

「PaO₂」は酸素の量でも濃度でもない

1.はじめにー「PaO₂」とは？

まず最初に、「PaO₂」とは何の略かを勉強しましょう。「P」は pressure、すなわち圧を意味します。「a」は artery、動脈のことです。「O₂」は言うまでもなく酸素のことです。日本語に訳すと、「動脈血酸素分圧」といいます。つまり、「PaO₂」は動脈血の中の酸素の圧なわけです。

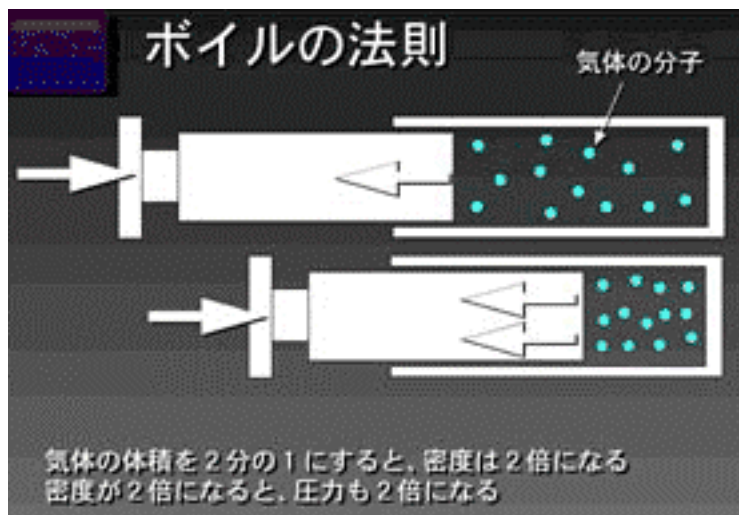
いったい圧って何でしょう。これを知らないと、「PaO₂」が酸素の量や濃度であると錯覚してしまうのです。液体である動脈血の中の気体（酸素）の圧、これを理解するためには、皆さんに高校で習った化学や物理を思い出してもらわねばなりません。

2.高校時代に戻る

(1)ボイルの法則で気体の「圧」を実感する

簡単な方法で気体が圧力を持っていることを実感しましょう。

まず、注射器に 10cc の空気を入れて、空気が外に漏れないようにしっかりキャップをしましょう。実はこの時すでに注射器内の空気は圧を持っていて、その圧力で注射器の内筒を外に押し出そうとしています。ところが、注射器の外の空気も同じ圧力で内筒を押し込



もうとしており、ちょうど圧力が釣り合っているため内筒は動きません。今度は、この状態で内筒を 5cc まで押し進めてみます。すると、指には結構な力がかかり、離せばすぐに元の 10cc に戻ってしまいます。これは、注射器内の空気の体積が減ったために密度が高くなり、その圧力が高くなったためです。気

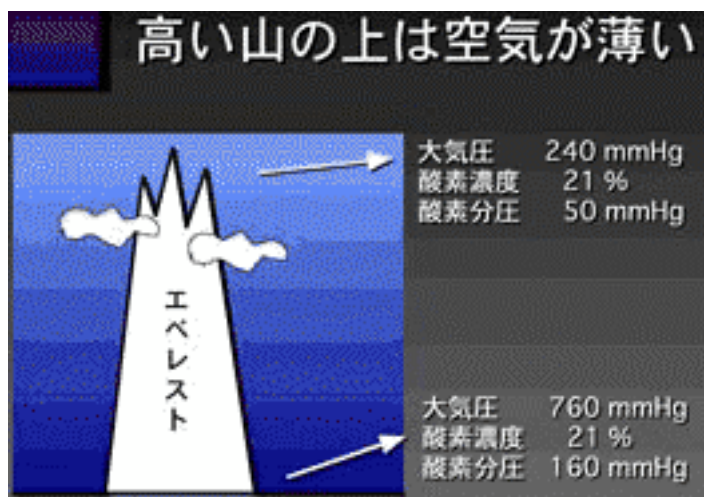
体の体積が 1/2 になったとき、その圧力は 2 倍になります。すなわち、気体の体積は圧力に反比例する。これが有名なボイル (Boyle) の法則です。思い出しましたか。ただし、ボイルの法則は、温度が一定ならば、という条件付きです。

(2) ボクらは大気圧の中で生活している

注射器の空気を圧縮することで、気体の圧力を実感しました。ボクたちは空気の中で生活しており、当然この空気も圧力を持っています。通常の空気の圧力の強さを便宜上「1 気圧」とします。普段ボクたちがこの「1 気圧」を意識しないのは、普段はどこもかしこも「1 気圧」であり、体の中も「1 気圧」なので、ちょうど圧がつり合っているからです。しかし、急激に気圧が変化すると、これを感じる場合があります。たとえば、飛行機の離着陸の時とか、電車がトンネルに入った時に耳が痛くなったり塞がった感じになったりするのがそうです。

(3) 高い山に登ると空気は薄い

空気は地球上に均一に分布しているわけではありません。重力の影響で、海拔の低いところほどその密度は高く、また高いところほど密度は低く分布しています。皆さんはすでに注射器を使って、空気を圧縮してその密度を高くしてやると気圧が高くなることを実感しました。高い山上では、空気の密度が低いので、その気圧も低いことはもう理解できるでしょう。



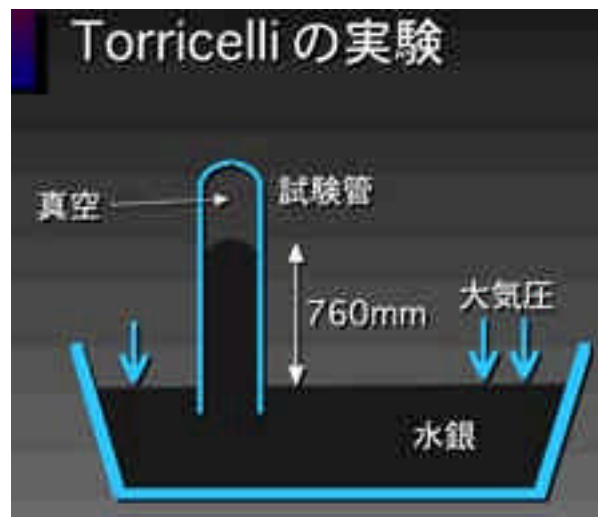
さて、今ボクは「空気が濃い」というような表現をわざと避けて、「空気の密度が高い」と表現しました。どうしてかというと、「密度」と「濃度」を混

同しないしてほしいからです。よく「高い山の上では酸素が薄い」といいますが、これではまるで酸素濃度が低いかのような印象を受けます。実はエベレストの頂上でも酸素濃度は相変わらず約 21% です。高い山の上では空気の密度が低いので、当然「酸素の密度」も低い、でも「酸素の濃度」に変化はないのです。気体における「濃度」とは、混合ガスに対するある成分の割合を意味します。空気はその混合ガスですから、「空気の濃度」という言葉はありません。

(4) 大気圧の測定ートリチェリの実験

さて、大気圧は「1気圧」といいましたが、ボクたちはその大気圧を意識することができません。いったいどれぐらいの圧なのか、何か目に見える方法で測定したいものです。

世界で初めて大気圧を測定したのはガリレオ・ガリレイの弟子であったトリチェリ (Torricelli) という人ですが、それは何と今から 350 年以上も前の 1644 年のこと



です。彼は長い試験管を水銀で満たし、それを立ててみました。しかし、水銀は全部落ちてはしまわずに、試験管の中にとどまっていた。これは、大気が圧を持っていて、その圧力で水銀を押し上げているに違いありません。そして、この時にできた水銀柱の高さは約 760mm でした。それで、「1気圧は 760 ミリ・メートル水銀柱」と表すことにしたのです。これからは、「760mmHg」というふうに書きますが、「Hg」とは水銀のことなのです。

(5) 760 mmHg = 760 Torr

圧を表す単位としてこの「mmHg」は非常にポピュラーですが、最近トリチェリの名前にちなんで「Torr」と表記しようということになりました。厳密にはある条件下では全く同じとは言えないのですが、一部の教科書ではすでに

「mmHg」の代わりに「Torr」を使っています。

余談になりますが、「mmHg」が血圧の単位としても使われるようになったのは、1828年に当時医学生だったポアズイユ（Poiseuille）が水銀柱を利用して血圧を測って以来のことです。ポアズイユはその後、血行力学というものを確立して大先生になります。彼が有名な「ポアズイユの法則」の実験をしたのが1840年、これを著書に記述したのが1846年でした。

ところで普通圧力は「強い、弱い」と表現しますが、大気圧も血圧も元々はこのように水銀柱の高さで測っていたので、「高い、低い」と表現するようになったのでしょうか。

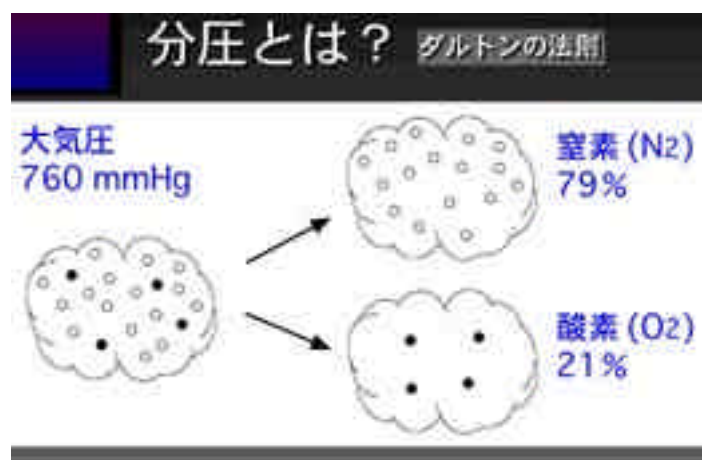
(6)大気圧は場所によってどれくらい違うのか？

厳密には、1気圧 = 760mmHgというのは、海面（海拔0m）での話です。大気圧はその場所の海拔が高いほど低くなることはすでに述べました。たぶんトリチェリが行った実験をエベレストの頂上で行うと、水銀柱は250mmぐらいにしかならないはずですよ。

日本で最も気圧が低いのは富士山の頂上で、その気圧は約480mmHgです。しかし、日本ではほとんどの人が海拔300m以下の場所にすんでいます。海拔300mでの大気圧は733mmHgですから、日本に住んでる限り、1気圧 = 760mmHgと考えて差し支えないでしょう。

(7)分圧とは何か？ーダルトンの法則

さて、気体の圧力についてだんだんその概念が分かってきました。今度は、「分圧」について勉強しましょう。分圧という概念は、ダルトン（Dalton）の法則から生まれたものです。どういう法則かというと、「混合気体の圧は、各構成気体がそれと同じ体積



を単独で占めた時の圧の和に等しい」というものです。この法則を空気に当てはめて考えていきましょう。

図に、ある一定の容器に密閉した空気を用意しました。空気とは、酸素約21%、窒素約79%の混合気体ですから、とりあえず、4つの酸素分子と16個の窒素分子、合計20個の分子を書いてみました。これを同じ容積の容器に、一方は酸素だけ、もう一方は窒素だけに分けてみました。酸素だけの方は同じ容積に4つしか分子がありません。元の空気は20個の分子を持っていたから、それに比べて密度は1/5になりました。したがって、気圧も1/5に下がっているはずですが、このことから、「各構成気体がそれと同じ体積を単独で占めた時の圧」とは、元の混合気体の気圧にその構成気体の濃度をかけたものであることが分かるでしょう。実はこれを「分圧」というのです。

したがって、空気の圧を760mmHgとすれば、酸素分圧は、 $760 \times 0.21 = 160\text{mmHg}$ となります。同様に、窒素分圧は、 $760 \times 0.79 = 600\text{mmHg}$ です。

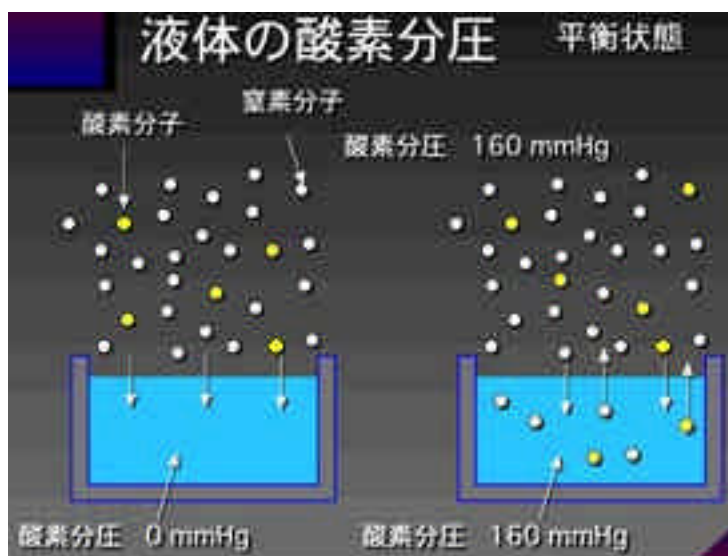
(8)液体のガス分圧とは？

さて、気体の「分圧」という言葉の意味が分かったのでしょうか。しかし、ボクたちが知りたいのは「 PaO_2 」、すなわち動脈血の酸素分圧です。液体のガス分圧とはいったいどういうことでしょうか。

