

高地における酸素解離曲線の移動 — 右方移動と左方移動、どちらが有利か？ —

薊 隆 文

要 約

高地での低酸素環境に対応するため、ヒトは様々な適応している。その一つが酸素の利用効率を高めるための酸素解離曲線の移動である。当初右方移動が有利と考えられていたが、左方移動の優位性が示されつつある。この混乱を解消するためには、右方移動と左方移動の選択基準が、動脈と静脈の酸素飽和度の較差を維持することと静脈血の酸素分圧を維持することにあると考えると理解しやすい。ヒトは右方移動と左方移動を低酸素の程度によって使い分けしていると考えてもよいだろう。

キーワード：高地、酸素解離曲線、右方移動、左方移動、 PvO_2 、 SvO_2

●はじめに

血液の中の酸素は、そのほとんどがヘモグロビン(Hb)に結合して組織へ運搬される。Hbは肺では酸素を取り込み(結合)、組織では酸素を受け渡している(放出)。この結合の程度は酸素解離曲線(oxygen dissociation curve)によって説明される。Hbは生体の酸素の需要に応じて、結合の程度を変化させるが、このことに伴う酸素解離曲線の変動は、右方移動・左方移動と呼ばれている。酸素環境が厳しい高地での右方移動と左方移動についてはこれまでに多くの議論がなされてきた。当初は右方移動するものと考えられていたが、近年、左方移動の優位性が示されつつある。右方移動と左方移動、なぜ、混乱をきたしたのだろうか？また、果たしてどちらが有利なのであろうか？

VO_2 (ml/min)：酸素摂取量、酸素消費量、1分間に肺から取り込まれる酸素の量、1分間に組織に受け渡される(消費される)酸素の量

■用語の説明と言葉の定義 1

・酸素に関する記号

- PaO_2 (mmHg)：動脈血の酸素分圧
- SaO_2 (%)：動脈血のHbの酸素飽和度
- CaO_2 (ml/dl)：動脈血酸素含量、動脈血1dl中に含まれる酸素の量(ml)
- PvO_2 (mmHg)：静脈血の酸素分圧
- SvO_2 (%)：静脈血のHbの酸素飽和度
- CvO_2 (ml/dl)：静脈血酸素含量、静脈血1dl中に含まれる酸素の量
- DO_2 (ml/min)：酸素運搬量、1分間に運ばれる酸素の量

■用語の説明と言葉の定義 2

- ・酸素の“取り込み”：ここでは、Hbの酸素と結合が強くなることで、外気から肺胞を通して血液中に酸素が取り込まれること(図1(b))。
- ・酸素の“受け渡し”：ここでは、Hbの酸素との結合が弱くなることで、血液から組織に酸素が受け渡されること(図1(b))。
- ・酸素解離曲線： PO_2 に対するHbの酸素飽和度を表した曲線(図2)。
- ・高地：高山病の危険が高まる海拔2500m以上を高地と呼んでいる。高地では酸素濃度は平地と同じであるが、気圧が低下するために酸素分圧が低下して低酸素環境となる。この低酸素環境によって高地で生じる肺水腫を高地肺水腫と呼んでいる。
- ・酸素解離曲線の“右方移動”と“左方移動”：生理的な条件の変化で、同じ PO_2 であってもpH、二酸化炭素分圧(PCO_2)、温度などの影響で、Hbの酸素との結合性、すなわち酸素飽和度 SO_2 が変わる。すると、図の上では、あたかも曲線が右側や左側に移動したように見える(図3)。
- ・酸素の移動が“有利”：与えられた環境で、より効率よく酸素の取り込みと受け渡しが可能になること。例えば PaO_2 が一定で SaO_2 が高くなるこ

と、 PvO_2 が一定と仮定した時に SaO_2 と SvO_2 の差が大きくなること(図3)。また、組織からミトコンドリアまでの酸素の拡散を考えたとき(図1(a))、 PvO_2 がより高いことなど。

