

【学習項目】

I. 呼吸筋と胸郭の運動、胸郭内圧の変化と肺容量の変化を関連づけて理解する(図1~3)。

- A. 横隔膜(diaphragm)
- B. 外肋間筋(external intercostal muscles)
- C. 胸腔内圧(intrapleural pressure)、肺胞内圧
- “肺の運動は受動的? 能動的?”

II. 呼吸中枢はどこにあるのか? その働きは?

- A. 脳幹(橋と延髄) (図4~6)
- B. 呼吸ニューロン
(背側呼吸ニューロン群、腹側呼吸ニューロン群)

III. 呼吸(換気)を調整する因子は何か?

- A. 頸動脈小体(carotid body) (図7~9)
- B. 中枢化学受容野
- C. PO_2 センサー
- D. PCO_2 センサー

IV. 換気障害 (図10~12)

- A. 拘束性換気障害
- B. 閉塞性換気障害

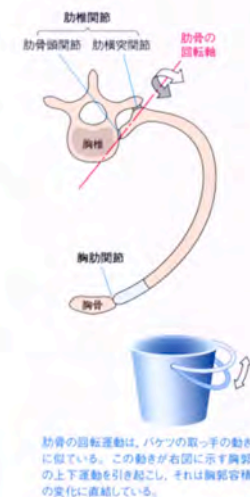
Point in check!

標準生理学 第9版 p715

呼吸運動は、**胸郭の変形**と**横隔膜の移動**による。

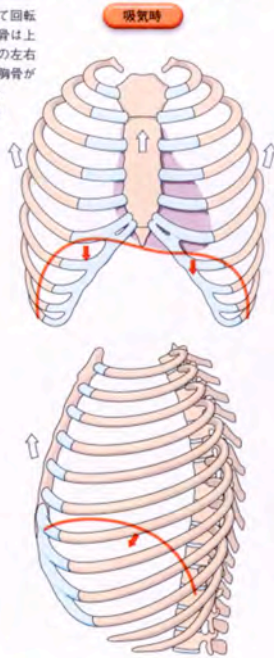
図1 呼吸運動(胸郭と横隔膜の変化)

肋骨は、肋骨頭と肋骨結節を結ぶ線を軸として回転する。吸気時には、外肋間筋などの働きで肋骨は上方へ回転しつつ挙上する。その結果、胸郭の左右径が大きくなる。このとき肋骨の挙上に伴って胸骨が前上方へ移動するため、胸郭の前後径も大きくなる。また、横隔膜が収縮・下降すると、胸郭の上下径も大きくなる。

