

●講座

圧力環境での換気力学

玉谷 青史*

自然界における圧力環境とは水深10m 毎におよそ1気圧ずつ増加する水中環境を指し、ここでは水圧および浮力が換気運動に大きな影響を及ぼす。ケーソンや高気圧タンクのような人工的な圧力環境においても吸入気体の密度の増加は換気量低下の原因となる。図1では高気圧環境下での換気量を最大換気量、MVV (Maximum Voluntary Ventilation)の指標を用いて比較している。多くの研究者の結果より、およそ30m, 4 ATAの深度でMVVは大気圧下のそれの1/2まで低下する。高気圧環境におけるMVVの低下は肺胞低換気をもたらす体内の二酸化炭素貯溜の原因となり、労働、運動能力に致命的な限界をもたらす。そこで窒素79%、酸素20.9%の空気より密度の低い人工的な呼吸ガスが必要となり、分子量28の窒素の代わりに分子量4のヘリウムガスや超大深度では分子量2の水素を使用することになる。人間の活動に必要なのは酸素の分圧 P_{iO_2} (150~200mmHg)であり、空气中20.9%のガス分画 F_{iO_2} が必要な訳ではない。高気圧環境では P_{iO_2} が150~200mmHgに保たれる限り、 F_{iO_2} は気圧に反比例して小さくなってよい。その結果ヘリウムや水素等のキャリアーガスのガス分画を増加してより密度の低い混合ガスを得ることができる。人工的な呼吸ガスが換気能力に与える効果は呼吸の換気力学的方法により評価される。

呼吸器の構造

1. 気道

呼吸器の入口は鼻孔に始まる。そこでは気体に混ざった大きなゴミが取り除かれ、鼻腔内の甲介と呼ばれる部分では吸入した空気の温度は体温近くまで加温され、また十分な湿度が与えられる。気体は咽頭、喉頭を通り、上部気道に達する。気道は直径1.5~2.0cmの気管に始まる。気管は体の中心部である縦隔を通り、ほぼ第5胸椎の高さで左右の主気管支に分岐する。人の肺では右は上、中、下の3つの肺葉、左は上葉、下葉の2葉から成る。左右の主気管支は肺葉の中で第2分岐、第3分岐と分岐を繰り返す、気管から数えて23回も分岐する。気道の直径も次第に小さくなり、16分岐当たりでは直径は1mm以下となり、気道をパネの力で開口していた軟骨もなくなる。細気管支、呼吸気管支、終末気管支、肺胞気管支となり、や

がて肺胞囊、肺胞へつながる。気管から終末の細気管支にいたるまで、直径と断面積は小さくなっていくが、断面積が小さくなくても気道の数は級数的に増加する(図3)。気道は必ず2つずつ分岐するので23回も分岐した時点では2の23乗、およそ800万個の小さな気道に分岐する。この結果、気道の総断面積は末梢に行くほど大きくなる。空気の流入経路は呼出時には呼気経路となる。

2. 肺と胸郭

気道の最先端に位置する肺胞はいくつかが集まって肺胞囊を形成し、さらに小肺葉となり、区域肺、右では上中下に3つの肺葉となる。左の肺は上下2つの肺葉となる。こうしてできた肺は気道、肺静脈、肺動脈、気管支動脈、リンパ組織を含むが、その他の多くの部分を満たすものは空気である。そこで肺は空気を含むスポンジの様なもので外部から圧力を加えるとその容積は縮小し、気道内部から圧力を加えると膨張する性質、弾性がある。胸郭の内側は胸腔を形成し、肺はその中にある。図2では肺胞と気道、胸腔、胸郭の関係を単純化して示しており、肺胞換気に必要な駆動力P