●酸素の運搬

酸素は血液に溶解し、多くはHbと結合し、血流によって組織へ運ばれる。したがって、酸素の運搬(oxygen delivery: DO_2)は、肺で血液に溶解する酸素をどれだけ供給し(動脈血酸素分圧: PaO_2)、その酸素をどれだけHbに結合させ(動脈血酸素飽和度: SaO_2)、Hbがどれだけ存在し、そして心臓がどれだけ血流を送るか(心拍出量: CO)という、これらの点に依存することになる。式で表すと、

$$DO_2 = CaO_2 \times CO \text{ (ml/min) となる。}$$

ここで、

CaO_2 : 動脈血酸素含量 (Hbに結合した酸素と溶存酸素の合計の濃度)

$$CaO_2 = 1.34^* \times Hb \times SaO_2 + 0.0031 \times PaO_2 \text{ (ml/dl)}$$

(*1.32、1.39とすることもある)

SaO_2 : 動脈血酸素飽和度 (%)

Hb: Hb濃度 (g/dl)

である。ここで、Hbに変化がなく、溶存酸素に関する部分 $0.0031 \times PaO_2$ は小さいので省略すると、

酸素運搬量 \propto 動脈血酸素飽和度 \times 心拍出量

となり、酸素運搬量は呼吸と循環に依存するが、本稿ではこのうち呼吸の要素である酸素飽和度について論じている。

●酸素の取り込み

(1)肺胞気式

酸素は肺で単純な拡散によって血液に取り込まれる(図1(b))。拡散は圧力較差に依存するので、運ばれてくる静脈血の酸素分圧(PvO_2)と肺の酸素分圧(PAO_2)の差が大きいくほど有利である。 PAO_2 は肺胞気式と呼ばれる以下の式で与えられる。

$$PAO_2 = PIO_2 - PaCO_2 / 0.8 \text{ (mmHg) (0.8は呼吸商)}$$

ここで、

$$PIO_2 = \text{大気酸素分圧} \times 0.21 \times (PB - 47) \text{ (mmHg)}$$

(47は水蒸気圧)

PB: 大気圧

である。

この式からわかるように、 PAO_2 は PIO_2 と $PaCO_2$ に依存する。高地では大気圧PBが低下するため

PIO_2 が低下する。したがって $PaCO_2$ を低下させることで PAO_2 を上げる反応、すなわち過換気が起こる。吸い込む空気の酸素が薄い(濃度は21%で平地と同じ、気圧が低い)ため、より多く空気を吸い込むことで酸素をより多く吸い込み、二酸化炭素をより多く吐くことで、肺胞の酸素を濃くすることができる。

(2)酸素摂取量(肺胞から血液への酸素の取り込み量)

$$: VO_2$$

肺胞から血液に取り込まれる酸素の量を VO_2 と呼び、吸気と呼気の酸素濃度の差に換気量(厳密には肺胞換気量)を乗じた以下の式であらわされる、

$$VO_2 = VA \times (FIO_2 - FAO_2) \text{ (ml/min)}$$

ここで、

VA: 肺胞換気量 (l/min.)

FIO₂: 吸気の酸素濃度

FAO₂: 呼気の酸素濃度

である。後述するが、定常状態ではこの酸素の取り込み量は、血液から組織への酸素の受け渡し量に等しい。

●酸素の受け渡し

(1)酸素消費量(血液から組織への酸素の受け渡しの量)