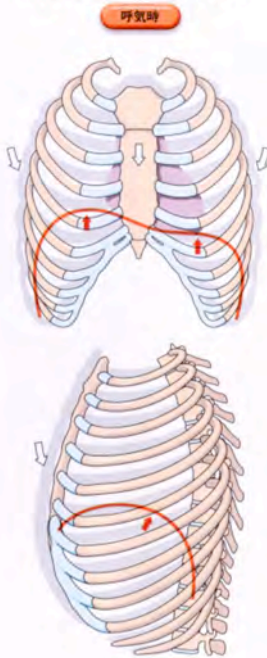


肋骨の回転運動は、バケツの取っ手の動きに似ている。この動きが右図に示す胸郭の上下運動を引き起こし、それは胸郭容積の変化に直結している。

外肋間筋と横隔膜が主要な吸気筋である。



安静時には呼吸筋の作用はわずかである。



外肋間筋と横隔膜が主要な呼吸筋(吸気筋)である。

肋骨の移動による呼吸を **胸式呼吸**、

横隔膜の移動による呼吸を **腹式呼吸**という。

内・外肋間筋はテコの原理で肋骨を動かす。

図2 肋間筋 標準生理学 第9版 p715

外肋間筋は肋骨結節付近で始まり、前方では肋軟骨の手前で終わる。内肋間筋は胸骨縁で始まり、後方では肋骨角付近で終わる。両筋は肋間隙を逆方向に斜走する。

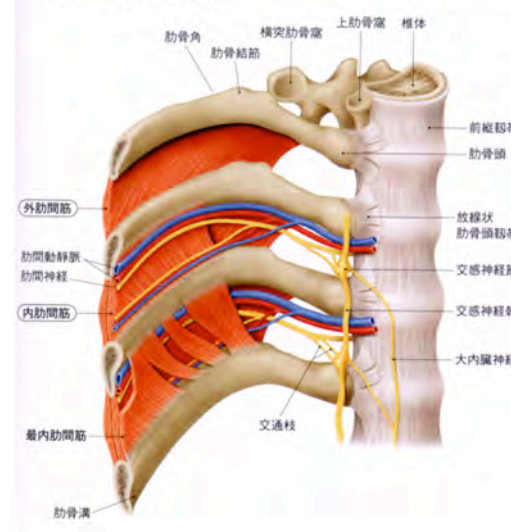
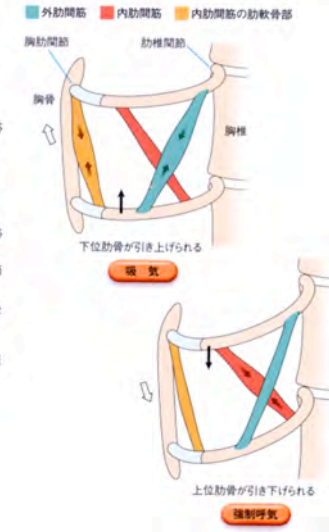


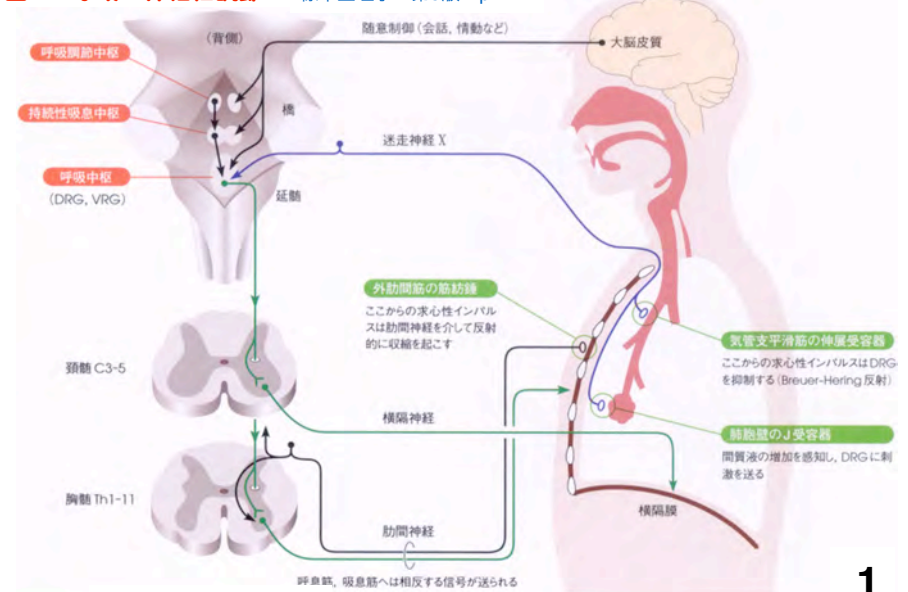
図3 肋間筋の作用

テコの原理により、支点(肋椎関節)から遠いほど、より小さな力で動かすことができる。



呼吸運動の中枢は脳幹にある。

図4 呼吸の神経性調節 標準生理学 第9版 p741-

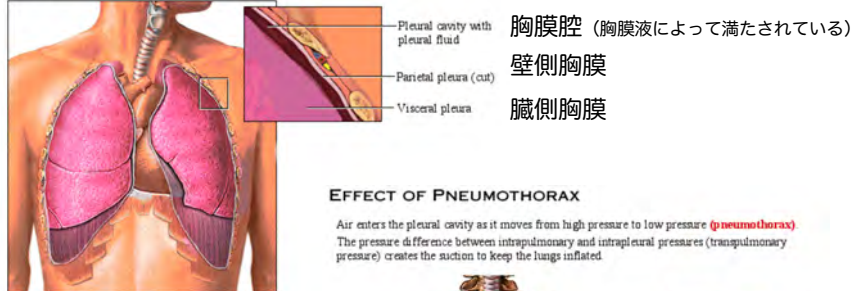


標準生理学 第9版 p715

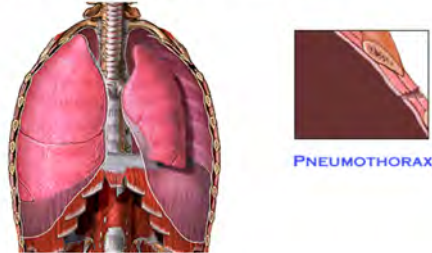
Point in check!

