

人工呼吸管理における換気能および死腔の評価について  
適正な換気状態を維持するためには

2020/11/29 Yoh.Yasushi ( yoh.yasushi@gmail.com )

【序 論】

人工呼吸管理において換気の管理の戦略は動脈血二酸化炭素分圧(以下、 $\text{PaCO}_2$ )の正常化ではなく高めの  $\text{PaCO}_2$  を許容する管理(permissive hypercapnia)が一般的であり、6ml/kg 程度の低一回換気量が好ましいとされている<sup>1</sup>。しかしながら pH の維持のためには、ある程度は適正な  $\text{PaCO}_2$  を維持しなければならないことは当然であろう。酸塩基平衡を考えると必須である Henderson-Hasselbalch 式は以下である。

$$\text{pH} = 6.1 + \{ \log[\text{HCO}_3^-] / ( 0.03 * \text{PaCO}_2 ) \}$$

この式によると、代謝因子は  $\text{HCO}_3^-$  で示され呼吸因子は  $\text{CO}_2$  で示される。すなわち酸塩基平衡は肺と腎臓という 2 つの臓器のバランスの上に成り立っている。

しかし、CHDF(持続緩徐式血液濾過透析)などの血液透析療法と人工呼吸管理が併用される症例においては、 $\text{HCO}_3^-$  が血液透析療法により 24mEq/L 近辺に固定され呼吸状態の変化に応じた腎の代償反応が極めて乏しくなることが時に経験され、pH は  $\text{PaCO}_2$  の変動のみに左右されることとなり、 $\text{PaCO}_2$  を正常値である 40mmHg 近辺に設定しないと pH が維持できないという局面が生じ得る。この問題について取り扱った論文は少ない<sup>2</sup>。

また透析療法を併用しない症例においても、ある程度は適正な  $\text{PaCO}_2$  値に管理することで、患者の pH が維持され投与薬剤の薬効が担保されるという側面もある。

ここで「目標  $\text{PaCO}_2$ 」という概念を想定する。「目標  $\text{PaCO}_2$ 」に近づけるためには、当然ながら有効な肺泡換気量(以下、 $V_A$ )を求めないといけない。しかし、一般的に人工呼吸管理下における  $V_A$  を正確に求めることは困難である。余談ではあるが、古の頻回の血液ガス採血が困難であった頃には、患者の身長や体重などのパラメーターから術中の換気量を試算する試みがなされたこともあった<sup>3</sup>。

今回、あくまで机上論ではあるが、患者のエネルギー消費量を仮定することで  $V_A$  を予想し、「目標  $\text{PaCO}_2$ 」維持の一助とする方法を試考したので記載する。

【本 論】

同一患者において、n 回目の血液ガス採血(以下、BGA)を行ったときの各種パラメーターを以下のように定義する。なお胸腔外へのリーク、著しい肺塞栓症や先天性心疾患などのシャント率 50%を超える病態はないものと想定する。またエネルギー消費量の計算においては、 $\text{FiO}_2=0.60$  や  $\text{PEEP}=14\text{cmH}_2\text{O}$  を超える患者は想定しないこととする<sup>4</sup>。

BGA<sup>(n)</sup>

一回換気量：  $V_T^{(n)}$  (ml)  
 一回肺胞換気量：  $V_A^{(n)}$  (ml)  
 一回死腔換気量：  $V_D^{(n)}$  (ml)  
 呼吸回数：  $f^{(n)}$  (/min)  
 動脈血二酸化炭素分圧：  $PaCO_2^{(n)}$  (mmHg)

なお、以下の関係が成り立つ。

$$V_T^{(n)} = V_A^{(n)} + V_D^{(n)}$$

つまり、

$$V_D^{(n)} = V_T^{(n)} - V_A^{(n)}$$

一般に肺胞換気式は以下のとおり定義されている。

$$\dot{V}_A = 0.863 * \dot{V}CO_2 / PaCO_2 \text{ (L/min)}$$

肺胞換気式に基づくと、以下の関係が成り立つ。

$$PaCO_2^{(1)} : PaCO_2^{(2)} = (V_A^{(2)} * f^{(2)}) : (V_A^{(1)} * f^{(1)})$$

ここで  $\dot{V}_A^{(n)}$  は  $f^{(n)}$  で割ることにより  $V_A^{(n)}$  となると考えて支障がないことに注意する。この式を変形すると、

$$V_A^{(2)} = (PaCO_2^{(1)} / PaCO_2^{(2)}) * (f^{(1)} / f^{(2)}) * V_A^{(1)}$$

の関係が成り立つ。また、 $V_T^{(n)} = V_A^{(n)} + V_D^{(n)}$  より、

$$V_D^{(2)} = V_T^{(2)} - (PaCO_2^{(1)} / PaCO_2^{(2)}) * (f^{(1)} / f^{(2)}) * V_A^{(1)} \text{ ———(1)}$$