実は、気体の分子は液体と接したとき、そのままの形で自由に液体に入り込んだり出ていったりします。

そして、気体分子が何ら化学反応を起こさずにその分子の形のままで液体の中に存在していることを、「溶解している」といいます。

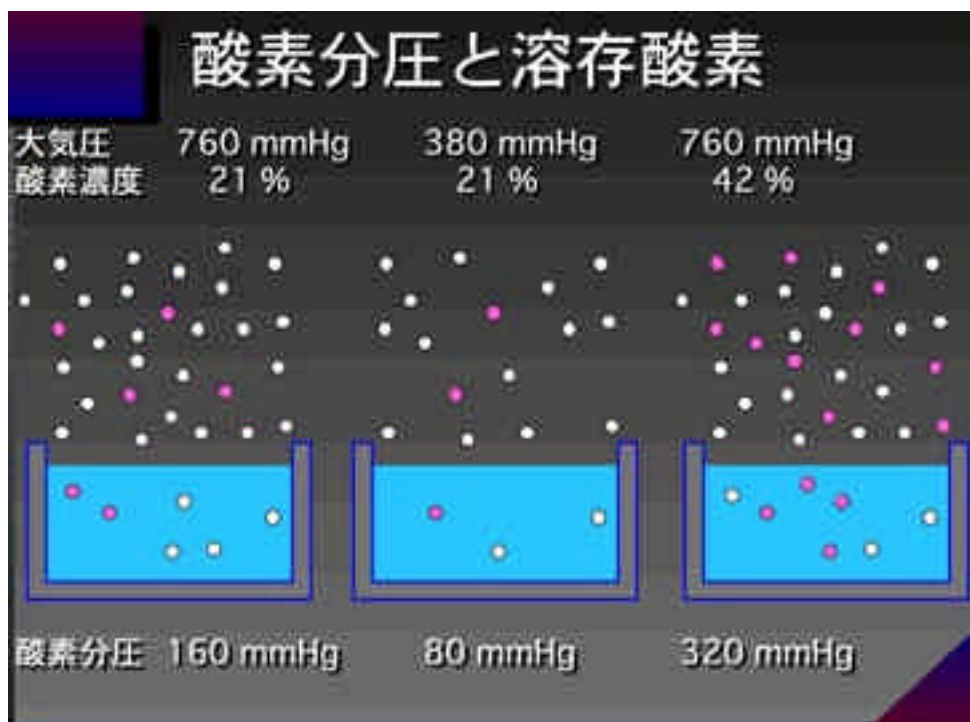
液体のガス分圧を簡単に説明するために、図を用意しました。全く気体が溶



けていない水を容器に入れて、空気中に放置しました。まず空気中の窒素分子も酸素分子も水の中に入り込んでいきます。しかし、水の中に存在できる気体分子の数には定員があります。したがって、やがて水の中に入り込む分子の数と水の中から出ていく分子の数は同じとなり、見かけ上水の中の気体分子の数は一定になります。この状態を「平衡状態」といいます。

空気は無限にありますから、水の中に多少気体分子が入り込んだところで空気の気圧も酸素分圧・窒素分圧も変化しません。ですから、この水は、酸素分圧が 160mmHg で窒素分圧が 600mmHg の気体と平衡状態にあるといえます。このとき、「この水の酸素分圧は 160mmHg で窒素分圧は 600mmHg である」と表現します。言い換えると、ある液体の酸素分圧が 160mmHg ということは、その液体が酸素分圧 160mmHg の気体と平衡状態にあることを意味します。

普段ボクたちが何気なく言ってる「 $\text{PaO}_2 = 100\text{mmHg}$ 」とは、「動脈血が酸素分圧 100mmHg の気体と平衡状態にある」という意味なのです。（注：厳密には、液体における「 PO_2 」と表現した場合、それは液体から出ていこうとする酸素分子によって生じる張力のことを指します。しかし、平衡状態では



液体中の酸素の張力と気体の酸素分圧は等しくなるので、このように理解して

もらっていいのです。)

(9) 気体が溶解する量はその分圧に比例する

「液体における気体分圧」について分かってきたでしょうか。だんだん話がややこしくなってきましたが、「 PaO_2 」を語る上でどうしても避けられないので、もう少し我慢して読んでください。

前項で、気体分子が液体の中に存在する数には「定員」があるといいました。実はこの「定員」は元の気体の分圧によって変化します。図の左側は、大気圧 760mmHg での空気と水の平衡状態で、水の中に酸素分子 2 個、窒素分子 4 個が存在しています。この水を気圧が半分の 380mmHg しかない高い山の上に持っていったのが図の真ん中です。気圧が半分ですから、酸素分圧も窒素分圧も半分です。そして、水の中には酸素分子が 1 個、窒素分子は 2 個しか存在していません。つまり、分圧が半分になると液体に溶解する気体の量も半分になるのです。逆に分圧が高ければそれだけ溶解する量は増えます。すなわち、「気体が溶液に溶解する量はその分圧に比例する」、これが有名なヘンリー (Henry) の法則です。

さて、しつこいかもしれませんが、ヘンリーの法則を理解するためにもうひとつ例をあげましょう。病院の酸素タンクが爆発して院内の酸素濃度が通常の 2 倍の約 42% になったとしましょう。それが図の右側です。酸素濃度が 2 倍なので酸素分圧も 2 倍の 320mmHg となり、溶けている酸素分子の数も 2 倍の 4 個になりました。

(10) ガスの種類によって、もとの溶けやすさが違う

さて、液体に溶解する気体の量は気体の分圧によって左右されることを模式図を使ってお話ししてきました。しかし、賢明な方なら、前の図にはまだボクが話したい秘密が隠されていることに気づくはずですよ。

もう一度前の図の左側を見てください。平衡状態ですから、大気の酸素分圧・窒素分圧も液体の酸素分圧・窒素分圧も同じです。ところが、酸素分子と窒素分子の数の割合は、大気と液体では異なっています。そして図の右側では、**酸素分圧よりも窒素分圧が高いにもかかわらず、酸素分子の方が数多く溶けています。**

実は、気体分子はその種類によって、もともとの溶けやすさがまちまちです。たしかにどんな気体でも、その分圧が2倍になれば溶ける量は2倍になるし、分圧が3倍になれば溶ける量は3倍になります。しかし、もともと酸素は窒素より2倍も水に溶けやすいので、前図右のように酸素分圧は窒素分圧より低いけれど溶解している量は酸素の方が多という状況が起こりうるのです。

ボクがなぜここまでまわりくどい例をあげてきたかというのも、このように「分圧」は、けっして液体中の気体の「量」や「濃度」そのものを表しているのではないことを実感してほしかったからです。

(11)ブンゼン係数で遊ぶ

思い出してみれば、ボイルの法則もヘンリーの法則も高校時代に習っているはずですが。当時は「こんなこと勉強して将来なんの役に立つんだ」なんて思ってたことでしょう。しかし、「 PaO_2 」の意味を理解するためには、避けて通れない知識なのです。ちまたの血液ガスの教科書は、こういうことを高校や大学で習ってきてすっかり理解しているという前提で書かれています。これがボクたちが教科書を読んでもさっぱり理解できない理由なのかもしれません。

さて、高校時代の復習もそろそろ終わりに近づいてきました。ここまで、なるべく理解しやすいように図を使って分子の数で示したりするようにして、難しい数字や計算を使わないように配慮してきたつもりです。重要なもうひとつの因子である「温度」もあえて無視してきました。しかし、「分圧」や「もともとの溶けやすさ」の違いで、液体に溶ける量がどれだけ違うのか、実際に計算で確かめられるようになればこしたことはありません。この項でそれをやりますが、数学や計算は全然ダメという人はパスしてください。

ブンゼン (Bunsen) というドイツ人は、気体の種類の違いによるもともとの溶けやすさの違いを調べました。彼は、いろいろな気体について、その気体が760mmHgの時、溶液1mlに溶けるその気体の量を、その気体を0にした時の体積(ml)で表しました。これを溶解係数といいますが、彼の名前をつけて**ブンゼン係数**ともいいます。気体の溶けやすさは温度にも影響されるので、ここでは体温に近い37で一定、しかも溶液は単純に「水」だということにして、表に示しました。この数字を見れば、酸素は窒素の約2倍溶けやすいことが分かります。それから、二酸化炭素はものすごく水に溶けやすく、酸素の約20倍も溶けることが分かります。

表：37、760mmHgでの水への溶解係数	
酸素 (O ₂)	0.024
窒素 (N ₂)	0.012
二酸化炭素 (CO ₂)	0.570

ml (気体) / ml (溶液) / 760mmHg、量は標準状態 (0℃、1気圧、乾燥状態) で表す

それでは、普通の空気 (酸素分圧 160mmHg、窒素分圧 600mmHg) と平衡状態にある 100ml の水の中に、いったいどれぐらいの酸素と窒素が存在しているのか計算してみましょう。

$$\begin{aligned} \text{酸素} &: 160\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.024 \times 100\text{ml} = 0.51\text{ml} \\ \text{窒素} &: 600\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.012 \times 100\text{ml} = 0.95\text{ml} \end{aligned}$$

というわけで、普通は水 100ml の中に 0.51ml の酸素と 0.95ml の窒素が溶けています。

次に、前の図で示したような、酸素濃度が約 42% になってしまった大気について、同じように計算してみます。

$$\begin{aligned} \text{酸素} &: 320\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.024 \times 100\text{ml} = 1.01\text{ml} \\ \text{窒素} &: 440\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.012 \times 100\text{ml} = 0.69\text{ml} \end{aligned}$$

このように、酸素分圧は窒素分圧よりも低いのに、実際に溶けている量は酸素の方が多いたことが分かります。

3. 閑話休題：魚の苦勞

(1) 「血液ガステキスト（文光堂）」

ボクの好きな血液ガスの教科書に、「血液ガステキスト（工藤翔二著・文光堂）」という本があります。図を多く使った分かりやすい解説はさることながら、日常に結びつけた参考になるエピソードがたくさん挿入されているのが好きで、ここでも大いに参考（盗作？）にさせてもらっているのです。

(2) 魚の苦勞

この本の中に、「魚の苦勞」というコラムがあります。魚は水の中に溶けているわずかの酸素を利用しなければならないから、大変な苦勞をしているという話です。前項で普通の水に溶けている酸素の量を計算しましたが、水100mlに酸素は約0.5mlしか存在していないのです。ボクたちは空気を100ml吸ったらその中に酸素は約21ml入ってますから、魚の苦勞もいっそう身にしみて理解できます（注：温度の影響は無視してます）。

(3) 魚の呼吸仕事量

魚は水中の少ない酸素を取り込むために、大量の水をエラに送り込んでいます。通常ボクたちは、全エネルギー消費量の1～2%ほどしか呼吸仕事量に費やしていませんが、魚は懸命にエラを動かさなければならず、10%も使っているそうです。

(4) 魚の「肺炎」ならぬ「エラ炎」

話はそれますが、呼吸不全患者では呼吸仕事量の増大が問題となります。酸素の取り込みがうまくいかないのに、患者さんは一生懸命呼吸しようとして（努力呼吸）。ところが、その努力呼吸によって呼吸仕事量が増えるので、その分より多くの酸素が必要になるという悪循環に陥ります。ですから、もともと呼吸仕事量が多い魚が、「肺炎」ならぬ「エラ炎」にでもなったら大変だろうなあと思うのです。

(5)活魚の輸送

もう10年以上も前に、風変わりなある麻酔科の先生から血液ガスの講義を受けたことがあります。その中でボクは「活魚の輸送」についての質問を受けました。魚をいかに健康なまま輸送するかという学問ですが、水産学の一部として立派に確立されている分野です。質問のひとつに、「酸素は水中よりも空気中に多くあるんだから、魚は空気中に出して輸送した方がいい、か×か？」というのがありました。ボクたちの肺の肺胞は、空気が入ってもしばまないようにサーファタントという物質が肺の表面張力に働いていることが知られています。ところが、魚のエラの肺葉ならぬ「エラ葉」は乾くと互にくっついちゃうので、有効な面積を生かすことができず、せっかく空気中にあるたくさんの酸素も取り込めないということになります。