胸膜は「肺表面と胸郭内面とを覆う閉じた袋」で、
内部（胸膜腔）は常に陰圧である。

VISCERAL AND PARIETAL PLEURAE



胸膜腔には、ごく少量の液体（胸膜液または、胸水）があり、呼吸する際の潤滑油の役割を果たす。
胸膜に炎症などが起こると、胸膜腔に大量の胸水が溜まる。



胸膜腔内に空気が入ると、
肺は虚脱萎縮する（矢印）



気胸 pneumothorax

胸膜腔は陰圧になっているので、肺や胸壁が損傷すると胸膜腔内に空気が入り込むことがある。その結果、胸膜腔内の圧が大気圧と等しくなり、肺は自身の弾性により小さく縮んでします。

気胸の中には、外傷などの外因がないのに肺胞壁が破れて生じることもある（自然気胸）。

治療は、胸膜腔内にチューブを刺し、持続的に低圧吸引して胸膜腔内圧を下げ、肺を拡張させる。

標準生理学 第9版 p714

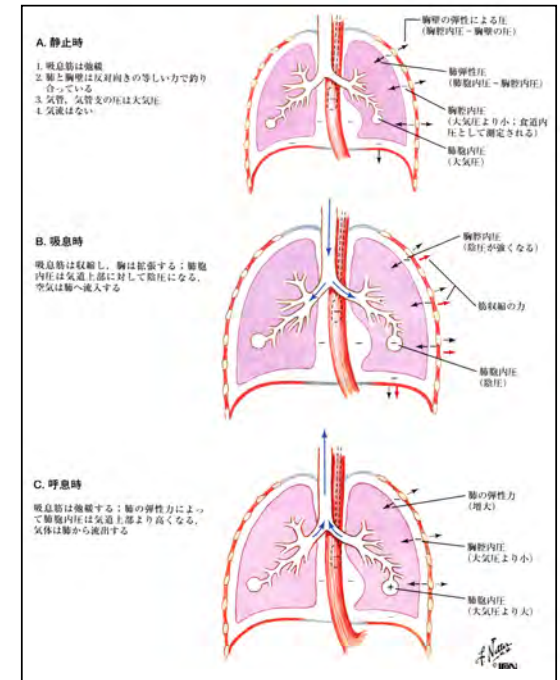
どうやって空気が肺に入ったり、肺から出たりするのか？

“呼吸による圧変化”

胸郭が膨らむにつれて胸腔内圧が低下し、肺が膨張し、肺胞内圧は大気圧よりも低くなる。

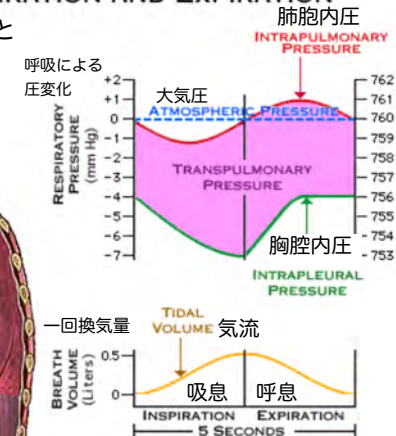
続いて空気が肺に流入するにつれ、肺胞内圧は大気圧のレベルまで上昇していく。その時点で胸腔内圧は最も強い陰圧を示す。

呼息になると胸腔内圧は上昇し（すなわち陰圧が弱くなる）、肺実質の弾性繊維の収縮によって、肺体積が収縮していく。肺胞内圧は更に上昇し、肺から空気を呼出させる。呼息が進むと肺胞内圧は大気圧のレベルまで低下していく。



