

肺におけるガス交換 — 換気と血流のバランスモデルを用いた説明 —

薊 隆 文

要 約

上下に重ねた長方形の上を換気、下を血流、そして境目を間質として肺全体を表し、上下の長方形の左右へのずれで、肺胞死腔と肺内シャントを、境目の厚さで拡散障害を、そして上下のそれぞれの長方形の大きさで過換気・低換気、血流の多少を表現するモデルを紹介した。このモデルを用いて換気と血流のバランスの乱れによる酸素化・換気障害の説明を試みた。

キーワード：ガス交換、換気、血流、酸素、二酸化炭素

はじめに

肺の主要な機能は酸素と二酸化炭素のガス交換である。様々な疾患、その疾患に伴う病態によって、このガス交換能が損なわれ、その結果、低酸素血症・高二酸化炭素血症などが生じる。この治療が酸素投与と人工呼吸である。実際、多くの臨床現場で酸素投与・人工呼吸が行われ、その多くにある程度の効果は得られている。しかし本来はこれらの治療法を有効に行うためには、低酸素血症・高二酸化炭素血症の病態の理解が必要である。ところが、この理解は医学生・看護学生や、研修医・新人看護師などの初学者にはなかなか容易ではない。そこで、本稿ではこのガス交換の概念の理解の助けとなることを目的として、単純化したモデルによるガス交換の考え方を紹介する。

単一肺胞モデルによる説明

ガス交換は肺胞で行われる。吸気によって肺胞に運ばれた酸素は、肺胞に接する肺毛細血管内の血流に単純な拡散によって浸透する。この時同時に血液から肺胞へと二酸化炭素も移動する。

まず、単一の肺胞で考える、つまり、すべての肺胞と血管との関係が均一で、一つの肺胞・血管の組み合わせですべてを代表させることを考える。これは古典的なモデルで現在でも「チューブ・バルンモデル」として用いられている¹⁾(図1)。ここで大切なことは、静脈血として運ばれた「血流」は肺胞に運ばれた「換気」と出会って酸素、二酸化炭素の濃度(厳密には分圧であるが)が平衡に達したのち、それぞれ動脈血・呼気になるという

ことである。肺が単一肺胞モデルの集合であれば、動脈血と呼気の肺胞の酸素、二酸化炭素は等しいと考えてよい。

はじめに考えることは、①換気の多少・②血流の多少の②点である。最も効率の良いガス交換は、換気と血流の比率がほぼ1:1(厳密には0.8:1)のときに成り立つ。健常人では換気4ℓ/分・血流5ℓ/分が正常値と考えて差し支えない。このバランスが崩れることで、いろいろと不都合なことが起こる。

換気の多少・血流の多少を「換気>血流」のとき、「換気<血流」の場合にわけ、それぞれ「酸素」「二酸化炭素」について考える。酸素は肺胞から肺毛細血管へ、二酸化炭素は肺毛細血管から肺胞へとそれぞれ濃度の低

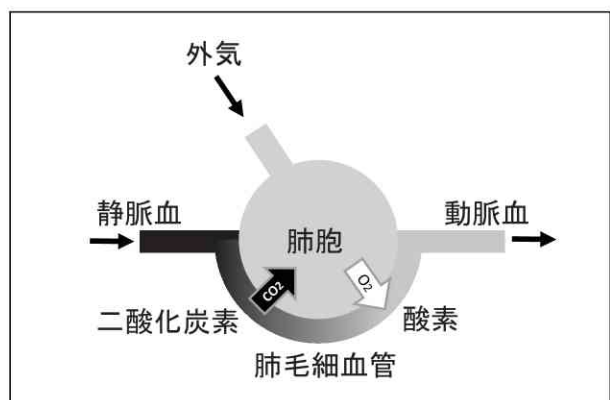


図1 チューブ・バルンモデル

肺全体を単一の肺胞と肺毛細血管で代表させる。
気道をチューブ・肺胞をバルンで表現する。
バルンの大きさを換気量を、血管の太さを血流量を表す。

い方へ移動する。これを日常生活で食塩と水から食塩水を作ることになぞらえて説明する（図2）。二酸化炭素については、血流が食塩で換気が水と考える（図3(a)）。一方、酸素については、二酸化炭素とは逆に、換気が食塩、血流が水と考える（図3(b)）。つまり、どちらも移動する前の状態を食塩、移動していく先を水と考えることにする。