4.血液に溶ける酸素の量

(1)もし血液がただの水だったら

酸素分圧は、それ自体は酸素の量も濃度も表していないことは理解できました。でも、酸素分圧から量を計算することはできるようになったはずですが。復習になりますが、ここでは血液をただの水だと考えて、動脈血酸素分圧すなわち「PaO₂」が100mmHgのとき、血液100mlにどれだけの酸素が溶けているかを計算しましょう。

さて、酸素のブンゼン係数は0.024でした。これは、酸素分圧が760mmHgの時に1mlの水に溶ける酸素の量でしたね。ですから、次のようになります。

$$\text{「} 100\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.024 \times 100\text{ml} = 0.3\text{ml}\text{」}$$

(2)PaO₂ 1mmHg で 0.003ml 溶ける

しかし、いちいち上のように計算していたのでは面倒です。そこで、まず酸素分圧1mmHgのとき100mlに溶ける酸素量を計算して覚えておきましょう。

「 $1\text{mmHg} / 760\text{mmHg} \times 0.024 \times 100\text{ml} = 0.003\text{ml}$ 」

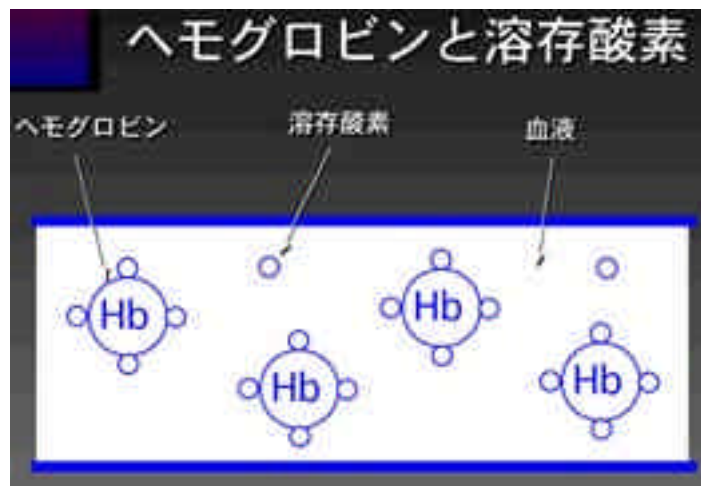
つまり、酸素は酸素分圧 1mmHg につき血液 100ml あたり 0.003ml 溶けるということになります。

(3) PaO_2 100mmHg で 0.3ml 溶ける

これで計算が楽になりました。 PaO_2 100mmHg ならば血液 100ml に「 $100\text{mmHg} \times 0.003 = 0.3\text{ml}$ 」の酸素が存在します。もし、 PaO_2 200mmHg ならば「 $200\text{mmHg} \times 0.003 = 0.6\text{ml}$ 」ということになります。

(4) 0.3ml では足りない

血液の大きな役割のひとつは、酸素を肺から受け取って組織へと運び、組織からは二酸化炭素を受け取ってこれを肺へと運ぶことです。ブンゼン係数の項で述べましたが、酸素は二酸化炭素に比べて20倍も水に溶けにくいのですから、ただ酸素の水に溶ける性質だけに頼っていたのではあまりに効率が悪いのです。

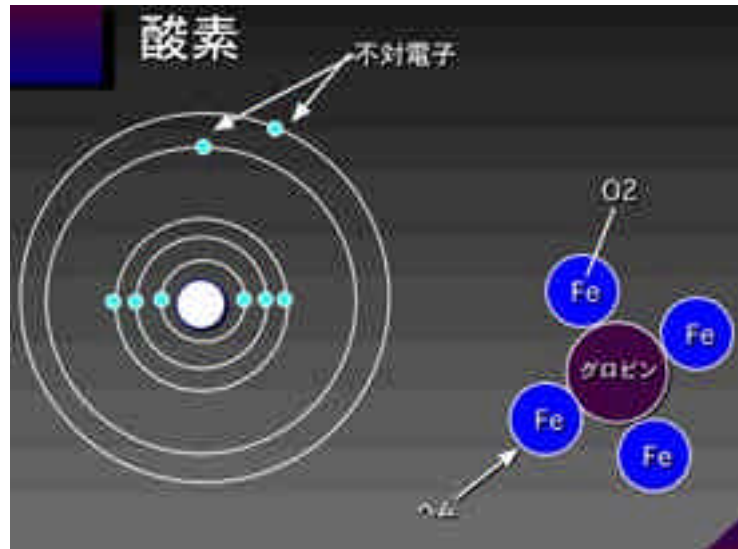


そこで登場するのがヘモグロビン (Hb) です。酸素分子と結合できるヘモグロビンの存在によって、血液はより多くの酸素を効率よく運ぶことができます。つまり、血液の中には、図のように直接溶けている溶存酸素と、ヘモグロビンと結合している酸素が存在します。したがって実際には、 PaO_2 100mmHg のとき血液 100ml に存在する酸素の量は、溶けている量 0.3ml に、ヘモグロビンと結合している量を加えなければなりません。

5.ヘモグロビンの能力

(1)酸素の功罪

酸素原子は、陽子とその周りを回る16個の電子から成ります。通常電子の軌道には2つの電子が対を成して存在しますが、酸素の場合、一番外側の2つの電子は、ひとつで回っています。このような相手のいない電子を「不対電子」といいます。「不対電子」は非常



に不安定なので、容易に取り出すことができます。電子が移動すれば電流となることから分かるように、電子の移動はエネルギーになります。ボクたちは、長い進化の過程で、生命活動に必要なエネルギーを得るための電子として、酸素の電子を使うことを選択したわけです。

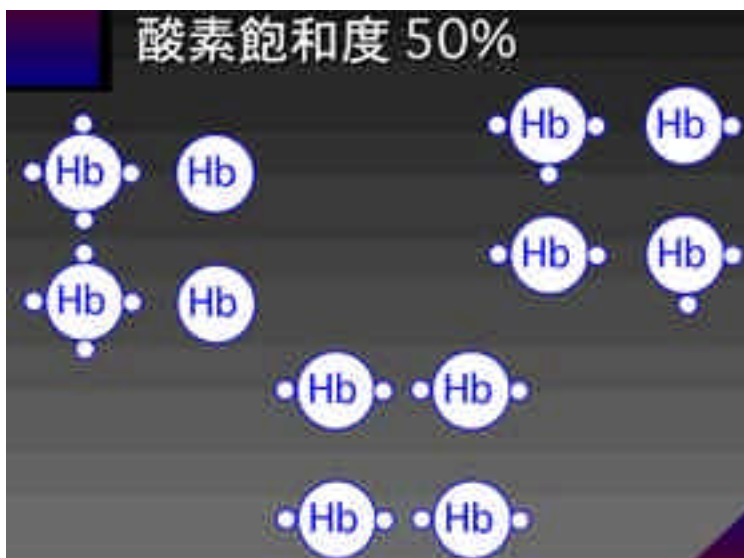
しかし、電子をもらうということは、酸化されるということです。酸化の極端な形が燃焼なので、電子を受け取るということは一方で結構リスクを背負っているのです。酸素は生体に必須のものですが、毒でもあるのです。ですから、もし酸素を運搬するのにタンパク質を使おうと思っても、すぐにやられてしまってダメです。生体は本当によくできているもので、ヘモグロビンは4つの「ヘム分子」の中の鉄に酸素をくっつけることで、この問題を解決しています。丈夫な金属を選んだわけです。

(2)ヘモグロビン酸素飽和度 (SaO₂)

それでは次に、ヘモグロビンにいったいどれだけの酸素が結合するのかを考えていきます。

ヘモグロビンの数には限りがありますから、ヘモグロビンと結合する酸素の

量にも限りがあります。実はヘモグロビン1分子は4つの酸素分子を結合する能力をもっています。だから、もし10個のヘモグロビンがあったとしたら、酸素分子が座れる空席は40席あることになります。このすべての



座席に酸素分子が座ってしまって、もう空席がない状態を「飽和状態」といいます。そして、このとき「酸素飽和度 100%」と表現します。もし座席が半分しか埋まってなかったら、酸素飽和度は50%です。ところが、酸素飽和度50%といっても図のようにいろいろなパターンが考えられます。

しかし実際には、ヘモグロビン分子は、全く酸素分子がくっついていない状態か、4つの酸素分子がくっついてしまっている状態が安定状態で、酸素分子が1個とか、2個とか、3個とか、中途半端にしかくっついてない状態はキライなのです。したがって、酸素飽和度50%のときは、4つの酸素分子で座席がすべて埋まっているヘモグロビンと、全く酸素が結合していないヘモグロビンが半分ずつ存在していると考えられます。



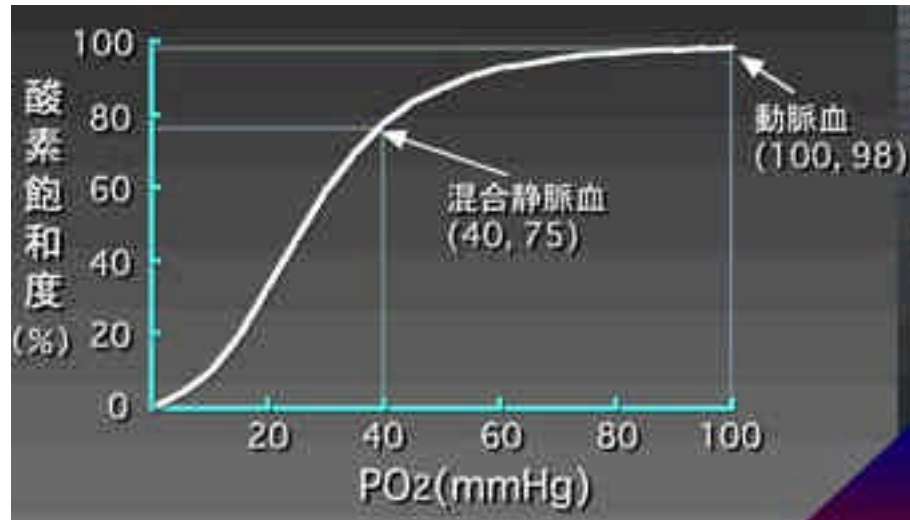
動脈血酸素分圧を PaO_2 と表したように、動脈血酸素飽和度は SaO_2 と表します。

「S」は「飽和」を意味する「saturation」

の頭文字です。英語で「サチュレーション」と言う人も多いようです。

(3) 酸素解離曲線

血液に溶ける酸素の量は、酸素分圧 (PO_2) に比例して増えることはもう勉強しました。ですから、酸素分圧と容存酸素量は



は直線になります。ヘモグロビンに結合する酸素の量も、 PO_2 が高いほど増えます。しかし、溶存酸素のように単純な比例関係とはいきません。酸素飽和度と酸素分圧の関係をグラフにすると、図のように、直線ではなくてS字状の曲線になります。このS字状の曲線を、酸素解離曲線と呼びます。

(4) 酸素解離曲線がS字状であることの意味

前図の酸素解離曲線をよく観察しましょう。理想的な肺の持ち主が普通の空気中で呼吸しているとすると、その動脈血の酸素分圧 (PaO_2) は100mmHgになります。この時の酸素飽和度は98%です。すなわち、健康な人ならば、酸素濃度21%の空気中で呼吸していても、ほとんどの動脈血中ヘモグロビンに酸素をくっつけることができる仕組みになっているのです。次に、この人がちょっと具合が悪くなって PaO_2 が80mmHgに下がったとしましょう。それでも酸素飽和度は90%以上に保たれていますから、酸素運搬能にはあまり影響がありません。つまり、このS字状曲線の上のなだらかな部分は、多少 PaO_2 が変動したところで酸素飽和度はあまり変わらないようにして、酸素運搬能に余裕を持たせていることの表れなのです。

しかし、ヘモグロビンがいつまでも酸素をくっつけていたままでは困ります。酸素を必要としている組織に到達したならば、そこで酸素を手離してくれ

なければなりません。毛細血管では、組織がどんどん酸素をもらっているの
で、その酸素分圧は 40mmHg ほどに下がっています。そしてその PO_2
40mmHg の血液が混合静脈血となって肺に戻っていきます。 PO_2 40mmHg
の時の酸素飽和度を見てみると、75%となっています。これは、 PO_2 の低い
組織に近づくとヘモグロビンは酸素を離しやすい状態になることを示していま
す。最初の酸素飽和度は 98% でしたから、 $98\% - 75\% = 23\%$ 、すなわち
ヘモグロビン上の全座席の 23% 分の酸素が組織に供給されたことになりま
す。この S 字状曲線の PO_2 40mmHg 前後では、勾配が急になって直線に近く
なっています。これは、組織で使う酸素の量が急に増えて PO_2 が下がると、
それに鋭敏に反応してヘモグロビンが酸素を離すという、すばらしい酸素供給
能力の表れなのです。

