

I-1

人工呼吸管理の基礎

呼吸の生理と呼吸不全の病態生理

氏家良人

川崎医科大学 救急総合診療医学 特任教授 / 日本集中治療医学会 理事長

Point 1 呼吸には換気とガス交換があることと、それらの概念を理解する。

Point 2 換気の指標とガス交換の指標を理解し評価できる。

Point 3 換気不全とガス交換不全（酸素化不全）の病態生理を理解できる。

Point 4 呼吸メカニクスから代表的呼吸不全を理解できる。

はじめに

人工呼吸管理は呼吸不全であるか否かにかかわらず、重症患者では生命を維持するために必要である。しかし、医学生のところは、人工呼吸管理のことについてほとんど勉強することを求められない。医学教育のためのコアカリキュラムにも、人工呼吸は心肺蘇生時に出てくるバッグバルブマスク程度である。

人工呼吸管理を的確に行うためには、呼吸生理と呼吸不全の病態生理の基本を知っておくことが必須である。1回換気量や換気回数、また、その評価はどうしたらよいのだろうか。また、呼吸不全といっても、肺炎・急性呼吸促進症候群（acute respiratory distress syndrome；ARDS）、神経筋疾患、気管支喘息などでは人工呼吸の方法は異なってくる。本章では、人工呼吸管理のための呼吸生理、病態生理を述べる。

1. 正常な呼吸と呼吸生理

呼吸

呼吸は酸素O₂を大気から摂取し、二酸化炭素CO₂を適切に調節して大気へ排出することである。CO₂の調節は体液の酸塩基平衡調節にも重要な役割を果たしている。

これらは、①大気と肺胞気との間のガスの移動（換気）、②肺胞気と肺毛細血管血液の間でのO₂とCO₂交換（ガス交換）、の2つの機序によって行われている（図1）。このどちらか、または両者が障害されたときに呼吸不全が生じる。

O₂とCO₂の表現方法

O₂とCO₂は呼吸において気相と血液などの液相を行き来する。各相におけるO₂やCO₂の濃度、分圧、飽和度、量などに関して略語を用いて表現するため、最初にそれらを整理・解説しておく。

呼吸生理ではO₂やCO₂のさまざまな状況での略語による表現があり、1次符合、2次符合、3次符合を用いて行われる。

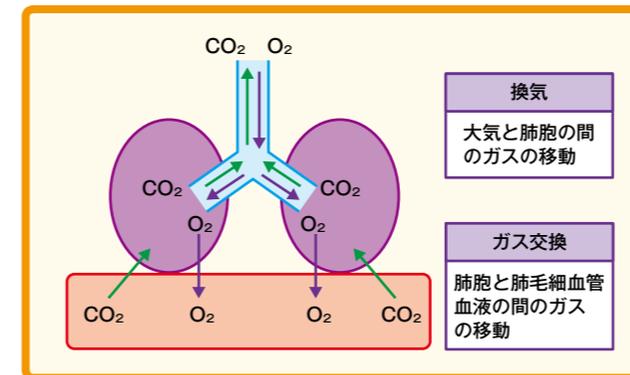


図1 換気とガス交換

吸入酸素濃度F_IO₂と動脈血酸素分圧PaO₂を例に挙げて説明する。

1次符合は大文字で書かれ、何を見ているのかを示す。ガス濃度はF (fractional concentration)、分圧はP (partial pressure)、飽和度はS (saturation)、含量はC (content)を用いる。2次符合は部位を示す符合で、気相は大文字を小さく、液相は小文字で書くことになっている。吸入気はI (inspiratory gas)、肺胞気はA (alveolar gas)、動脈血はa (arterial blood)、静脈血はv (venous blood)と書く。そして、3次符合はガスの種類を示す。酸素はO₂、二酸化炭素はCO₂となる。したがって、吸入気酸素濃度はF_IO₂でありFiO₂ではない。また、動脈血酸素分圧はPaO₂であり、肺胞気酸素分圧はPAO₂となる。

次に、主に酸素の生体における流れを説明しながら表現方法を説明していく。

吸気、呼気のガス濃度

空気を吸入する場合のF_IO₂はおおよそ0.21で、50%酸素を吸入する場合は0.5、純酸素の場合は1.0と表現する。ちなみに、空気中にはCO₂はほとんどないとみなしてよい。呼気 (expiratory gas) 中のO₂濃度やCO₂濃度はF_EO₂、F_ECO₂、肺胞気 (alveolar gas) のO₂濃度はF_AO₂、CO₂濃度はF_ACO₂と表す。

吸気、呼気のガス分圧

空気には重さ（質量）があり、海面では面積1 cm²あたり約1 kg（水銀柱で760 mmHg、水柱で10 m、ヘクトパスカル表示では1013.25 hPa）の圧力をかけている。これ

を気圧といい、1気圧と表現もする。高所たとえば富士山頂では0.62気圧、エベレスト山頂では0.3気圧程度になる。

空気の場合、その主な構成ガスの体積は窒素が約79%、酸素が21%程度であり、海面上の酸素の分圧はおおよそ760 × 0.21 = 159.6 (mmHg)となる。吸入気ガスのO₂分圧はP_IO₂、呼気ガスのCO₂分圧はP_ECO₂と表す。また、呼気終末 (end-tidal) のCO₂はEt-CO₂と表現して、濃度や分圧で表現することがある。

気相と液相との間のガスの移動

肺胞と肺毛細血管の関係のように気相と液相が接してガスが行き来できる状態では、それぞれの中の気体分子が分圧の高いほうから低いほうへ移動（拡散という）していき、ある時間経つと液相に入り込む気体分子と液相から飛び出す気体分子の数が等しくなる。これを平衡状態といい、このときの液相の気体分子の分圧は気相の分圧と等しくなる。したがって、理想状態ではP_AO₂ = PaO₂となる。しかし、通常は健康人でも10%程度の較差があることが多い。これをA-aDO₂と表現する。

血液中のO₂の量

血液中に存在する酸素の量は、“血漿に溶解する酸素”と“ヘモグロビンに結合する酸素”の総和となる。100 mLの動脈血液中の酸素含量 (O₂ Content) はCaO₂として表され、
CaO₂ = 0.0031 × PaO₂ + 1.39 × Hb × SaO₂
(mL/dLまたはVol%)

の計算式で求めることができる。式の前半が溶解している酸素の量で、後半がヘモグロビンに結合している酸素の量である。

換気

換気量と死腔換気 (図2)

安静時の1回換気量 (tidal volume；V_T) は新生児から成人に至るまで、およそ体重1 kgあたり6～8 mLと理解しておくとうい。したがって60 kgの体重の人の1回換気量は360～480 mLになる。安静時の呼吸回数 (f) は成人