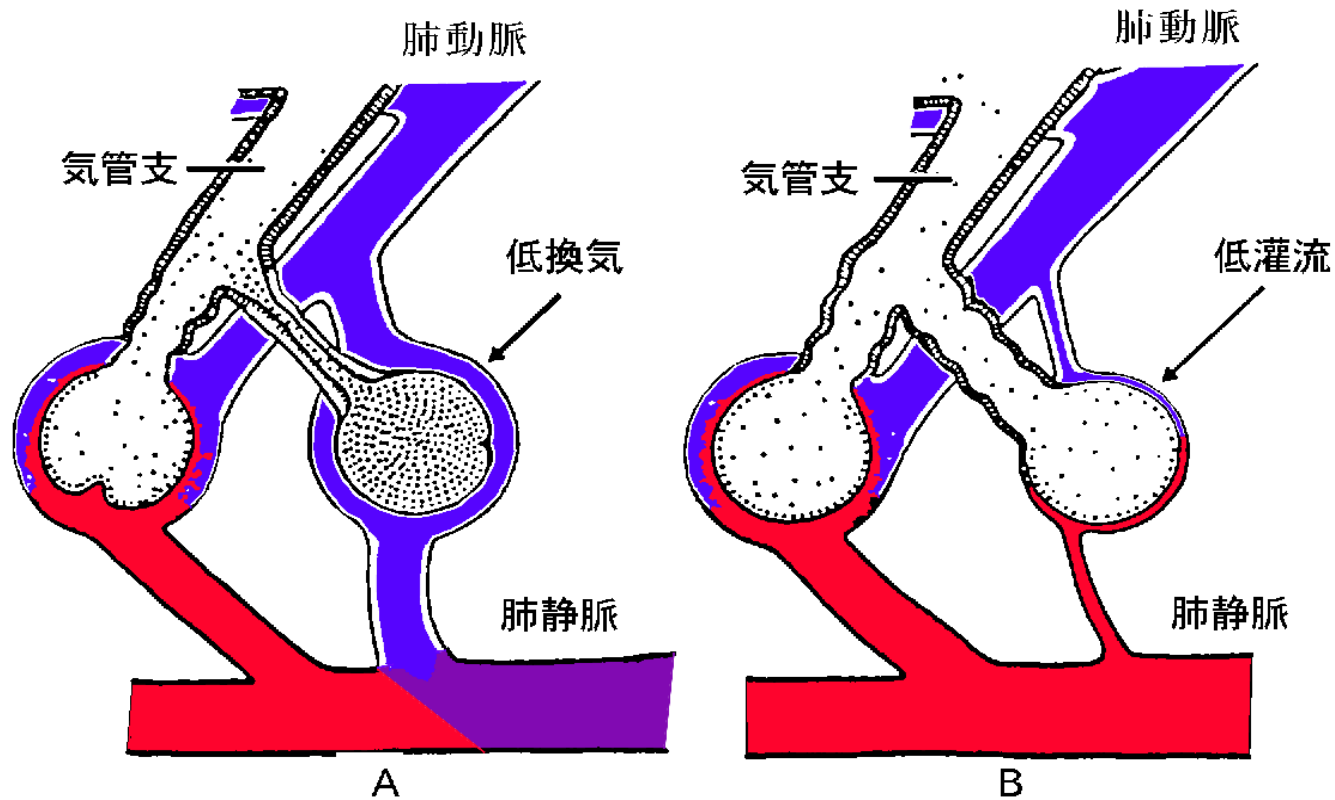
陽圧換気によって  
肺容量が確保できると  
酸素化が改善する





# 1-3 低酸素血症の原因 (3)

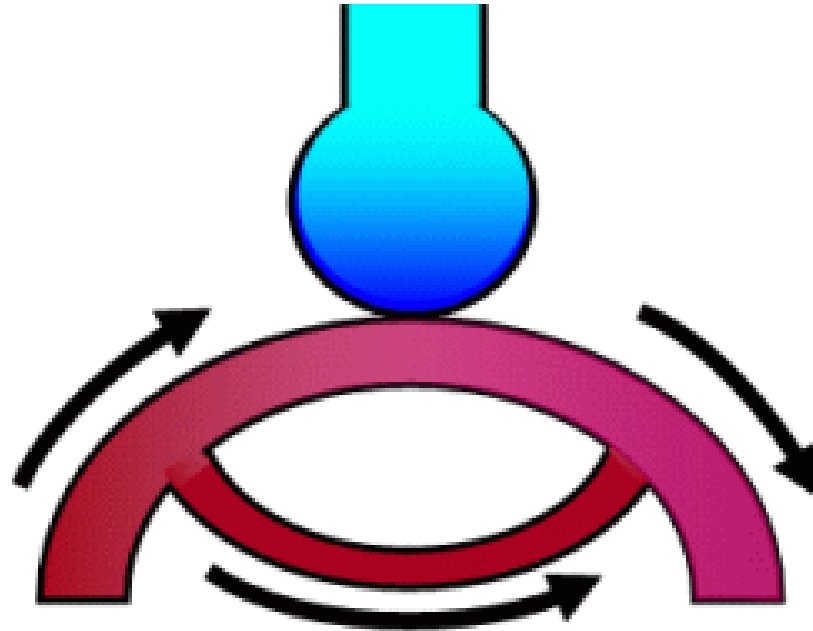
## 換気-血流比の不均衡



下側肺障害など肺胞の換気量とそこへ流れ込む  
血流の不均衡

# 1-3 低酸素血症の原因 (4)

シャント



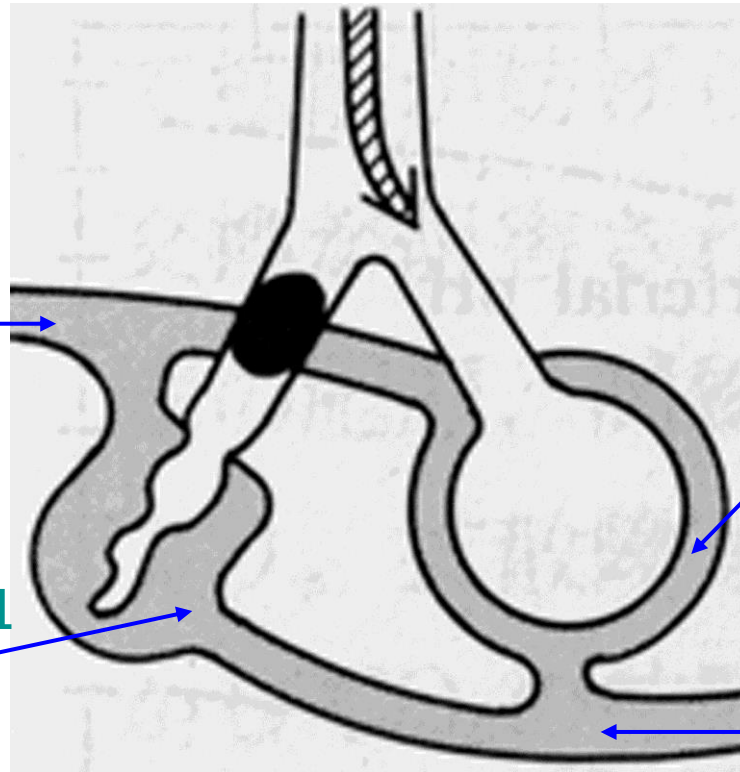
短絡(シャント)

