

●講座

潜水の生理

梨本一郎*

潜水するヒトは潜水艇に乗組んだり、耐圧潜水服を着用しないかぎり、水深10mあたり約1気圧もしくは1 kg/cm²の水圧を受ける。このように高い圧力環境に暴露されることは、圧気潜函工事などで高気圧作業に従事する人々や、高気圧酸素治療を受ける患者およびその介護のため高圧タンク内に入る医師、看護婦などの医療従事者と同様であり、圧力の種々の直接、間接作用を受ける。

しかしながら、潜水者（ダイバー）はその他にも各種の苛酷な環境条件に直面する。呼吸ガスの欠如、冷却力の大きい水、音や光によるコミュニケーションの困難さ、無重量状態などが人体に危害を及ぼすおそれも少なくない。

以下潜水の人体に及ぼす影響を生理学的側面より考えてみたい。

潜水と呼吸

呼吸ガスとしての空気が存在しない水中では、ヒトは肺呼吸ができないので、そのままでは短時間内に窒息死する。したがって潜水を実現するには、何らかの方法で呼吸手段を確保しなければならない。

ごく短時間であれば息こらえを利用することができるが、数分をこえ長時間にわたる潜水では、潜水器とよばれる水中呼吸装置を使用する。

1. 素潜り（息こらえ潜水, breath-hold diving）

健康体であればヒトは数十秒間自発的に息を止めていることができる。この現象をうまく利用したのが素潜りで、数千年前もの昔より海産物の採取などに広く利用されてきた。わが国の海女はとくに有名である。

息を止めていると次第に苦しくなり、やがて我慢できなくなる。息こらえがだめになる時点をブレイキングポイント（breaking point, B.P.）とよんでいる。B.P.に関与する因子として動脈血 O₂ 分圧および CO₂ 分圧、それに肺の動きの有無など

があげられている。

B.P.を延長させ素潜りの時間を長びかせるには、潜水直前にハイパーベンチレーション（過換気）をくり返すことが有効である。これは過換気により肺胞および血中の CO₂ を洗い出し、その分圧を低下させるからである。しかしながら潜水が長くなると体内の O₂ 消費のため水面に戻る過程でハイポキシア（hypoxia）状態となり、体内の CO₂ 蓄積と相まって危険な状況となるおそれがある。

2. 器械潜水

大深度潜水や長期間の飽和潜水などの特殊な例を除き、通常の潜水では潜水器とよばれる空気を供給する水中呼吸装置が用いられる。この場合、岸壁あるいは船上の空気供給源よりホースで圧縮空気を潜水者（ダイバー）に送る方式（ホース式もしくは他給気式）と、ダイバー自身が携行する空気ボンベからデアンドレギュレータを介して空気の供給をうける方式（自給式もしくはスクーバ式）とがある。作業時間や行動の面からそれぞれ一長一短があるが、息こらえ潜水と比較すれば、水中活動範囲は深度、時間ともに著しく拡大される。

一方、呼吸生理面からみれば地上では認められない種々の問題に直面する。すなわち空気の密度

*埼玉医科大学衛生学教室

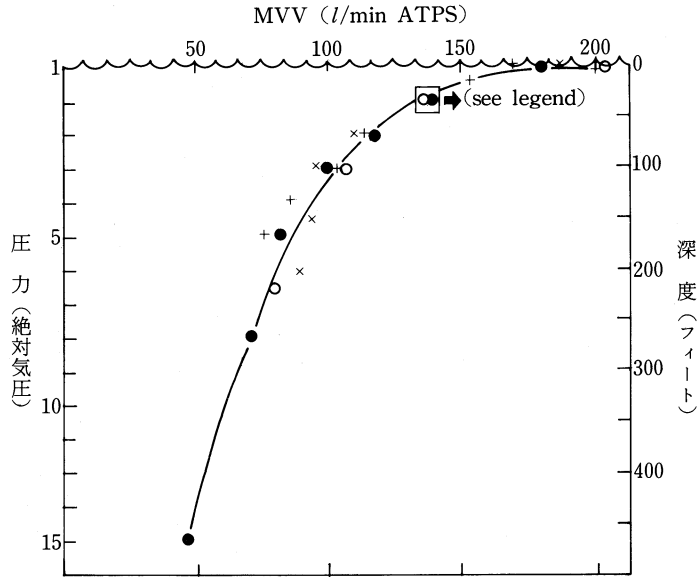


図1 各種空気潜水深度における最大換気量 (MVV)
(Lanphier, 1982)

