

●特集・非飽和混合ガス潜水の現状と将来

混合ガス潜水に用いる潜水器

岡本峰雄*

1. はじめに

潜水には、息こらえによるものとガスを吸いながら潜る方法とがある。前者には海女の素潜りやスノーケリング等があり、後者がいわゆる潜水で、短時間潜水と飽和潜水とがある。

短時間潜水はレジャーのスクーバ潜水、タイラギ漁業や港湾工事等のヘルメット潜水に代表される、一回の潜水が分・時間単位で完了する潜水方法である。浅深度の短時間潜水では水面上から潜水呼吸器を着けて潜水（加圧）し、作業後に適切な減圧表に従って浮上（減圧）する。水上減圧方式の短時間潜水では、ダイバーは減圧途中で一旦浮上して船上の加減圧タンク（DDC：Deck Decompression Chamber）内に移動し、ドライ状態で以後の減圧を行う。大深度の短時間潜水では、ダイビングベル（Diving Bell）とDDCを用いるが、180mで1時間潜水するような場合、長時間の減圧のために一回の潜水が数日間に及ぶ。ダイバーは作業深度まで降りたダイビングベル内で加圧され、呼吸器を着けて水中に出、作業後はベルに戻って呼吸器を外す。ベルは圧力を保って浮上し、その途中及び船上のDDCにドッキングして減圧を行う。

飽和潜水は海底石油資源関連の商業潜水や海中研究室に滞在する方式のもので、一回が数週間に及ぶ。加圧・保圧（圧力下で滞在）・減圧を加減圧タンク内で行い、水中作業時のみベルに乗って作業深度まで降り、潜水呼吸器を着けて水中に出る。海中研究室の場合、呼吸器を着けて下部のハッチから出入りする。

潜水には目的と深度によって様々のものがあり、潜水呼吸器も同様に種々のものが組み合わせ

て用いられる。その中から、本稿では、短時間潜水の混合ガス潜水に用いる潜水器について、現状と問題点、評価法等についてまとめる。飽和潜水用の潜水呼吸器、DDCのドライ環境で用いられる呼吸器については別の機会に述べることにしたい。

2. 代表的な潜水呼吸器

潜水呼吸器には各種あるが、わが国で主として用いられているのは、スクーバ潜水器、フーカー潜水器、ハードハット潜水器、ヘルメット潜水器と呼ばれる四種である。これらの名称は、わが国の潜水の歴史的な流れに由来したもので、欧米の分類ではスクーバ潜水器と他給気潜水器（フーカー潜水器、ハードハット潜水器、ヘルメット潜水器を含む）の二種のみである。まずそれぞれの特徴を述べ、呼吸器のメカニズム等については後述する。

（1）スクーバ潜水器

スクーバ潜水器は、レジャーダイビングや商業潜水での軽作業等に最も一般的に用いられ、正確な名称は解放式スクーバ潜水器である（図1）。空気ボンベ、ボンベを背負うためのハーネス、マウスピース付きの二段式レギュレータの三点からなり、他に面マスクと足ヒレさえあれば潜水できる。呼吸はマウスピースをくわえて口で行う。スクーバ潜水器で潜水することをスクーバ潜水という。わが国には第二次大戦後導入された。

その他の装備品としては、ウェットスーツ（寒い場所や長い潜水作業ではドライスーツ）、ウエイトベルト、深度計、時計、減圧コンピュータ、ナイフ、手袋、ブーツ、バランスベスト、スノーケル等が用いられる。

レジャー潜水の大きなマーケットを背景に、潜水器と装備品のそれぞれに多くの製品があり、好

*海洋科学技術センター



図1 スクーバ潜水器
(解放式スクーバ、面マスク式)



図3 フーカー潜水器
(解放式他給気)



図2 スクーバ潜水器
(全面マスク式、AGA)

みに合わせて自由な組み合わせができる。

スクーバ潜水器の一変形として、二段レギュレータ部のマウスピースを口鼻マスクに変え、マスクをその部分まで広くした全面マスクも用いられる(図2)。マスクが顔にあわないとガスが漏れたり水が入ったりして使い難いが、交話しやすいためよく利用されている。

(2) フーカー潜水器

フーカー潜水器は潜水漁業、港湾工事などに伴う商業潜水の分野で多く用いられている装置で、

正確な名称は解放式他給気潜水器である(図3)。船上のガス源、圧力調整装置、中圧ガスホース、マウスピース付きレギュレータで構成される。スクーバ潜水器の空気ボンベとレギュレータの一段減圧弁が船上に位置した形態であり、ダイバーのマウスピース付き二段レギュレータ部までホースで空気を送るものである。

