

●特集・気圧と気体の障害

生体の圧力平衡とその破綻

太田保世*

はじめに

地球上の生物は、必然的にその環境から受ける物理的な影響因子に対して、さまざまな順応 (acclimatization) と適応 (adaptation) を遂げながら生きてきた。物理的な影響因子とは、1Gの重力加速度、1気圧の環境圧力、約21%の酸素濃度、ある程度の温度変化などであり、適応現象は、呼吸器系の構造変化、循環系の変化などである。

文明は、人間の生活圏を急速に拡大しているが、新しい環境では、順応 (適応) 能力を超えた物理的因子の変化が、生体に再調整を要求する。例えば、宇宙酔いの現象がそれである。物理的因子のなかでも、生体内外の圧力環境をめぐる問題は、高気圧酸素治療と密接した問題であり、本稿では、次の呼吸生理学に関する桑平論文と重複するかも知れないが、基礎的な部分に限り述べてみたい。

1. 環境と圧力

周知のように、海拔0mでの標準的な気圧は760 Torrである。潜水を行えば、海水と淡水の若干の差はあるが、10mごとに1気圧ずつ (直線的に) 上昇する。高地に行けば、図1¹⁾のような (非直線的な) 気圧の低下、従って吸気あるいは肺胞気の酸素分圧の低下が起きる。高度5,500~5,800mで気圧は半分になり、最も高いエベレスト (チョモランマ) 山頂 (8,848m) では、気圧は約250 Torrである。神話以外には、海底 (水中) に定住する人間はいないが、3,000m以上の高地に、世界中で約300万人が生活をしている。このような場合、圧力そのものは障害因子にはならないが、さらに高高度まで空気の組成が変わらないので、吸気酸素分圧の低下が重大な問題となる。高度が3,000m

を超えると、酸素飽和度は90%以下となり、さまざまな症状が出現する。エベレスト山頂での吸気酸素分圧は、 $(250-47) \times 0.2093 = 42 \text{ Torr}$ ほどになり、 AaDO_2 を10 Torrほどとすれば、動脈血酸素分圧は約30 Torrで、組織・細胞にとって危険な状態になっている。地表を離れれば、高度約14,000 mでは、たとえ酸素吸入をしていても必要な酸素飽和度に達しないし、高度19,000mでは気圧が約47 Torr (37°Cでの水蒸気分圧に等しい) であるから、生体の体液は沸騰してしまうことになる。

2. 生体内の圧力

1) 組織の圧力

生体は、体内の特殊な閉鎖腔を除けば、この環境圧を均等に受けている。従って、基本的には、体内の圧力は1気圧 (760 Torr) である。しかし、通常の呼吸条件 (1気圧、空気呼吸) で、体内の圧力分布をみると、まずガス交換の結果としての圧力較差が存在する。気道で外界と交通する肺胞気およびそれと平衡した動脈血では、全体圧は環境圧と等しく1気圧であり、その構成分圧は、体温37°Cでの水蒸気分圧が47 Torr、窒素分圧570 Torr、酸素分圧103 Torr、二酸化炭素分圧は40 Torrで、計760 Torrとなる。組織側をみると、水蒸気分圧、窒素分圧は変わらないが、静脈血ガス分圧と平衡しているとすれば、酸素分圧が40 Torr、二酸化炭素分圧が45 Torrで、計702 Torrとなり、静脈側よりも58 Torr低い圧力になっている。

このことは、ガス交換という点からは具合の良いことであるが、時には都合の良い場合と悪い場合とがある。例えば、次項で述べる体腔内のガスを考えてみよう。自然気胸を起こせば、胸腔内圧は環境気圧と同じになるが、リークが止まれば、気胸腔の圧力は周囲の組織よりも高いので、ガス