* 医療法人社団玉栄会東京天使病院

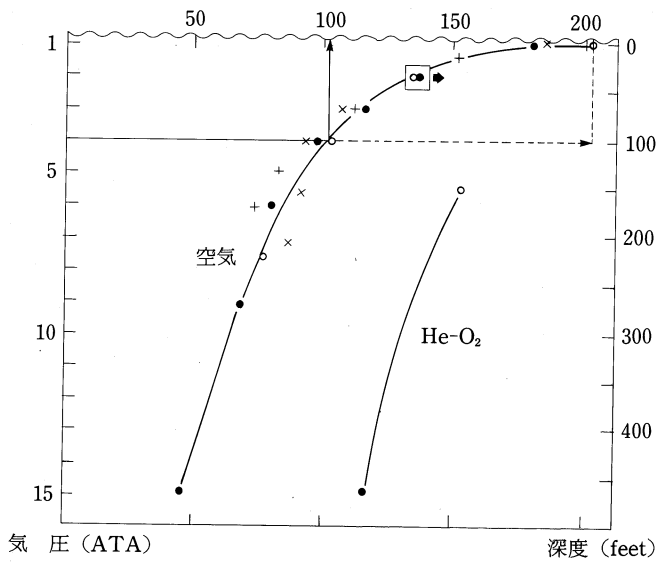


図1 圧力環境における最大換気量MVVの変化

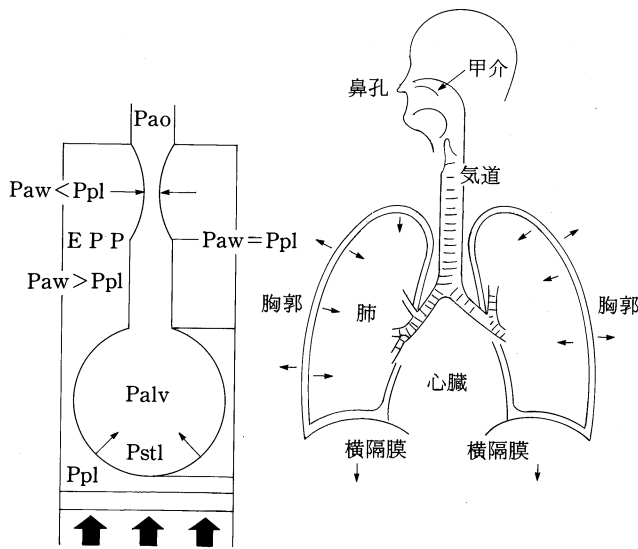


図2

は肺胞の弾性収縮力と胸腔内圧の和で示される。空気を体内に送り込み、肺胞で酸素、二酸化炭素のガスを交換して再び体外へ運び出す一連の換気運動は、フィゴの運動になぞられる。フィゴの換

気を力学的に扱う場合には空気の圧縮、換気時に刻々と変化する気道の形態の影響、フィゴ自体の弾性等の要素が絡むため一層複雑になる。

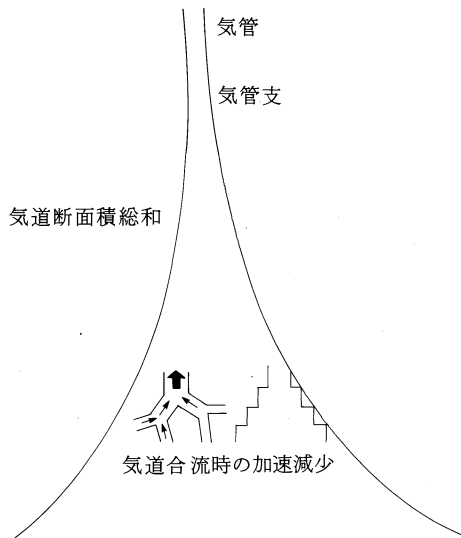


図 3

肺気量と圧量曲線（フイゴの物理特性）

健康人の肺活量の範囲は3Lから6Lに及ぶがこれは最大吸気位と最大呼気位の差を示す気量で肺の全容量はさらに1.5から2L大きい。肺気量を機能に応じて細分化したのが肺気量図である（図4）。肺には弾性があり、最大呼出時においても肺内の空気を完全に排出することはできない。そこに残った気量が残気量である。最大吸気の値は全肺気量とよぶ。全肺気量は肺活量と残気量を加えた値である。安静に換気している時、呼気終末時のレベルを機能的残気量 FRC（Functional Residual Capacity）という。このレベルは拡張しようとする胸郭の力と縮小しようとする肺の弾性収縮力 Pstl が均衡を保った状態であり、口腔内圧と肺胞内圧が等しい点である。この点より最大呼気位まで呼出努力して得られる気量を予備呼気量 ERVとよぶ。また安静換気の吸気位から最大吸気位までの気量を予備吸気量 IRVとよぶ。安静換気の気量を一回換気量 V_T という。鼻腔を閉じて口に圧力計を設置し、おもいきり吸気努力をすると圧は陰圧となる。その値は肺気量の変化によって変動する。およそ水柱で0～150cmH₂Oである（図4A）。また最大呼出努力をした時にもその

