水中生理学 その I

他谷 康

海洋科学技術センター潜水技術部

Underwater Physiology (Part- I)

Yasushi TAYA

*Undersea Science and Technology Department, Japan Marine Science and Technology Center,
Natsushima-cho, Yokosuka-shi, 237 Japan*

はじめに

1916年の初版以後、潜水に関するバイブルとして、数多くのダイバーにその情報を提供してきた米国海軍ダイビング・マニュアルも時代の推移と科学技術の発展により、その内容も充実されて今日に到っている。特に潜水の技術は、2000年以上の歴史を持つ海女(海士)に代表される素潜り(息こらえ潜水: breath-hold Diving)や他給気潜水及び自給気潜水における潜水呼吸機器を用いた潜水、そして近年の潜水技術において最も目ざましい発展を遂げた飽和潜水(Saturation Diving)へと開発されてきた。この事は潜水深度の増加はもちろん、空気潜水からヘリウム酸素に代表される混合ガス潜水といった新しい潜水技術への開発でもあった。このような背景にあって本マニュアル(U.S. Navy Diving Manual: NAVSEA 0994-LP-001-9010)は、1975年に内容、体裁ともに一新され、米国海軍の過去、現在、未来のダイバーに捧げられたものである。

筆者は、本誌掲載の機会を得て、本マニュアルの「第3章 水中生理学」の全文を紹介し、今日の米国における水中生理学の考え方を提示してみたいと思う。

なお、本章は、10節に分かれており、本誌では先ず、身体の構造、身体組織の相互依存、及び循環器系について述べ、次号では呼吸器系及び体温と体熱喪失について、さらに次号において圧力変化(潜水及び浮上)に伴う病気について紹介し、本章の全文を掲載する予定である。

第3章 水中生理学

生理学は、生きている生体の機能とその生命維持に関する機序を研究する学問である。解剖学は身体の組織と構造を研究する学問である。そして私達の身体は生理学の仕組みが営まれている入れ物といえる。ダイバーにとって、自分とその生命を維持する仕組みの基本的理解を持つことは、そのダイバーが水中環境下において遭遇するであろう、生理学的および物理学的な諸問題に対して如何に対処すべきかといった知識を得るために重要な事である。本章では、このような基本的理解に必要な生理学と解剖学の一般的事項について述べる。また、基礎的な生理学が如何にダイバーと深く関わっているかについても詳細に理解させるため、その範囲を広げて述べてみる。

3.1 身体の構造

ヒトの身体は互いに依存し合っているシステムの組合せであり、各システムはある特定の機能を持っている。特にダイバーにとって重要なシステムは次のとおりである。

- 骨格系
- 筋肉系
- 神経系
- 循環器系
- 呼吸器系
- 消化器/排泄器系

骨格系は、その回りに身体が形成される基本的構造を備えている。すなわち、骨格は身体に力を与え、生命を維持するための各器官を保護するものである。筋肉は臉をまたたかせるといったことから、長距離レー

スにおいて身体全体を動かすといった運動に関与している。さらに筋肉は身体の生命を維持する器官を保護することにも役立っている。筋肉には随意的に制御されるものや、またヒトが歩いたり眠ったり、運動を行う上において随意的か不随意である場合にも自動的に機能を果たす筋肉もある。

神経系は脳、脊髄ならびに神経の複雑なネットワークから構成されており、全ての身体の機能と活動を調整している。神経系の基本的単位はニューロンという神経細胞で、電気的あるいは化学的(伝達物質)信号を伝達する能力をもつ特別な型の細胞であり、脳から、または脳へ情報を伝達する。またその伝達速度は毎秒

350フィートほどもある。身体の中には約100億ものニューロンがあり、顕微鏡レベルの小さなものや、最も大きなものでは脊髄から足の親指に到るほどの神経繊維をもつものまである。

骨、筋肉、神経および生命に関する器管からなる身体全ての部分は、細胞とそれらを浸す体液で構成されている。細胞には色々な種類があるが、その大部分は共通の特性を持っている。それは、食物からとったエネルギーをある有用な方法で利用する能力である。

食物をエネルギーに変える過程では、その食物は細胞の中で酸素と結合し、ゆっくりと燃焼(酸化作用)することになる。このとき、廃棄物として炭酸ガスが作られる。しかし用意された食物すべてが、すぐにエネルギーに変わるとは限らず、それらのうちのいくらかは新しい組織を作り上げるために用いられる。また、将来のエネルギー源として貯えられるものもある。この様に食物を生体が細胞に取り込み、利用する事を一般的に物質代謝(metabolism)と呼んでいる。物質代謝は、生命のある限り常に細胞の中で続けられる。またこの作用のために、生体は食物、酸素および各種の化学物質(酸素)などを常に取り込み、また供給する必要がある。