まず、「換気>血流」のとき、この場合、酸素では食塩が水に対して多めということであり、濃い食塩水ができる。これは酸素濃度の濃い血流（動脈血）ができるということである。したがって換気が多くなると血液の酸素濃度は高くなることが理解できるだろう。一方、二酸化炭素では食塩が水に対して少なめということであり、薄い食塩水ができる。これは二酸化炭素濃度の低い呼気が生じるということである（図4(a)）。

次に、「換気<血流」のとき、酸素については少ない食塩で食塩水を作ることになり薄い食塩水ができる。すなわち酸素濃度の低い動脈血となる。また二酸化炭素については、多い食塩で食塩水を作ることになるので濃い食塩水、すなわち二酸化炭素の濃度の高い呼気が生じることになる（図4(b)）。そして、肺泡と動脈血の酸素、二酸化炭素は平衡に達したのち等しくなるので、「換気>血流」のときは高酸素・低二酸化炭素血症に、「換気<血流」のときは低酸素・高二酸化炭素血症になる。ここまで、健常肺で換気と血流のバランスの多少によって生じる病態の説明を行った。しかし、病的な肺には異常な肺泡・血管が存在し、さらにそれらの組み合わせとなっているため状況はもう少し複雑になる。

3つのコンパートメントによる説明

単一のチューブ・バルンモデルを組み合わせて様々な病態を一つの図で説明しようとしたものがRileyの3コンパートメントモデルである²⁾（図5）。これも古典的モデ

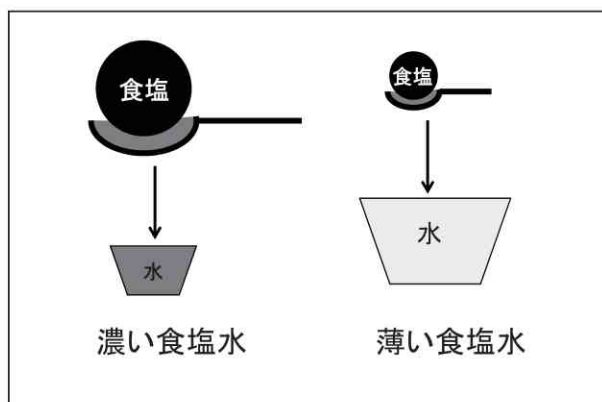


図2 食塩水の濃度

食塩が多く水が少なければ濃度は高くなる。
食塩が少なく水が多ければ濃度は低くなる。

ルであるが、現在でも低酸素血症や呼気と動脈血の二酸化炭素分圧の違いの説明に広く用いられている。このモデルでは、換気と血流のバランスのとれた部分、換気が

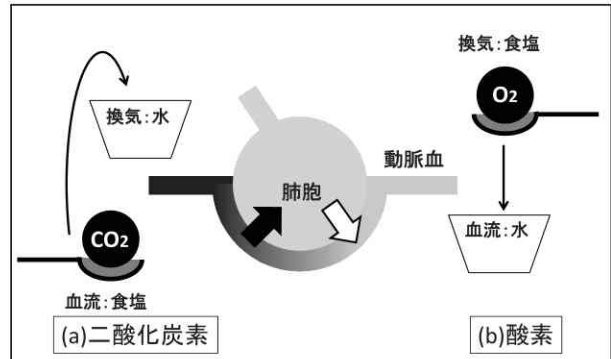


図3 単一肺泡モデル 換気=血流

- (a)二酸化炭素では、血流が食塩・換気が水と考える。
(b)酸素では、換気が食塩・血流が水と考える。
酸素・二酸化炭素は肺泡と動脈血で平衡に達する。

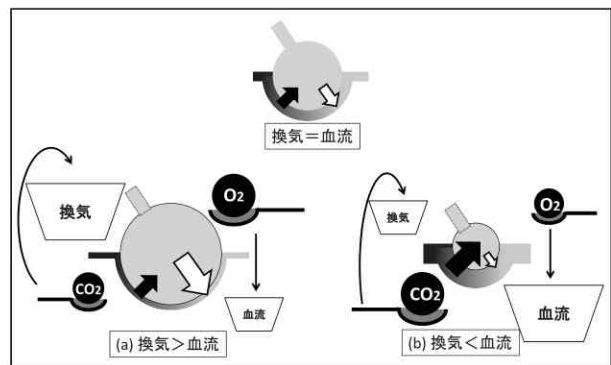


図4 単一肺泡モデル 換気>血流 換気<血流

- (a)換気>血流：酸素では、換気（食塩）が多く血流（水）が少なければ動脈の酸素濃度は高くなる。
(b)換気<血流：二酸化炭素では、血流（食塩）が多く換気（水）が少なければ呼気の二酸化炭素濃度は高くなる。

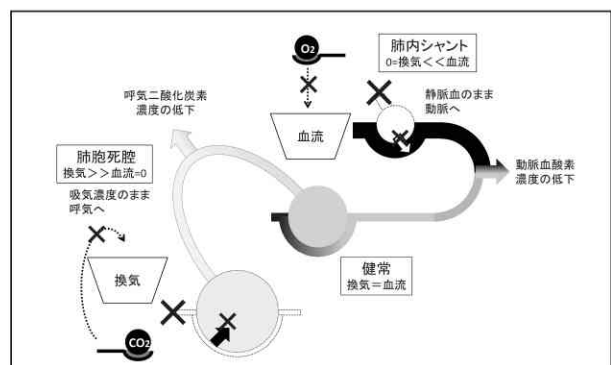


図5 3コンパートメントモデル

肺泡死腔、換気=血流、肺内シャントの3つのコンパートメント