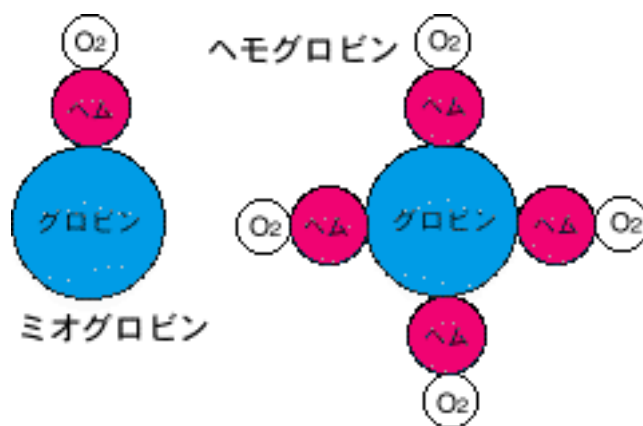
(5)なぜ酸素解離曲線はS字状になるのか

ヘモグロビンの酸素結合能力（酸素飽和度）と酸素分圧の関係が直線ではな
くて S 字状になっていることが、酸素を運搬してそれを供給するという面で実
に理にかなっていることが分かりましたか。本当に人間のからだは不思議なほ
どにうまくできているものです。それでは、ヘモグロビンはいったいどうい
う仕組みでこの S 字状曲線を作り出しているのでしょうか。答えはもう少し後にし
ましょう。

5.ヘモグロビンの能力

(6)ヘモグロビンとミオグロ ビン

ヘモグロビンの構造を簡単な
模式図として図の右に示しまし
た。ヘモグロビンは、タンパク
成分であるグロビンに 4 つのヘ
ムという物質がくっついてお
り、1 個のヘムに 1 個の酸素分
子がくっつくという構造になっ



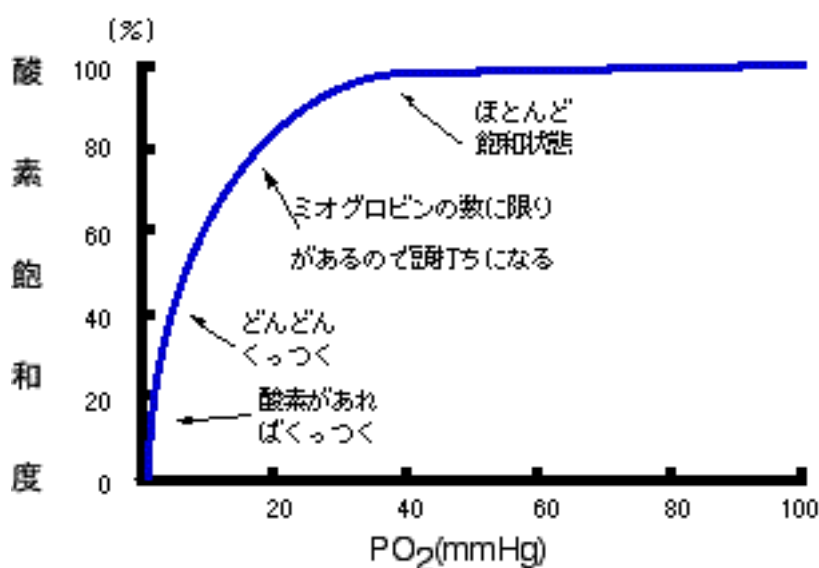
ています。すなわち1分子のヘモグロビンは4つの酸素分子を結合する能力を持っていることは、前にも述べたとおりです。

ところで、ボクたちのからだには、ミオグロビンという物質もあります。ミオグロビン1分子は図左のようにヘムを1個しか持っておらず、ヘモグロビンの原始的なものと考えられています。

(7)ミオグロビンの酸素解離曲線

酸素解離曲線の形を考えるには、酸素分子を1個しか結合しないミオグロビンの方が簡単なので、ちょっとやってみましょう。

図にミオグロビンの酸素解離曲線を示しました。これを酸素分圧が低



い方から見ていきましょう。出発点は酸素分圧 0mmHg の地点で、酸素分子がないのでミオグロビンの酸素飽和度も 0% です。次に、酸素分圧を上げていく、すなわち血中の酸素分子が増えていくと、それらはどんどんミオグロビンと結合していきますので、酸素飽和度も直線上に上昇していきます。ところが、ミオグロビンの数には限りがありますから、酸素飽和度の上昇は頭打ちになっていきます。そして、酸素分圧 40mmHg の地点でほとんどすべてのミオグロビンが酸素と結合してしまい、もうそれ以上酸素分子を増やしても酸素飽和度は上昇しなくなります。このようにしてできた図のような形の曲線は、双曲線と呼ばれます。

(8)もし全部ミオグロビンだったら

ところで、もしボクたちの赤血球の中にあるのがヘモグロビンではなくて、

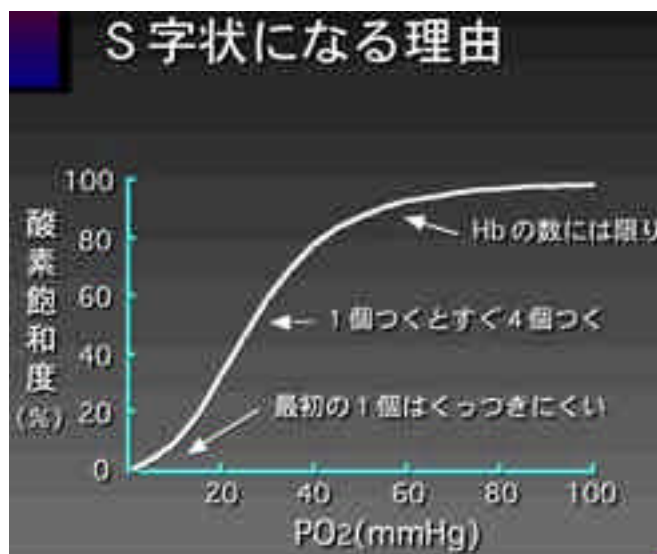
全部ミオグロビンだったらどうなるでしょう。酸素分圧が 40mmHg でもほとんどのミオグロビンが酸素と結合しているという点では、酸素運搬という面では有利です。たとえ PaO₂ が 60mmHg の低酸素血症でも動脈血はミオグロビンさえたくさんあればたくさんの酸素を運べるので問題なしです。しかし、よく考えると、逆に、組織に近づいて酸素分圧が下がっても酸素分子を離さないということです。もしボクたちの赤血球の中にあるのが全部ミオグロビンだったら、組織で使われない酸素がただぐるぐる循環しているだけになってしまいます。

実際には、ミオグロビンは筋肉で活躍しています。筋肉の毛細管に運ばれてきた酸素を受け取り、筋肉細胞のミトコンドリアにその酸素を与えます。毛細管での酸素分圧は 20 ~ 40mmHg、ミトコンドリアでは数 mmHg です。ですから、40mmHg で酸素飽和度が高く、数 mmHg で低いという性質は実に理にかなっているのです。

(9)ヘモグロビンの酸素解離曲線

19 世紀の終わり頃まで、ヘモグロビンの酸素解離曲線はミオグロビンと同じように双曲線状だと考えられていました。その後、実はそうではなくて S 字状だということが分かったのですが、なぜ S 字状なのかは長い間謎でした。なぜ S 字状なのかを正確に説明するのはとても大変なことです、簡単に次のように考えてもらっていいと思います。鍵は、ヘモグロビン 1 分子が酸素分子を 4 つ結合することができることにあります。

ヘモグロビンは酸素が全く結合していないか、あるいは全部酸素で埋まっている状態で安定し、酸素分子が 1 個だけ、あるいは 2 個だけ 3 個だけという状態は中途半端でキライだと前にお話ししました。言い換えると、ヘモグロビン 1 分子に最初の酸素分子 1 個はなかなかくっつきにくい。でもひとたび



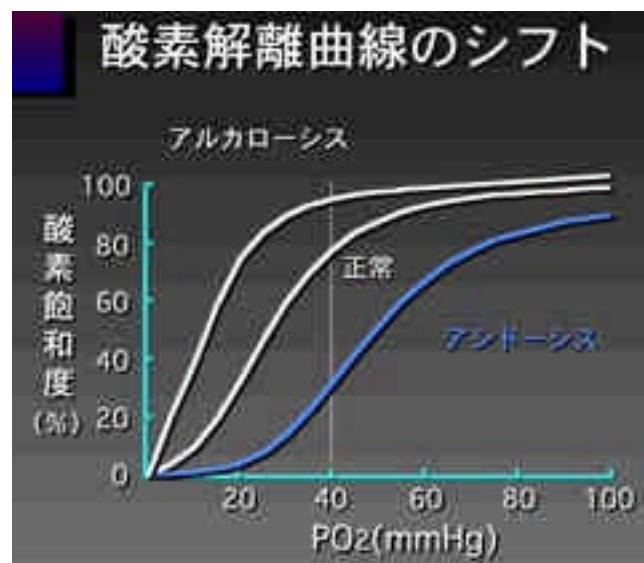
酸素分子が1個くっついてしまえば、2個3個と次々にくっついて、すぐに4個全部くっついた形になりやすい、ということです。

このことを念頭において、再びヘモグロビンの酸素解離曲線をみていきましょう(図)。出発点は酸素分圧0mmHgの地点です。酸素分子がないのでヘモグロビンの酸素飽和度も0%です。次に、酸素分圧を上げていく、すなわち血中の酸素分子が増えていくと、それらはヘモグロビンと結合していきます。でも、最初の酸素分子1個はくっつきにくいので、酸素飽和度の上昇は比較的ゆるやかです。しかし次に、ひとたび酸素分子1個がくっつけば残りの3個はすぐにくっつくわけですから、酸素飽和度の上昇は急な勾配を作ります。ところが、ヘモグロビンの数には限りがありますから、酸素飽和度の上昇は頭打ちになっていきます。そして、酸素分圧80mmHgぐらいの地点でほとんどすべてのヘモグロビンが酸素と結合してしまい、もうそれ以上酸素分子を増やしても酸素飽和度は上昇しなくなります。以上が、S字状曲線となる仕組みなのです。S字状であることが生体にとっていかに都合がいいのかについては前にお話ししました。

(10) 酸素解離曲線の移動

これまで図に示してきた酸素解離曲線は「標準酸素解離曲線」と呼ばれるものです。すなわち平地に住む健康な人で、体温37℃、pH7.4、PaCO₂40mmHgだと仮定しての話なのです。実は、酸素解離曲線はこのような条件の変化によって右にずれたり左にずれたりするからです。

図にその左右への移動の様子を示しました。アシドーシスや体温上昇では曲線が右へ移動することが分かります。この図の場合の右方移動では、PaO₂が100mmHgあったとしても酸素飽和度は約80%にしかならず、運ばれる酸素の量が少なくなるのではないかと心配になります。しかし、PaO₂が



40mmHg の地点の酸素飽和度は約 30%にも低下しています。80% - 30% = 50%、すなわちヘモグロビンの全座席の約 50%分もの酸素が組織に供給されることになり、標準曲線での 98% - 75% = 23%を大きく上回っています。

つまり、右方移動はヘモグロビンが酸素を離しやすくやって組織にたくさんの酸素を与えやすくなることを示しています。これは、たとえば激しい運動すると、筋肉がたくさん酸素を使う、たくさん酸素を燃やすから温度が上昇する、酸素が足りなくなるから嫌気性代謝によってアシドーシスになる、すると酸素解離曲線が右方に移動して組織に酸素を与えやすくなる、というように、非常に合理的な仕組みになっているのです。

しかし、極端な右方移動は酸素運搬能力の障害が高度となって危険な状態に陥ります。たとえば悪性高熱症では、 PaO_2 が 100mmHg でも酸素飽和度は 70%でチアノーゼが出現するなんてことがあります。

温度の変化がヘモグロビンの酸素結合能に影響を及ぼすのは、純粹に物理的な作用であると考えられています。また、pH の影響に関しては、水素イオンの直接作用だといわれています。炭酸ガスの影響は、pH の変化を介したものであると考えられていたこともありましたが、これも炭酸ガス自身の直接作用であることが分かってきました。