増加, 圧呼吸, 送気(量), 器具の呼吸死腔や呼吸抵抗などである。

1) 空気密度増加

ダイバーが呼吸する空気密度は, 同一温度では絶対圧力に比例する。したがって潜水深度が増大するのに伴い空気密度は増大し, 気道抵抗を増加させる。このことは理論的にも実験的にも証明されている。図1は潜水深度と最大換気量 (MVV) の関係を示したものである。

深度増加に伴う肺換気予備能力の低下は労作能の減少を招く。また潜水器の弁や呼吸管の抵抗の増加はこうした現象をさらに促進させる。その対策として深い緩徐な呼吸は気流抵抗を減少させるとともに, 呼吸死腔を相対的に減少させる効果がある。

また窒素に比べ分子量が1/7の軽いヘリウムを用いたヘリウム・酸素(ヘリオクス)やヘリウム・窒素・酸素(トライミクス)などの混合ガスは, 空気よりも気流抵抗がかなり軽減される。これらのガスは深海潜水において空気使用時に発現する窒素酔いも回避できるので, 水深50mをこえるような潜水では好んで用いられる(混合ガス潜水の

項参照)。

2) 圧呼吸

肺の換気運動は肺と胸廓の互いに逆方向の弾性のバランス点を中心に行われている。地上ではこの点は肺活量の約40%のレベルに相当する。この付近は圧量曲線の傾斜が急であり, 単位圧力当り大きな肺容積変化が得られる。いいかえれば, わずかな力で大きな換気を行うことができる。

一方スクーバ潜水の場合, 水中ではデマンドレギュレータや呼吸囊などの空気源と肺の位置の関係などから, 水位差に相当するプラスあるいはマイナスの圧差を生じるので, 肺胸廓弾性のバランス点が大きく移動する。その結果圧量曲線の傾斜は緩やかとなり, 換気の効率が低下するばかりでなく, 過大な努力が必要となる。これを回避するため, 潜水中のダイバーの姿勢を考慮し, デマンドレギュレータや呼吸囊が肺中心にできるだけ近い位置をとるような工夫がなされている。

3) 送気量

ダイバーの消費する O_2 を補給し排泄する CO_2 を除去するには, 絶えず新鮮な空気の供給が必要である。送気量の不足は O_2 不足と CO_2 蓄積を招

く。但し潜水時には深度とともに呼吸する空気圧が上昇し、吸気 O_2 分圧が高くなるので、ハイポキシアのリスクは少ない。したがって送気量の決定には CO_2 を考慮し次式が用いられる。

$$V = \frac{D}{H-A}$$

ここで V は潜水深度での送気量 (l/min)、 D はダイバーの CO_2 排泄量 ($l/minSTPD$)、 H は潜水器内の CO_2 分圧 (ATA)、 A は送気中の CO_2 分圧 (ATA) である。

この式は送気が連続流のホース式潜水ばかりでなく、送気が間歇的となるデマンドレギュレータ使用のスクーバ潜水やフーカ潜水にも適用可能である。また高圧タンクの適切な換気量の計算にも応用できる。

4) 器具の呼吸死腔

ヒトは固有の呼吸死腔をもっているが、潜水器を使用するとその呼吸死腔がさらに加わり、有効肺胞換気量の減少に拍車がかかる。その結果肺胞気 CO_2 分圧は上昇し、甚だしい場合には CO_2 過剰から CO_2 中毒症候をひき起こすおそれがある。器具の呼吸死腔を減少させるため、再呼吸を最小限にするような構造と機能をもたせる必要がある。