*東海大学医学部第2内科

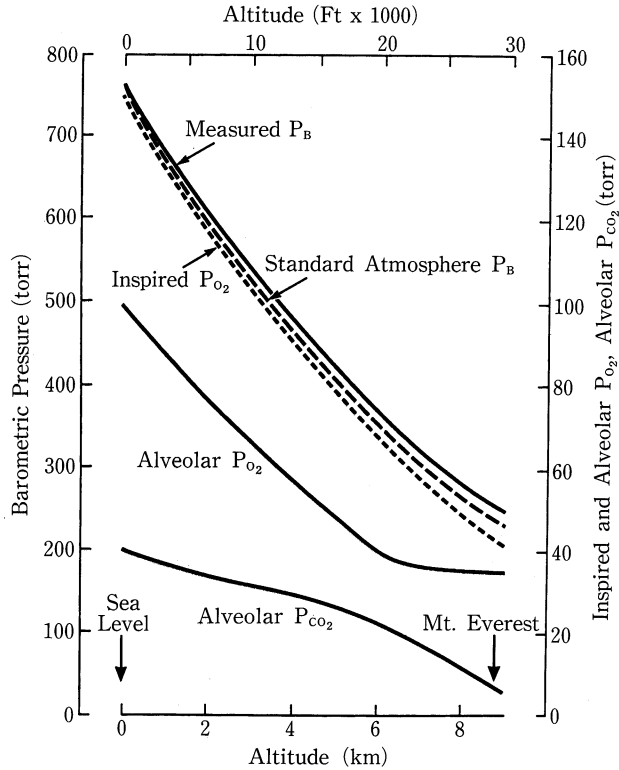


図1 高度と気圧および肺胞気酸素分圧
(West JB: 文献1より引用)

は結局吸収される運命にある。しかし、圧力によって形状を変えられないような気腔、例えば副鼻腔が閉塞されたような場合は、気腔の圧力が閉塞部位の圧力（環境圧）より低くなって、疼痛の原因になったりする。

2) 体内の気腔

生体内には、さまざまな形で、ガスを含むスペースが存在する。その最大のものが気道・肺胞系の気腔であるが、気道（死腔）容積が約120ml、肺の残気量（性別・身長・年齢で差がある）が、例えば1500ml程度である。この気腔は気道によって外界と通じているから、換気に伴う胸腔内圧の変動を別にすれば、環境圧に等しいと考えることができる。

その他、鼻腔（約20ml）、副鼻腔（約50ml）、中耳や乳様突起（約20ml）がある。

体内気腔を、環境圧によって圧縮されるもの（collapsible）とそうでないものに分けて考える

ことがある。特に、その両者でのガス交換に大きな差があり、理論式の違いが明確に示されているので、文献²⁾を参照されたい。

圧縮、非圧縮の差異は、例えば腸内ガスは環境圧に応じて腹腔内圧が変化するので、おおむね環境圧と等しいとすることができるが、中耳や乳様突起の気腔は、固い容器内の気腔であるから圧縮されないという違いである。問題は、肺胞系の気腔で、胸壁（胸郭と横隔膜）は一定度までは圧縮されるが、残気量位では固い容器のなかにあると考えても良い。従って、肺活量位まで吸入したとすれば、その約80%は圧縮されるが、それ以上は圧縮されない。

3) 胸膜腔と腹腔の圧力

腹膜腔は厳密には気腔ではないが、胸腔内圧には、重力の影響によって、図2のような肺の上下での圧力勾配がある。肺の高さ1cmにつき0.25 cmH₂O、肺尖部と基底部分の間で約7.5cmH₂Oの

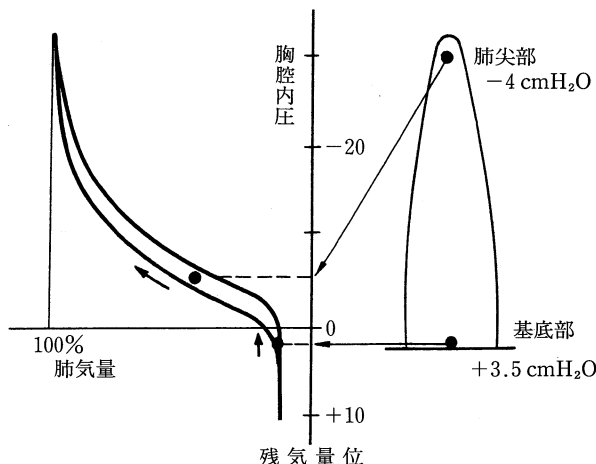


図2 胸腔内圧への重力の影響と圧量曲線
(太田保世：文献3より引用)