肺炎、無気肺、解剖学的シャント

肺動脈が肺胞でのガス交換を受けずにそのまま左心系に流入すること

# 1-3 低酸素血症の原因 (4)

## シャント



静脈血  
SpO<sub>2</sub>  
50%

換気された静脈血  
SpO<sub>2</sub> 100%

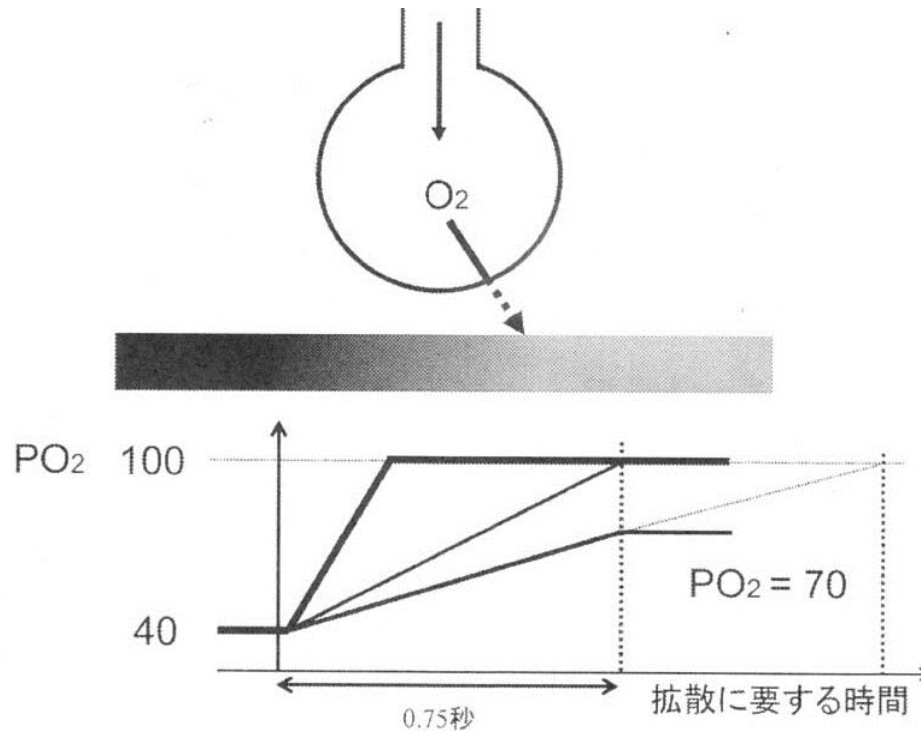
換気されない静脈血  
SpO<sub>2</sub> 50%

混合した動脈血  
SpO<sub>2</sub> 75%

- PaO<sub>2</sub>は低下
- PaCO<sub>2</sub>は変化しない
- 酸素投与により改善できない

# 1-3 低酸素血症の原因 (5)

## 拡散障害

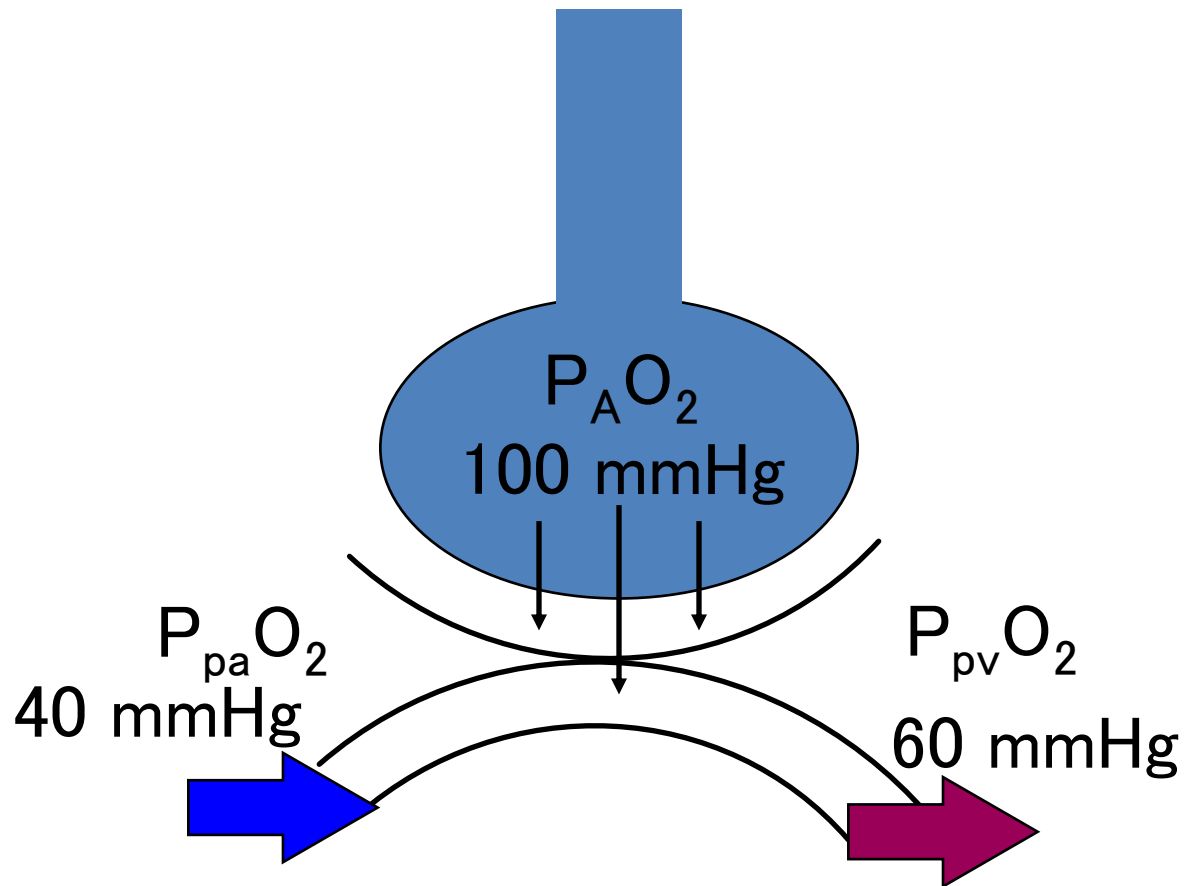


肺線維症や肺水腫、間質性肺炎など肺胞膜が肥厚したり、血管と肺胞の間に隙間が空きガス交換が障害される。

- 酸素の拡散時間:成人では安静時に0.25秒
- $CO_2$ は $O_2$ に比べ約20倍速く拡散

# 1-3 低酸素血症の原因 (5)

## 拡散障害

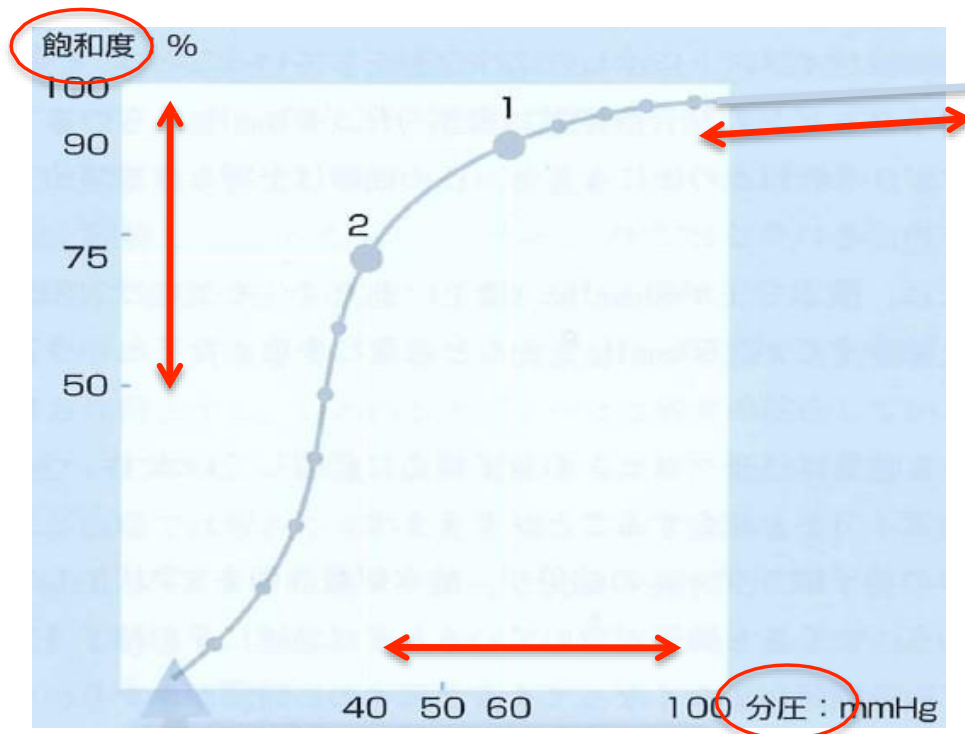


# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の關係 (1)

PaO <sub>2</sub> (mmHg)	SaO <sub>2</sub> (%)	
97	97	正常若年成人
70	93	正常下限
60	90	呼吸不全、軽症
50	85	呼吸不全、入院
40	75	呼吸不全、重症
30	60	意識喪失

# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の関係 (2)

## 酸素解離曲線

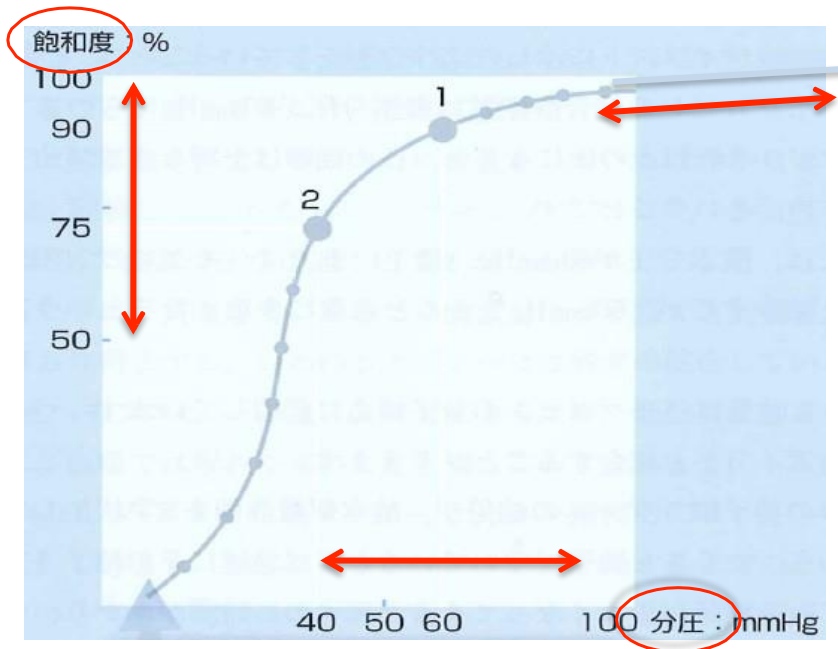


- PO<sub>2</sub>が60mmHgを割ると急激にSO<sub>2</sub>がさがる

マジックナンバー : SpO<sub>2</sub> 90%・PaO<sub>2</sub> 60mmHg

# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の関係 (2)

## 酸素解離曲線



低酸素血症

➡ 酸素投与

➡ SO<sub>2</sub>改善

-低酸素血症の対症療法

-根本原因が治っていない

