

$$PaO_2 = (PB - PH_2O) \times FiO_2 - PaCO_2 / R$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

$$CaO_2 = 1.39 \times Hb \times SaO_2 + 0.0031 \times PaO_2$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

$$CO = SV \times HR$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

式から読み解く

+ + + + + + + + + + + + + + +

臨床に役立つ生理学

+ + + + + + + + + + + + + + +

田邊翔太

+ + + + + + + + + + + + + + +

松江赤十字病院 救急部

$$DO_2 = CaO_2 \times CO$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

$$VO_2 = (CaO_2 - CvO_2) \times CO$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

$$PaCO_2 \propto VCO_2 / VA$$

+ + + + + + + + + + + + + + +

中外医学社

呼吸・循環

ヒトは吸入した酸素を肺胞から血液に乗せて細胞に届けています。細胞は届けられた酸素を消費する過程で二酸化炭素を産生します。二酸化炭素は細胞から血液に乗せられ、肺で呼気として排出されます。

呼吸とは酸素と二酸化炭素の交換（ガス交換）を意味しますが、

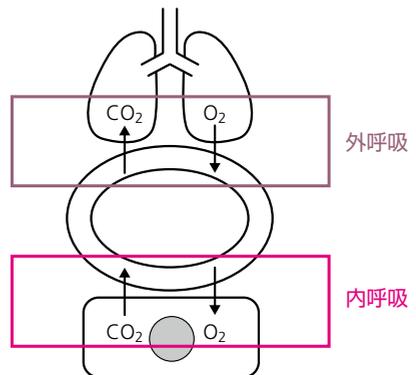
- 肺胞と血液による酸素・二酸化炭素の交換を外呼吸
 - 細胞と血液による酸素・二酸化炭素の交換を内呼吸
- と呼んでいます **図**。

循環の主な目的は

- 酸素を肺から組織へ運搬すること
 - 二酸化炭素を組織から肺へ運搬すること
- です。

どれくらいの酸素を吸入しているのか
どれくらいの酸素を血液に乗せているのか
どれくらいの酸素が細胞に届けられているのか
どれくらいの酸素を細胞が消費しているのか
どれくらいの二酸化炭素が産生されているのか

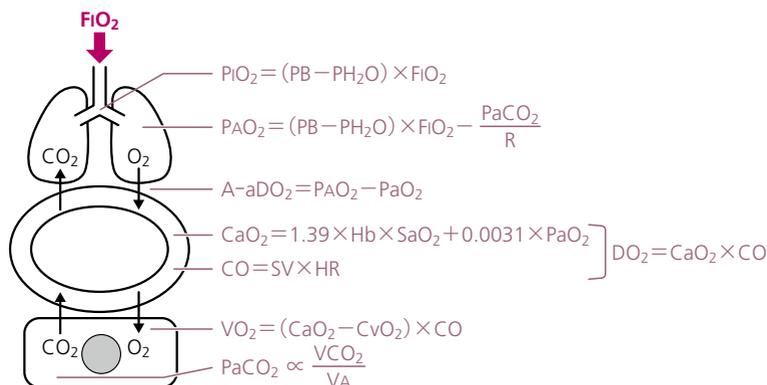
本章では呼吸と循環に関する式から臨床を読み解いていこうと思います。



図

吸入酸素濃度

FiO_2



ヒトが上気道から吸入する気体にどれくらいの酸素が含まれているのか。
酸素投与でどう変化するのか。

FiO_2 を中心に考えていきます。

P/F 比

呼吸機能を評価する際に登場するのが P/F ratio (P/F 比) であり、

$$P/F \text{ ratio} = \frac{PaO_2}{FiO_2}$$

で計算されます。

動脈血酸素分圧 (PaO_2) を吸入酸素濃度 (FiO_2) で除しており、 FiO_2 に対する PaO_2 の比をみています。

表1 ARDS ベルリン基準

| | mild | moderate | severe |
|--------|---|--|--|
| P/F 比 | 200 < ≤ 300
(PEEP ≥ 5 cmH ₂ O) | 100 < ≤ 200
(PEEP ≥ 5 cmH ₂ O) | < 100
(PEEP ≥ 5 cmH ₂ O) |
| 発症時期 | 侵襲や呼吸器症状（急性/増悪）から 1 週間以内 | | |
| 画像 | 両側性陰影（肺炎・肺虚脱・結節では全て説明できない） | | |
| 肺水腫の原因 | 心不全、輸液過多では説明できない呼吸不全
*危険因子がない場合は超音波による客観的評価が必要 | | |

肺での酸素化=外呼吸に障害があると低下し、ARDSのベルリン定義^[1]などでも登場する一番有名な酸素化の指標です（表1）。ちなみに健康人の正常値は400～500程度です。

PaO₂は動脈血液ガスから測定しますが、FiO₂はどのように決まるのでしょうか？

まず、地球の酸素濃度は0.21（21%）です。これは海拔0mでも、エベレスト山頂でも変わりません。標高が上がると「酸素が薄くなる」と言われることがありますが、これはFiO₂が下がるのではなく、大気圧が下がることで酸素分圧が低くなる現象を言っています。（酸素分圧については後述の「SECTION 02 肺胞気式」などで詳しく説明します）

地球上でFiO₂が0.21より低くなるのは、人為的に造られた常圧低酸素トレーニング施設や労働災害など限られた場合のみです。人工呼吸器もFiO₂を0.21より低く設定できないようになっており、医療機関においてFiO₂が0.21より低下することはありません。

逆にFiO₂を0.21より高くするのは簡単です。酸素を投与するだけです。では、どれくらい酸素を投与すれば、どれくらいFiO₂が高くなるのでしょうか？

memo 地球の酸素濃度^[2]