勾配があり、上部ほど陰圧度が大きい。この勾配は、局所の肺胞の拡がり、換言すれば局所の換気に影響する。図の左半分は残気量位からの呼吸を示す圧量曲線であるが、吸気によって肺尖部と肺底部が移動する圧量曲線の傾斜（コンプライアンス）が異なるので、局所換気量の大きさと時間経過が異なることが示されている。

主要な呼吸筋は横隔膜であるが、その横隔膜を挟んで、胸腔内圧（食道内圧）と腹腔内圧の差、横隔膜内外圧差（transdiaphragmatic pressure; Pdi）が存在する。もし呼吸筋（横隔膜）が疲労してしまえばPdiは低下してしまう。

4) 循環器系の圧力

血圧は、心周期に従って収縮期圧から拡張期圧までの変化をすると同時に、重力方向に沿った勾配をもっている。特にキリンのような体型で体長も大きい場合には、頭部と脚部間の血圧には大きな差異がある。仮にヒトが、戦闘機やロケットなどで、頭部から下肢の方向に5Gの重力加速度を受けたとすれば、下肢の血圧は450Torrにも達し、脳血流は著しく低下するために視力障害、意識障害を呈する（ブラックアウト）。

低圧系である肺循環はさらに重力の影響度が大きい。West⁴⁾によれば、立位のヒトの肺では、肺尖部と肺底部の血流の比は、およそ0.1対1.3である。

3. 圧力と換気のマカニクス

換気系の諸圧力も、循環器系と同様に、呼吸周期に従った変化をする。しかも、努力性呼出のように、意識的に圧力を変化することもできる。その換気力学を簡単に述べれば、まず基本的には、力学的に直列な関係にある肺と胸郭の圧力バランスで換気機械系が成り立っている。図3⁵⁾は、図2に示したような呼吸系（Prs）全体の圧量曲線を、肺（Pl）と胸壁（Pw）のそれぞれの圧量曲線に分けて示したものである。詳しくは成書に譲るとして、重要な点は、安静呼気位（Prsが縦軸を横切る点）では、肺が内方に収縮しようとする圧力（弾性収縮圧）と胸壁が外方に拡がろうとする圧力の等しい点にあり、最大吸気位（曲線の右端）では内方に縮む圧力が大きく、最大呼気時（左端）では拡がる力が大きいということである。

フローボリューム曲線の記録の場合のような最大努力の呼出は、呼吸筋の最大努力によって駆動圧である胸腔内圧（肺胞内圧）を上昇させることにより行われる。しかし、筋肉の長さや張力の関係から、呼吸筋の収縮力は肺気量によって異なり、図4⁵⁾のような関係を示すことが知られている。図中の実線は呼吸筋力と呼吸器系の弾性収縮圧の和であるが、機能的残気量位でこれと交差する点線は、弾性収縮圧を除いた呼吸筋力を示している。

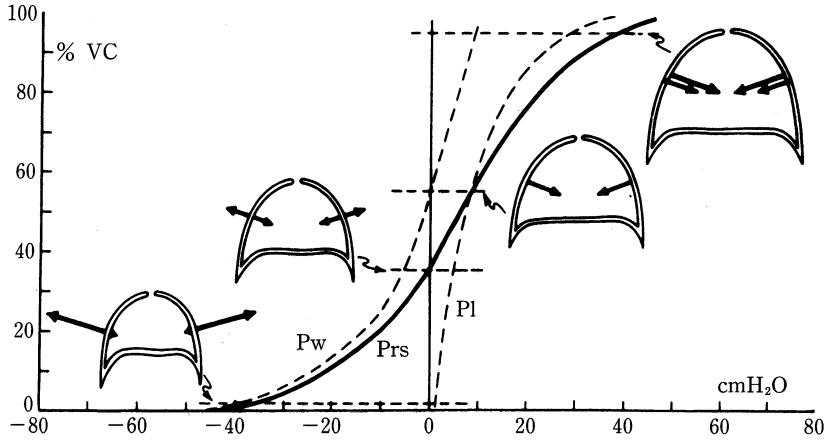


図3 肺 (Pl), 胸壁 (Pw) および呼吸器系 (Prs) の静的圧量曲線
(Agostnoni E & Mead J: 文献5より引用)