酸素投与は低酸素血症をわかりにくくする



# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の関係 (3)

## 酸素化能の指標

### 肺酸素化効率の指標

肺胞気-動脈血酸素分圧較差 (A-aDO<sub>2</sub>)

F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>次第で正常値が変化する。

室内空気: 5~15mmHg

100%吸入: >100mmHg

### 簡便な指標

PaO<sub>2</sub>/F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>が反映されない

<300で高度ガス交換障害

# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の関係 (4)

## 血液による酸素運搬

Hb=15g/dl  
SaO<sub>2</sub>=100%  
PaO<sub>2</sub>=100mmhgのとき



ヘモグロビンに結合する酸素  
20cc/100cc  
血漿に溶存する酸素  
0.3cc/100cc



SaO<sub>2</sub>が重要

血液100ml中溶存酸素量(ml) =  $0.003 \times PO_2(\text{mmHg})$

Hbと結合している酸素量(ml) =  $1.34 \times \text{Hb}(\text{g}) \times SO_2/100$

100mlの血液中の酸素量(ml) = 溶存酸素 + Hbの酸素量

$$= 0.003 \times PO_2 + 1.34 \times \text{Hb} \times SO_2/100$$

酸素運搬量 = 心拍出量 × 酸素飽和度/100 × ヘモグロビン濃度 × 1.34  
= C.O. × SaO<sub>2</sub>/100 × Hb × 1.34

# 第1章 チェックテスト

Q1.以下の文の( )を埋めて下さい。

- 気道の最も狭いところは成人で( )、小児で( )ある。
- 下気道は肺胞に至るまで( )の分岐がある。
- 気管から16分岐付近の( )までは輪状軟骨がある。
- 17分岐以下の( )ではこの軟骨はなくなりガス交換に関与する。
- 成人肺の肺胞表面積は( ) $\pm 12\text{m}^2$ ,毛細血管の表面積は( ) $\pm 12\text{m}^2$ である。