$$: VO_2$$

肺で血液に取り込まれた酸素は組織に運搬され、組織に受け渡され消費される(図1(b))。定常状態ではこの「酸素の受け渡し」と肺から血液への「酸素の取

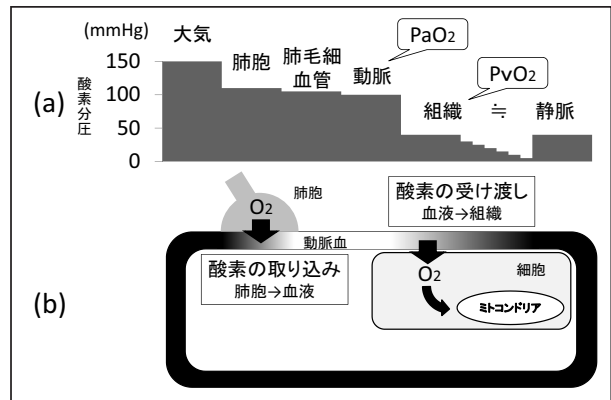


図1 酸素分圧の変化・酸素の取り込みと受け渡し

(a): 大気から、ミトコンドリアまでの酸素分圧の変化

(b): 酸素の取り込み(酸素摂取量)と酸素の受け渡し(酸素消費量)

肺胞と静脈との間の酸素分圧較差で、酸素の取り込みが行われ、動脈の分圧となり組織に運ばれる。

動脈と組織との間の酸素分圧較差で、酸素の受け渡しが行われ、静脈の分圧となり肺に運ばれる。

この静脈の分圧(≒組織の分圧)が細胞・ミトコンドリアまでの拡散を行う。

り込み」は等しい。この酸素の受け渡しの量（酸素の消費量）も VO_2 と表される。これは組織に運搬した酸素の量 DO_2 と心臓に戻ってきた酸素の量との差で、以下のように式で表すことができる。

$VO_2 = DO_2 - \text{心臓に戻ってきた酸素の量 (ml/min.)}$
 ここで
 $DO_2 = CaO_2 \times CO$ であったので、心臓に戻ってきた酸素の量は同じように、
 心臓に戻ってきた酸素の量 $= CvO_2 \times CO$
 である。ここで、
 CvO_2 ：中心静脈血の酸素含量 (ml/dl)
 $CvO_2 = 1.34 \times Hb \times SvO_2 + 0.0031 \times PvO_2$ (ml/dl)
 SvO_2 ：中心静脈の酸素飽和度 (%)
 PvO_2 ：中心静脈の酸素分圧 (mmHg)
 である。以上から、結局 VO_2 は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} VO_2 &= DO_2 - \text{心臓に戻ってきた酸素の量} \\ &= CaO_2 \times CO - CvO_2 \times CO \\ &= (1.34 \times Hb \times SaO_2 + 0.0031 \times PaO_2) \times CO \\ &\quad - (1.34 \times Hb \times SvO_2 + 0.0031 \times PvO_2) \times CO \\ &\approx 1.34 \times Hb \times (SaO_2 - SvO_2) \times CO \\ &\quad (\text{※}PaO_2、PvO_2の項は十分小さいので省略) \end{aligned}$$

となる。この式から、Hb、心拍出量CO、そして SaO_2 が一定ならば、中心静脈の酸素飽和度である SvO_2 が低いほうが VO_2 （ここでは、血液から組織への酸素の受け渡し）が多くなるのがわかる。言い換えると「酸素の受け渡しが有利である」ということになる。 PO_2 の低い組織において、同じ PO_2 で SO_2 を低くして受け渡しの効率をあげている。

(2)静脈血酸素飽和度： SvO_2

一方、この式は、以下のように書き換えられる。

$$SvO_2 = SaO_2 - VO_2 / (1.34 \times Hb \times CO)$$

この式からわかるように、 SvO_2 は、 SaO_2 、 VO_2 、Hb、そしてCOの関数で、その正常値は75%である。 SaO_2 の正常値はほぼ100%なので、送った酸素のわずか25%しか使用せず75%を戻すという無駄なことを行っていることになるが、これは不測の事態に備えての予備力と考えられている。健常者では、たとえばHbが多少低くても、代謝が嵩じて VO_2 が増大しても、あるいは呼吸が悪くなって SaO_2 が低下した場合も、心拍出量を増大させることで、第2項の部分 $VO_2 /$