消化とは、食物中の栄養素を細胞によって利用できるように形を変えることをいう。この消化システムは、機械的、化学的および細菌学的な利用の組み合わせを経て、アミノ酸、脂肪酸、単糖類および水などのような溶解性のある基礎物質に分解する。このような物質は血液の中へ拡散し、循環系(circulatory system)によって体内のすべての細胞へ運ばれる。

図3-1 ヒトの生理学上のシステム
身体を構成する各部の断面図

図3-2 典型的な細胞の断面図
細胞の形は大きく異なるが、基本的には核と細胞質と細胞膜の3つの要素を持っている

物質代謝に必要な酸素はまた血液の中へ運ばれる。この酸素は呼吸系(respiratory system)によって体内に取り込まれる。呼吸系は、空気が肺に致る口、鼻、喉(気管)及び肺などから構成されている。肺に空気が満たされると、酸素は血液の中に拡散される。この酸素を取り込んだ血液は身体の酸素を必要とする細胞に送られ、そのうちのいくらかは細胞のまわりの組織液を通り、そして薄い細胞膜の壁を通して細胞内に拡散する。

物質代謝は、細胞から外に除外しなければならない老廃物を作り出す。この固体および液体の老廃物は細胞を通過する血液の中へ溶解する。そして腎臓へ選ばれ、ここで濾過される。これらの濾過された老廃物は、一時的に尿として貯蔵するため、膀胱へ運ばれる。炭酸ガスやその他のガス状の老廃物は、血液によって肺に運ばれる。ここでこれらのガス状の老廃物は呼吸の一部として体外に出される。

代謝作用は、身体が必要とするエネルギーに比例して影響を受けている。たとえばヒトが睡眠のときは、その代謝率は遅く、呼吸や循環もまたその遅いレベルに見合っている。反対に身体の活動が活発になると、呼吸や循環のレベルは細胞へ更に多くの食物や酸素を供給すると同時に、多くの老廃物を除去するために増加する。

3.2 身体組織の相互依存

身体の中の1つのシステムの働きが阻害されると、その結果、他のシステムに何らかの影響を及ぼす。しかし、この影響はほとんどの場合そのシステムが短時間で回復すれば、その間は耐えられるものである。たとえば、骨折や筋肉の傷は運動には影響するが、身体の方は基礎的な代謝作用でその傷を治している間も、それなりの方法で機能しつづけている。神経系の障害は、麻痺や目が見えなくなるといった永久的な障害になることもある。しかしその他の身体に影響を受けない部分は正常な機能を続けることができる。通常、健康成人では、もし代謝作用によって生じる様々な代謝産物(特に化学物質)を取り除くために必要な水があれば、食糧を摂取しなくても数週間は生き続けることができる。この場合には、身体の細胞で既に貯えられている食物となるエネルギー源を必要に応じて利用する事ができるからである。

しかし、身体は呼吸と循環が止まった場合には機能

図3-3 胸郭と腹部の内臓を骨格と関連して図示してある

を発揮し続けることが非常に困難となる。細胞が新鮮な酸素を必要とする以前のわずか数分間しかヒトは呼吸を停止することができない。酸素不足によって最も急速に影響を受けるのは脳であり、脳が通常は身体の内全酸素量の20%を使用しているからである。脳への血液が止まれば、脳細胞は約4分以内に死に致る。この場合、直ちにマウス・ツー・マウスやその他の人工呼吸により100%の酸素を供給できれば、細胞の損傷があまり広がらないうちに呼吸を再開することができる。

循環系に大きな障害を受けると、身体に更に激烈な影響を受ける。もし心臓の鼓動が止まれば、その結果、血液の循環は止まり、ほとんど直ぐに脳細胞は障害を受ける。このようなことが起こると、身体全ての機能が脅かされることになる。心臓のポンプ作用は、心臓マッサージ、あるいは電気的および化学的な刺激によって再開される場合もある。これは効果的であるが、直ちに行なわれなければならない(第8章 潜水時の緊急処置を参照)。

呼吸および循環系の障害は、ヒトの生命維持にとって非常に重大な問題となるので、これらの影響をおよぼす何物に対しても常に注意しなければならない。こ

のような意味からも、水中環境は呼吸や循環に対して常に危険をはらんでいる。ダイバーは特に呼吸循環系の解剖学と生理学を十分に理解しなければならない。

3.3 循環系

血液は、生体に張りめぐらされた血管のネットワークを通して流れ、この血管の最も大きなものは直径約1インチで、厚みのある筋肉の壁を持っている。また最も細いものは非常に細く、これら10本を一緒にして、その太さがヒトの髪の毛とほぼ同じくらいのものもある。