EVENTS DURING INSPIRATION AND EXPIRATION

1 呼吸周期の間の胸腔内圧と
肺胞内圧の変化



吸気時
1. 横隔膜と肋間筋の収縮
2. 胸郭の拡大
3. 胸腔内圧がより陰圧となる
4. 肺実質の拡張
5. 肺胞内圧が陰圧となる
6. 肺へ空気が流れ込む

呼気時
1. 横隔膜と肋間筋の弛緩
2. 胸郭の縮小
3. 胸腔内圧の陰圧が元に戻る
4. 肺実質の縮小
5. 肺胞内圧が大気圧より高くなる
6. 肺から空気が出る。

胸郭の拡大運動により、胸腔内の圧力を変化させることによって、肺胞が受動的に拡張・収縮して、空気が出入りする

延髄の呼吸中枢が自発的な呼吸リズムをつくり出す。

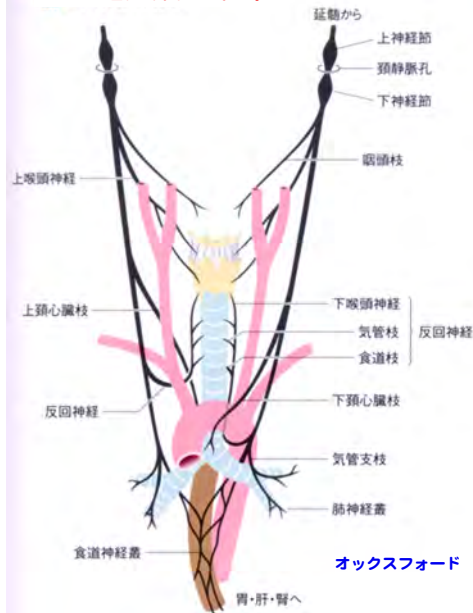
標準生理学 第9版 p741-

1. 脳実核に密集する背側呼吸ニューロン群
(dorsal respiratory group; DRG)
2. 疑核とその周辺に密集する腹側呼吸ニューロン群
(ventral respiratory group; VRG)

肺・上気道・胸郭に存在する知覚受容器や、頸動脈小体などの化学受容器からの信号は、DRGに入力され、統合される。
DRGからの信号はVRGに伝達され、VRGから延髄横隔神経核を介して横膈膜を収縮させ、また肋間神経を介して肋間筋や腹筋などの補助呼吸筋にも吸息及び呼息の信号を送っている。

末梢神経からの信号が呼吸運動を補助的に調節する。

図5 迷走神経の分布



オックスフォード 第3版-
p371-

迷走神経を介した呼吸運動の調節

1. 肺伸張反射 (Breuer-Hering reflex)

肺が過膨張すると、気管支や細気管支の平滑筋にある伸張受容器からの信号が迷走神経有髄線維を介して、背側呼吸ニューロン群を抑制し、呼吸への切り換えを促進する。運動時などで一回換気量が大きいときに肺の過膨張を防ぐ働きがある。

2. 咳そう反射

咽喉や気道の粘膜に存在する刺激受容器 irritant receptorが異物や煙によって刺激されると、迷走神経有髄線維を介して「咳」を起こさせる。

3. 迷走神経無髄C線維からの反射

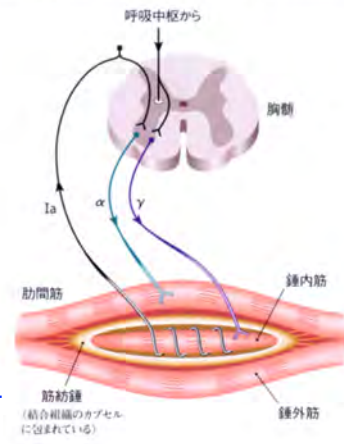
Bronchial C-fiberは気管支平滑筋の緊張、気道分泌、気道上皮のタンパク透過性に関与している。Pulmonary C-fiber (J受容器)は間質の組織間液の増加で刺激され、肺うっ血、肺水腫、間質性肺炎などの際の頻呼吸に関与している。

4. 筋伸張 (伸張) 反射 (stretch reflex)