$(1.34 \times Hb \times CO)$ の増大を抑え SvO_2 はほぼ正常に保たれている。しかし重症患者で、たとえば心拍出量そのものが減少していたり、心拍出量の増大が不十分だったりすると SvO_2 が低くなる。そのため SvO_2 は重症患者の管理の指標としても用いられている。「 SvO_2 を低くすることは酸素の受け渡しには有利である」とのべてきたが、それは必要に迫られての結果であると考えられる。

●酸素解離曲線

(1)酸素解離曲線

酸素がHbにどれだけ十分に結合しているかを表したものが、酸素飽和度である。健常人では平地での SaO_2 は97-98%である。これは、Hbに結合しうる最大量の酸素の97-98%が結合していることを意味する。酸素飽和度は、血液の酸素分圧と密接に関連しているが、単純な比例関係ではなく、その関係はS状の曲線を描く。これを酸素解離曲線と呼んでいる(図2)。酸素分圧の高い環境ではより結合しやすく、低い環境ではより結合しにくい(言い換えると酸素を放出しやすい・受け渡ししやすい)ことを表している。生体では、より高い環境とは肺であり、より低い環境とは組織である。つまり、肺で酸素をより多く取り込んで、組織でより多く放出できる仕組みとなっている。

(2)酸素解離曲線の右方移動・左方移動

また、この酸素解離曲線は、状態に応じて、右側あるいは左側に移動することが知られている。例えば熱があるときは代謝が亢進しているので、より多くの酸

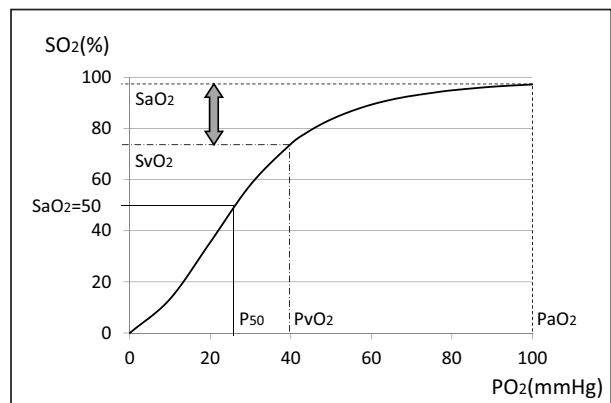


図2 酸素解離曲線

(Oxygen Dissociation Curve: ODC)

健常人の平地での正常値は、 $PaO_2 = 100$ mmHg、 $SaO_2 = 96-98\%$ 、 $PvO_2 = 40$ mmHg、 $SvO_2 = 75\%$ 、 $SaO_2 = 50\%$ のときの PO_2 である $P50 = 27$ mmHg
 グレー両矢印：動脈と静脈の酸素飽和度の差 ($SaO_2 - SvO_2$ 較差) で組織に酸素が受け渡される。

素を必要とする、したがって組織により多くの酸素を受け渡す必要がある。このとき、酸素解離曲線が右方移動していると、酸素分圧が低い組織において同じ酸素分圧でより酸素を放出しやすくなるため、より多くの酸素を受け渡すことができる（図3の黒両矢印）。酸素をより多く必要とする運動時にも同様なことが起こる。酸素が足りなくなると嫌気性代謝が進んで、アシドーシスが進行し、pHが下がる。したがってこの時も、酸素をより多く受け渡す必要がある。酸素がより多く必要な環境では結果としてCO₂もより多く産生される。したがってCO₂の増大も右方移動を促す。

また、赤血球中には2,3-ジホスホグリセリン酸(2,3-diphosphoglycerate: 2,3-DPG)という物質があり、Hbと酸素との親和性に関与している。2,3-DPGは低酸素環境で生じる嫌気性解糖の中間代謝産物である。2,3-DPGが増大するとHbと酸素の親和性が低下し右方移動する^{1), 2)}。

