

麻酔に必要な解剖・生理

1 呼吸

■ ポイント ■

- ① 呼吸器系の解剖と呼吸生理は、麻酔科医にとって必須の知識である。
- ② 呼吸生理学の基礎的概念を理解しよう。
- ③ 死腔は PaCO_2 に影響し、シャントは低酸素血症の最大の原因である。

■ はじめに

麻酔科医には、周術期の呼吸管理および循環管理に関する知識が求められるため、呼吸生理学を理解することは必須である。本稿では、麻酔科医が最低限の知識として身につけておくべき呼吸器系の解剖と生理の基礎について解説する。

A 呼吸器系の解剖

呼吸器系は、上気道・下気道および肺実質と、胸郭および呼吸筋群からなる。

上気道は声門より上部の鼻腔・口腔・咽頭および喉頭からなる。上気道の主な機能は、加温と加湿および異物の除去である。

下気道は声門以下、気管、主気管支、葉気管支、区域気管支、亜区域気管支、小気管支、細気管支、終末細気管支、呼吸細気管支、肺胞管、肺胞とつながる。気管軟骨は小気管支レベルまで存在するが、気管および主気管支レベルではすべて背側が開いた馬蹄形である。ただし、輪状軟骨は気道に存在する軟骨のうち唯一の全周性軟骨で、フルストマック患者に対して急速導入を行う時に、輪状軟骨を圧迫することにより、食道から口腔へ胃内容が逆流するのを抑えることができる。気管は気管分岐部で左右の主気管支に分岐し、気管分岐部を含めて22回分岐して肺胞へ至る。成人の気管分岐部は第5胸椎の高さにあり、その分岐角度は右25°左45°と左右差がある。そのため、気管挿管チューブが気管分岐部を超える場合には右主気管支に入りやすい。16回目の分岐までの気管支壁には肺胞がなく、conducting zone とよばれる単なる気道であるが、それより末梢はrespiratory zone とよばれ、ガス交換機能をもつ¹⁾。

胸郭は、肋骨籠と横隔膜からなる。横隔膜と外肋間筋および呼吸補助筋群からなる吸気筋群は、胸郭の容積を広げることによって吸気を行う。一方で、呼気は肺と胸郭が縮もうとする弾力によって通常行われるが、気道の狭窄などで呼気抵抗が上昇している時には、内肋間筋および腹直筋などの呼気筋群が胸郭容積を押し縮めるようにして呼気を行う。

B 呼吸生理

呼吸生理学の基本的概念について以下に解説する。

1) 肺容量

スパイロメトリーから得られる肺容量に関係する情報は、スパイログラム上に表わされるが、残気量を含む成分は直接測定することができない (図 1)。しかし臨床では、直接測定することが困難な機能的残気量とクロージングキャパシティに関する知識が必要である。

a) 機能的残気量 functional residual capacity (FRC)

FRC は呼吸の基準位とよぶべきもので、安静時呼気終末の時点で肺内に残っている空気の種類である。ゴム風船のように縮もうとする肺は、鳥かごの骨組のように胸腔の容積を支える肋骨籠によってその容積を保たれる。気道内圧が 0 cmH₂O の時に、肺が縮もうとする力と肋骨籠が肺を広げた状態で保とうとする力のバランスが釣りあう。この時の肺容積が FRC である。安静時の呼吸では、呼気終末でも肺内に FRC 分の空気が残っているために、末梢気道の虚脱が生じず、無呼吸時にも酸素化を維持することができる。成人では、FRC は加齢によりほとんど変化しないが、体位や肺疾患・全身麻酔によって減少する。成人では座位から仰臥位になると、FRC はおよそ 30% 減少する。さらに全身麻酔をかけると、自発呼吸下で 20.5%，人工呼吸下で 17.5% 覚醒時より FRC が減少する。FRC が小さくなれば、末梢気道の虚脱・閉塞が起こりやすくなる²⁾。

b) クロージングキャパシティ closing capacity (CC)