[正解はこちら](#)

# 1-1 気道の構造と機能

Q1.以下の文の( )を埋めて下さい。

- 気道の最も狭いところは成人で声門部、小児で輪状軟骨ある。
- 下気道は肺胞に至るまで23回の分岐がある。
- 気管から16分岐付近の終末細気管支までは輪状軟骨がある。
- 17分岐以下の呼吸細気管支ではこの軟骨はなくなりガス交換に参与する。
- 成人肺の肺胞表面積は143±12m<sup>2</sup>,毛細血管の表面積は126±12m<sup>2</sup>である。

# 第1章 チェックテスト

Q2.以下の表の( )を埋めて下さい。

- ① 室内気吸入時の( )が( )mmHg以下となる呼吸障害またはそれに相当する呼吸障害を呈する異常状態を呼吸不全と診断する。
- ② 呼吸不全の型を2型に分け、( )分圧が( )mmHgを超えないものを( )型呼吸不全、( )分圧が( )mmHgを超えて異常な高値を呈するものを( )型呼吸不全という。
- ③ ( )呼吸不全とは呼吸不全の状態が少なくとも( )ヶ月間持続するものをいう。

[正解はこちら](#)

# 1-2 呼吸不全の概念

## 診断基準

- ① 室内気吸入時の動脈血O<sub>2</sub>分圧が60mmHg以下となる呼吸障害またはそれに相当する呼吸障害を呈する異常状態を呼吸不全と診断する。
- ② 呼吸不全の型を2型に分け、動脈血CO<sub>2</sub>分圧が45mmHgを超えないものをI型呼吸不全、動脈血CO<sub>2</sub>分圧が45mmHgを超えて異常な高値を呈するものをII型呼吸不全という。
- ③ 慢性呼吸不全とは呼吸不全の状態が少なくとも1ヶ月間持続するものをいう。

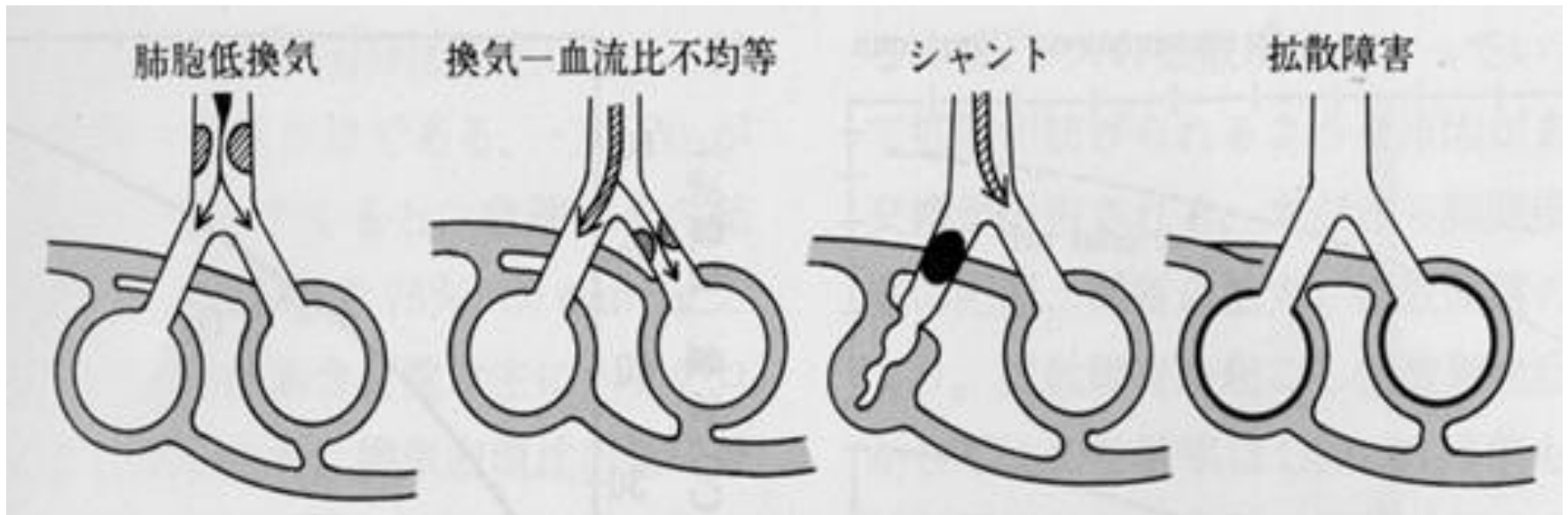
# 第1章 チェックテスト

Q3.低酸素血症の原因を4つ挙げて下さい。

[正解はこちら](#)

# 1-3 低酸素血症の原因

- ◆ 肺胞低換気
- ◆ 換気-血流比不均衡
- ◆ シヤント
- ◆ 拡散障害





# 第1章 チェックテスト

Q4.以下の表の( )を埋めて下さい。

PaO <sub>2</sub> (mmHg)	SaO <sub>2</sub> (%)	
97	97	正常若年成人
70	93	正常下限
( )	( )	呼吸不全、軽症
50	85	呼吸不全、入院
( )	( )	呼吸不全、重症
30	60	意識喪失

[正解はこちら](#)

# 1-4 PaO<sub>2</sub>, SaO<sub>2</sub>の関係

PaO <sub>2</sub> (mmHg)	SaO <sub>2</sub> (%)	
97	97	正常若年成人
70	93	正常下限
<u>60</u>	<u>90</u>	呼吸不全、軽症
50	85	呼吸不全、入院
<u>40</u>	<u>75</u>	呼吸不全、重症
30	60	意識喪失

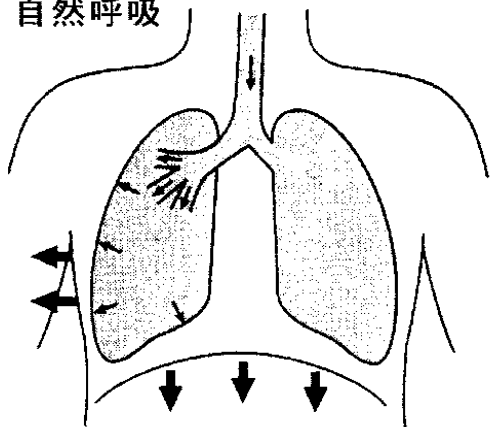
# 第2章 人工呼吸の適応

## 第2章の到達目標

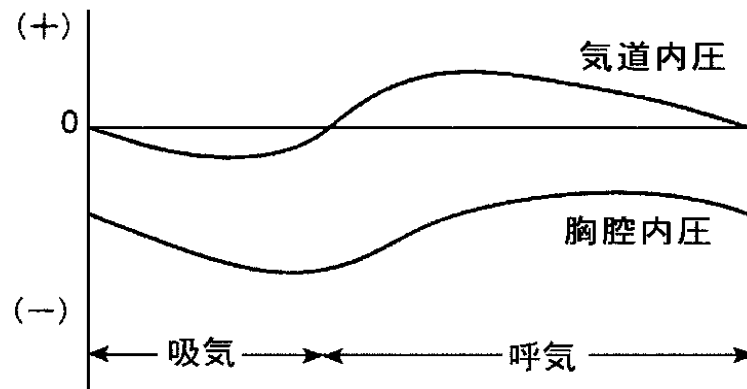
- 自発呼吸と陽圧換気の違いについて  
説明できる
- 陽圧換気の生体への影響が説明できる
- 気管挿管の目的が説明できる
- 人工呼吸の目的が説明できる