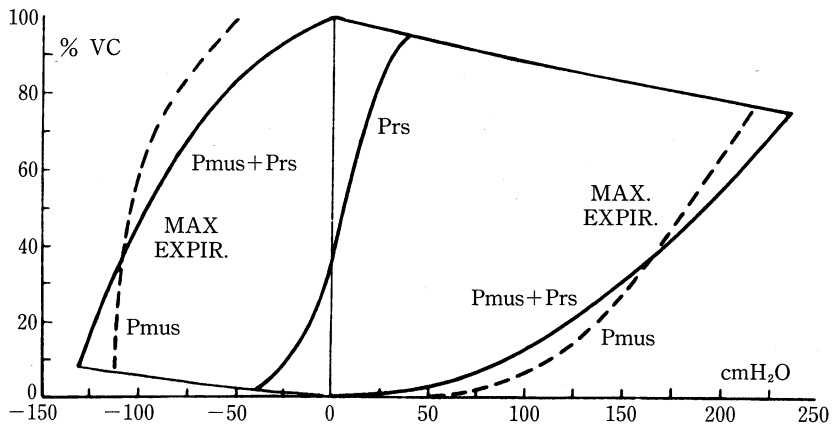


図4 最大吸気および呼気努力時の圧量曲線
(Agostnoni E & Mead J: 文献5より引用)

このように、意識的努力や、気道の閉塞の発生などによって、気道・肺胞系の圧力は大きな変化をする。

4. 圧力平衡の破綻

1) 気圧外傷

周知のように、高気圧タンク内ではいわゆる耳抜きを行うのは、中耳や副鼻腔などの内圧と環境圧との間の圧力平衡を図る訳で、それに失敗すれば、疼痛、出血、鼓膜損傷などを起こす。これが最も

単純な気圧外傷 (barotrauma) の例である。

息こらえ潜水 (breath-hold diving) など で発生する squeeze あるいは burst lung といわれる病態はさらに重大である。すでに述べたように、肺胞系は体内の最大の気腔であるが、気道により外界と交通しているために、環境圧の変動による障害は発生しない。しかし、圧力変化の過程で、息こらえをしたり、何らかの理由で気道が閉塞を起こすと重大な破綻に結びついてしまう。

まず、息こらえ潜水の場合を想定して、胸郭系

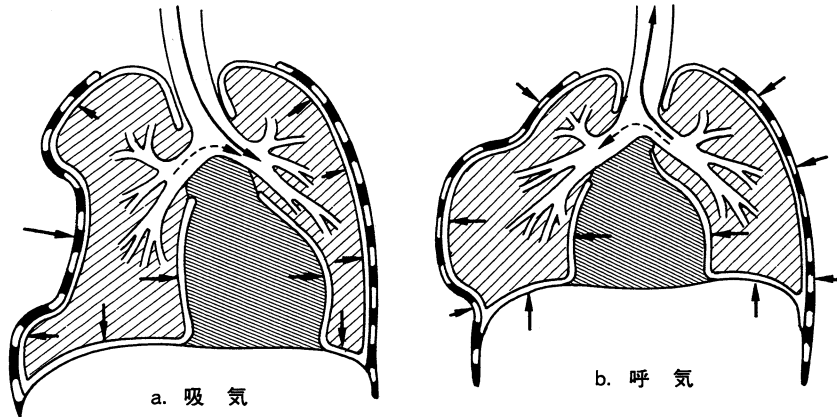


図5 動揺胸郭 (flail chest) での振り様呼吸の発生機序
(太田保世：文献7より引用)

にボイルの法則を当てはめると、大気圧(1気圧)で最大吸気位(TLC)まで吸入してから圧力Pまで潜水したとすれば、圧縮される胸郭の容積は残気量(RV)までで(途中で代謝されるガスは無視して)、 $1 \times \text{TLC} = P \times \text{RV}$ 、という関係が成立する。仮に健康成人のTLCを6l、RVを1.5lとすれば、 $P=4$ となり、30mまでしか潜水できないことになる。その深度を超えて息こらえ潜水をすれば、肺あるいはその他の組織が傷害されて、いわゆるsqueezeを発生することになる。しかし実際には、肺損傷を起こさずに100m以上の息こらえ潜水を行う人間がいる訳で、その理由として、血液が胸郭系に流入してRVを小さくすること⁶⁾(仮に上述の計算で、RV0.5lならば $P=12$ となり、110mまで潜水可能となる)、腹腔臓器の胸腔内シフトなどの理由が挙げられている。