CC とは、最大吸気位から最大呼気位まで肺内の空気を出していき、末梢気道の閉塞が起こり始める肺容量である (図 2)。CC は体位や麻酔などの影響を受けないが、年齢により増加する。CC が FRC よりも大きくなると、安静時の呼吸でも末梢気道の閉塞が起こっている²⁾。すなわ

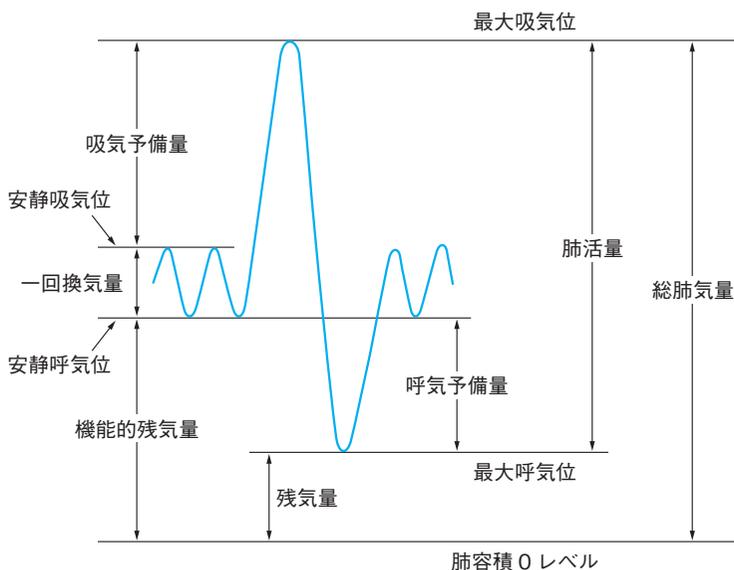


図 1 スパイログラム

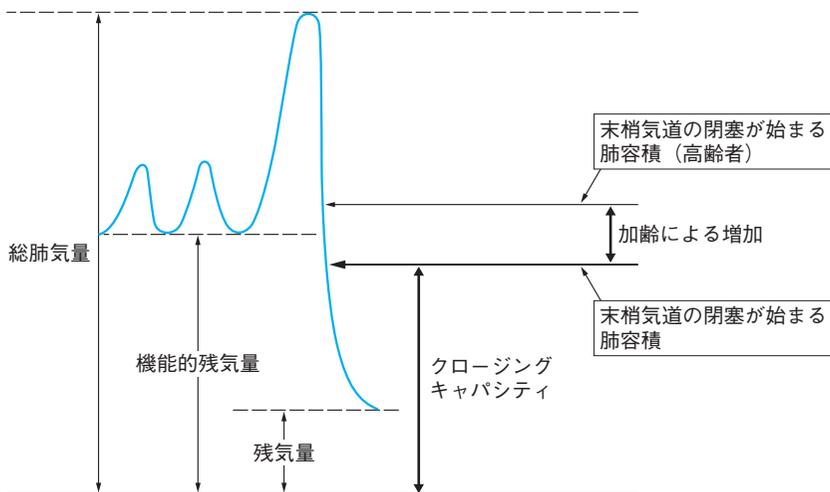


図2 クロージングキャパシティ

ち、高齢者や仰臥位の全身麻酔下の患者では、CCがFRCよりも大きくなっているために、通常の換気でも、1呼吸サイクル毎に末梢気道の閉塞が起こっている可能性が高い。この状態が継続されれば、末梢気道の閉塞から無気肺をきたし低酸素に至る可能性がある。