安全性と作業性を高めるため、有線の交話装置、ダイバーの水深を船上で知するためのクルージホース等をガスホースに沿わせ、船上支援員が常にダイバーの監視を行うのが一般的である。ダイバー装備にも各種があり、空気を一度小型貯気タンクに経由させて非常時のガスを確保したり、非常用の小型ボンベを装備することが多い。マウスピース付きのレギュレータ部とマスクが一体になった全面マスクも広く用いられている。

その他の装備はスクーバ潜水の場合とほぼ同様であるが、潜水の管理を船上支援員に依存できる。ため、深度計や時計などいくつかのものは省略できる。

スクーバ潜水よりも長時間の作業を安全に行える利点があるが、潜水支援員を要し、また全体システムがやや大きくなる。昭和初期の古典的なマスク式潜水器から発展したものであるが、次第にハードハット潜水器に近いものになっている。

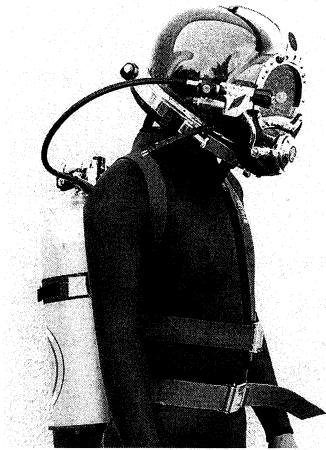


図4 ハードハット潜水器
(スーパーライト27, 解放式,
自・他給気)

(3) ハードハット潜水器

ハードハット潜水器は頭部を完全に覆う、ヘルメット潜水器よりかなり小型のハードハットを用いるものである(図4)。解放式で主として他給気潜水で用いられるが、スクーバ潜水にも用いることができる。商業潜水分野で、障害物の多い場所、混合ガスも使うやや深い潜水、寒冷地等で用いられている。基本構成はフーカー潜水器と同一で、ダイバーが被るハードハットに二段レギュレータ部を装備したものである。首の部分でシールして中に水が入らない構造になっているため、ドライスーツと組み合わせれば殆ど水に濡れることなく潜水できる。寒冷地では温水式加温服との組み合わせで用いられる。

欧米の海底石油・ガス資源開発に関わる潜水で、1960年代から一般的に用いられており、世界で10種類程度が市販されている。

(4) ヘルメット潜水器

ヘルメット潜水器は、頭部をすっぽりと覆う大きなヘルメットと大きなドライ潜水服をダイバーの肩の部分で結合し、手首の部分のみが水とのシール部になった構造であり、軟式ヘルメットとも呼ばれる(図5)。明治時代初期から用いられている。構成は船上の低圧コンプレッサーと低圧貯気

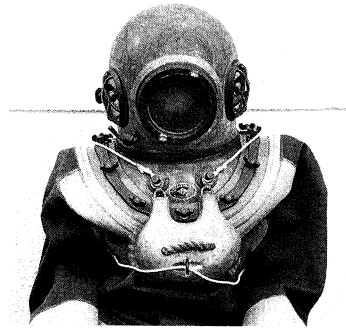


図5 ヘルメット潜水器
(解放式他給気, 横浜 AC 型)

タンク、送気ホース、ヘルメットと潜水衣である。かなり大きな浮力を有するため、それを補償するための重錘と潜水靴にかなりの重量のものをを用い、全体重量は60-80kg またはそれ以上となる。水中では浮力調整機能を利用した石均しなどの重量物運搬作業に適し、港湾工事に活躍している他、一部の潜水漁業でも用いられている。水に濡れることなく長時間の作業ができるが、重装備で機動性に欠け、また熟練に相当の年月を要する等の不利な部分が多く、後継者不足によるダイバーの高齢化が問題となっている。

3. 潜水呼吸器の概念

(1) 陸上と水中の呼吸の相違

陸上の生活では、運動時を除けば意識して呼吸することは少ない。広大な大気空間の中で、口腔・肺・そして口腔周辺の大気の三者間で圧力差が殆ど生じない状態で呼吸するため、通常的生活を営む範囲においては、呼吸のために要する仕事量が無視できるほどに小さいためである。ちなみに安静座位で呼吸に要する仕事量は総エネルギー消費量70-100ワットの約1%である。この値は運動負荷によって変化し、毎秒5フィートで泳ぐ場合、総エネルギー1,100ワットに対して約57ワットとなる¹⁾。なお1分間あたりの酸素消費量(大気圧換算)と分時換気量(圧力状態の容積)について見ると、睡眠時にそれぞれ0.25 l/min, 6 l/min, 徒歩で0.6-1.8 l/min, 13-40 l/min, ランニングで2.0-4.0 l/min, 50-95 l/min, また水泳の場合