呼吸筋である外肋間筋に豊富に存在する筋紡錘が関与する反射。筋紡錘が伸張すると、肋間神経などを介して反射的に筋収縮を起こす。

図6 筋伸張 (伸張) 反射

筋紡錘は結合組織に包まれ、一次終末 (Ia線維) と二次終末 (II群感覚線維) の感覚神経終末がある。筋紡錘が伸張されると神経インパルスの発射が増加し、筋紡錘が存在する筋を反射的に収縮させ、拮抗筋を弛緩させる。γ運動ニューロンは筋紡錘そのものを収縮させ、感覚神経のインパルス発射を増加させ、間接的に筋を収縮させる。このように、筋紡錘とその反射経路は筋の長さを調節するフィードバック機構を有し、一般には呼吸運動よりも主に姿勢制御に関与していると考えられている。



痰と咳

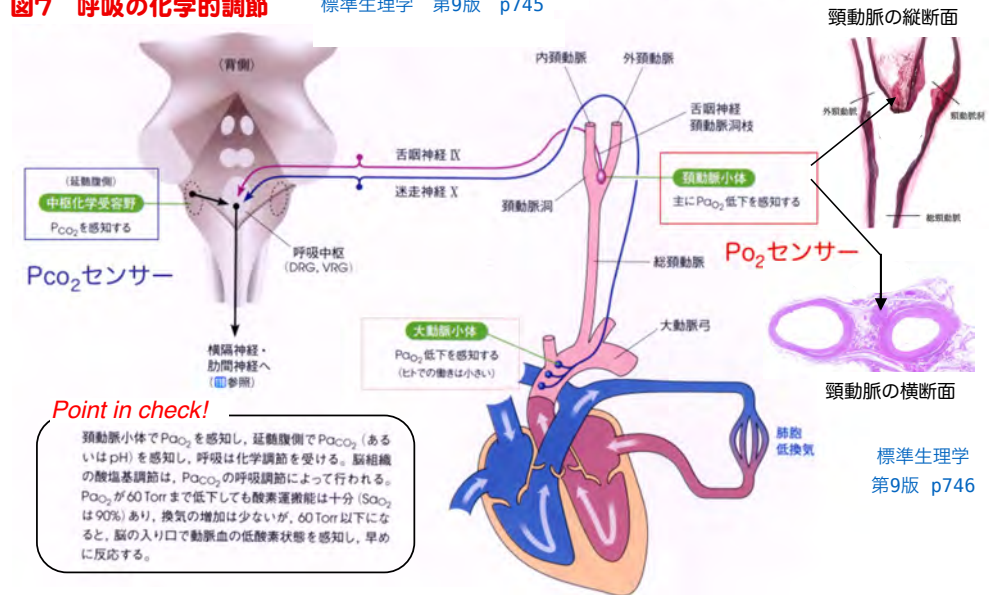
気道の炎症は粘液分泌を亢進し、分泌液や細菌、マクロファージ・白血球とその分解物などが痰となる。痰は換気・血流比を不均等にし、詰まって無気肺が生じると血流シャントができ、低酸素血症をきたす。

痰が末梢にあるときは気道抵抗は上がらないが、線毛運動で中枢気道に運ばれると、気道抵抗は増大する。中枢気道はirritant receptorを、末梢気道ではC-fiberを介して咳反射が起こり、強い呼吸によって痰を排出する。

化学受容器が動脈血のガス分圧を監視し、呼吸を調節する。

図7 呼吸の化学的調節

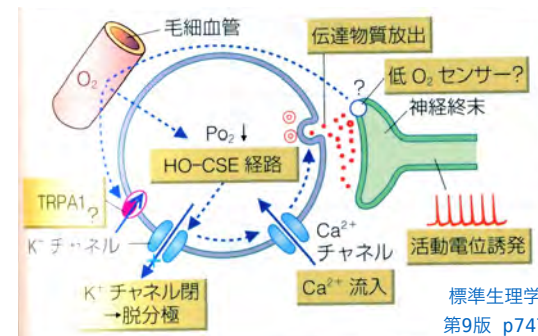
標準生理学 第9版 p745



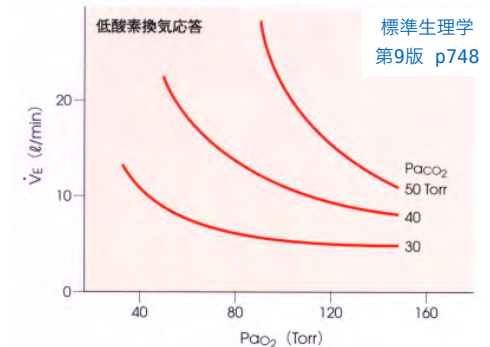
Point in check!