動脈血は「換気=血流」の部分と肺内シャントの部分の混合となり、ガス交換が行われない静脈血の混合によって酸素濃度が薄くなる。

呼気は「換気=血流」の部分と肺泡死腔の部分の混合となり、ガス交換が行われない肺泡死腔からの混合によって二酸化炭素濃度が薄くなる。

なくて血流のみ存在する部分、そして血流がなくて換気だけ存在する部分の3つの部分ですべてを代表させている。「換気がなくて血流のみ存在する部分」とは「換気<血流」の究極のバランス、「血流がなくて換気だけ存在する部分」は「換気>血流」の究極のバランスの部分と考えればよく、それぞれ「換気がなくて血流のみ存在する部分」は「肺内シャント」、「血流がなくて換気だけ存在する部分」は「肺胞死腔」と呼ばれている。肺胞死腔は、二酸化炭素に関して食塩がない状態に相当し吸気そのまま呼気になることを意味する。また、肺内シャントは、酸素に関して食塩がない状態であり、これは静脈血から酸素濃度（二酸化炭素濃度も）が変化しないことを意味する。つまり、肺胞死腔は、二酸化炭素に関して呼気に二酸化炭素が排出されることがないので呼気の二酸化炭素濃度が低くなることになる※。一方、肺内シャントは、酸素に関して酸素濃度の低い静脈血がそのまま動脈血に流れることになり、低酸素血症となる。

ここまで、身近な食塩水になぞらえて説明したが、すでにこの部分で理解がしづらいと感じる学生も多い。

※時間が経過すれば二酸化炭素が体内に蓄積するので血液の二酸化炭素が上昇し最終的には呼気の二酸化炭素濃度も上昇してくるが、常に血液より低くなる。

Sliding rectangle モデルによる説明

本稿の主題である単純化したモデルについて説明する。換気と血流の関係を図や式で何度説明しても「測りがたい神秘」のままである医学生が少なからず存在することに対して、Nortonは「Sliding rectangle（スライドする長方形）モデル」を提唱した³⁾。その考え方を要約すると、2つの同じ形の長方形を用意し上下に重ねて肺全体を表し、上を換気、下を血流と考える（図6(a)）、そして、換気量と血流量は一定で、ただし換気と血流の接し方が異なる、というものである。完全に接していれば健全な理想的なガス交換を意味する。左右にずれて接する部分が少なくなった場合、上の換気だけの部分は死腔を、下の血流だけの部分はシャントを意味する（図6(b)）。この「ずれ」の大きさで、シャントと死腔の大きさを視覚的に表現できる。このモデルは換気と血流をあえて一定にすることで、「シャントが存在すればその部分に対応して死腔が必ず存在する」という別の大切なことを表現している。健康人であってもわずかな「ずれ」、すなわち死腔とシャントの要因は存在する。