2) 気道抵抗

気道抵抗とは、吸気および呼気が気道を移動する時に受ける抵抗のことで、気道の長さや気体の流速に比例し、気道半径の4乗に反比例する²⁾。そのため、頻呼吸や努力呼吸のように流速が速くなる呼吸パターンでは、同じ気道半径でも気道抵抗は大きくなる。また、喀痰などが気管内に付着すると気道半径が小さくなり、気道抵抗は気道半径の4乗に反比例するため、気道抵抗が急激に増大する。全身麻酔中は、気道抵抗の増大は気道内圧の上昇という形で表れ、呼吸器の設定によっては、十分な一回換気量を得られなくなる。自発呼吸下では、気道抵抗の上昇は呼吸仕事量の増大という形で現れ、患者の呼吸筋疲労から呼吸不全に陥ることもある。

3) コンプライアンス

コンプライアンスは肺の広がりやすさの指標で、1 cmH₂Oの圧を気道にかけた時に増加する肺容積で表わされる。コンプライアンスの正常値は15~30mL/cmH₂Oで、コンプライアンスが小さい時に「肺が硬い」と表現される。コンプライアンスは、体位・年齢・胸郭および肺の状態で変化する。

4) 呼吸仕事量

呼吸仕事量とは呼吸筋群が行う仕事量を表し、気道抵抗に逆らって空気を肺内に吸い込むために費やされる仕事量と、しばもうとする肺の弾力に逆らって肺を広げるために費やされる仕事量に分けることができる(図3)。肺の弾力は、前述のコンプライアンスによって表わされる。

5) 分時換気量、肺胞換気量、死腔換気量

分時換気量と肺胞換気量の関係を図4に示す。麻酔中の呼吸管理で、麻酔器に付属する人工呼吸器が機械的に測定し表示するのは、分時換気量である。しかしガス交換に関与するのは、肺胞レ