が成り立つことも明らかであろう。これを(1)式とする。

すなわち、 $V_A^{(1)}$  を試算することが出来たら、 $PaCO_2^{(2)}$  と  $V_A^{(2)}$  に一定の関係性を見出すことができることがわかる。

$V_A$  は  $PaCO_2$  により評価されるが、 $PaCO_2$  の由来は、これは吸気中にはなく生体内での産生および主たるは摂取した栄養素の代謝に基づくものである。従って、患者のエネルギー消費量、すなわち EE (energy expenditure) (kcal/day) を評価することが  $V_A$  の試算のために必要である。

間接熱量計による EE の測定 (EE: Calorimetry) と、幾つかの代替評価の手段を比較した研究では、呼気  $CO_2$  を集める Weir の式を用いた方法が最も近似していたとの報告がある<sup>4</sup>。なお、この論文で呼吸商  $R = 0.86$  を採用していたことから、今回の試算でも  $R = 0.86$  を用いることとする。

BGA<sup>(1)</sup>の条件下において EE<sup>(1)</sup>を満たしており、EE<sup>(1)</sup>は Weir の式<sup>5</sup>で近似できるという仮定をもって、 $V_A^{(1)}$ を推定してみることにした。

前述のとおり呼気を集めた際の EE の計算においては、Weir の式が成り立つとされている。

$$EE \text{ (kcal/day)} = ( 3.941 * \dot{V}O_2 + 1.106 * \dot{V}CO_2 ) * 1.44$$

ここで  $\dot{V}O_2$  と  $\dot{V}CO_2$  の単位は ml/min である。

前に述べたとおり肺胞換気式は、

$$\dot{V}_A \text{ (L/min)} = 0.863 * \dot{V}CO_2 / PaCO_2$$

であり、単位を L/min から ml/min に変換するために、

$$\dot{V}_A \text{ (ml/min)} = 863 * \dot{V}CO_2 / PaCO_2$$

とする。

この 2 つの式における  $\dot{V}CO_2$  は同一のものであるから Weir の式に肺胞換気式を代入し  $\dot{V}CO_2$  を消去すると、

$$\begin{aligned} V_A^{(n)} \text{ (ml)} \\ = ( 863 / 1.44 ) * ( EE^{(n)} / PaCO_2^{(n)} ) / \{ ( 3.941 / R ) + 1.106 \} / f^{(n)} \end{aligned}$$

となる。

なお、 $\dot{V}_A$  を  $f$ (呼吸回数)で割ることにより  $V_A$  となることに注意する。この式より、 $V_A$  が EE と  $PaCO_2$  により表されることがわかる。

$R = 0.86$  を代入すると上式は、

$$V_A^{(n)} = K * EE^{(n)} / ( PaCO_2^{(n)} * f^{(n)} ) \text{ ——(2)}$$

となる。これを(2)式とする。

ただし、 $K = (863/1.44)*(3.941/0.86 + 1.106) = 105.353$  である。

ここで単位が右辺は kcal/mmHg であり左辺は ml となる。しかしながら、Weir の式では元から両辺の単位系が揃っていないことになるので問題はないものと考えられる。

(2)式は 1 回目の血液ガス採血において、

$$V_A^{(1)} = K * EE^{(1)} / ( PaCO_2^{(1)} * f^{(1)} )$$

が成り立つ。これを(1)式に代入すると、

$$V_D^{(2)} = V_T^{(2)} - (K * EE^{(1)}) / (PaCO_2^{(2)} * f^{(2)}) \text{ ———(3)}$$

となる。(3)式とする。

(3)式を見ると、 $EE^{(1)}$ がわかれば  $V_D^{(2)}$ を知ることができることがわかる。

さらに2回の血液ガス採血の間の死腔換気量の差  $\Delta V_D$  は、

$$\begin{aligned} \Delta V_D &= V_D^{(2)} - V_D^{(1)} = V_T^{(2)} - V_T^{(1)} \\ &+ (K * EE^{(1)}) / (PaCO_2^{(1)} * f^{(1)}) - (K * EE^{(1)}) / (PaCO_2^{(2)} * f^{(2)}) \\ &\text{————(4)} \end{aligned}$$

であることがわかる。(4)式とする。

1回目のBGA時およびそのときの呼吸状態から  $EE$  を推定することにより2回目のBGA時の  $V_D$ を知ることができさらに、 $V_T$ のみ変更する場合は  $f^{(1)} = f^{(2)} = f$  とおけるので(4)式は簡便になり、

$$\begin{aligned} \Delta V_D &= V_D^{(2)} - V_D^{(1)} = V_T^{(2)} - V_T^{(1)} \\ &+ \{ (K * EE^{(1)}) / f \} * \{ (1 / PaCO_2^{(1)}) - (1 / PaCO_2^{(2)}) \} \text{ ———(5)} \end{aligned}$$