動脈は血管のうちで最も太く最も強い血管であり、心臓のポンプ作用で押し出される血液を常に運んでいる。心臓から始まる大動脈（最も大きな動脈）は次第

に分かれて小さな動脈となり、小動脈に分かれる。小動脈は枝分かれして毛細血管となり、これは最も細い血管で数もまた最も多い。毛細血管は身体全体に分布しているので、少なくともこれらの毛細血管の1つから1 mmと離れている細胞はほとんどない。

毛細血管は血液が心臓から生体組織の末端へ流れる終末部で、血液が心臓へ戻るときの始点ともなる。この戻る流れは静脈系を通して行なわれ、最も小さな血管(小静脈)から始まり、徐々に大きな静脈に合流されてゆく。静脈系は血液を常に心臓に向けて流している。このネットワークの終わりで血液は最も大きな静脈(大静脈)へ入り心臓へ流れ込む。

図3-4 ヒトの骨格正面図と動静脈系

図3-5 胸郭と肺の正面図

図3-6 心臓の構造と血液の流れ

3.3.1 心臓

心臓は実際には2個のポンプから成っており、それぞれは壁で完全に仕切られている。心臓の右側のポンプは大静脈からの血液を取り入れ、これを肺に送り込み(血液の肺循環)、そして心臓の左側へ送り出す。ここから血液は身体全体の各組織にポンプで送られ(体循環)、最終的には心臓の右側に再び返ってくる。平均的な心臓の大きさは、握りこぶし大である。心臓は肺に寄り添っていて、胸骨と肋骨によって保護されており、胸の中央よりわずかに左に位置している。

心臓は各々の半分がポンプになっており、二つの室を持っている。上の室を心房と言い流れ込む血液を受け入れ、それを下側の更に筋肉層の厚い室である心室へ流し込む。また左と右の両方の心室からは血液を同時に循環系へ押し出し、この際、心臓の心室にある特別の弁が血液が間違った方向に流れることを防ぐ役目をはたしている。

3.3.2 血液

血液は4つの主な組成から成っており、下記の通りである。

- 50%の血漿
- 45%の赤血球
- 5%の白血球と血漿板

血漿は黄色の液体で、92%は水分である。これは赤血球および白血球を運び、同時に他の多くの物質も運ぶ。これらには、基礎的な栄養物、各種の化学物質、特種な蛋白質とホルモンならびにある量の溶解ガスが含まれる。血液中には25兆の赤血球があり、身体の細胞へ酸素の大部分を運び、そこで炭酸ガスと交換する。またある量の酸素は血漿に溶解するが、量的には非常に少なく身体に必要な量を補うことはできない。酸素の運搬は主に赤血球の中に含まれている酸素と特に親和性の強い物質で行なわれている。それはヘモグロビン(hemoglobin)と呼ばれ、鉄分の多い化合物であり、肺の中で酸素と弱い結合物を作り、酸素を必要とする体内の細胞で酸素を放す。ヘモグロビンは酸素を多く含むと明るい赤色になり、酸素レベルが減ると、にぶい青味がかかった色合いになる。

炭酸ガスはいくつかの異なる方法で血液によって運ばれる。炭酸ガスの約半分は血漿中に溶解し、残りはヘモグロビンと化学的に結合して運ばれる。そして肺へくると、ヘモグロビンは直ぐに炭酸ガスを放し酸素

図3-7 ガスはAとBの空気スペースから拡散し赤血球のCとDへ出入する。このガスは肺泡毛細血管を通して移動する。

と結びつく。

白血球にはいくつかの型がある。しかしどの型の白血球も攻めてくる細菌により身体が攻撃されたり、消耗することを防ぐ役割をになっている。白血球は700:1の割合で赤血球より数がまさっている。しかし、感染を受けると身体は更に追加の白血球を作り、また非常に早く作られるので、その数は数時間で倍になる。血液の中の第3番目の型の細胞は血漿板であり、これらは血液の凝固過程に役立っている。

3.3.3 循環

平均的な身体にはほとんど一定量の血液があり、その量はおおよそ、脂肪を除き去った体重の1ポンド当たり40ccである。しかし、ある一定の時間内に心臓からポンプで押し出される量は身体の要求によって変わる。通常的生活では、心臓は一日に7,200リットル以上の血液をポンプで送り出すことは事実である。