圧は肺気量に応じて変化して0～200cmH₂Oに及ぶ（図4B）。全肺活量時には吸気圧は0であり、最大呼出時には呼気圧は0となる。安静換気における胸郭および肺の容量の変化と胸腔内圧の関係は圧の変化と気量の変化を示し、L/cmH₂Oのディメンションとなるので、この値は弾性（コンプライアンス）となる。FRC付近では1cmH₂Oの胸腔内圧の変化に対して肺は100ml変化するので肺胸郭系のコンプライアンスは0.1である。しかし全肺気量に近づくと1cmH₂Oの変化に対する曲線の勾配は小さくなり、気量の変化は少なくなる。コンプライアンスは小さくなった、あるいは肺は伸展しにくくなったと理解できる。物理学では加えた力と物体の移動距離の積が仕事量となる。呼吸の仕事量も圧力と容積の変化量を掛け合わせたものと考えられる。一定の換気量を得るために必要な圧力が大きい時、呼吸の仕事量は増加したと考えられる。

呼吸運動を行うのは呼吸筋で肋間筋と横隔膜がおもな筋肉である。呼吸が苦しい時は肩で呼吸するという位、補助の呼吸筋が使われる。肋間の筋肉は肋骨の外側の筋肉は肋骨を上部に持ち上げ、胸郭を拡大する機能をもち、肋骨の内側の筋肉は肋骨を引き下げて胸郭を縮める役割をする。横隔膜の面積はおよそ300～500cm²あるので横隔膜が1cm上下するだけで胸郭内の容積は300～500cm³変化する。この値は安静時の1回換気量に匹敵する。圧量曲線は個体の肺、胸郭の特性を表わし、環境因子には左右されないで人工的な圧力環境にあっても、肺の圧量曲線への影響はない。

重力と浮力の影響

自然の圧力環境、水圧がかかる環境では水圧と浮力が換気条件、特に圧量曲線上で複雑になる。体の周囲の水圧はそれぞれの場所で体を圧迫するので、体全体にかかる圧力を特定することは不可能である。大気圧下では腹部臓器、腸内内容物は重力により横隔膜を下方に引き下げ胸腔を広げる働きをする。しかし水中では体内臓器の重力は浮力と相殺されるので胸腔容積は縮小する。また大気中では下肢を循環する血液は、重力の影響で下肢に溜まりやすいが、浮力は下肢の血液を胸腔内の大静脈や肺の血管へ送り込む助けとなるので静脈還流が増加し、胸腔容積はその分減少する。肺