頸動脈小体で P_{aO_2} を感知し、延髄腹側で P_{aCO_2} (あるいは pH) を感知し、呼吸は化学調節を受ける。脳組織の酸塩基調節は、 P_{aCO_2} の呼吸調節によって行われる。 P_{aO_2} が 60 Torr まで低下しても酸素運搬能力は十分 (S_{aO_2} は 90% あり、換気量は少ないが、60 Torr 以下になると、脳の入り口で動脈血の低酸素状態を感知し、早めに反応する。

図8 頸動脈小体における低酸素感受機構

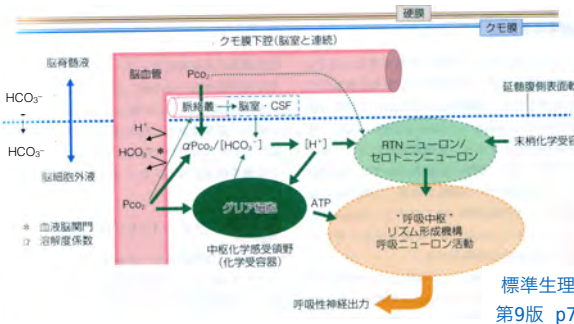


標準生理学
第9版 p747

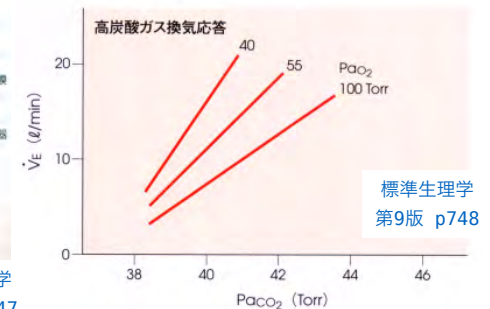


標準生理学
第9版 p748

図9 CO₂による呼吸刺激の機序



標準生理学
第9版 p747



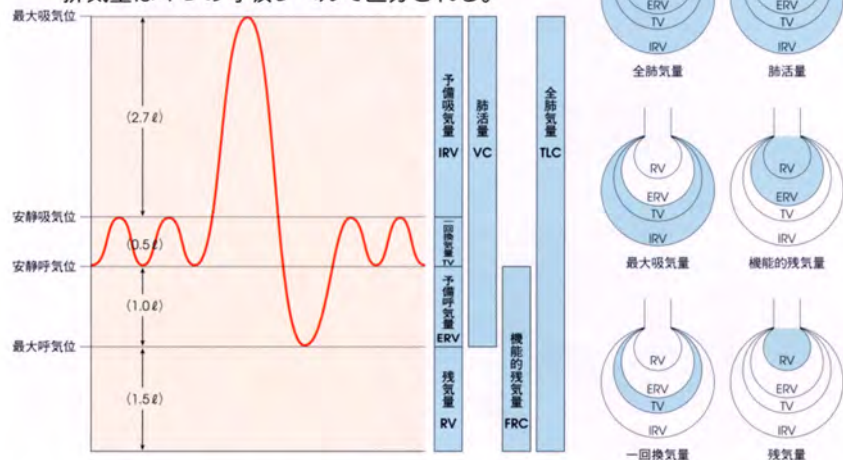
標準生理学
第9版 p748

図10 肺気量分画 排気量はスパイロメーターで測定する。

各肺気量分画の値は年齢、性別、身長によって異なる。
下図の値は一応の目安である。

標準生理学 第9版 p716

排気量は4つの呼吸レベルで区分される。

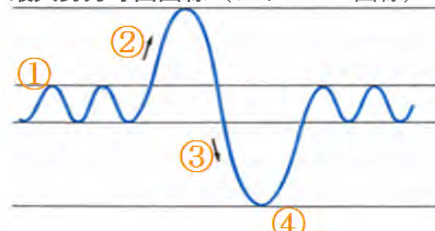


安静時の一回換気量は0.5L程度であるが、肺活量は7～9倍の予備を持つ。

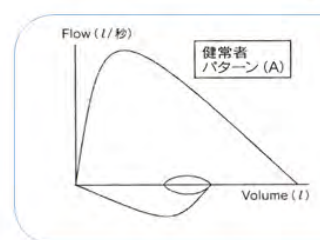
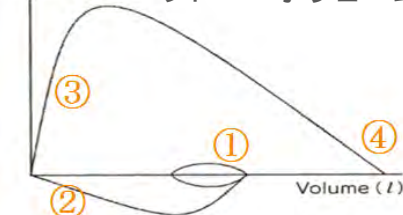
スパイロメーター



最大努力呼出曲線 (ティフノー曲線)



Flow (L/秒) フロー・ボリューム曲線