5) 器具の呼吸抵抗

とくにスクーバ潜水では弁や呼吸管などの呼吸抵抗がダイバー固有の気道抵抗に加わる。これらは肺の換気仕事を増大させ、その予備能力を低下させる。したがってデマンドレギュレータや呼吸管の抵抗が可及的に少なくなるような機構が必要である。

過度の呼吸抵抗は労作能の減少、呼吸パターンの変化、分時換気量の減少、ガス交換の阻害、循環障害、肺損傷などを招く。

3. 混合ガス潜水

地上でヒトはいつまたどこでも空気を呼吸しているが、水中でもダイバーは空気の供給をうけて潜水するのが常態である。しかしながら潜水深度が40~50mをこえるような深い潜水では、窒素分圧の上昇により窒素酔いをひき起こすようになる。これを回避するため高分圧でも麻酔作用のないヘリウムを含む、ヘリウム・酸素（ヘリオクス）やヘリウム・窒素・酸素（トライミクス）などの混合ガスを用いる。

一方20~50mの潜水深度範囲では、減圧症（潜

水病）罹患リスクを低下させながら作業時間の延長や減圧（浮上）時間の短縮が可能となる、空気より酸素濃度の高い窒素・酸素混合ガス（ナイトロクス）の使用も近年盛んになってきた。

いずれの場合でも酸素中毒を防ぐため、潜水深度と在底時間に応じた酸素分圧の許容限界の範囲内の厳守が必要である。

圧力と人体

ヒトは通常1気圧(1ATA)前後のいわゆる常圧環境下で生活している。しかしながら潜水するとさらに水圧が加わる。水深と水圧の関係は次の通りである。

$$\begin{aligned} \text{海水10mの水圧} &= 1 \text{ 気圧} = 1.033 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 760 \text{ mm Hg} = 1.013 \text{ bar} = 101.325 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\text{淡水10mの水圧} = 0.968 \text{ 気圧} = 1 \text{ kg/cm}^2$$

しかしながら実際的な見地からは水深10m当り1気圧もしくは1 kg/cm^2 の圧力が加わると見なしてよい。

ところで潜水は通常水面より潜降し在底した後再び水面に浮上するという経過をとる。この間人体は潜降、在底に伴い加圧され、また浮上に伴い減圧される。したがって、それぞれの作用を考慮する必要がある。

1. 加圧の作用

加圧に際し人体は圧力の直接作用と、圧力上昇に伴う空気の密度増加や成分ガス分圧上昇による間接作用をうける。

1) 加圧の直接作用

圧力が体表に加わると軟組織や体液に伝達し新しい圧力平衡が生じる。この際圧力が均等に分布すれば組織の傷害を起こさない。ただし数十気圧から数百気圧という超高压下では組織の変性や酵素の抑制作用がみられるようになる。

一方体内で圧力差を生じると、わずかに50mm Hg程度でも組織の変形、うっけつ、むくみ、疼痛などをひき起こすことが知られている。このような現象は気圧傷害 (barotrauma) とよばれるが、とくに加圧時に生ずるものをスクイーズ (squeeze, 締め付け傷害) と称している。

スクイーズを生じやすい場所は中耳(鼓室)、副耳腔(洞)、歯などで、いずれも体内の空間(腔)が外界に通じていない状態で加圧され、しかも腔の体積が変化せず圧力差を生じるためである。