となる。(5)式とする。

(5)式をみると、 $V_T^{(2)}$ が増加するとLinearに  $\Delta V_D$ も増加することがわかり、 $PaCO_2^{(2)}$ が増加したらその場合も  $\Delta V_D$ が増加することがわかる。つまり2回目の血ガスにおいて  $V_T$ が増大しており  $PaCO_2$ が高値であるほど、呼吸状態 =  $\Delta V_D$ が悪化している指標となりえることがわかる。 $PCO_2$ が同値においても  $V_T$ が高値の場合は換気能力が悪く病態の悪化が示唆されるであろうことがわかる。

これをみると、いかに2回の血液ガス採血を採取し2回の呼吸条件を吟味しようとも、 $V_A$ は未知のままであり  $EE^{(1)}$ がわかって初めて  $V_A$ や  $V_D$ を知ることができることがわかるであろう。

さらに  $\Delta V_D=0$  すなわち、2回のBGA時の呼吸状態が変わらない場合、目標  $CO_2$  を目指した換気量の調整を行いたい場合は、

$$\begin{aligned} V_T^{(2)} &= V_T^{(1)} + (K * EE^{(1)}) * \{ 1 / (PaCO_2^{(2)} * f^{(2)}) - 1 / (PaCO_2^{(1)} * f^{(1)}) \} \\ &\text{————(6)} \end{aligned}$$

これを(6)式とする。これに従えば、換気能が変わらない場合においては、目標  $CO_2$ 、ここでは  $PaCO_2^{(2)}$ と置いているもの、を目指した目標換気量  $V_T^{(2)}$ の設定が可能となることがわかる。また  $f^{(1)} = f^{(2)} = f$  の条件下では、

$$V_T^{(2)} = V_T^{(1)} + \{ (K * EE^{(1)}) / f \} * \{ 1 / (PaCO_2^{(2)}) - 1 / (PaCO_2^{(1)}) \} \text{ ——— } (7)$$

これを(7)式とする。さらに簡便に  $V_T^{(2)}$  の設定が可能となり、やはり 2 回の BGA のみでは設定困難であり  $EE^{(1)}$  が項として含まれることがわかる。

EE の試算のための方法を幾つか列挙するので参考にされたい。

・ Harris-Benedict 式

男性:  $BEE = 66.47 + 13.75 * W + 5.0 * H - 6.76 * A$

女性:  $BEE = 655.1 + 9.56 * W + 1.85 * H - 4.68 * A$

W: 体重(kg), H: 身長(cm), A: 年齢

ここに適切な Activity Index, Stress Index を乗じて用いる。

・ The ICU Book による方法

$REE \text{ (kcal/day)} = 25 * \text{体重 (kg)}$

ただし、実体重が理想体重の 125%以内なら実体重で計算してよいが、実体重が理想体重の 125%を上回る場合は、次の式により算出された補正体重を用いる。

$\text{補正体重 (kg)} = \{ (\text{実体重} - \text{理想体重}) * 0.25 \} + \text{理想体重}$

$V_T = V_D + V_A$  であるから、疾患肺において問題となるのは  $V_D$  の大小であることは論を俟たない。従って、病態が改善してきたら  $V_D$  は減少する。挿管チューブの太さや長さが変わらないのであれば、つまりメカニカルな  $V_D$  が変わらないのであれば、 $V_D$  の大小がすなわち疾患肺の病態の改善の有無そのものである。

逆に考えたら  $V_D$  が変化しない場合は、 $V_A$  の変化そのものが  $PaCO_2$  の変化となることがわかるであろう。

BGA<sup>(1)</sup>と BGA<sup>(2)</sup>の間はかなり時間が空いている場合や投与している栄養のレジメンが大幅に変更されている場合は参考にならないが、代謝や栄養状態に著変なく、新たな感染症などの病態が生じていない場合は、ここで行った試考は大いに参考になるであろう。

今回の試考が適切なものであるか、今後、臨床現場で大いに検討されることを期待する。

【Python コードと症例】

<https://github.com/YohYasushi/CO2-VT-VD> に提示している。

<参考書籍>

ウエスト呼吸生理学入門 正常肺編

経腸栄養バイブル

血液ガスの臨床

静脈経腸栄養ガイドライン 第 3 版

The ICU Book

Dr. 竜馬の病態で考える人工呼吸管理

一目でわかる血液ガス

ヘスとカクマレックの THE 人工呼吸ブック

臨床呼吸機能検査 第8版

<引用文献>

1. Brower, R. G. *et al.* Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N. Engl. J. Med.* **342**, 1301–1308 (2000).
2. Jacobs, R., Sablon, A. & Spapen, H. Extracorporeal Carbon Dioxide Removal During Continuous Renal Replacement Therapy as Adjunctive Therapy. *Respiratory care* **65**, 517–524 (2020).
3. RADFORD, E. P. Ventilation standards for use in artificial respiration. *J. Appl. Physiol.* **7**, 451–460 (1955).
4. Stapel, S. N. *et al.* Ventilator-derived carbon dioxide production to assess energy expenditure in critically ill patients: Proof of concept. *Crit. Care* **19**, 370 (2015).
5. Weir, J. B. d. V. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.* **109**, 1–9 (1949).