まとめると、酸素解離曲線が右方移動するのは、体温の上昇、運動時、pHの低下、CO₂の増大、そして2,3-DPGの増大、が生じた時である。反対に左方移動するのは、低体温、pHの上昇、CO₂の減少、そして2,3-DPGの減少した時ということになる³⁾。右方移動したときは、酸素分圧の低い環境すなわち組織で酸素をより多く受け渡すが、酸素分圧の高い環境すなわち肺では酸素を取り込みにくくなっている。反対に左方移動したときは、肺で酸素をより多く取り込めるが、組織では酸素を放出しにくくなっている。酸素解離曲

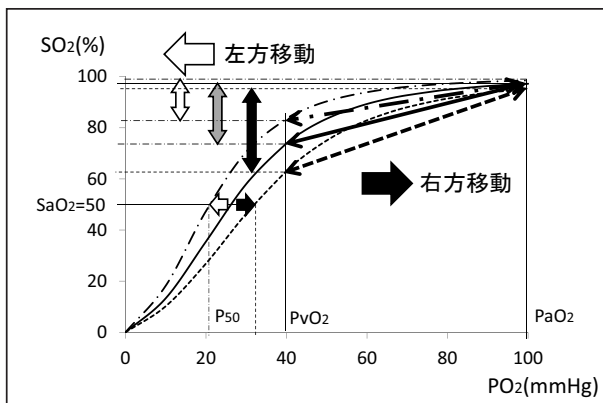


図3 酸素解離曲線（平地）

実線：pH=7.40の正常時、点線：右方移動、破線：左方移動
黒矢印：温度上昇、pH増大、CO₂増大、2,3-DPG増大で右方移動

白矢印：温度低下、pH減少、CO₂減少、2,3-DPG減少で左方移動

PvO₂に変化がないと仮定すると、右方移動は動脈と静脈の酸素飽和度の差が大きくなる（黒両矢印）、P₅₀は増大する。

左方移動は動脈と静脈の酸素飽和度の差が小さくなる（白両矢印）、P₅₀は減少する。

線の移動の程度はP₅₀という指標で表される。P₅₀とは、酸素飽和度(SO₂)が50%のときのPO₂を表す。「P₅₀が増大した」ということは「右方移動」を表している（図3）⁴⁾。

● 高地での反応

高地の低酸素環境では、まず化学受容体が反応して過換気となる。PaCO₂が低下し、pHが増大して、酸素解離曲線は左方移動する。その後、腎臓でのH⁺の再吸収が促されアルカリ性に傾いたpHを戻す反応が進む、1-2日後、pHの変化に反応して2,3-DPGが増加する。この増加によって酸素解離曲線は右方移動する。エリスロポイエチンの増加に伴うHbの増大はさらに遅れて1週間後から生じる。では、結局のところ酸素解離曲線はどちらに移動しているのだろうか？

● 高地での酸素解離曲線の移動

(1) 右方移動が有利である

高地における生体の反応の研究・調査は1900年代の初期から行われ、多くの報告がなされてきた。近年においても高値の低酸素環境では右方移動が有利であるとの報告も多い⁵⁻⁹⁾。これらの多くは、2,3-DPGが増大して、酸素解離曲線を右方移動させ、SvO₂を低下させ、受け渡しをしやすくすることが根拠となっている。

低酸素環境の高地では、酸素を受け渡しやすい方が有利であると考えられる。すなわち右方移動が有利である。静脈血酸素分圧(PvO₂)は組織の酸素分圧と同等と考えられている（図1(a)）ので、確かに、図3では同じPvO₂でも右方移動の場合の方がSvO₂がより低くなって酸素を受け渡しやすくなっている。反対に、酸素の取り込みにおいては、前述したように過換気でCO₂を低下させた方が有利である、これは左方移動を促す。しかし、この環境では左方移動しても、同じPaO₂でSaO₂はほとんど変化なく、一方、同じPvO₂ではSvO₂が上昇してしまうため、左方移動はかえって効率が悪いことになる（図3の白両矢印）。PvO₂が一定のとき、右方移動は、左方移動に比べて縦の矢印で表した動脈と静脈の酸素飽和度較差が大きく、Hbや心拍出量が変わらなければ、酸素の受け渡し量が大きくなっている。酸素の運搬が減少する低酸素環境で、少しでも酸素の受け渡ししがしやすい方が有利であると考えられる。教科書にも長年このように記載されている。貧血や心拍出量の低下などによる酸素の運搬の低下時には、実際この図3のように右方移動することによって代償できるので効率がよい。しかし、高地の低酸素環境では事情が異なるのではないかという疑問が