心拍出量は、ある状態での時間内に心臓によって押し出される血液の量ではかられる。普通は、“毎分リットル”の単位で表わされる。安静状態では、心臓は毎分60~70回拍動し、その時の心拍出量は5リットルである。重労働をしている時は、心拍数が毎分150回にも達し、心拍出量は毎分35リットルにもなる。この場合心臓の拍動数は速くなるだけでなく、各拍動ごとに非常に多量の血液を操作するようになる。

心拍数の調節は、右心房にある神経様の組織の小さな部分で制御される。この部分を静脈洞(sinus node)注(洞房結節)という。これは心臓の“ペースメーカー”で通常はこれを収縮させながら心筋を通して小さな電

氣的刺激を送っている。

3.3.4 血圧

心臓は拍動するごとに循環系を通して圧力波を送る。この圧力波は心臓のところで大きく、身体を通過していくうちにその力は徐々に弱まる。この圧力波は皮膚の近くにある動脈の脈拍(pulse)のように見たり感じとったりすることができる。

脈拍は心臓の拍動を測るために数えることができる。そしてその脈圧は心臓の拍動の力を測るために測定することができる。血圧は心臓の各拍動によってある幅がある。心臓がリラックスしているときには血圧が低く、心臓が身体各組織へある量の血液を送るときは血圧は高い。血圧の低い時の値は弛緩期血圧(diastolic pressure)と呼ばれ、血圧の高いときの値は収縮期血圧(systolic pressure)と呼ばれる。

血圧は水銀柱ミリメートルで測られる。そしてその値は収縮期血圧/弛緩期血圧で呼称される。通常、若い男子の安静時の血圧は約120/80である。すなわち収縮期血圧が120mmHgで、弛緩期血圧は80mmHgである。いずれの値も何か仕事をしている時や興奮している時には増加するが、身体がリラックスしたり安静になればすぐに通常の値に戻る。

3.3.5 血流の調節

ヒトが走っている状態では、特にその脚部の筋肉は、身体他の部分の筋肉より大きな労働をしていることになる。そしてより多くの血液の供給を必要とする。循環系の中のある機構は、この運動を確保することを助けるので、労働している筋肉は必要な血液の供給を受けることができる。毛細血管やある動脈は膨張する能力があるので、その直径を太くし、それによって血液の大部分を運動している筋肉に効率よく供給する。また全身的な循環障害や生体内のある器官に対して血液量が減少する場合などには、身体はある種のショック状態となる。この場合も、脳や心臓といった重要な器官に対して生体は補護する機構が作用する。

心拍出量の割合や筋肉の中のある血管の直径は、副腎から分泌されるアドレナリン(abrenalin)という物質によって増加される。たとえば、急激な驚きの後の心拍数の増加は、このシステムにおけるアドレナリン量が急に増すことによって起こされる。また身体が行動を起こすために必要な一次的に多量に必要とされる血液もこのシステムによるものである。

3.3.6 失神とショック

時として、肉体的または心理的なストレスが、一時的に血圧を下げて脳が十分な量の血液を受け入れられないような状態になる事がある。このようなときには、ヒトはよく気が遠くなり、急に身体の具合が悪くなり、気を失うこともある。またこの状態では意識不明となり倒れてしまう。しかし、脳への血流がほぼ通常の状態に近づくと急に意識を取り戻すものである。倒れることそれ自身が、症状を回復させる一つの行動となる。その理由は、頭を心臓に対して低くすれば、血圧が下がったとしても多くの血液が脳に流れ易くなるからである。

ショックは出血、ひどいやけど、あるいはその他の事情によって起こるもので、これらは理論的に血圧を下げ、あるいは実質的に血液量を少なくし、血圧や血流が循環系の中で保持されなくなるところまでの状態にある。この場合、脳だけでなく身体全ての組織も影響を受ける事になる。ショックの場合、特に危険な

図3-8 肺のガス交換システムには3個のポンプが必要である。胸部は気体のポンプであり気管と気管支を通じて肺の空気袋へ空気を送り込む。この袋を肺泡と言い、肺毛細血管で覆われた図と覆われない図を示している。

心臓の右心室は液体のポンプで、酸素が少なく炭酸ガスの多い血液を肺毛細血管へ送る。空気中からの酸素は血液中へ拡散し、その間に炭酸ガスは血液中から肺の空気中へ拡散する。酸素で飽和された血液は左心室へ入り、左心室のポンプでこの血液を全身の毛細血管系へ送り、また炭酸ガスが集められる。

ことは、血液の減ったことが見えないこと、また出血に気が遠くなったと思われがちだからである。
量がわからない(内出血の場合)事で、その当事者が単

(1984年11月20日受付)