# 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(1)

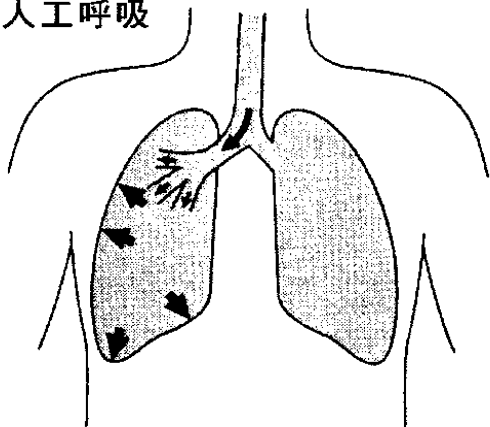
a) 自然呼吸



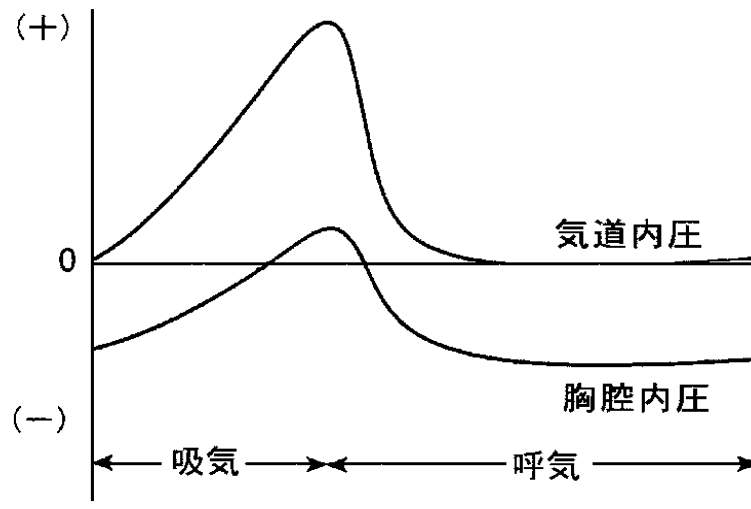
a) 自然呼吸



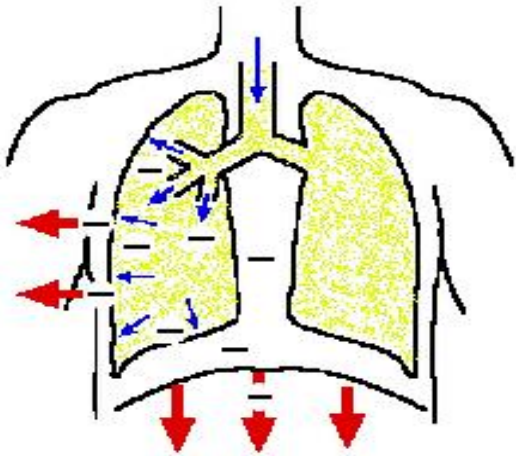
b) 人工呼吸



b) 人工呼吸



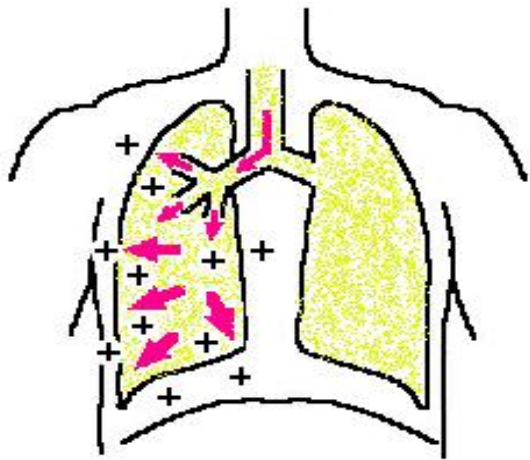
## 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(2)



### 自然呼吸(自発呼吸)

吸気: 胸腔内に陰圧, 外気を吸い込む

呼気: 胸郭の弾性収縮力



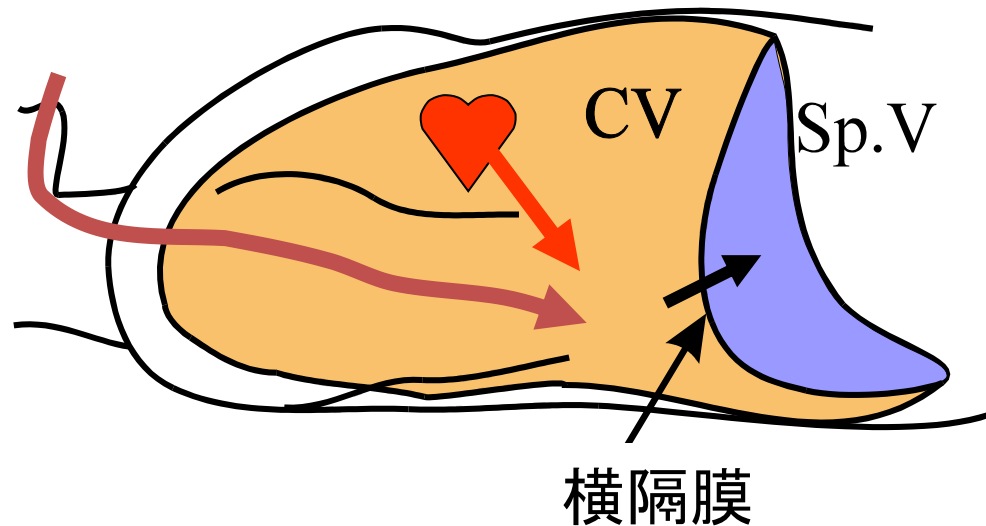
### 人工呼吸(陽圧換気)