生じた。高地における状況は魚類など他の動物の低酸素環境のそれと似ているというのである¹⁰⁾。

(2)左方移動が有利である

胎児の環境は低酸素であり、高地の状況と似ているといってもよい。その胎児のHbは成人のHbに比較し左方に移動して低酸素環境で、より酸素との結合性を高めて、同じ酸素分圧で母体のHbから酸素を奪いとることができる。つまり、左方移動は低酸素環境でより多くの酸素を取り込むことができる。また、高地でのPvO₂は平地のそれよりかなり低くなってS字カーブの平坦な部分に近づくので、右方移動してもその利点は少なくなる。それなら左方移動で取り込みを増大させた方が有利であろうという議論はあった¹¹⁾。高地にすむラクダの一種であるリヤマやビクーニャのHbは高いO₂親和性を持っている¹²⁾。言い換えると酸素解離曲線が左方移動している。また、高地にすむある種のネズミでは、居住地の高度と酸素の親和性に高い相関があった(=P₅₀とに負の相関が認められた)¹³⁾。ヒトでも、高地の居住者だけでなく滞在者も酸素解離曲線は左方移動して、これは過換気、pHの上昇、低温の影響が、2,3-DPGの増大に打ち勝った結果であるという¹⁴⁾。これまで教科書に説明されていたことが翻ったのである¹⁵⁾。

(3)高度による右方移動・左方移動の選択

実は、居住地の高度によって反応が異なり¹⁶⁾、高度5000mまでは右方移動、それを超えると左方移動が有

利である¹⁷⁾。理論的には酸素の受け渡しを効率化するためには酸素解離曲線の急峻なところを利用することが重要である。Hbや心拍出量が一定のときに、同じ動脈と静脈の酸素飽和度較差を維持することを考えてみよう。図4は中等度の高地の場合であるが、右方移動のほうが曲線のより急峻な部分を利用できる。組織での酸素の移動も肺と同じように拡散によって行われるが、そのためにはある程度高いPvO₂が必要(図1(a))である。中等度の高地では、右方移動の方がPvO₂が高い。一方、極度の高地ではどうであろうか?

図5は極度の高地の場合である。ここではPaO₂=20mmHgとなっているが、エベレストの山頂付近でのPaO₂はこれより低くなりうる¹⁸⁾。こうなると動脈と静脈の酸素飽和度較差が同じ場合に、左方移動のほうが急峻な部分を利用でき、PvO₂を高く保つことができる^{19),20)}。すでに、別の研究で高地もP₅₀の増大(つまり右方移動)の有効性に疑問が持たれ、PaO₂が極度に低いと左方移動の方がPvO₂を増大させるかもしれないといわれていた²¹⁾。

低酸素環境での左方移動の利点とその根拠をまとめると、酸素解離曲線の急峻な部分を利用できることと、動脈と静脈の酸素飽和度較差が同じ場合にPvO₂を高く保てること^{21),22)}の2点であるといえることができる。

●おわりに

高地における酸素解離曲線の移動について、その混乱を解決する考え方について述べた。重要なことは、必要なだけの酸素を組織に受け渡すことである。極度の高地・

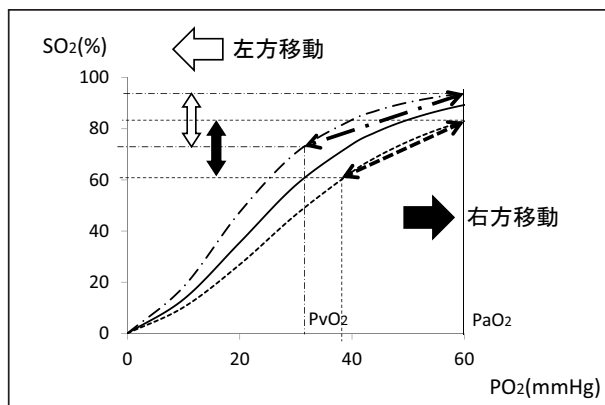


図4 酸素解離曲線 (中等度の高地)