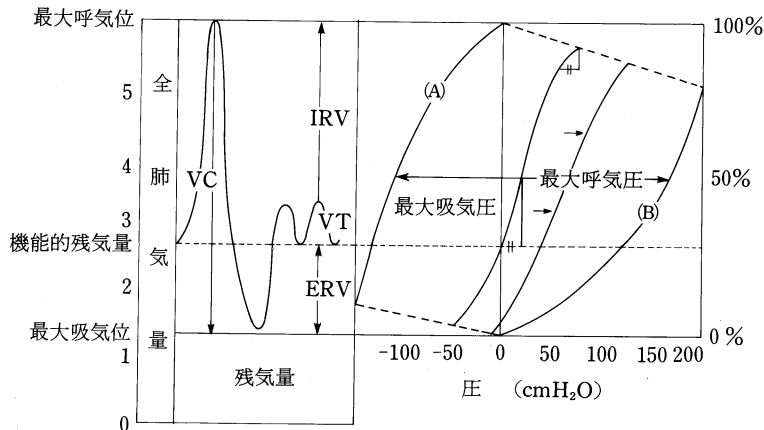


図4 肺気量と圧量曲線

内の空気は水中では浮力を作り肺を拡張する働きをする。水圧の影響は、入浴時やシュノーケル潜水のように水中に体を沈め、頭だけを大気にさらず Headout immersion の場合と、スキューバ潜水のように体全体を水中に沈め、肺内の気圧と体外の水圧がほぼ均等になる状況で変わってくる。Headout immersion の場合には胸郭外部の水圧が胸腔内圧に足されるので圧量曲線は右に移動する(図4)。この結果、吸気時には大気圧下での吸気に必要な圧に水圧を加えた駆動圧が必要になる。また水圧による胸腔容積の減少は肺気量をも縮小させるので、肺のコンプライアンスが低下し、気道口径の縮小がおこり、呼吸抵抗が増加する。スキューバ潜水では肺内に水圧とほぼ同圧の高圧空気が入るので、胸郭の圧迫は無くなる。しかしデマンドバルブの位置が肺より深い時には陽圧呼吸となり、吸気は楽だが呼出時には抵抗がある。またデマンドバルブの位置が肺より浅い時には陰圧呼吸となり、吸気に大きな力が必要となる。

換気運動と呼吸の仕事量

肺に吸入気体が入り出すのは単純に気圧の勾配が変化するからである。吸気の際は体外の気圧より肺内の気圧が低くなり、呼気の場合には逆に体外より肺胞内の気圧が高くならなければならない。肺の組織はゴム風船のように縮む性質をもつので肺の弾性収縮力 (static recoil) P_{stl} とよばれ

る。肺は左右それぞれ胸郭内におさまっている。吸気運動によって胸郭が拡大すると胸腔内は陰圧となる。しかし肺の弾性は肺を縮ませる性質があるので、肺を広げる力は胸腔内の陰圧から肺の弾性を差し引いた力となる。肺の弾性はおよそ $0.2 \text{ L/cmH}_2\text{O}$ であるが年齢とともに大きくなる。肺の弾性が大きいということは肺が伸びっぱなしになるので吸気時にはよいが呼出時には肺内の圧力が高まらず気体が出にくいことになる。また肺の弾性は中に通る気道の形状保持にも役立っており、肺気腫などでは気道の虚脱がおこりやすい。縦軸に肺気量、横軸に胸腔内圧をとるとその関係は力と移動距離となる。換気の駆動力と肺気量の移動距離を掛けた斜線部分が呼吸の仕事量となる。 $10 \text{ cmH}_2\text{O}$ 陰圧で 1 L 肺は拡張するが次の 1 L の肺気量のためにさらに $10 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、計 $20 \text{ cmH}_2\text{O}$ の陰圧が必要である。この時の呼吸仕事量ははじめの 1 L の4倍となっている。一回換気量が大きくなる時には呼吸仕事量の増加を伴う結果となる(図5)。

肺胞換気量

呼吸の仕事量から言えば一回換気量があまり大きくならない方が効率が高いことになる。しかし大切なのは換気量の大きさではなく肺胞換気が有効に行われることである。肺胞換気量を V_A 、一回換気量を V_T 、死腔量を V_D 、呼吸数を f とすると

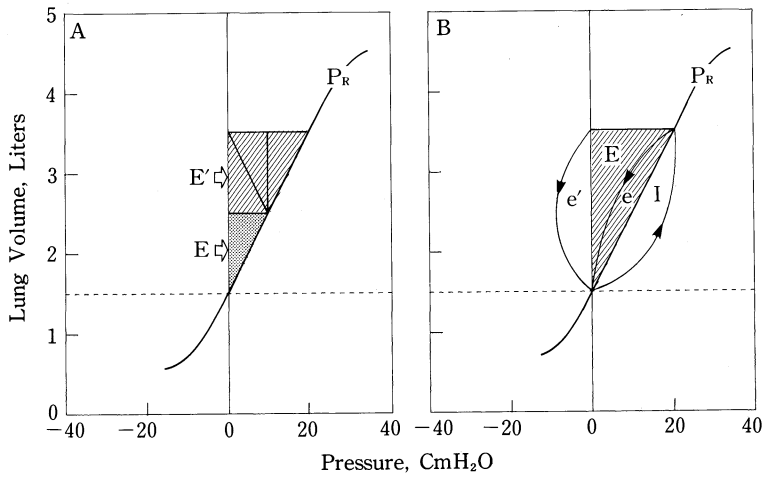


図5 圧量曲線上呼吸の仕事量は力と移動距離、 $P \times V$ で得られる。10cmH₂Oの力PでVは1L移動する。20cmH₂Oでは2L移動するがその仕事量(斜線部分)は先の1Lに比べて4倍になっている。実際には肺の弾性(Elastic)の他に胸郭の弾性と気道抵抗分の呼吸仕事量も加わる。