2,3DPG は、赤血球で生産される酸素解離曲線移動の調節物質だといえます。たとえば高地に住んでいる人や慢性呼吸不全患者など、長い間低酸素血症に陥ってる人では 2,3DPG が増加して酸素解離曲線が右方に移動しており、組織に酸素を与えやすい状態になっています。また、貧血の人でも 2,3DPG の作用によって酸素解離曲線が右方に移動しています。注意したいのは、保存血では 2,3DPG が減少しているということです。輸血をするとヘモグロビンが増えて運ばれる酸素の量は増えますが、保存血を大量に使うと 2,3DPG が減少しているので酸素解離曲線を左方に移動することになり、組織に酸素を与えにくくなる可能性があります。

6.Hb と結合する酸素の量

(1)Hb1g に酸素 1.39ml 結合する

さて、 PaO_2 100mmHg のとき、動脈血 100ml に溶けている酸素の量はもう計算しました。しかし、酸素は直接溶けているものの他に、ヘモグロビンと結合しているものもあるので、これを加えなければ全体の酸素含有量にはならないのでした。では、ヘモグロビンと結合している酸素はどれくらいの量なのでしょう。

ヘモグロビン 1 分子は酸素分子 4 つを結合するという事実から、ヘモグロビン 1g には酸素 1.39ml が結合するということが計算で導かれます。しかし、実際の実験結果ではこの値よりも少なかったため、教科書によっては 1.34ml の酸素が結合するとしているものがたくさんあります。どうして小さい値が出るかということ、昔は酸素と結合する力がないメトヘモグロビンなども酸素化ヘモグロビンとして測定されていたからです。現在の測定器は、かなり精度がよくなっていますから、ここでは、ヘモグロビン 1g には酸素 1.39ml が結合するということにして話をすすめましょう。

(2)Hb が 15 の人で考える

ところで、ヘモグロビンと結合している酸素がいくらあるのかを計算しようとしたら、そもそもそのヘモグロビンがいくらあるのか分からないとどうしようもないわけです。とりあえず、ヘモグロビンは 15 だったとしましょう。ところで、15 っていったいいくらなのでしょう。単位は何ですか。正解は g/dl です。1dl (デシリットル) は 100ml ですから、15g/dl は血液 100ml に 15g のヘモグロビンが存在しているということです。

酸素飽和度は測定値を使うのが本当ですが、ここでは図 12 の標準酸素解離曲線を使います。すると、 PaO_2 100mmHg のとき、酸素飽和度は約 98% になります。つまり、 PaO_2 が 100mmHg のとき、15g のヘモグロビンのうち 98% が酸素と結合している。そして、ヘモグロビン 1g は酸素 1.39ml と結合するのでしたね。以上のことから、 PaO_2 100mmHg のとき、動脈血 100ml 中のヘモグロビンと結合している酸素の量を求めます。

$$15 \times 1.39 \times 0.98 = 20.4\text{ml}$$

ということで、血液 100ml 中には 20.4ml のヘモグロビン結合酸素が存在します。溶存酸素の方は 0.3ml でしたから、合計 20.7ml の酸素が存在するのです。

このことから、血液中に存在する酸素は、その大部分がヘモグロビンと結合しているものであることが分かるでしょう。

(3) PaO₂ 100 を 200 にすることは意味あるか？

さて、PaO₂ が 100mmHg の人に酸素を与えたら、PaO₂ が 2 倍の 200mmHg になりました。なんとなく血液中の酸素の量が 2 倍になった気がします。本当でしょうか。実際に確かめてみましょう。PaO₂ 200mmHg の時の溶存酸素の量は、

$$0.003 \times 200 = 0.6\text{ml}$$

PaO₂ の 200mmHg の時の酸素飽和度は 100%、ヘモグロビン値を 15g/dl とすると、ヘモグロビンに結合する酸素の量は、

$$15 \times 1.39 \times 1 = 20.9\text{ml}$$

ということで、PaO₂ 200mmHg の時、動脈血 100ml に含まれる酸素の量は、

$$0.6 + 20.9 = 21.5\text{ml}$$

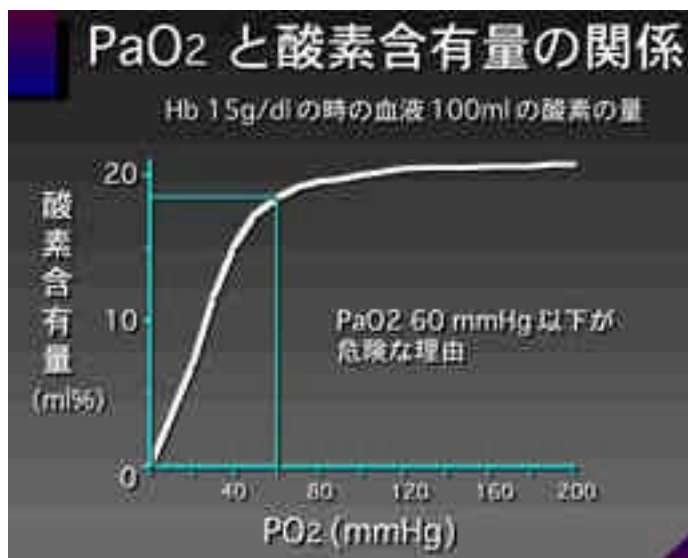
これは、PaO₂ 100mmHg の時の 20.7ml と比べるとたった 0.8ml しか増えていません。したがって、PaO₂ を 100 から 200 にすることは、あまり意味のあることとはいえません。高濃度酸素投与の副作用のことを考えれば、むしろ悪いことであるといってもいいかもしれません。

(4) PaO₂ と酸素含有量の関係

これでもう皆さんは、ヘモグロビン値が分かればいろいろな PaO₂ での酸素含有量が計算できるようになりました。ヘモグロビン 15 として、横軸に PaO₂、縦軸に計算した酸素含有量をとって、その関係を図にグラフにしてみました。

このグラフを見ると、酸素含有量は PaO₂ が 80 ぐらい

でもう頭打ちで、それ以上 PaO₂ を上げてあまり意味がないことが分かります。そして、PaO₂ が 60 以下では急速に酸素含有量が降下しますので、このあたりがクリティカル・ポイントだと考えることができます。



(5) PaO₂ は 100 ならオッケーか？

今度は、PaO₂ が 100 なら無条件で安心かどうかを考えたいと思います。たとえば患者さんが出血をしてヘモグロビンが 5 になっちゃったとしましょう。

$$\text{溶存酸素} : 100 \times 0.003 = 0.3 \text{ ml}$$

$$\text{Hb 結合酸素} : 5 \times 1.39 \times 0.98 = 6.8 \text{ ml}$$

$$\text{酸素含有量} : 0.3 + 6.8 = 7.1 \text{ ml}$$

ヘモグロビン 15 のときの酸素含有量は 20.7ml でした。同じ酸素分圧にもかかわらず、酸素含有量は約 1/3 になってしまいました。実際には血中のヘモグロビンの量が、血中の総酸素含有量に大きく影響することが分かりますね。

(6)貧血は輸血するしかないか？

以上のように、血中の酸素含有量を考えるとき、 PaO_2 の値だけをうのみにしていると大きな間違いを犯します。酸素含有量は、ヘモグロビン値とその酸素飽和度に大きく左右されるのですから、それを考慮しなければいけません。

ところで、「この患者さんは貧血なので PaO_2 を少し高めにしてほしい」と言われることがよくあります。しかし、これまで学んできたように、仮に PaO_2 を 100 上げたところで溶存酸素の量は 0.3ml しか上昇しません。焼け石に水なのです。ヘモグロビン値が低いので溶存酸素の量を有効なだけ上げたいというのなら、 PaO_2 を 1000 とか 2000 にしなければ意味がありません。「この患者さんは貧血なので PaO_2 をメチャクチャ高めにしてほしい」と言うほうがまだ許せます。しかし、そのためには高圧酸素療法のような特別な仕掛けが必要になります。

すると、貧血の患者さんの酸素含有量を増やすためには、輸血しかないということになります。たしかにヘモグロビン値 5 では輸血することが多いでしょうが、7 とか 8 だったらちょっと我慢しようという気になります。だからといって患者さんが酸素不足で死んじゃうということもありません。どうしてでしょう。

(7)「呼吸」だけでは片手落ち、「循環」も大事

その秘密は酸素供給という面で忘れていたもうひとつの大事な因子、血流量にあります。血液 100ml あたりの酸素含有量がたとえ半分になったとしても、組織への血流量が 2 倍になれば、組織に運ばれる酸素の量は同じということになります。妊娠したら貧血になるけど心拍出量が増えるのも、出血時に血管が収縮して酸素消費の多い臓器（主に脳）に血流を分配するのも、酸素供給量を維持しようという循環系による代償なのです。

循環動態も含めた酸素化の指標、「酸素供給量」は、「動脈血酸素含有量 × 心拍出量」で求めることができます。ならば、この「酸素供給量」が高ければ安心かといえ、必ずしもそうではありません。実際に、ある大手術の術後管理を「酸素供給量」を高めに維持して行ったが、予後は変わらなかったという報告もあります。

その理由のまずひとつは、心拍出量は局所の血流量を反映していないという

ことです。脳の血流はどうか、冠血管はどうか、肝臓はどうかというふうに、局所の血流を考えていかないと、脳虚血や心筋虚血、肝不全などの危険性を評価できません。もうひとつの理由は、たとえ局所への酸素供給量が多めだと分かったとしても、その量が組織の細胞にとって本当に足りる量なのか分かりません。あるいはひょっとして細胞そのものが酸素を利用できない状況にあるかもしれません。細胞自身はどう感じているのかを評価するモニター法が確立していませんので、評価するのは今のところ難しいということです。

とにかく、酸素の需要供給を語るには、呼吸だけではなくて循環も大切なことは確かです。でも、それを詳しくやるとまた長くなってしまいますので、今回はこの辺でということにしておきます。

7. 優秀な最近の血液ガス分析機器

(1) 全部計算してくれる

ちょっと前までは、ガスの器械といえば pH、 PO_2 、 PCO_2 を実測するだけで、酸素飽和度も酸素解離曲線を元にした計算値でした。しかし、現在の血液ガス分析機器は正確な酸素飽和度を 実測してくれるものがほとんどです。その上、せっかく酸素含有量を計算できるようになったところを申し訳ないのですが、これも毎回自動的に計算してくれてたのです。見てましたか？

次に、実際にある手術中の患者さんの動脈血を測定した結果を示します（ラジオメータ社の ABL505 + OSM3 で測定したものです）。

血液ガス分析結果

カンジヤタイオンホセイ		ケクエキオキシメトリー	
pH (37.0)	7.505	tHb	8.4 g/dL
pCO ₂ (37.0)	34.7 mmHg	Hctc	26.1 %
pO ₂ (37.0)	219.1 mmHg		
デノカイツ		O ₂ Hb	96.5 %
K ⁺	3.5 mmol/L	COHb	2.0 %
Na ⁺	140 mmol/L	MetHb	1.4 %
Ca ⁺⁺	1.14 mmol/L	RHbC	0.1 %
Ca(7.4)C	1.20 mmol/L	sO ₂	99.9 %
サンエンキノコ		サンソゾヨクタイ	
ABEC	4.2mmol/L	p50(act),Tc	23.13mmHg
HCO-3C	27.1 mmol/L		
tCO ₂ (P)C	63.2 Vol %		
tO ₂ C	11.9 Vol %		
O ₂ CAPC	11.3 Vol %		

この患者さんはちょっと貧血で、ヘモグロビン (Hb) は 8.4g/dl です。正確な酸素飽和度の実測値は「O₂Hb」で、これは 96.5% となっています。PaO₂ は 219.1mmHg です。これらで酸素含有量を計算すると、

Hb 結合酸素	$1.39 \times 8.4 \times 0.965 = 11.27\text{ml}$
溶存酸素	$0.003 \times 219.1 = 0.66\text{ml}$
酸素含有量	$11.27 + 0.66 = 11.93\text{ml}$

ボクたちの計算結果では、血液 100ml あたりの酸素含有量は約 11.9ml ということになりました。これは、先の血液ガス分析機器の計算結果である酸素含有量 (tO₂c) 11.9 Vol% とぴったり一致しています (Vol% は血液 100ml あたりの ml という意味です)。