実線：正常時、点線：右方移動、破線：左方移動
 中等度の高地では、動脈と静脈の酸素飽和度の差が同じであると仮定すると、右方移動のほうが酸素解離曲線の急峻な部分を利用でき、効率が良い。
 また、PvO₂をより高く保つことができる。
 白両矢印：左方移動のときの動脈と静脈の酸素飽和度の差
 黒両矢印：右方移動のときの動脈と静脈の酸素飽和度の差 (文献²¹⁾、²²⁾を参考にして作図)

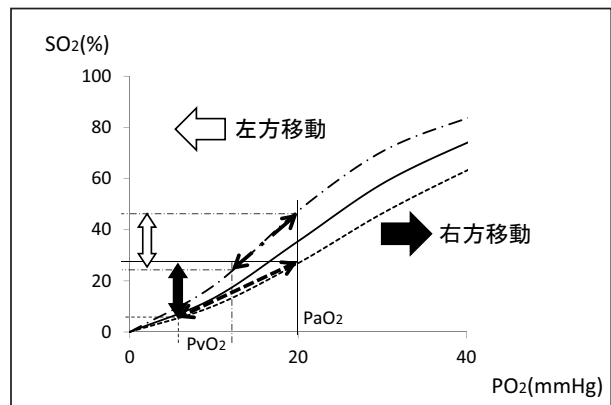


図5 酸素解離曲線 (極度の高地)

実線：正常時、点線：右方移動、破線：左方移動
 極度の高地では、動脈と静脈の酸素飽和度の差が同じであると仮定すると、左方移動のほうが酸素解離曲線の急峻な部分を利用でき、効率が良い。
 また、PvO₂をより高く保つことができる。
 白両矢印：左方移動のときの動脈と静脈の酸素飽和度の差
 黒両矢印：右方移動のときの動脈と静脈の酸素飽和度の差 (文献²¹⁾、²²⁾を参考にして作図)

極地の低酸素環境では、過換気・pHの上昇による左方移動の方が有利なようであるが、まだ解決していない問題は残っている。酸素の運搬には血流が大きな意味をもつことはすでに述べたが、過換気は脳血管を収縮させ脳血流を減少させる。ところが、より高地の住民であるヒマラヤの居住者はアンデスの居住者より脳血流が20%多い²³⁾。より大きな左方移動がより大きな過換気・PCO₂の低下によってもたらされていると考えるとこの結果は説明できない。高地への順応はどれも単純ではないようである。