逆に、SCUBA divingでの浮上時に息こらえを行ってしまえば、高い圧力下で呼吸していた肺内ガスが、浮上に伴う減圧で膨張し、環境圧を大きく超えて肺や気道の損傷、破裂(burst lung)を起こす可能性がある。

2) 自然気胸と動揺胸郭

日常診療でしばしば遭遇する圧力破綻の例である。肺のbullaeあるいはblebsが破れて、胸膜腔の圧力が環境圧に等しくなれば、図3からも明らかのように、肺は弾性収縮圧で縮んでしまう。さらに興味深いことは、自然気胸の原因になるbullae

などの気腫性変化は肺尖部に多く、また、やせて身長の高い人が気胸を起こしやすい事実である。これは、すでに述べたように、重力の影響により胸腔内圧に上下の圧勾配がある事実と関係する。ふだん頭部を下にしてさがっているコウモリでは、このような気腫性変化が肺底部に多いという観察も興味深い。

交通外傷などで発生する動揺胸郭(flail chest)の病態を図5⁷⁾に示した。通常、何本かの隣接する肋骨が2ヶ所以上で骨折離断した場合、既述の換気機械系の圧力異常のために機能が低下する。図左の吸気時には、吸気の一部のみが健側に入るが、離断部が陰圧で引き込まれるので、同側のガスは対側に移動する。呼気時には、離断部位が膨らみ、十分に呼出できず、肺内ガスは健側から患側へ移動する。つまり振り子様空気(Pendelluft)を生じ、ガス交換が著しく障害されて危険な状態になる。

おわりに

体内の圧力平衡とその破綻について、主として呼吸との関連で概説した。高気圧酸素治療の適応であるイレウスの場合でも、腸内ガス腔が閉塞されると、局所で新しく産生されるガスと、血流障害のために腸内ガスが吸収されないために、局所の圧力が高まり、さらに病態を悪化させる。幸いなことに、腹腔は加圧により収縮され得る構造であり、高気圧酸素治療によって貯留したガス容積

を縮小でき、それが血流・栄養の改善につながり、血液中の酸素分圧が高く、不活性ガスを含まないことが、局所の酸素加とガス吸収の促進に働く。逆に、高い気圧下では、ガス密度が気圧に比例して上昇するので、換気のメカニクスに影響をもたらす、一定程度以上の圧力下では、運動制限の因子になってしまう。

本稿が、そうした体内の圧力の問題と、高気圧酸素療法とを結びつけて考える上に少しでも役に立てば幸いである。

【参 考 文 献】

- 1) West JB: High altitude. In: The Lung scientific foundations, Crystal RG & West JB (eds), vol 2, NY, Raven Press Ltd, 1991, p.2093-2107
- 2) Piiper J: Physiological equilibria of gas cavities in the body. In: Handbook of Physiology, Sec. 3: Respiration, vol II, Fenn WO & Rahn H (eds), Washington DC, Amer Physiol Soc, 1965, p.1205-1218
- 3) 太田保世: 呼吸機能検査. 東京, 中外医学社, 1982
- 4) West JB: Ventilation/blood flow and gas exchange, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1965
- 5) Agostoni E, Mead J: Statics of the respiratory system. In: Handbook of Physiology, Sec. 3: Respiration, vol 1, Fenn WO & Rahn H (eds), Washington DC, Amer Physiol Soc, 1964, p.387-409
- 6) Schaefer KE, Allison RD, Dougherty JH Jr, et al: Pulmonary and circulatory adjustments determining the limits of depths in breathhold diving. Science 162: 1020-1023, 1968
- 7) 太田保世: 機械的破綻. In: 呼吸, 吉良枝郎, 太田保世編, 東京, 医学書院, 1986, p.290-296