隔壁の影響

換気と血流のバランス以外にもガス交換への影響はある。間質性肺炎などの隔壁の影響も Sliding rectangle モデルで説明可能である。ここでいう隔壁とは、肺胞上

皮、血管内皮、そして間質のことである。ガス交換は単純な拡散で起こるが、拡散は隔壁の距離に反比例する。つまり隔壁が厚くなると「拡散の速さ」が遅くなるのである。単純化したモデルでは、上下の接する部分を厚くすることで隔壁の影響を表現できる（図6(c)）。

単純化したモデルによる説明

Nortonのモデルは、あえて血流と換気を同じにして単純化した。単一肺胞モデルで説明した換気・血流の多少も Sliding rectangle モデルの形式に表すことができる。換気>血流の場合は、上の長方形をたてに大きく、換気<血流の場合は下の長方形をたてに大きくする。肺胞死腔の場合は上の長方形のみ、肺内シャントの場合は下の長方形のみとすればよいが、一つの肺ですべてが肺内シャント、あるいは肺胞死腔となることは臨床的には存在しない（図7）。

換気血流不均衡（V/Qミスマッチ）

これまでは長方形の組み合わせで一つの肺全体を表し、接している部分では換気と血流のバランスは一定であった（図8(a)）。しかし、実際の肺では「換気>血流」の部分と「換気<血流」の部分が混在して換気血流の不均衡（V/Qミスマッチ）を形成している。そこで上下の長方形の組み合わせを一つの肺ではなく、それぞれの病態の肺胞の代表と考える（図8(b)）。Nortonはこれを長方形ではなく三角形の組み合わせで表現した（図8(c)）。

臨床例

換気と血流の「ずれ」を表現した Sliding rectangle

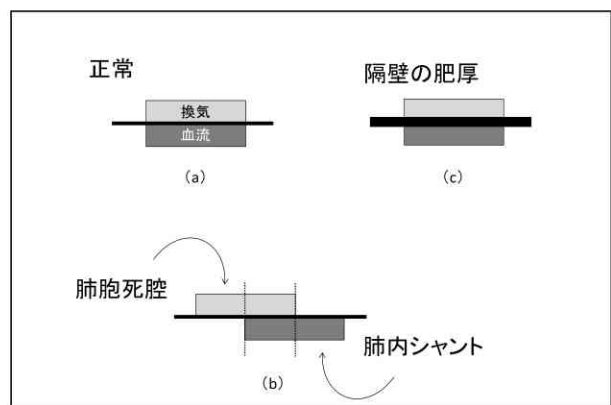


図6 sliding rectangle モデル

(a)上の長方形は換気を、下の長方形は血流をあらわす。

(b)上下の長方形がずれることで、上の長方形の血流と接していない部分は肺胞死腔を、下の長方形の換気と接していない部分は肺内シャントをあらわす。

(c)上下の長方形の接する部分は肺胞上皮・間質・血管内皮をあらわしているが、この厚さが厚くなることで間質の障害をあらわす。

モデルに換気・血流の多少を組み合わせた単純化したモデルで様々な病態を説明することができる。以下にそのいくつかを例として示す。

(1) 低換気と過換気

低換気は図7の(b)、過換気は図7の(d)でそれぞれあらわされる。これらは、Nortonのモデルでは表現されていなかった。換気<血流では、血液の酸素（酸素分圧）は低く、二酸化炭素（二酸化炭素分圧）は高くなり、逆に、換気>血流では、酸素は高く、二酸化炭