酸素飽和度を測定する場合、一昔前までは、酸素結合能のない一酸化炭素ヘモグロビン (COHb) やメトヘモグロビン (MetHb) と、真の酸素化ヘモグロビンを区別できませんでした。したがって、そのような精度の低い器械でこの患者さんの酸素飽和度を測定したら、96.5% に COHb 2.0% と MetHb 1.4% を加えた 99.9% と表示するはずです。ABL505 では、ご丁寧にもこの不正確な

酸素飽和度を「sO₂」として表示してくれます。

経皮的酸素飽和度モニター（パルス・オキシメーター）で酸素飽和度を測定する場合も、その値にはCOHbやMetHbが含まれている可能性があります。実際、この患者さんのSpO₂は手術中は99～100%を示していました。

ところで、動脈血の酸素飽和度はSaO₂と表すと前にお話しましたが、パルスオキシメーターで測定した場合はSpO₂と書きます。この「p」は、ボクはずっと「perctaneous（経皮的）」の頭文字だと思っていたのですが、これは「pulse oximeter（パルス・オキシメーター）」の頭文字であるというのが正解です。

8.なぜ PaO₂ の正常値は 100 か

(1)なぜ PaO₂ = 100 なんだろう

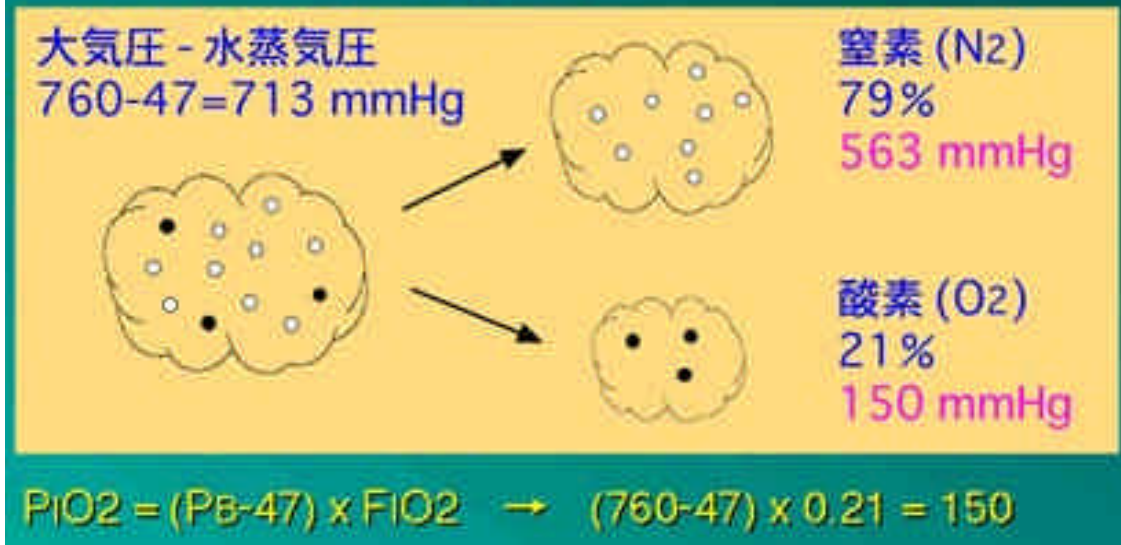
PaO₂の正常値は？と聞くと、100だと答える人がほとんどだと思います。ところでボクたちが吸っている空気の酸素分圧はいくらだったでしょうか。思い出してください。大気圧は760mmHgで、酸素濃度は21%だから、
「760mmHg x 0.21 = 160mmHg」

ということで、酸素分圧160mmHgの空気を吸ってるはずなのに、動脈血では100mmHgに下がってしまうのです。これはどうしてかを考えていきましょう。

(2)肺の中は湿っている

ボクたちが吸った空気は、鼻粘膜や咽頭、気管支などで十分に加湿されてから肺胞に到達します。人工呼吸器の吸入気も加湿してから患者さんに送っているのです。言い換えると、吸入気には酸素分子、窒素分子の他に、水の分子が気体として存在していることになります。したがって、酸素分圧を求めるのに単純に760mmHgに21%をかけるわけにはいかなくなります。

吸入気の酸素分圧 (PIO₂)



空气中で水の分子がめいっぱい気体化したとき、その分圧（水蒸気圧）は 47mmHg になります（飽和水蒸気圧）。したがって、水蒸気で飽和した空気の酸素分圧は、

$$(760 - 47) \times 0.21 = 150 \text{ mmHg}$$

ということになります。

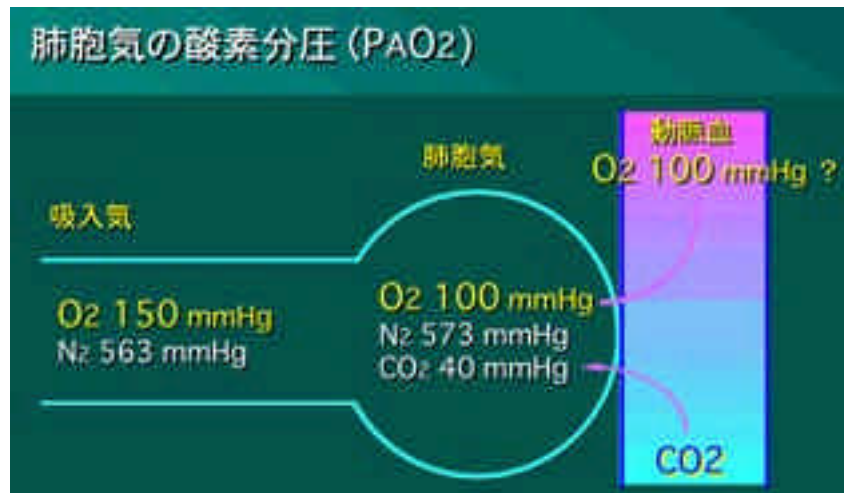
さて、この式は、あとでも応用できるように一般化しておきましょう。大気圧を PB、酸素濃度を FIO₂ とすると、吸入気酸素分圧 PIO₂ は、

$$PIO_2 = (PB - 47) \times FIO_2$$

(3) 肺胞では酸素が去り、炭酸ガスが来る

というわけで、酸素分圧 150mmHg の吸入気が肺胞にやってくるわけです。ところが、肺胞では流れてくる血液によって常に酸素が持ち去られています。おまけに、組織で生じた炭酸ガス (CO₂) がやってきます。二酸化炭素がやってくればくるほど肺胞での酸素の居場所がなくなっていくます。そういうわけで、肺胞気の酸素分圧を求めるためにはこのような「肺胞でのガス交換に影響

される分」を引いてやらなければなりません。「肺胞でのガス交換に影響される分」は、動脈血炭酸ガス分圧 (PaCO₂) を 0.8 で割ることで概算されます。どうしてかを説明するのは非常に難し



いので勘弁してもらおうとして、丸暗記してください。

そうすると、吸入気酸素分圧を PIO₂ として、肺胞気酸素分圧 PAO₂ は、

$$PAO_2 = PIO_2 - PaCO_2 / 0.8$$

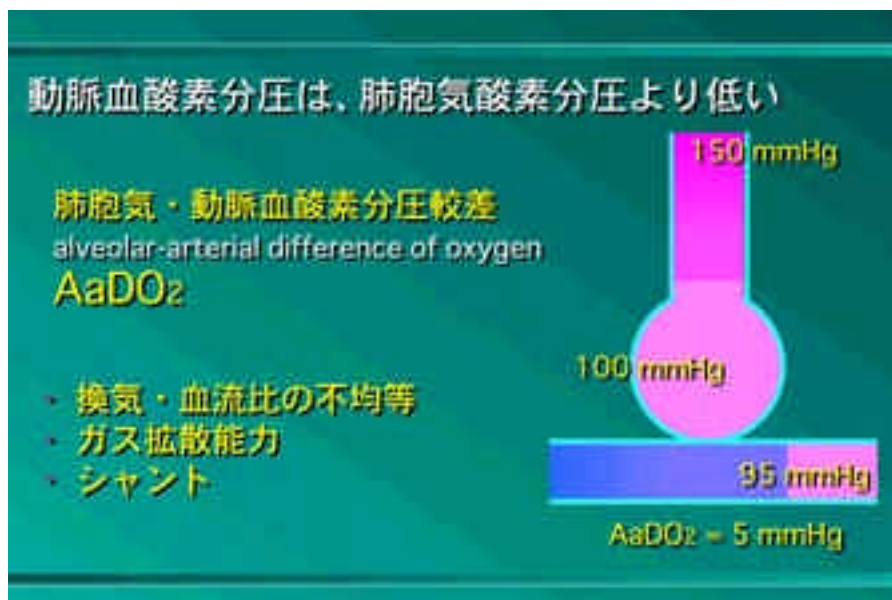
吸入気の酸素分圧は 150mmHg でしたから、PaCO₂ が 40mmHg とすると、肺胞気酸素分圧は、

$$PAO_2 = 150 - 40 / 0.8 = 100\text{mmHg}$$

ということで、肺胞気酸素分圧は 100mmHg、これが血液と平衡状態になって動脈血となるわけですから、動脈血酸素分圧 (PaO₂) も 100mmHg になるはずです。ちなみに、0.8 という数字は、「呼吸商」と呼ばれるものです。これは、ボクたちが産生する炭酸ガスの量と消費する酸素の量の比です。もちろん個人差はありますが、通常ボクたちは、安静時には 1 分間に 250ml の酸素を吸って、200ml の炭酸ガスを吐いてますから、200ml / 250ml = 0.8 となるわけです。もし激しい運動をすれば、酸素消費量は増えますが炭酸ガス排出も増えるので、比率は変わりません。この比率にもっとも大きな影響を与える因子は栄養素の種類で、炭水化物、蛋白質、脂肪をどういう割合で摂取しているかで決まってきます。

(4) 実は空気呼吸では $\text{PaO}_2 = 100$ にはならない

さて、空気呼吸下では肺胞の酸素分圧は 100mmHg になりました。もし、すべての肺胞が完璧な効率で血液を酸素化してくれればたしかに PaO_2 は 100mmHg になるはずですが、しかし、現実にはそう甘くありません。どんなに健康そうにいらしている人だって、うまく働いてない肺胞のひとつやふたつ持っていることでしょう。ですから、 PaO_2 は 100mmHg になりえません。それに、もし完璧な肺胞ばかりの人がいたとしても、気管支動静脈系や冠循環系の一部は肺を通らずに動脈血に合流しますから、せいぜい 95mmHg ぐらいのはずですが。



このような肺胞気と動脈血の酸素分圧の差を、肺胞気・動脈血酸素分圧格差 (alveolar-arterial difference of oxygen)、略して AaDO_2 といいます。すなわち、

$$\text{AaDO}_2 = \text{PAO}_2 - \text{PaO}_2$$

この AaDO_2 が増大する因子として、よく教科書ではシヤント、換気血流比の不均衡分布、酸素拡散能障害の3つの因子に分けて説明しています。しかし、今回はこの3つの因子について詳しく説明はしません。というのは、ボクはどうもこのように3つに分ける考え方がいまひとつ気にいらないと、シヤント

という言葉の定義が混乱をきたしているからです。ですから今回は、要するに $AaDO_2$ は肺胞が血液を酸素化する能力を反映すると考えてください。肺炎や無気肺などで肺が悪くなれば、 $AaDO_2$ が大きくなるということです。

9. PaO_2 は何で変化するか

(1) PaO_2 を求める式を作ってみる

さて、前項で「 $AaDO_2 = PAO_2 - PaO_2$ 」でしたから、

$$PaO_2 = PAO_2 - AaDO_2$$

これに「 $PAO_2 = PIO_2 - PaCO_2 / 0.8$ 」を代入して、

$$PaO_2 = PIO_2 - PaCO_2 / 0.8 - AaDO_2$$

さらに、「 $PIO_2 = (PB - 47) \times FIO_2$ 」を代入して、

$$PaO_2 = (PB - 47) \times FIO_2 - PaCO_2 / 0.8 - AaDO_2$$

この式の右辺を見つめれば、 PaO_2 を上げるためには、 PB を上げる、 FIO_2 を上げる、 $PaCO_2$ を下げる、 $AaDO_2$ を下げるといった方法があることが分かります。

The diagram illustrates the components of the PaO_2 equation. It features a green background with white and yellow text. At the top, four terms are listed: 大気圧 (Atmospheric pressure), 酸素濃度 (Oxygen concentration), 換気 (Ventilation), and 肺胞の能力 (Lung capacity). Arrows point from each of these terms down to the corresponding part of the equation: $PaO_2 = (PB - 47) \times FIO_2 - \frac{PaCO_2}{0.8} - AaDO_2$. Below the equation, two yellow boxes are shown. The first box, labeled 吸入気 (PIO_2), encompasses the terms $(PB - 47) \times FIO_2$. The second box, labeled 肺胞気 (PAO_2), encompasses the entire right-hand side of the equation: $(PB - 47) \times FIO_2 - \frac{PaCO_2}{0.8} - AaDO_2$.