文 献

- 1) Bellingham AJ., Detter JC., Lenfant C.: Regulatory mechanisms of hemoglobin oxygen affinity in acidosis and alkalosis, *J Clin Invest*, 50(3), 700-6, 1971.
- 2) Morgan TJ.: The oxyhaemoglobin dissociation curve in critical illness, *Crit Care Resusc*, 1(1), 93-100, 1999.
- 3) Adair GS., Bock AV., Field Jr.H.: The hemoglobin system: VI. The oxygen dissociation curve of hemoglobin, *J. Biol. Chem*, 63: 529-545, 1925.
- 4) Connie CW., Hsia MD.: Respiratory Function of Hemoglobin, *N Engl J Med*, 338, 239-24, 1998.
- 5) Lenfant C., Torrance J., English E., et al.: Effect of altitude on oxygen binding by hemoglobin and on organic phosphate levels, *J Clin Invest*, 47(12), 2652-6, 1968.
- 6) Lenfant C., Torrance JD., Reynafarje C.: Shift of the O₂-Hb dissociation curve at altitude: mechanism and effect, *J Appl Physiol*, 30(5), 625-31, 1971.
- 7) Eaton JW., Skelton TD., Berger E.: Survival at extreme altitude: protective effect of increased hemoglobin-oxygen affinity, *Science*, 183(4126), 743-4, 1974.
- 8) Frisancho AR.: Functional adaptation to high altitude hypoxia, *Science*, 187(4174), 313-9, 1975.
- 9) Moore LG., Brewer GJ.: Beneficial effect of rightward hemoglobin-oxygen dissociation curve shift for short-term high-altitude adaptation, *J Lab Clin Med*, 98(1), 145-54, 1981.
- 10) Hebbel RP., Eaton JW., Kronenberg RS., et al.: Human llamas: adaptation to altitude in subjects with high hemoglobin oxygen affinity, *J Clin Invest*, 62(3), 593-600, 1978.
- 11) Bencowitz HZ., Wagner PD., West JB.: Effect of change in P50 on exercise tolerance at high altitude: a theoretical study, *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 53(6), 1487-95, 1982.
- 12) Weber RE.: High-altitude adaptations in vertebrate hemoglobins, *Respir Physiol Neurobiol*, 158(2-3), 132-42, 2007.
- 13) Snyder LR., Born S., Lechner AJ.: Blood oxygen affinity in high- and low-altitude populations of the deer mouse, *Respir Physiol*, 48(1), 89-105, 1982.
- 14) Winslow RM.: The role of hemoglobin oxygen affinity in oxygen transport at high altitude, *Respir Physiol Neurobiol*, 158, 121-127, 2007.
- 15) Joyner MJ.: Giant sucking sound: can physiology fill the intellectual void left by the reductionists?, *J Appl Physiol*, 111(2), 335-42, 2011.
- 16) West JB.: Human responses to extreme altitudes, *Integr Comp Biol*, 46(1), 25-34, 2006.
- 17) Samaja M., Crespi T., Guazzi M., et al.: Oxygen transport in blood at high altitude: role of the hemoglobin-oxygen affinity and impact of the phenomena related to hemoglobin allosterism and red cell function, *Eur J Appl Physiol*, 90(3-4), 351-9, 2003.
- 18) Grocott MP., Martin DS., Levett DZ., et al.: Arterial blood gases and oxygen content in climbers on Mount Everest, *N Engl J Med*, 360, 140-9, 2009.
- 19) Samaja M., Di Prampero PE., Cerretelli P.: The role of 2,3-DPG in the oxygen transport at altitude, *Respir Physiol*, 64(2), 191-202, 1986.
- 20) Storz JF.: Hemoglobin function and physiological adaptation to hypoxia in high-altitude mammals, *Journal of Mammalogy*, 88(1), 24-31, 2007.
- 21) Aberman A., Hew E.: Clarification of the effects of changes in P50 on oxygen transport, *Acute Care*, 11(3-4), 216-21.1985.
- 22) Brauner CJ., Wang T.: The Optimal Oxygen Equilibrium Curve: A Comparison between

Environmental Hypoxia and Anemia,
American Zoologist, 37(1), 101-8, 1997.

- 23) Jansen GF., Basnyat B.: Brain blood flow in Andean and Himalayan high-altitude populations: evidence of different traits for the same environmental constraint, J Cereb Blood Flow Metab, 31(2), 706-14, 2011.

Movement of the oxygen dissociation curve in high altitude

— right shift or left shift, which is more advantageous? —

Takafumi Azami

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

Abstract

Human beings adapt variously to hypoxic environment in high altitude. Shift of oxygen dissociation curve raises efficiency of oxygen usage. Right shift or left shift of the curve depends on how to maintain the difference between oxygen and mixed venous saturation and to raise mixed venous partial pressure of oxygen.

Key Words: high altitude, oxygen dissociation curve, right shift, left shift, PvO_2 , SvO_2