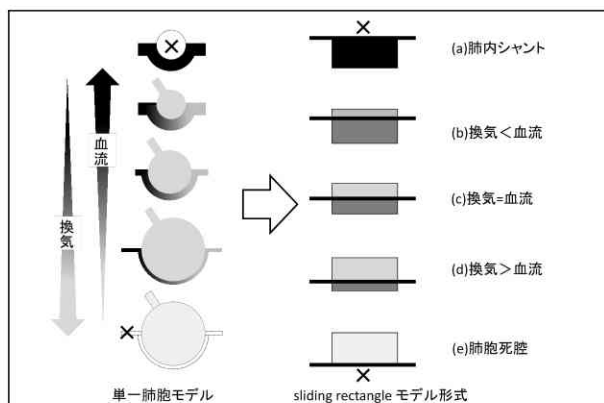


図7 単一肺胞モデルをsliding rectangleモデル形式で表す

- 単一肺胞モデルをsliding rectangleモデルで表した。
 (a)肺内シャント（肺炎など）：静脈血のまま。
 (b)換気<血流（低換気・高心拍出量）：呼気の二酸化炭素濃度上昇・動脈血の酸素濃度低下
 (c)換気=血流（正常）
 (d)換気>血流（過換気・低心拍出量）：呼気の二酸化炭素濃度低下・動脈血の酸素濃度上昇
 (e)肺胞死腔（肺塞栓など）：呼気に二酸化炭素が出ない。

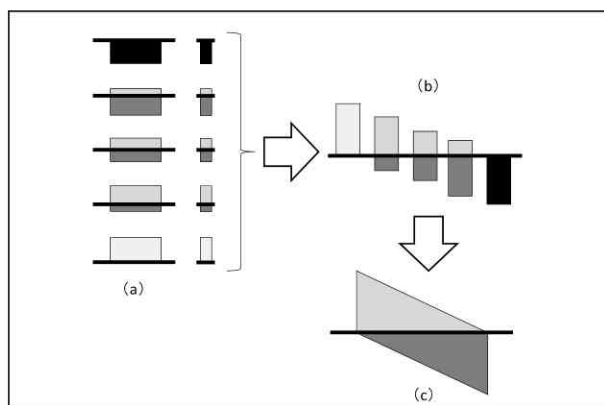


図8 換気血流不均衡（V/Qミスマッチ）

- (a)Sliding rectangleモデルでは一つの図が一つの肺全体を表現している。
 (b)肺全体は様々な換気と血流のバランスを持つ肺胞の集合と考える。
 (c)連続的だと考えると上下の三角形で表すことができる。

素は低くなる。

(2) 肺炎による呼吸不全

図9に高齢者の肺炎による呼吸不全を単純化したモデルで表した。無気肺・肺水腫による換気のない血流だけの部分（肺内シャント）、肺胞の過膨張に伴う血流のない換気だけの部分（肺胞死腔）に加え、炎症に伴う様々な換気と血流のバランス（換気血流不均衡）が混在していることを表している。

肺内シャントと換気血流不均衡の「換気<血流」の部分とによって低酸素血症となる。その部分が大きければ高度の低酸素血症となる。一方、肺胞死腔は呼気の二酸化炭素濃度を低下させて最終的には二酸化炭素が体内に貯留して高二酸化炭素血症になる方向に働く。しかし自発呼吸の場合、重症でなければ血液の二酸化炭素濃度は化学受容体や呼吸中枢によってコントロールされるので呼吸が促進されて正常範囲に保たれる。

(3) 分離肺換気

肺の手術を行うときには。術側の肺を虚脱させる必要がある。そのため、虚脱させた部分は血流だけが残り換気のない肺内シャントとなる。換気量が保たればこの換気はもう一方の片側の肺だけで行われることになり、この部分は「換気>血流」となる（図10）。

人工呼吸であるので二酸化炭素濃度は換気の設定により正常範囲に近づけることが可能である。片側肺の虚脱直後は肺内シャントによって低酸素血症になるが、下側の換気されている肺への血流が次第に増加して肺内シャントは減少してくるため、低酸素血症も次第に改善する。