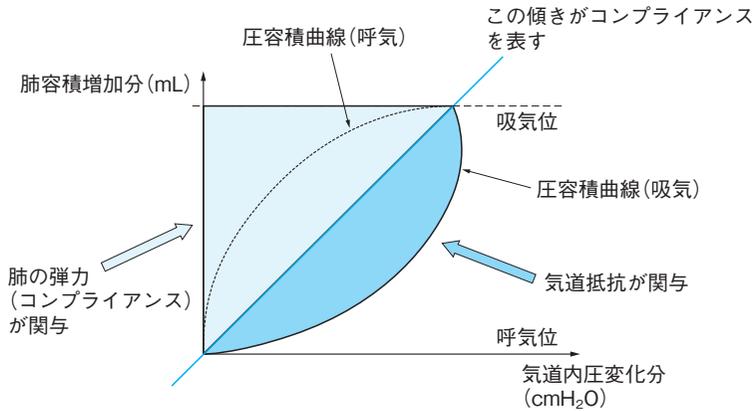


図3 肺の圧容量曲線と呼吸仕事量

呼吸仕事量は、図の塗りつぶした面積によって表わされるが、肺の弾力に逆らって行われる仕事量と気道抵抗に逆らって行われる仕事量に分けられる。

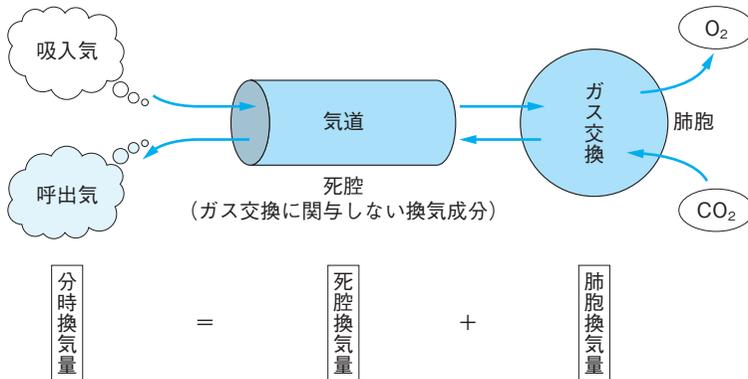


図4 分時換気量と肺胞換気量・死腔換気量の関係

ベルでの換気量すなわち肺胞換気量である。肺胞換気量がガス交換に大きな影響を及ぼしていることを示す事例として、肺胞気式がある¹⁾。

肺胞気式を動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO₂) について解くと (メモ参照)。

$$PaCO_2 = k \times VCO_2 / VA$$

k: 定数

VCO₂: 1 分間の二酸化炭素産生量

VA: 肺胞換気量

となる。

$$VA = (VT - VD) \times f$$

VT: 一回換気量

VD: 死腔容積

f: 呼吸数

であるから、

$$PaCO_2 = k \times VCO_2 / \{(V_T - V_D) \times f\}$$

となり、 $PaCO_2$ を規定する因子は、

- ①二酸化炭素産生量
- ②一回換気量
- ③死腔容積
- ④呼吸数

の4個である。この式から、全身麻酔中の体温が一定であると仮定するならば、人工呼吸中の $PaCO_2$ の管理は一回換気量と呼吸数を変えることによって行い、適切な人工呼吸器の設定にもかかわらず $PaCO_2$ が上昇する時は、死腔容積が増大していると理解できる。

6) 肺循環

肺循環では、右心室から駆出された血液が肺動脈から肺毛細血管に至り酸素化を受け、肺静脈を経て左心房に戻る。肺循環は低圧系で、肺動脈圧は大動脈圧の約20%と低い。そのため重力の影響を強く受け、体位によって肺内の血流分布が不均一になる。仰臥位では背側に血流がシフトし、側臥位では下側の肺へ血流のシフトが起こる。この現象は、低酸素性肺血管収縮とともに、呼吸器外科手術における片肺換気下での酸素化維持に貢献している。

肺血管抵抗に影響を及ぼす因子のうち、麻酔中特に注意を払うべきものは吸入酸素濃度、 $PaCO_2$ および吸入麻酔薬の血管拡張作用である。高濃度酸素および $PaCO_2$ 低下、吸入麻酔薬は肺血管抵抗を低下させる。肺循環は呼吸生理学上独立した概念であるが、临床上は肺循環と換気は1つのコンポーネントであり、別々に考えてはならない。

7) 換気血流比 (V/Q 比)

V/Q比とは、肺胞換気量と肺血流量の間でのガス交換の効率を表す。肺内の換気の分布と血流の分布は、模式化すると図5のように3種類のパターンとなる。換気はあるが血流のない部分は死腔である。その一方で、換気はないが血流のある部分はシャントとよばれ、静脈血が酸素化されずに体循環へと流入することを示す。実際の肺は、死腔とシャント、および理想的な換気と血流の分布を示す部分の組み合わせで表現され、V/Q比はおおよそ0.8となる。

a) 死腔

死腔とは換気成分のうち、ガス交換に関与しない部分のことで、解剖学的死腔、肺胞死腔、機械的死腔(気管挿管チューブなど)がある。死腔は $PaCO_2$ に影響を与える〔前項5)を参照のこと〕。

b) シャント(動静脈血混合)

シャントとは静脈血が肺胞でのガス交換を受けずに左心系に流入することで、低酸素血症の最大の原因である。シャントによる低酸素血症は、酸素投与によっても改善しないことが特徴である。

メモ

肺胞気の酸素分圧(PAO_2)は近似的に

$$PAO_2 = PIO_2 - PaCO_2/R$$

PIO_2 : 吸入気酸素分圧

$PaCO_2$: 動脈血二酸化炭素分圧

R: ガス交換率=呼吸商

とあらわされる。これを肺胞気式という。

この式に

$$R = VCO_2/VO_2$$

$$PAO_2 = PIO_2 - k \times VO_2/VA$$

VCO_2 : 1分間の二酸化炭素産生量

VO_2 : 1分間の酸素摂取量

VA: 肺胞換気量

k: 定数

を代入し、 $PaCO_2$ について解くと、

$$PaCO_2 = k \times VCO_2/VA$$

となる。