

27

換気量による呼吸死腔の変化の理論的解析

東京医科歯科大学医学部麻酔蘇生科

沢 桓

呼吸死腔には、解剖学的死腔、肺胞死腔および生理学的死腔の3種類がある。死腔が存在すると血中から大気中への炭酸ガスの排出が阻害され、その結果、血中の炭酸ガスレベルの上昇をきたす。すなわち死腔とは、血中から大気中への炭酸ガスの排出効率を低下させる因子である。

(1)解剖学的死腔は、ほぼ気道の容積(プロキロ約2.2mL)に等しく、それが死腔となる理由は、呼気時に気道の中に残った炭酸ガスが次の吸気時に再吸入されることによって、肺胞中の炭酸ガスレベルが上昇し、その結果血中の炭酸ガスが上昇するからである。すなわち解剖学的死腔は炭酸ガスの再呼吸という形で、炭酸ガスの排出効率を低下させる。解剖学的死腔量($V_{D_{an}}$)は気道の容積であるから、換気量によってほとんど変化しない。それを換気量で割った解剖学的死腔率($V_{D_{an}}/V_T$)は換気量に逆比例して双曲線状に変化する。すなわち換気量が減少すれば増加し、換気量が増加すれば大幅に減少する。解剖学的死腔量はBohrの式で計算される。

$$V_{D_{an}} = \{(P_A CO_2 - P_E CO_2) / P_A CO_2\} \times V_T \quad (1)$$

(2)肺胞死腔は、肺全体の中で、血中から肺胞中への炭酸ガスの排出が損なわれている部分がどの程度あるかを示す指標である。今、肺胞の中で30%の部分で血中から肺胞中へ炭酸ガスが全然でてこないとなると、肺胞死腔率は30%ということになる。このように肺胞死腔は、血中から肺胞中への炭酸ガスの排出が直接阻害されることによって炭酸ガス排出効率を低下させる。通常は全換気量の中で炭酸ガスを運び出さない無駄な換気量の比率で表される。上述のように肺胞死腔は比率($r_{DA} = V_{DA} / V_T$)が肺の病的状態に応じたほぼ一定の値を示すので、これに換気量を乗じた肺胞死腔換気量($V_{DA} = r_{DA} \times V_T$)は換気量に比例して変化する。肺胞死腔率はJulianの式で計算される。

$$r_{DA} = (P_A CO_2 - P_A CO_2) / (P_A CO_2 - P_A CO_2 + P_E CO_2) \quad (2)$$

(3)生理学的死腔は、解剖学的死腔と肺胞死腔を含めた肺全体としての炭酸ガス排出効率の低下を示す指標である。教科書的には

生理学的死腔=解剖学的死腔+肺胞死腔 (3)
という「単純和」の形で説明がなされているが、これは正確でない。生理学的死腔率はEnghoffの式で計算される。

$$V_{D_{ph}} / V_T = (P_A CO_2 - P_E CO_2) / P_A CO_2 \quad (4)$$

$$= 1 - P_E CO_2 / P_A CO_2 \quad (5)$$

(5)式に見られるように、肺が全然ダメになって炭酸ガスの排出がゼロ($P_E CO_2 = 0$)になった場合に、はじめてその値は最大値の1すなわち100%となるものであって、通常は100%を超えることはない。しかるに(3)式の単純和で計算すると換気量の小さい範囲および肺胞死腔が非常に増大した範囲で、100%を超える生理学的死腔率の値が算出される。したがって死腔換気量が一回換気量よりも大きくなるといった矛盾した結果が得られるようになる。解剖学的死腔と肺胞死腔の値から正しい生理学的死腔を求める式は

$$V_{D_{ph}} = \frac{1}{1 - r_{D_{an}} r_{DA}} \{(1 - r_{DA}) V_{D_{an}} + (1 - r_{D_{an}}) V_{DA}\} \quad (6)$$

$$\text{ただし } r_{D_{an}} = V_{D_{an}} / V_T, \quad r_{DA} = V_{DA} / V_T$$

である。(6)式に示されるように、正確な生理学的死腔の計算式は、解剖学的死腔および肺胞死腔の値に或る補正係数をかけて加えたものとなっている。

(6)式で計算する限り、生理学的死腔率の値が100%を超えたり、生理学的死腔量が一回換気量より大きくなるといった矛盾した結果が得られることはない。

(4)実測値との比較：正確な(6)式によって計算された生理学的死腔の理論曲線は、実測値と非常によく一致した。従来よりFolkow、Pappenneimer、東大の諏訪先生らの先駆者によって正しい式が既に示されているのであるから、一般の教科書やhandbookにも、そのことがはっきりと示されることが必要ではないかと常に感じている。