$$\dot{V}_A = (V_T - V_D) \times f$$

この式から V_T を1000ml, 死腔量 V_D を150ml 呼吸数を10回とすると

$$\dot{V}_A = (1000 - 150) \times 10 = 8500 \text{ml}$$

V_T を500ml, 死腔量を150ml, 呼吸数を20回とすると

$$\dot{V}_A = (500 - 150) \times 20 = 7000 \text{ml}$$

すなわち1000ml×10=10L, あるいは500ml×20=10Lと同じ換気量であっても深くゆっくりした換気の方が効率の良い肺胞換気量 \dot{V}_A が得られることになる。

換気調節

呼吸運動は呼吸中枢より吸気の指令と換気の指令信号が交互に組み合わさり行われるが換気量を決定するのは呼吸の深さ (V_T) と呼吸数である。体が要求する酸素の需要の増大は二酸化炭素の産生の増加につながる。体内の二酸化炭素は $\text{pH} = 6.1 + \text{HCO}_3^- / \alpha \times \text{PCO}_2$ ($\alpha = \text{CO}_2$ の容解度係数) の関係から体液のpHを低下させ酸性の方向へもたすので体の恒常性を保つためpHを生理学的レベルに調節するように反応する。血液中の酸素、二酸化炭素の量は頸動脈にある末梢化学受容体と

延髄腹側にある中枢化学受容体で感じ取られ、この量を一定に保つよう換気量を調整する。血液内の酸素、二酸化炭素の分圧の正常な範囲はそれぞれ85~100mmHg, 40mmHgである。酸素の受容に対応するための換気量増大は酸素分圧が40mmHg以下にならなければ顕著に現れない。これに比べ二酸化炭素の増加には敏感に反応するので二酸化炭素は最も強い呼吸刺激材として知られる。

動脈血の PaCO_2 と組織で産生された二酸化炭素、および肺胞換気量との間には

$$\text{PaCO}_2 = 863 \times \text{CO}_2 (\text{L}/\text{min STPD}) / \dot{V}_A (\text{L}/\text{min BTPS})$$

の関係式がある。ここで863の値は体内の温度、湿度、気圧などの環境因子と実際にガスを測定できる環境因子等を調整する係数である。肺胞とそれを取りまく肺の毛細血管の間では二酸化炭素は容易に拡散するので動脈血 PaCO_2 は肺胞 PaCO_2 とほぼ同じとなる。運動により体内で産生された CO_2 の増加に対して肺胞換気量が増加すると PaCO_2 は一定のレベルに保たれ、先の式よりpHが安定し、体液の恒常性が保たれる。換気量の増加は一回換気量の増加、すなわち呼吸の深さと呼吸

回数が増加でまかなわれる。普通は換気量が軽度増加する場合には一回換気量が増加し、やがてその量がVCのおよそ1/2になると呼吸数の増加を伴うようになる。理論的には肺活量1ばいの吸入、呼出ができるが肺の圧-量曲線から大きな V_T は呼吸仕事量が大きくなるので換気の深さと数の関係は個人個人の体型により、1番仕事量の少ない、楽な組み合わせに自動調整されると考えられる(J. Mead)。

呼吸の流速

物理的な速度は距離/時間の関係で表わされるが換気力学のそれはVolume flow (cm^3/sec , またはL/sec)を使うことが多い。すなわち気道の断面積 (cm^2) と速度 (cm/sec) の積がvolume flowで、断面積を通過する気体の速度は $\text{cm}/\text{時間}$ で単位は距離/時間で同じ結果となる。安静換気時には200ml/秒程度のVolume Flowで気道の口径断面積が 4 cm^2 とすると50cm/秒の速度となる。努力呼出時には10L/秒以上にもなり、大きな咳をする時には時速100Km以上の速度となる。

気道抵抗

物体には弾性、粘性、慣性という3つの物理的特性がある。換気力学では3つの特性を代表する指標としてcompliance, resistance, inertanceを用いる。換気力学での変動因子は圧P, 気量V, 気速 \dot{V} であるが、気速 \dot{V} は気量Vを時間で微分したもので、 \dot{V} をさらに時間で微分すると加速度 \ddot{V} となる。