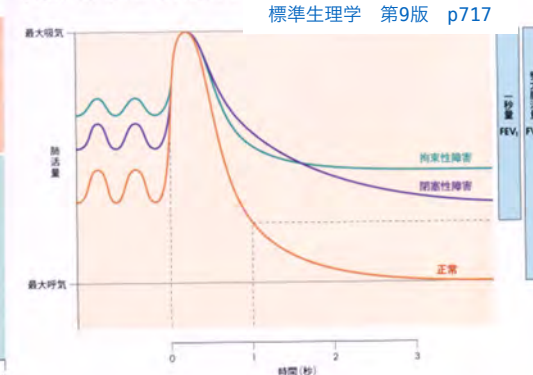
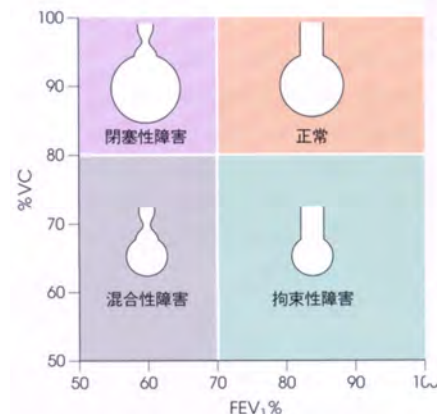
%VCとFEV1%より換気障害の原因を推測出来る。

図11 換気障害のパターン

図12 努力呼出曲線

最大吸気位からできるだけ速く呼出したときの肺気量曲線。
その最初の1秒間に呼出された気量を1秒量という。

標準生理学 第9版 p717



%VC: 肺活量の予測値(VC_{pred})に対する実測値の割合

$$= VC/VC_{pred} \times 100$$

FEV1%: 努力肺活量に対する1秒量の割合 (1秒率)

$$= FEV_1/FVC \times 100$$

Point in check!

1. 拘束性換気障害

肺を膨張させられない状態で、原因としては

- 肺組織の硬化: じん肺、過敏性肺炎、薬物性肺炎、放射線肺炎、癌性リンパ管症などが原因
- 肺実質の減少: 肺切除後、無気肺、肺腫瘍、結核肺炎、無形成肺、肺胞タンパク症
- 肺外病変: 胸膜・胸腔の病変として胸膜肥厚、胸水など。胸郭の病変として多発性肋骨骨折、胸郭形成術後など。
- 呼吸筋の運動制限: 妊娠、腹水、筋萎縮性側索硬化症など。

2. 閉塞性換気障害

気道の閉塞のために呼出に支障をきたした状態で、1秒量は低下し、残気量は増加する。

- 上気道の閉塞性疾患: 扁桃腺の肥大、喉頭癌、甲状腺腫瘍による気道閉塞、声帯麻痺など。
- 下気道の閉塞性疾患: 気道内の腫瘍、肺炎腫瘍や慢性気管支炎、慢性閉塞性気管支疾患、気管支喘息の発作時など。

3. 混合性換気障害

拘束性疾患と閉塞性疾患の合併や慢性肺気腫が進行した際見られる。