表1 高圧の作用と健康障害

物理作用	病理作用	障 害
1)加 圧		
(1)直接作用		
a. 均等加圧	—————	
b. 不均等加圧	組織の変形, 圧迫	きわめて高圧のとき以外はみられない 締め付け障害 (squeeze)
(2)間接作用		
a. 呼吸ガスの密度増加	気道抵抗の増大	肺換気不全
b. 成分気体分圧上昇		
i) 酸素 (O ₂)	酸素の毒性	酸素中毒
ii) 窒素 (N ₂)	麻酔作用	窒素酔
iii) 炭酸ガス (CO ₂)	炭酸ガス過剰	炭酸ガス蓄積
iv) ヘリウム (He)	浸透圧差による膜透過性の変化など	高圧神経症候群
2)減 圧		
(1)直接作用		
a. 均等減圧	—————	
b. 不均等減圧	肺の膨張	肺破裂, 空気塞栓症
(2)間接作用		
気体溶解度減少	体内気泡の形成	減圧症(潜水病, 潜函病), 無菌性骨壊死

耳のスクイーズによる鼓膜損傷を防ぐには潜降時嚙下運動や鼻をつまみ強いかむ動作（バルサルバ法）を行い、耳管（欧氏管）を開通させ鼓膜内外の圧平衡をはかればよい。これを「耳抜き」と呼んでいる。

2) 加圧の間接作用

加圧による空気密度の増加が気道抵抗を増大させ、肺換気能力の低下から労作能の減少を招くことについてはすでに述べた。

ところで空気の成分ガスのうち O₂ の分圧上昇がある限度をこえると人体に有害な作用を生じ、中枢神経型もしくは肺型の酸素中毒をひき起こす。その出現には吸気 O₂ 分圧と暴露時間が大きく関与する。すなわち著しく高い O₂ 分圧では比較的短時間内に中枢神経型 O₂ 中毒を生じる。一方それほど高くない O₂ 分圧での長時間暴露では肺型 O₂ 中毒を生じる。また個体差、日差のほか、暑さ、寒さ、気中、水中などの環境因子も影響する。最近では酸素暴露の累積効果によるリスクも論じられている。

これに対して空気の大半（約78%）を占める N₂ は、1 ATA 環境では人体に何の影響も認められないが、水深30m（4 ATA）をこえると、N₂ 分圧

上昇による麻酔作用が出現するようになる。ダイバーはアルコール飲料で酔ったような状態になるので N₂ 酔いとよばれている。N₂ 酔いによる二次的な潜水事故を防ぐため、深海潜水では空気の代わりに麻酔作用の殆どないヘリウムを含む混合ガスの使用が不可欠となる（混合ガス潜水の項参照）。

なお N₂ 分圧の上昇は肺と循環血液を介して体内外の分圧が平衡するまで組織への N₂ 吸収と溶解を継続させる。

2. 減圧の作用

1) 減圧の直接作用

水中を浮上し人体をとりまく水圧が減少すると、それが体内に伝達する。その際人体各部で圧力の平衡が保たれていれば問題はない。もし圧力差を生じ、それが大きくなると組織に傷害を生じる。しかしながら耳、鼻、歯などの部分でこうした逆スクイーズを起こすことは稀である。というのも加圧（潜降）時にすでにスクイーズを生じ潜水を中止することが多いからである。

ただし注意しなければならないのは肺の破裂である。素潜りの場合を除き、息を止めたまま浮上すれば肺内空気は膨張する。肺の最大吸気レベルをこえ、なおも減圧（浮上）を続ければ肺は過膨