弾性を代表する指標はcomplianceであり、

$$\text{compliance (C)} = V/P_{\text{st}} \text{ (L/cmH}_2\text{O)}$$

粘性に対応する指標は抵抗, resistance (R)であり、

$$\text{resistance (R)} = P_{\text{res}}/\dot{V} \text{ (cmH}_2\text{O/L/sec)}$$

慣性ではinertance (L)で代表され

$$\text{inertance (L)} = P_{\text{in}}/\ddot{V} \text{ (cmH}_2\text{O/L/sec}^2)$$

となる。換気の際抵抗となるのは気道を通れる気体の粘性抵抗だけでなく、肺組織や胸郭の摩擦抵抗などの粘性抵抗もある。肺、胸郭にはそれぞれ弾性と慣性があり、これらも気流の妨げになる。肺、気道、胸郭での3つの抵抗要素が複雑に絡み合せて、換気の抵抗となっており、これを統合して、呼吸のインピーダンス impedance とよぶ。気

道の粘性抵抗に関しては気道の半径を r , 長さ l の管に気流があり、管の両端の圧差を P , 気流速度を \dot{V} , 気体の粘性に関する係数を μ とするとPoiseuilleの数式より

$$P = \frac{8\mu l}{\pi r^4} \times \dot{V}$$

ここでは管の長さが長い程、管の半径が小さいほど気体が流れにくくなる。そして P は管の半径 r の4乗に反比例するのでもし半径が2分の1になれば抵抗は16倍にも増加する。気道の口径は気道抵抗において重要な因子である。

呼吸のインピーダンスに関して大気圧環境と圧力環境での相違は呼吸ガスの密度が増加するために気道の粘性抵抗が増加することである。この気道抵抗に打ち勝つためにより大きな駆動圧が必要となり、呼吸の仕事量が増加する。また運動による換気量の増大時には気流速度の限界も顕著となる。物理学的には電圧 E , 電流 I と電気抵抗 R の関係は $E = I \times R$ の一次式で表わされる。

電気抵抗では電気を通り道である電線のもつ固有の抵抗は均一で、また電流の流れも比較的一定であるので E と I の関係は直線的である。しかし呼吸の換気力学の分野における気道抵抗を考えると、気道は肺胞から口腔に至るまでその口径および形状は続々と変化する。また気道のなかの気体は駆動圧の変化に応じて気道内の気圧が陽圧、陰圧と変化する度にその容積が変化する。気道の口径が変化する毎に、また気道が分岐する毎に気流は乱流となったり気道の合流時には気体が一時的に圧縮され加速される(convective acceleration)。そして電流や液体と異なり、空気は圧によって圧縮される性質があるので空気の流れは電気抵抗と比較して複雑な要素をもっている。気道抵抗は気道内で刻々変化する圧の変化を ΔP , 気流速度的変化を $\Delta \dot{V}$ とすると今述べた理由で単純に

$$\Delta P = \Delta \dot{V}_4 \times R$$

とはならない。

ΔP は肺胞内圧と口腔内圧の圧差であり、呼吸器などの器具がない場合には口腔内圧は通常大気圧と同じである。肺胞内圧の変化が呼吸の駆動圧となる。Rohrerは駆動圧と気流の関係を連続する2つの数式からなるとしては古典的なRohrerの数式で近似した。