吸気: 酸素, 空気を肺内に送り込む

呼気: 気道内の圧力減少により押し出す

人工呼吸: 陽圧で換気・・非生理的, 生体に影響を及ぼすため  
人工呼吸器関連肺傷害 (VALI) に繋がる

## 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(3) 自発呼吸時



- ① 背中側の横隔膜が大きく動くので、吸った空気は背中側に多く供給される。
- ② 血液も下葉側に多く集まる。

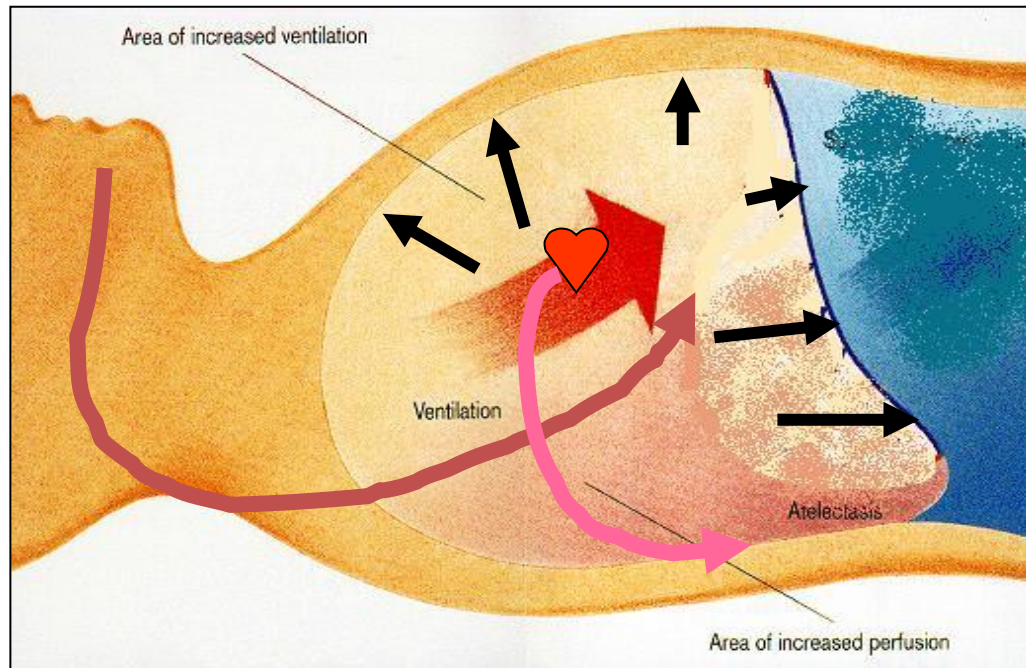
ガス交換は良好

## 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(4)

### 自発呼吸

- 自発呼吸では吸気に横隔膜を下げて胸郭を拡張することで胸腔内が陰圧になり肺胞に空気が流れ込んでくる
- 吸気時は胸郭、胸腔内圧が陰圧になるので心臓への静脈還流が増加する
- 自発呼吸は肺そのものに圧力を加えるわけではなく自然に満たされる

## 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(5) 陽圧換気時



- ① 陽圧換気は肺を押し広げる換気のため腹側へガスが流れやすくなる。
- ② 血液は背部の下葉へと流れる。  
ガス交換が最善の状態ではない。



# 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い(6)

## 人工呼吸(強制換気)

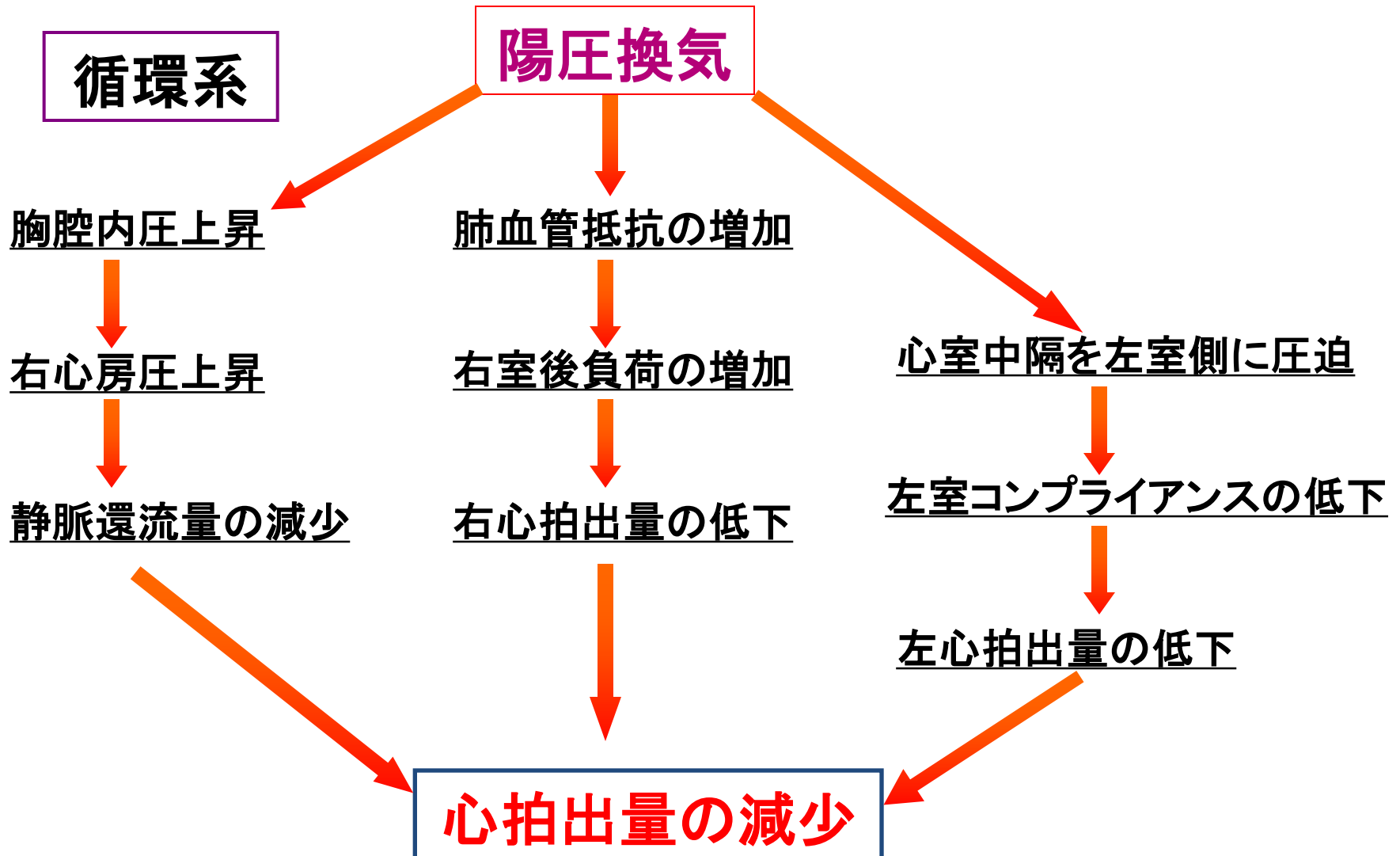
- 強制換気は気道に陽圧を加えて肺を膨らませる
- 空気を注入する方法なので供給ホース(蛇管)は、はずすことができない
- 自発呼吸とは反対に胸腔内圧が上昇するため静脈還流が減少する(頭蓋内圧上昇、肝うっ血の発生)
- 血圧低下、腎血流低下
- 人工呼吸器関連肺傷害(VALI)