$$PaO_2 = (PB - 47) \times FIO_2 - \frac{PaCO_2}{0.8} - AaDO_2$$

吸入気 (PIO_2)

肺胞気 (PAO_2)

(2)大気圧 (PB) を上げる

まず、 PaO_2 は大気圧が上がれば上がり、大気圧が下がれば下がることが分かります。富士山の頂上では大気圧は480mmHgほどしかありません。 AaDO_2 が5mmHgしかない健康な青年が無酸素で登頂に成功しました。ただし、すこし苦しそうで過換気気味なので、 PaCO_2 は30mmHgになっています。すると、この青年の PaO_2 は、

$$\text{PaO}_2 = (480 - 47) \times 0.21 - 30 / 0.8 - 5 = 48\text{mmHg}$$

これは、気圧の低いところに行けば、低酸素血症に陥ることを示しています。このため、昔はエベレストには酸素ボンベなしでは登れないと考えられていました。しかし最近では「高地順応」の生理学が解明され、ゆっくり体を馴らしで登っていけば大丈夫なことが分かってきました。それでも大変なことには変わりなく、「初の無酸素登頂」なんてニュースになったりするわけです。

平地に住んでるボクたちには、簡単に大気圧を上げることは不可能です。しかし、これを可能にしてくれるのが、高圧酸素タンクなわけです。

(3)酸素濃度 (FIO_2) を上げる

吸入気酸素濃度を上げれば PaO_2 が上がる、これは式を見なくても経験的に知っていることです。しかし、むやみに吸入気酸素濃度を上げると、高濃度酸素による様々な障害が起きることも考慮しなければなりません。

ところで、高濃度酸素による肺障害って本当にあるのでしょうか。もしあるとして、それはどのくらいの酸素濃度をどれくらいの期間与えたら生じるのでしょうか。またそれは、肺胞気の酸素分圧が高いと生じるのでしょうか。それとも血液の酸素分圧が高いと生じるのでしょうか。実は、まだいろいろ議論があるところなのです。

(4)換気量を増やすー (PaCO_2 を下げる)

高炭酸ガス血症が合併している場合、低酸素血症の原因は低換気かもしれません。だから、まず呼吸刺激薬や人工呼吸で換気量を増やしてみようとする

のが自然です。

しかし、 PaCO_2 値が正常（40mmHg）の場合は、ガス交換による酸素分圧の低下分は $40 / 0.8 = 50\text{mmHg}$ です。少なくとも、これをたとえ完全になくしたところで PaO_2 はけっして 50mmHg 以上はあがらないことが分かります。かえって PaCO_2 低下による脳血流減少やアルカローシスが問題になってしまいます。

(5) 肺を良くするー AaDO_2 を下げる

結局この方法がもっとも根本的な治療に関わっています。喀痰の吸引、体位ドレナージなど、普段の呼吸管理でやってることの目的は、大きくなっている AaDO_2 を下げようということです。肺炎に対して抗生剤を投与するのも、肺水腫で血管拡張剤や利尿薬を使うのも、 AaDO_2 の正常化につながります。

人工呼吸のモードでいえば、PEEP を負荷して PaO_2 を上げるというのがこの範疇に入ります。

10. PaO_2 を求める式は実は正しくない

(1) PaO_2 は計算するな

これまで使ってきた PaO_2 を求める式は、 PaO_2 がどのような因子で変化するかを説明するために導入したのであって、実際の患者さんで使ってみようとするといろいろ矛盾が生じます。

数式がでてくるとそれだけで逃げてしまう人が多いのですが、数式は計算するためのものではなく、物事の間係を表すのに大変便利なものなのです。 PaO_2 を計算する必要な全くありません。測ればいいのです。ただ、その値の意味を考える時に、例の式を思い出してください。

(2) ガス交換の影響ー $\text{PaCO}_2 / 0.8$

例の式の正しくない部分のまずひとつめは、肺胞でのガス交換による酸素消滅分である「 $\text{PaCO}_2 / 0.8$ 」にあります。まず、呼吸商がいつでも 0.8 だとは限らないこと。それから、 PaCO_2 は肺胞気の炭酸ガス分圧と同じであるという前提で導入されたものであること。さらに、吸う空気の量と吐く空気の量は同

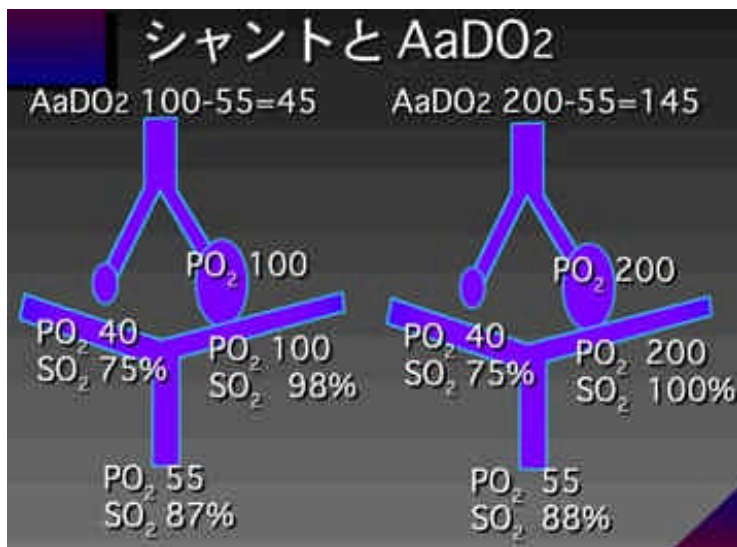
じではないのに、その影響を無視していることがあげられます。

(3) AaDO₂ は変化する

例の式を見ると、 $(PB - 47) \times FIO_2$ は大気圧 760mmHg では $713 \times FIO_2$ となりますから、酸素濃度を 1% 上昇させれば PaO₂ は 7.13mmHg 上昇することになります。酸素濃度 40% で PaO₂ = 60mmHg の患者さんがいたとして、酸素濃度を 10% 上げて 50% にしたときの PaO₂ は、 $60 + 10 \times 7.13 = 131.3$ mmHg ということになります。しかし、10% 上げただけでこんなにガスが良くなることはそうそうないでしょう。

どうしてこんなことになっちゃうかということ、AaDO₂ 自体が酸素濃度で変化するからなのです。これはやはり、PaO₂ が酸素の量ではないことに起因しています。

次の図をみてください。同じ血流を受けている 2 つの肺胞を用意しました。一方は完璧なガス交換をしますが、もう一方は全く換気をしていません。完璧な方の肺胞気酸素分圧は 100mmHg なので、そこからやってくる血液の酸素分圧も 100mmHg のはずですが、一方、換気されない血液の酸素分圧は静脈血と同じ 40mmHg です。この 2 つの血液が合流して動脈血となります。ではその合流した血液の酸素分圧はいくらでしょう。酸素分圧を平均して、 $(100+40) / 2 = 70$ mmHg としたくなりますが、正しくありません。血液では酸素分圧 = 酸素の量ではないからです。それぞれの酸素含有量を計算して、それを平均しなければいけません。これはちょっと面倒なので、ここでは微量である溶存酸素は無視することにしましょう。大部分はヘモグロビン結合酸素なわけですから、合流した酸素飽和度は両者の平均値に近いはずですが、完璧な方の酸素分圧は 100mmHg なので、酸素解離曲線から酸素飽和度は 98%、同様に換気してない方は 75%、合流地点では両者を平均して、 $(98 + 75) / 2 = 87\%$ のはずですが、酸素解離曲線に戻ると、その時の酸素分圧は約 55mmHg です。つまり、AaDO₂ は $100 - 55 = 45$ mmHg です。



次に、全く同じ肺胞で、酸素投与で肺胞気酸素分圧が 200mmHg に上昇したとしましょう（図右）。完璧な方の血液は酸素分圧 200mmHg ですから酸素飽和度は 100%、換気してない方は相変わらず 75% ですから、合流地点の酸素飽和度は $(100 + 75) / 2 = 88\%$ 、つまり酸素を与えても動脈血酸素飽和度はあまり変化せず、やっぱり酸素分圧は約 55mmHg です。すると AaDO₂ は $200 - 55 = 145\text{mmHg}$ となり、同じ状態の肺なのに酸素を投与することによって AaDO₂ は大きくなるのが分かります。

(4) 循環の影響を無視してる

PaO₂ に影響を与える因子として、実は心拍出量がありますが、これは例の式の中には入っていません。心拍出量が減ると、肺が同じ効率で血液を酸素化していたとしても PaO₂ は低下します。つまり、AaDO₂ は循環の影響も受けてしまうのです。

逆に心拍出量が増えると、PaO₂ は良くなると思いがちですが、そうともいいきれません。酸素が血液中に拡散して溶けるにはある程度時間がかかります。だから血流があまり早すぎると、酸素が溶ける前に血液が去ってしまうので、かえって PaO₂ は低下してしまいます。

(5) AaDO₂ は本当に酸素化能の指標なのか

AaDO₂ は肺胞気と酸素化される血液の酸素分圧の差のことですから、概念としては完璧に「肺の血液を酸素化する能力」を反映します。この考え方は非常に分かりやすいので、ボクは AaDO₂ を PaO₂ を求める式に入れたのです。ところが AaDO₂ は酸素濃度で変化してしまう変動値なので、実際にこの式を使って PaO₂ を求めることは強引なことだったのです。

AaDO₂ は酸素濃度で変化するので、これを計算して肺酸素化能の評価に使う場合は、空気呼吸下で、あるいは 100%酸素吸入下でというように、条件を一定にすることになってます。でも、実際の臨床の現場では、酸素の投与量にかかわらず肺自体の酸素化能力を反映してくれる指標があれば便利なわけです。たとえば、空気呼吸で PaO₂ が 60mmHg だった人で、今日は酸素濃度 40% にして PaO₂ 80mmHg だった。吸入酸素濃度が違うので、肺自体が良くなってるのか悪くなってるのかは分かりません。もし AaDO₂ が酸素投与量によって影響を受けないのであれば計算する価値があります。しかし、酸素をはずして空気呼吸に戻さなければならぬのであれば、わざわざ AaDO₂ を計算するまでもなく、PaO₂ を見ればよいことになります。

(6) その他の酸素化の指標

しかし、学会発表などで患者さんの経時的な肺酸素化能の変化を示したいということもあるでしょう。そのためだけに毎日毎日空気呼吸下でのガスを測るというのも現実的ではありません。そこで、次のようなものが使われることがあります。

R-index	$(PAO_2 - PaO_2) / PaO_2$
M-index	PAO_2 / PaO_2
O ₂ -index	PaO_2 / FIO_2

これらの値も全く FIO₂ に影響を受けないわけではありませんが、今のところ他

に良い指標がないので、よく使われています。

1.1. 酸素をなぜ分圧で表すのか

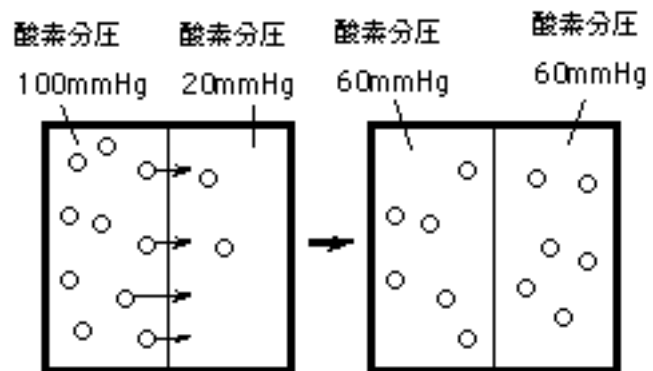
(1) 素直に酸素の量や濃度で表せばいいじゃん

ここまで読んできたあなたは、「そんなに PaO_2 が酸素の量でも濃度でもないと騒ぐのであれば、なぜ最初から量や濃度で示さないのか」という疑問がわくことでしょう。その理由のひとつは、酸素分圧は酸素の移動を考える上で極めて便利だからなのです。

ボクたちは気体の状態の酸素を肺胞に取り込み、それを液体である血液に送り、それが細胞内へと運ばれるわけです。酸素は、相手が気体だろうが液体だろうが、とにかく「分圧が高い方から低い方に移動する」、これが大原則なのです。