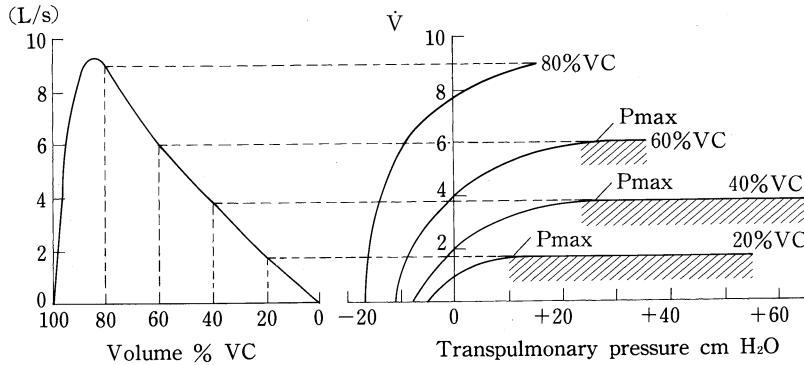


図6 IVPF (Iso Volume Pressure Flow) 曲線

努力呼出時における換気力学の3要素, V (Volume), P (Pressure), \dot{V} (Flow) の相互関係を観察する方法である。気道内圧 (P_{aw}) が駆動圧となり、それに対応する気流速度は \dot{V} である。早い呼出から遅い呼出まで呼出運動を何回も繰り返して測定する。VC (Vital Capacity, 肺活量) の80%, 60%, 40%, 20%の気量時 (Iso Volume, 等量) を例にしてそれぞれの P_{aw} と \dot{V} の関係を圧, 気速の図面上に描写すると IVPF 曲線が得られる。 P_{aw} の増加とともに \dot{V} も増加する (effort dependent)。しかし一定以上の P_{aw} では \dot{V} は限界となり、時には P_{aw} の上昇が \dot{V} の低下を引き起こす (斜線部分)。この結果各等量で effort independent な \dot{V}_{max} が決定されるので、強制呼出時の VC と \dot{V}_{max} の関係から MEF R (Maximum Expiratory Flow Rate) 曲線が得られる。

$$\Delta P = k_1 \times \dot{V} + k_2 \times \dot{V}^2$$

ここで k_1 は層流状態の気流速度に一次式で比例し、乱流状態では \dot{V}^2 に比例する。

気流はある状態では層流でその他の状態では乱流となる。以下の計算式で得られる Reynolds 数が2000を越えると乱流になる。

$$\text{Reynolds 数} = \frac{\text{気流速度} \times \text{口径} \times \text{気体密度}}{\text{気体の粘性}}$$

ここで気流速度 \dot{V} は (cm/sec), 口径 (cm), 密度を (g/cm³), 気体の粘性は poise。気体が細い管の中を通過する時には通りにくさ、つまり抵抗が生ずる。管の口径が小さいほど、気流の速度が早いほど抵抗が大きくなることは容易に予想される。

常数の k_1 と k_2 は気道の口径, 長さ, 気道内部のなめらかさなどによって決まるが気道自体に弾力性がある。呼吸運動による胸腔内圧に変化を受けて吸気時には気道の口径は拡大し、呼気時には縮小するので気道抵抗値は刻々と変化する。

IVPF (等量圧気速) 曲線

最大吸気位から最大呼気位まで呼出を行う際、

最小から最大までさまざまな呼気努力をした時の胸腔内圧を横軸に、気流速度を縦軸にとり同じ肺気量位での関係をプロットすると IVPF (Iso Volume Pressure Flow) 曲線が得られる (図6)。VC の80% から20% までの等量で気流速度と P_{aw} の関係が見られるがその特徴は

1. 低肺気量ではある程度の P_{aw} 以上では気流速度がプラトーとなり、それ以上の駆動圧は気流速度の上昇に結びつかない。すなわち最大気流速度 \dot{V}_{max} が存在する。
2. \dot{V}_{max} は肺気量が減少すると小さくなる。
3. \dot{V}_{max} に到達する駆動圧は肺気量が小さいほど小さい。
4. 高肺気量では気流速度のプラトーが存在せず、 \dot{V}_{max} は呼出努力依存 (effort dependent) となる。
5. \dot{V}_{max} 以上では駆動圧の増加により、呼気速度は \dot{V}_{max} 以下の低値を示すことがある。