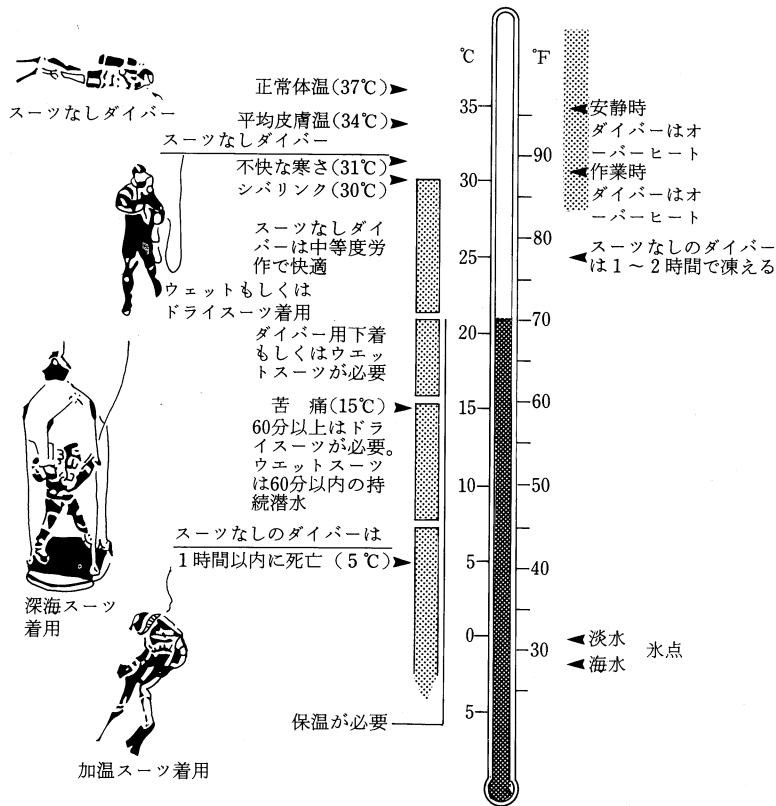


図2 水温の影響と対策 (米海軍潜水マニュアル1985)

張状態となり、やがて肺の損傷が起こる。この時破れた肺毛細管内に肺泡より空気が侵入すると、動脈側へ送られ、ガス塞栓となる (arterial gas embolism, AGE)。また肺の損傷に伴い気胸や縦隔洞気腫などを併発することもある。水深3m程度から水面への浮上によって発生した例もみられており、急浮上は禁物である。

2) 減圧の間接作用

減圧の間接作用は加圧の場合と同様、空気の性状変化によるものである。しかしながら正常な方向へ向かうので、ヒトにとってはむしろ望ましい事態といえる。唯一の例外は減圧による体内溶解窒素の排泄である。浮上(減圧)が急速かつ過大であると、体内よりのN₂排泄が追従できず、組織溶存N₂は過飽和状態となり、遂には気泡を形成する。この気泡が組織を圧迫したり、血管内では

血流を阻害し、減圧症の原因となる。こうした気泡の単純な機械的作用ばかりでなく、血液・気泡相互作用による血管内凝固現象や血液濃縮、さらに局所ホルモンの放出などの二次的現象が減圧症の病態生理に関与することも明らかにされている。減圧症は作業に因み、潜函病、潜水病ともよばれている。

減圧症の予防は減圧によって体内に気泡をつくらないうよう、潜水深度や在底時間に応じて作成された適切な減圧スケジュールを守ることである。また減圧症の治療は酸素を併用する再圧が有効である。

なお圧力の物理作用、生(病)理作用、それによってもたらされる健康障害をリストにまとめたのが表1である。

水温と人体

1. 体温の調節

人体は環境温度が変化しても、体温を一定（約37℃）に維持する仕組みをもっている。この体温調節は、代謝の結果生じる熱（産熱）とその放散（放熱）のバランスによって行われている。ところで産熱は代謝という化学的プロセスによるのに対し、放熱は伝導、対流、輻射という物理的プロセスによる。さらに空気中では高温になると、体表よりの水分の蒸発による冷却も大きな役割を果

たすが、水中ではこうした現象はみられない。

2. 水温の人体に及ぼす影響

水は空気と比べ約25倍の熱伝導度を有し、また約1,000倍の熱容量を有している。このことは水温が低い場合、空気環境に比べ人体が冷却されやすく、その活動が鈍るばかりでなく、パニック状態をひき起こしたり、凍死するおそれさえあることを意味する。一般に水温が20℃以下では保温のためウェットスーツやドライスーツなど潜水服の着用が必要である。また水温が著しく低い場合や深海では加温潜水服も用いられる（図2参照）。