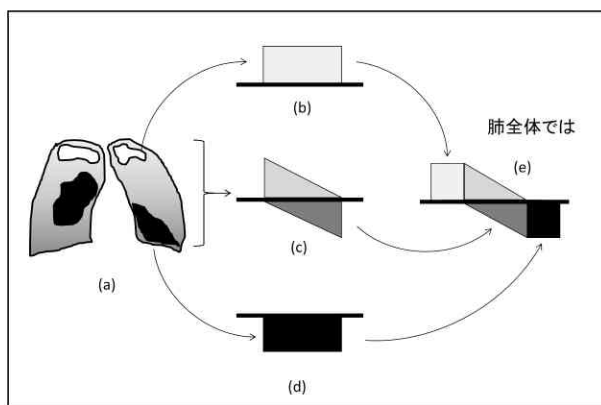


図9 肺炎による呼吸不全

- (a)肺炎では様々な換気と血流の組み合わせが混在する。
 (b)血流のない肺胞死腔
 (c)換気と血流の不均衡
 (d)換気のない肺内シャント
 (e)肺全体ではb+c+dの組み合わせとなる。

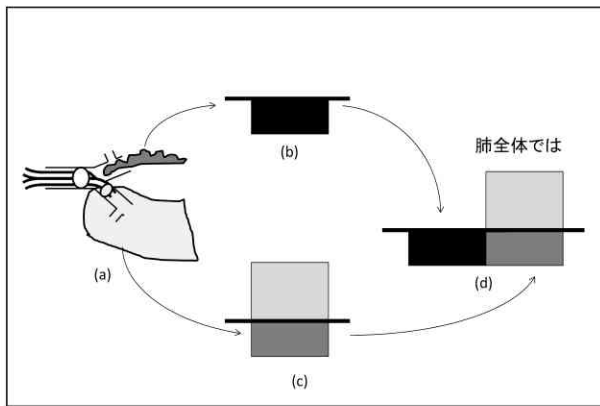


図10 分離肺換気

- (a)肺の手術で行われる分離肺換気
 (b)手術側の肺は虚脱し、換気はないが血流は残っている。ここは「肺内シャント」となり低酸素血症を助長する。
 (c)手術側の肺の分の換気も、換気側の肺で行われる。ここは「換気>血流」となり、呼気二酸化炭素濃度を減少させる要因となる。
 (d)肺全体ではb+cの組み合わせとなる。

終わりに

本稿は初学者の理解の助けになることを目的とした。そこで、あえて PaO_2 や SaO_2 などの記号を用いることはせず、またその計算も行わなかった。ガス交換を理解するうえで数値を計算することも大切ではあるが、このことが理解を妨げている一因とも考えられるからである。重要なことは「感覚的にどれくらい影響があるか」である。そうかといって大きい小さいかというだけでは大雑把すぎる。Sliding rectangleモデルに換気と血流の多少を組み合わせた単純化したモデルは、多くの病態を単純な図形の組み合わせで表現でき、視覚的に影響の大きさを推し量ることが可能である。

文 献

- 1) West J. B.: Respiratory Physiology, The Essentials, 8th Edition, 2008, 桑平一郎訳, ウェスト呼吸生理学入門, 61-82, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2009.
- 2) Riley R. L., Cournand A.: Ideal alveolar air and the analysis of ventilation-perfusion relationships in the lungs, J Appl Physiol., 1(12), 825-47, 1949.
- 3) Norton J. M.: A visual aid for teaching ventilation-perfusion relationships, Adv Physiol Educ., 24(1), 38-42, 2000.

Gas exchange in the lungs

— An explanation using the balance model of ventilation and perfusion —

Takafumi Azami

Laboratory of pathophysiology (anesthesiology), Nagoya City University School of Nursing

Abstract

Medical novices such as nurse students, medical students, novice nurses, and medical-interns cannot understand gas exchange of oxygen and carbon dioxide easily. I introduce a way of thinking of gas exchange using the simplified model to help understanding of the concept.

Key Words: gas exchange, ventilation, perfusion, oxygen, carbon dioxide