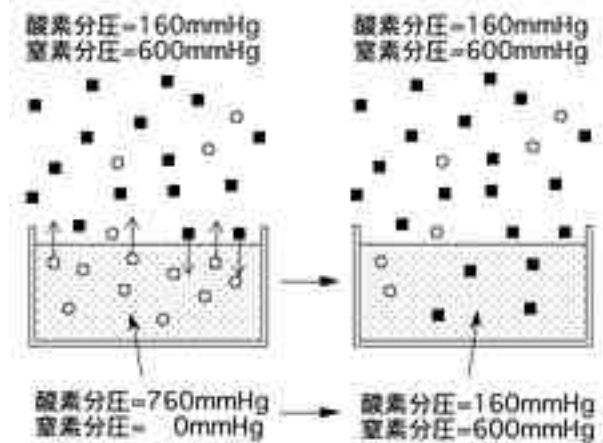
(2) 酸素—気体から気体へ

図では、酸素分圧 100mmHg の気体と、酸素分圧 20mmHg の気体が、酸素分子が通過できる膜を介して接しています。すると 100mmHg の方の酸素分子が移動して、結局両者とも酸素分圧は 60mmHg になるでしょう。酸素分子は 100mmHg の方から 20mmHg の方に移動したのです。



(3) 酸素—液体から気体へ

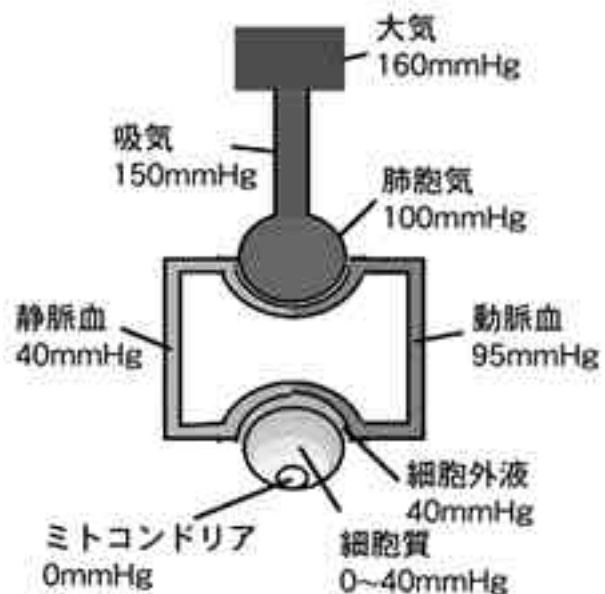
図では、100%酸素で飽和させた水を空気中に出してみたところです。水の酸素分圧は760mmHg、空気の酸素分圧は160mmHgですから、酸素分子は空気中に出ていき、結局水の酸素分圧は160mmHgに落ち着きます。液体と気体で比べた場合も、やはり酸素分子は高い方から低い方へ移動するのです。



しかし、これを量や濃度で表したらどうでしょう。空気中の酸素濃度は21%、空気100mlには21mlの酸素があります。一方、酸素分圧760mmHgの水100mlには、 $760 \times 0.003 = 2.28$ mlの酸素が含まれています。これでは、酸素分子がいったいどちらに移動するのかさっぱり分からないわけです。

(4) 酸素の滝

生体でも酸素分子は酸素分圧が高い方から低い方へと移動していきます。この様子を滝の流れにたとえて、「酸素の滝」と表現することがあります。分かっている人にとっては良い例えなんです、ちょっと文学的過ぎます。そこで、分かりやすいように、生体での酸素の流れを図に示しました。色の濃いところほど酸素分圧が高くなっています。



これを見ると、酸素は大気(160mmHg)から気管支(150mmHg)に取り込まれ、肺胞(100mmHg)から動脈血(95mmHg)に乗って組織に運ばれ

ます。組織では、毛細血管から細胞外液（40mmHg）へと移動し、細胞内に入っていきます。細胞質では、毛細管に近いほうでは酸素分圧は40mmHg近くありますが、ミトコンドリアに近づくほど低下します。そして、酸素が実際に使われるミトコンドリアでは、酸素分圧は数mmHgしかありません。

12.PaO₂かSaO₂か

(1)PaO₂とSaO₂ではどっちが大事か

酸素分圧と酸素飽和度のどちらが大事なんだという質問を聞くことがありますが、ここまで読んできた皆さんはそれは愚問であることがお分かりでしょう。

ボクたちがこのような酸素に関わるパラメーターを調べる時、意味合いは2つあります。ひとつは、肺がきちんと血液を酸素化しているか、そしてもうひとつは、体に必要な酸素が与えられているかということで、この2つの違いを常に認識している必要があります。

(2)肺が酸素化しているか

肺がきちんと血液を酸素化しているかということが知りたい時には、PaO₂に軍配が上がります。それは、PaO₂が生体での酸素の流れを表しているという事からも分かると思います。さらに、酸素化能の指標の項で上げた様々なパラメーターも、すべてPaO₂を元に計算されたものです。

皆さんがPaO₂の正常値だと思っていた100という数字は、空気呼吸下で理想的な肺によって得られる最高値というところから出てきたのです。だから、たとえばもし空気呼吸でPaO₂が100mmHgに近かったら、肺の酸素化能には問題ないなと安心できます。一方、酸素濃度50%でPaO₂が100mmHgだったら、何か問題があるなと考えることができるのです。いずれにしろ、PaO₂が100mmHgだからといって、体の酸素が足りているかどうかは別問題となります。

SaO₂は、逆に酸素化能の評価という点では、特に酸素を投与している場合は感度が悪くなってしまいます。酸素濃度50%でPaO₂が200mmHgから100mmHgに低下したら何かおかしいと感じますが、これをSaO₂に換算する

と 100%から 98%の低下です。これでは誤差だと思うかもしれませんが。また、酸素解離曲線がアシドーシスやアルカローシスでシフトしている場合もあります。この場合は肺に問題がなくて PaO₂ が変化しなくても SaO₂ の値は変化してしまいます。

(3)体に酸素が充分与えられているか

体に十分な酸素が供給されているのかどうかは、PaO₂ では判断できません。この場合は、動脈血の酸素含有量が重要です。そして、酸素含有量の大部分を占めるのはヘモグロビンに結合した酸素です。ですから、こんどは SaO₂ と Hb 値が重要になってきます。もちろん、心拍出量や局所の血流量といった循環系の因子も重要です。

しかしこれは、「体に充分酸素が与えられているか」という酸素供給の話であって、「それで体が足りているか」という酸素需要の話になるとまた別問題です。これについては、後で少しお話ししましょう。

(4)100 という数字の魔力

集中治療室でも手術室でも、たいてい患者さんは酸素を投与されています。だから、酸素が投与されているのに PaO₂ が 100 を下回って、たとえば 80mmHg だったら、「なんかおかしいな」と考えるのは正解です。しかし、100mmHg でも 80mmHg でも体に与えられる酸素の量にはたいして変わりはないのです。たしかに「100」という数字には理屈抜きに魔性の魅力がありますので、PaO₂ を 100 を基準にして考えたくなくなるのも無理はありませんが、何となく PaO₂ の正常値が 100 だから、それを下回ったら心配ということではいけません。

(5)パルスオキシメーターでの酸素飽和度—SpO₂

これまでお話ししてきたように、どちらかといえば、「肺がうまくいっている」のを知るの PaO₂ で、「体に充分酸素が与えられている」のを知るのが SaO₂ なわけです。ところで、パルスオキシメーターによって測定する酸素飽和度、SpO₂ についてはどうでしょう。本来酸素飽和度は、「充分酸素が与えられている」ことを知るための指標ですが、むしろ SpO₂ は、急激な「酸素化

能の低下」を察知するために使っています。その理由は、今のところ連続的に測定できる簡便な酸素化能の指標は SpO_2 しかないからです。連続的 PaO_2 測定法もありますが、侵襲的でしかもまだ高価なので、気軽に使用するわけにはいきません。

「酸素化能」の指標として酸素飽和度を使う場合は、頭に酸素解離曲線を思い浮かべてそれを酸素分圧に置き換えて考えるのです。「酸素を投与しているのに PaO_2 が 80mmHg しかない、何かおかしい」という例では、酸素解離曲線から酸素飽和度は 95% に相当します。ですから、この例では、酸素投与下で SpO_2 が 100% から 95% に下がったら「何かおかしい」と考えます。酸素投与経路や気道、あるいは肺自体の酸素化能に問題が生じたと考えます。一方、「体の酸素」は 95% では少し足りないのは確かですが、そう気にすることはありません。ところで、100% と 95% の差はわずか 5% しかありません。パルスオキシメーターの誤差が 2% ぐらいだとすると、けっして精度の良い酸素化能の指標とはいえません。それでもこれほど普及しているのは、非侵襲的で手軽に使えることと、連続的に測定できるので、急激な変化に対応できることが最大の理由なのです。もし、将来、精度の良い経皮的酸素分圧モニターが登場したら、それが主流になるかもしれません。

13. PaO_2 を少し上げて

(1) PaO_2 を少し上げるのは本当に意味がないか？

前にも言いましたが、「 PaO_2 を少し上げてください」と主治医から要求されることがあります。ここまで読んでいただいたことから、 PaO_2 は酸素の量というよりは酸素化能の指標である、 PaO_2 を少し上げたところでわずかな溶存酸素がわずかに増えるだけである、局所も含めた循環動態も大きなファクターである、といったことから、「 PaO_2 を少し上げる」なんてことは全くもって無意味なことであるという結論が得られます。

しかし、それは断言できることかということ、そうでもありません。 PaO_2 も SaO_2 も結局血液から得た情報でしかないのです。「肺はちゃんと血液を酸素化している」、そして「酸素は十分な量が運ばれている」ということは見当がつきますが、その酸素を使う細胞自身が「酸素が足りています」と言って満足してくれているかどうかは分からないのです。

(2)ミトコンドリアの意見を聞いてみたい

これを何とか評価しようとして登場したもののひとつが混合静脈血酸素飽和度 (SvO_2) 測定です。組織から帰ってきた血液の酸素量をみて判断しようという試みです。ところが、混合静脈血は体のいたるところから帰ってきた血液の集合なので、個々の重要臓器の酸素状態はうまく評価できないことが分かってきました。そこで最近では、脳に対しては内頸静脈酸素飽和度、肝臓に対しては肝静脈酸素飽和度というように、局所の静脈酸素飽和度測定が試みられています。しかし、所詮これらも血液からの間接的な情報に過ぎません。他の方法としては、胃粘膜 pH 測定や血中乳酸値測定といったところが試みられていますが、まだまだ研究の余地があります。

要するに、ボクたちはまだ、組織から「酸素は足りています」という知らせを聞く手段を持っていないのです。たしかに組織の直前まで酸素を運んでくれるのはヘモグロビンです。しかし、その先はヘモグロビンを離れた溶存酸素が細胞外液、細胞質を拡散してミトコンドリアに到達すると考えられています。ですから、わずかな溶存酸素をわずかに増やすだけでも、ひょっとしたらミトコンドリアにとったら意味のあることかもしれないけど、それを調べる手段がまだないのです。微量であるが故に様々な計算式でその存在を無視されてきた溶存酸素ですが、最近では低体温下での人工心肺のように特殊な環境下では、溶存酸素に由来する酸素消費が大部分を占めるのではないかという意見もでてきています。

というわけで、主治医に「 PaO_2 を少し上げて」と言われると、全くの無知なのか、あるいは、そのような意味も含めて言ってるのか、悩んでしまうわけです。

14.APPENDIX

(1)参考文献

読みやすい参考文献をあげておきます。それぞれの著者の先生方に心から感謝いたします。

血液ガステキスト	工藤翔二著	文光堂	初心者向きの良い本
血液ガスABC	諏訪邦夫著	中外医学社	血液ガスの臨床の初心者版
血液ガスの臨床	諏訪邦夫著	中外医学社	名著。もう売っていないのが残念
🍏ト吸生理学入門	太田保世訳	MED Si	呼吸生理全般にやさしく解説
呼吸の生理	John B West 笛木隆三・小林節雄訳	医学書院	基礎的な記述が充実
呼吸不全の臨床と生理	諏訪邦夫著	中外医学社	臨床病態的血液ガス論
臨床医 1997年11月号 特集：血液ガスからわかること		中外医学社	臨床的血液ガス論

(2)出典

本著の内容は、以下の講演や著作が進化したものです。

- ・ 血液ガスの基礎と臨床 旭川ICU検討会 1997-1998年
- ・ やさしい呼吸生理 人工呼吸セミナー 1999-2002年
- ・ ER-Excellent Review 1997年