## 2-2 陽圧換気の生体への影響(1)

### 呼吸器系

- 高い気道内圧により、気胸・皮下気腫・縦隔気腫などの圧外傷
- 胸腔内圧上昇による肺リンパ流の抑制 → 肺間質水分量増加
- 高圧による直接的な肺胞上皮障害
- 長期使用により呼吸筋の廃用萎縮・協調障害
- コンプライアンスや体位による換気/血流比の悪化

## 2-2 陽圧換気の生体への影響(2)



## 2-2 陽圧換気の生体への影響(3)

腎機能

心拍出量の減少



腎血流量の減少



ADH(抗利尿ホルモン)およびレニンの分泌増加



尿量減少  
体内水分量の増加

## 2-3 気管挿管の適応 (1)

### A; Airway 気道の問題

気道閉塞が切迫している

嚥下機能や咳嗽反射などの気道保護反射の低下(意識障害)

### B; Breathing 呼吸の問題

低酸素血症、低換気

臨床症状、血液ガス分析や病態から総合的に判断

### C; Circulation 循環の問題

著しい循環不全(ショック、心不全)

酸素消費の抑制や心負荷の軽減を目的

## 2-3 気管挿管の適応 (2)

### D; Disability                      中枢神経の問題

意識障害による気道保護反射の消失

低換気による脳浮腫悪化の予防

### E; Enviornment                      環境・状況

長時間の搬送

侵襲的な処置や治療

画像検査(MRI検査など)・・・小児など対象

## 2-4 人工呼吸の目的 (1)

- 酸素化の改善
- 呼吸努力(仕事量)の軽減
- 換気の是正

## 2-4 人工呼吸の目的 (2)

呼吸中枢の障害  
神経・筋・胸郭・気道系の障害



PaCO<sub>2</sub>の上昇

肺胞換気量の  
維持が必要

心・大血管の術後  
ARDS・肺炎などの呼吸不全  
sepsis



酸素消費量の増加  
呼吸努力の増加  
酸素需要の増加

呼吸仕事量の  
軽減が必要

術後肺合併症が予想される  
抜管後の補助



PaO<sub>2</sub>の低下

肺内シャントの  
是正が必要



## 第2章 チェックテスト

Q1.以下の文の( )を埋めて下さい。

- 自発呼吸では吸気に横隔膜を( )胸郭を拡張することで( )になり肺胞に空気が流れ込んでくる。
- 吸気時は胸郭、胸腔内圧が( )になるので心臓への( )が増加する。
- 強制換気は気道に( )を加えて肺を膨らませる
- 自発呼吸とは反対に胸腔内圧が( )するため( )が減少する( 上昇、 の発生)

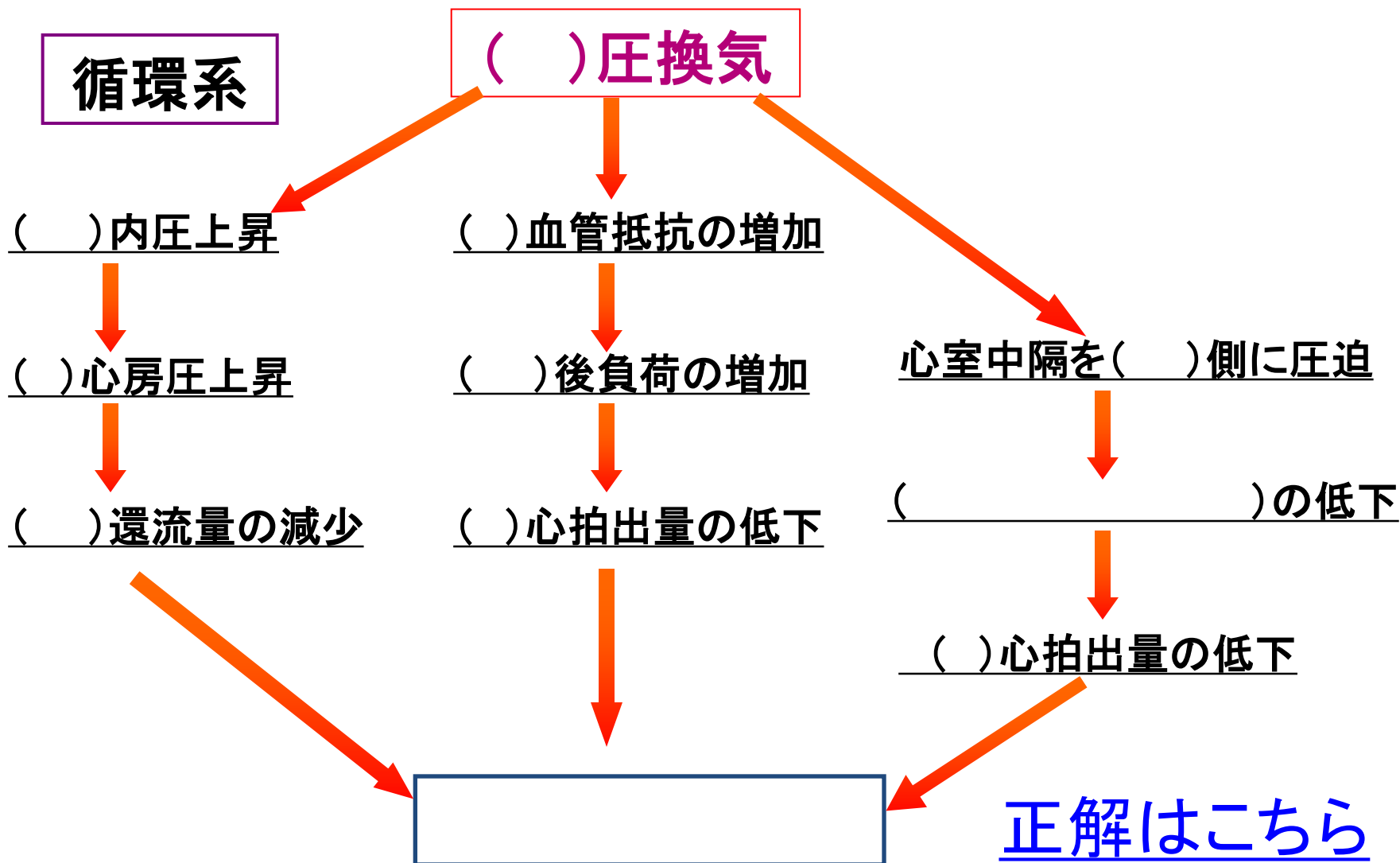
[正解はこちら](#)