正確には0.209（20.9%）ですが、本書では0.21（21%）とします。

今後、地球の酸素濃度が低下していくと予測する専門家もいるようですが、地球のFiO₂は1000万～1億年という果てしなく長い単位で変動しており、少なくとも我々が生きる現代で大きく変わることはないでしょう。

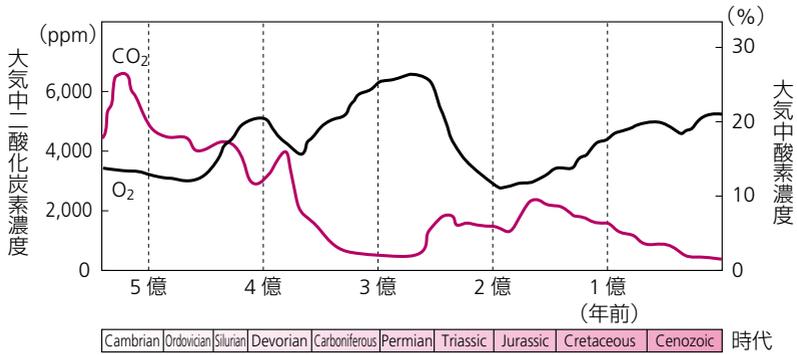


図 1

(Dorrell RG, et al. Eukaryot Cell. 2011; 10: 856-68⁽²⁾より改変)

標準酸素療法における FiO_2

標準酸素療法は英語では standard oxygen therapy (SOT), conventional oxygen therapy (COT) と表記され、カニューラやマスクを用いて行う酸素療法です。表 2 に標準酸素療法における酸素投与量と FiO_2 の換算表を示します。よく見かける表ですね。

この有名な表 2 が架空の計算式に基づくものであり、臨床では役に立たないと

表 2

| | 酸素流量 L/min | FiO_2 |
|-------------|------------|---------|
| 鼻カニューラ | 1 | 0.24 |
| | 2 | 0.28 |
| | 3 | 0.32 |
| | 4 | 0.36 |
| 酸素マスク | 5 | 0.4 |
| | 6 | 0.5 |
| | 7 | 0.6 |
| リザーバー付酸素マスク | 7 | 0.7 |
| | 8 | 0.8 |
| | 9 | 0.8 以上 |
| | 10 | 0.8 以上 |

偉人たちの法則

18～19世紀は偉人たちより多くの法則が発明された時代でした。本章では臨床にも役立つラプラス、ハーゲン・ポアズイユ、ベルヌーイの法則について紹介していきます。

これらの法則は「モノ」を対象として発明されてきました。そのため、「ヒト」に適用すること、臨床生理学に応用することは正しくないのかもしれませんが、しかし、法則の基礎にある考え方をすることで臨床への理解が深まるのは間違いないでしょう。

様々な場面で活躍する偉人たちの法則を通して、式の奥深さと臨床生理学の面白さを感じてください。

ラプラスの法則

Pierre-Simon Laplace (1749-1827) **図 1**

フランス

数学・物理学・天体学

フランスのニュートンと云われた天才。

未来に生じる全ての事象は過去に起きた事象に起因すると考えていた典型的な決定論者だった (memo: ラプラスの魔)。

代表的著書は「Mécanique céleste (天体力学論)」と「Théorie Analytique des Probabilités (確率の解析的理論)」。

フランス革命の動乱を生き、晩年は政治家としても活動。



図 1

(<https://ja.wikipedia.org/>)

ラプラスの式

球や円柱における圧: pressure, 半径: radius, 張力: tension の関係を示した法則です。汎用されているラプラスの法則は下記のように表せます **図 2**。

$$\text{球: } P = \frac{2T}{R} \quad \text{円柱: } P = \frac{T}{R}$$

P: 圧, T: 張力, R: 半径

この式は、

- 張力が大きいほど壁にかかる圧は高い
- 半径が小さいほど壁にかかる圧は高い

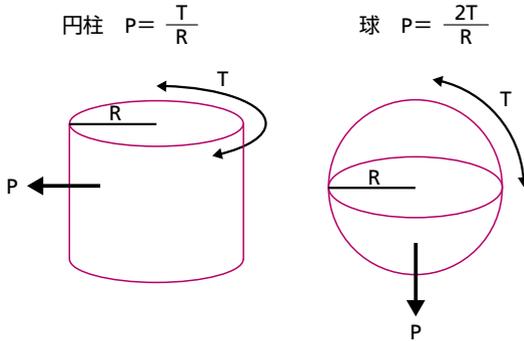


図 2

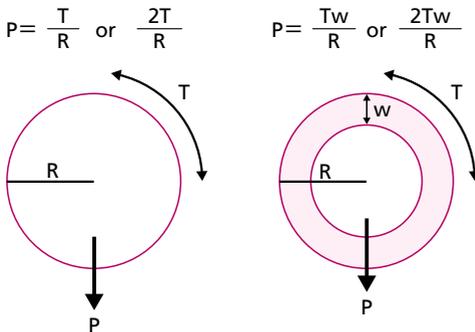


図 3

などの関係を示しています。

また、球や円柱の壁厚を考慮する場合には、壁厚 = w (wall thickness) を張力 $= T$ に乗じた式を用います 図 3。

球: $P = \frac{2Tw}{R}$

円柱: $P = \frac{Tw}{R}$

この壁厚を考慮した式は元々の式に加えて圧と半径が一定なら

- 壁が厚いほど張力は小さくなる
- 壁が薄いほど張力は大きくなる

という関係を示しています。