気道抵抗が一定であれば呼気速度が呼吸筋の収縮力に応じて増加するはずである。胸郭, 胸腔, 肺, 気道の関係を単純に図示すると図2のように

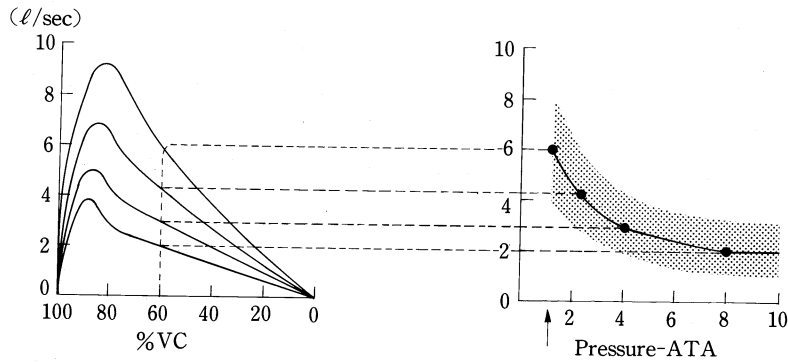


図7 8 ATA, 4 ATA, 2 ATA, 1.5ATA の各高圧環境下, 空気呼吸時のMEFR曲線の比較した図である。VCが60%の点(点線部分)ではVmaxが環境圧力の増加とともに減少するのが明確となる。

なる。肺の中の空気を呼出するときの駆動圧は肺胞内圧と口腔内圧の圧差である。口腔内圧は大気圧と同じなのでその値はゼロである。実際の駆動圧は肺胞内圧の値となる。肺胞内圧Palvは肺の弾性収縮力と肺胞内圧の合計である。肺の弾性収縮力は肺の容量に応じて変化する。肺の圧量曲線から明らかのように肺の容量が最大に近づいた時には肺の収縮力(Pstl)が大きくなる。すなわち肺容量が大きいときは肺の弾性収縮力Pstlが大きくなり、従ってPalvも大きくなるので気速も大きくなる。呼出時の呼吸筋の働きは胸腔内圧を増加させ、結果としてPalvを増加させる。図2で気道内の圧を注目すると肺胞から口腔にいたるまで圧較差が存在する。その途中で胸腔内圧が気道内圧と同じになる場所が存在するはずである。この点をEPP(Equal Pressure Point)とする。肺胞からEPPまでの間をupperstreamとよぶ。この間気道内の駆動圧はPpl + Pstlであり、気道外部には均等にPplがかかっている(図2)。その結果気道の内外の圧差Transmural PressureはPstlがUpperstreamでの駆動圧となる。EPPから口腔までの間では胸腔内圧が気道内圧より大きくなる。呼出時に努力をするとPplの増加はPalvの増加となり、駆動圧を上昇させるが、同時に気道周囲の圧Pplの増加はdownstreamでは気道を圧迫させる結果となる。この理由で一定以上の呼気努力は駆動圧を増加させるのと同時に気道を圧迫して気道抵抗を増加させ、気速に限界をもたらす結果となる。Pstlは肺気量に応じて決

定され、一定の限界を越えた呼気努力は気速の増加につながらないので最大努力呼気曲線MEFR(Maximum Expiratory Flow Rate)ができあがる。呼吸で使われるガスの粘性はほとんど同じで大気圧下での呼吸抵抗にはあまり関与しない。この指標を用いて圧力環境でのMEFRを比較すると同じ肺気量位での最大呼気速度は気圧の増加に反して低下することが明らかになる(図7)。

まとめ

圧力環境における換気力学の変化は呼吸ガス(空気)密度が増加するため呼吸速度が制限され、大気圧下と比べて呼吸仕事量が増加すること。そして特に運動により換気量が増加する時には呼吸仕事量が大きくなり、エネルギー消費量が増加する。圧力環境での効率的な換気パターンについては深くゆっくりした換気が最適であるが、その場合にも通常では V_T は V/P の大きな所を逸脱しない範囲、すなわちVCの1/2あたりが呼吸仕事量の面で効率が良い。熟練したダイバーではVCの1/2以上の大きな V_T と10回/分以下の呼吸数で有効な換気パターンを持つ人がいるがこれは訓練次第ということなのだろう。

[参考文献]

- 1) Lanphier E.H. Pulmonary Function. in Benett & Elliot:eds. The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work, Baillies & Tindall, 1975
- 2) Hyatt R.E., Schilder D.P., and Fry D.L.

- Relationship between maximum expiratory flow and degree of lung inflation. J. Appl. Physiol. 13: 331-336, 1958
- 3) Bouhuys A., Jonson B. Alveolar pressure: airflow rate and lung inflation in man. J. Appl. Physiol. 22: 1086-1100, 1967
- 4) 富田友幸: CとR. 呼吸と循環. 16: 133-139, 1972
- 5) 玉谷青史: 潜水と肺機能. 呼吸. 6: 161-167, 1987