## 2-1 自発呼吸と陽圧換気の違い

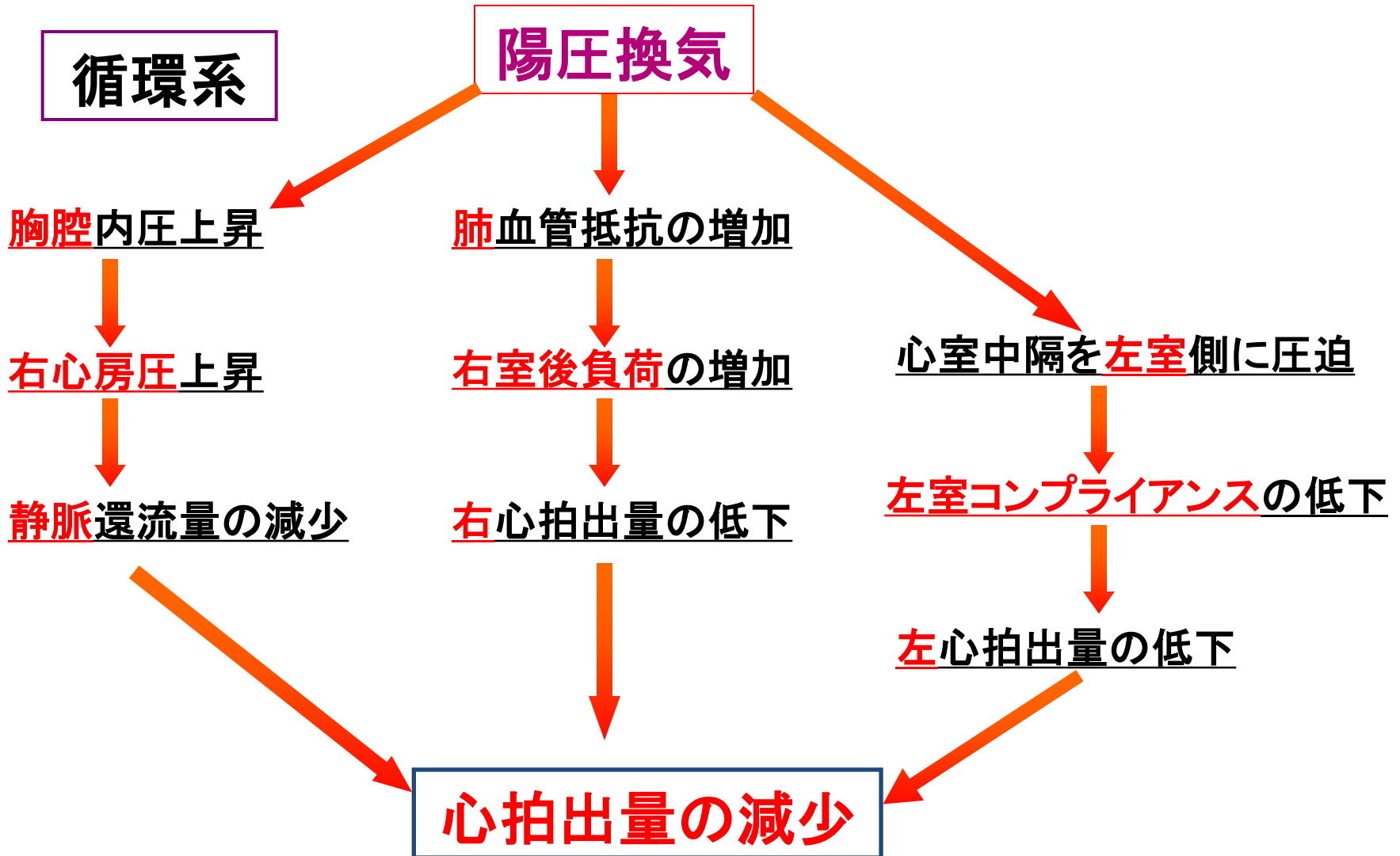
- 自発呼吸では吸気に横隔膜を下げて胸郭を拡張することで胸腔内が陰圧になり肺胞に空気が流れ込んでくる。
- 吸気時は胸郭、胸腔内圧が陰圧になるので心臓への静脈還流が増加する。
- 強制換気は気道に陽圧を加えて肺を膨らませる
- 自発呼吸とは反対に胸腔内圧が上昇するため静脈還流が減少する(頭蓋内圧上昇、肝うっ血の発生)

# 第2章 チェックテスト

Q2.以下のチャートの( )を埋めて下さい。



## 2-2 陽圧換気の生体への影響



## 第2章 チェックテスト

Q3.気管挿管の適応になる問題を5つ挙げて下さい。

[正解はこちら](#)

## 2-3 気管挿管の適応

A; Airway

気道の問題

B; Breathing

呼吸の問題

C; Circulation

循環の問題

D; Disability

中枢神経の問題

E; Enviornment

環境・状況

## 第2章 チェックテスト

Q4.人工呼吸の主な目的を3つ挙げて下さい。

[正解はこちら](#)

## 2-4 人工呼吸の目的

- 酸素化の改善
- 呼吸努力(仕事量)の軽減
- 換気の是正



# ポストテスト

Q.下記の表について( )を埋めて下さい

気道の最狭部	成人; ( ) 小児; ( )
呼吸不全の型	( )呼吸不全【低O <sub>2</sub> 血症・高CO <sub>2</sub> 血症】、( )呼吸不全【低O <sub>2</sub> 血症】
低酸素血症の原因	( )、( )、( )、( )
自発呼吸とは	吸気:胸腔内に( ), ( )を吸い込む
	呼出:胸郭の( )
陽圧換気とは	吸気( )、( )を肺内に送り込む
	呼気:気道内の( )により押し出す
気管挿管の適応	( )、( )、( )、( )の問題、( )・( )
人工呼吸の目的	( )の改善、( )の軽減、( )の是正

[正解はこちら](#)

# 人工呼吸の生理学および適応

気道の最狭部	成人；声門部 小児；輪状軟骨
呼吸不全の型	II 呼吸不全【低O <sub>2</sub> 血症・高CO <sub>2</sub> 血症】、I 呼吸不全【低O <sub>2</sub> 血症】
低酸素血症の原因	肺胞低換気、換気-血流比不均衡、シャント、拡散障害
自発呼吸とは	吸気：胸腔内に陰圧，外気を吸い込む
	呼出：胸郭の弾性収縮力
陽圧換気とは	吸気：酸素，空気を肺内に送り込む
	呼気：気道内の圧力減少により押し出す
気管挿管の適応	気道、呼吸、循環、中枢神経の問題、環境・状況
人工呼吸の目的	酸素化の改善、呼吸努力の軽減、換気の是正

# 参考文献

- 3学会合同呼吸療法認定士認定講習テキスト
- 救急医学 呼吸生理の基礎を学ぶ
- 人工呼吸に活かす！呼吸生理がわかる、  
好きになる