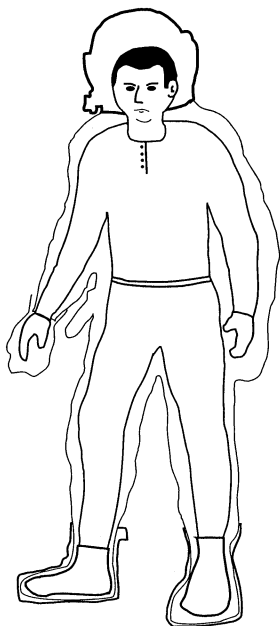


図6 ヘルメット潜水での呼吸の状況

は0.8-2.5 l/min, 18-60 l/minである²⁾。

水中の呼吸は、周囲の水深に応じた圧力のガスを呼吸する必要があること、また潜水用のヘルメット内のように狭い空間内やレギュレータのマウスピースを介するなどして呼吸すること、の二つの特徴がある。

呼吸するガスの圧力は、大気中では約1気圧であるが、10m潜水するごとに約1気圧増加する圧力のため、30mでは約4気圧のガスを呼吸する。ダイバーの呼吸は陸上と同じ肺容積で行われるため、大気圧換算では陸上の約4倍のガスを呼吸する。例えば陸上と水中で、分時換気量30lで酸素消費量1.5lの呼吸を行った場合、30m深度では大気圧換算で約120l (30l × 4気圧)の空気を消費する。しかし酸素消費量は大気圧換算でも1.5lのまま、30m下では約0.375l (1.5 ÷ 4)となる。なお圧力下でのガス容積についての混乱を避けるため、大気圧換算した容積と圧力下での容積について、N: Normal, A: Actualの表示を付加することがある。例えば、容積10lのガスボトルに1,500lの空気が充填されて約150気圧になっている場合、1,500Nlの空気を充填した10lボトル

や、10A lの150気圧空気といった用いかたをする。

呼吸する場が狭い空間であることを、ヘルメットと潜水衣を装備した場合を例に図6に示した。ヘルメット内の容積はダイバーの装着状態で約10lである。仮にヘルメットが密閉状態で吸気によって約2lのガスを吸うと、内部圧力は0.2気圧低下することになる。つまり吸気するには肺が0.2気圧の圧力差に打ちかつ必要がある。同様に、呼気は内部の圧力を高めることになる。実際にはヘルメットには空気供給ホースから空気が流れ込み、また大きな潜水衣の空間がバッファの役目を果たすのでこのような大きな呼吸努力は不要である。

また水中で立位の場合、口腔部と肺で、深度差によって約0.02気圧(20cmH₂O)の圧力差があり、これが吸気のために要する差圧にプラスされる。逆に呼気差圧はこの分軽減される。従って吸気はきつく呼気は楽という現象が起きる。遊泳姿勢ではこの圧力差は小さくなる。

以上のように、潜水呼吸器の問題点の基本は、有限の狭い空間内で呼吸するために呼気差圧と吸気差圧が生ずること。また環境と等しい圧力の高密度のガスを呼吸するために呼吸抵抗が大きくなることにある。この結果、呼吸に要する仕事量が、大気中の場合に比較すると相当に大きくなる。

(2) 呼吸ガスの組成選定の基準

潜水の基本は、潜水する深度と時間に応じて安全な酸素分圧範囲内の呼吸ガスを選択して用い、またそれに応じた適切な減圧を行うことである。

潜水呼吸ガスは酸素と不活性ガスを適切な組成で混合したものである。不活性ガスは潜水深度の増加に伴って増す酸素分圧を低下させるための希釈ガスで、潜水深度や目的によって希釈比や組み合わせが異なる。一般に用いられる不活性ガスは、浅深度で窒素、深くなるとヘリウムである。潜水の目的によっては窒素・ヘリウムやネオン・ヘリウム等が用いられることもある。

呼吸ガスの選定にあたっては、同一のガスでも潜降・浮上に伴う深度変化で酸素分圧が異なっていくことを考慮する必要がある。酸素分圧は、酸欠にならない0.16気圧(大気圧で16%)以上で、また酸素中毒にならない暴露許容限界以内の分圧で、十分な余裕をみて選定する。暴露許容限界²⁾を

表1 短時間潜水の酸素分圧の暴露許容限界

酸素分圧 (気圧)	最大潜水時間 (min)
1.80	15
1.70	20
1.50	40
1.40	50
1.30	制限なし

表2 閉式酸素呼吸器の潜水許容限界

水深 (fsw)	最大潜水時間 (min)
20	240
30	80
35	25
40	15
50	10

表1に示した。なお閉式の軍用酸素呼吸器の場合には表2に示した別途の許容限界表が用いられている²⁾。

不活性ガスには適切な利用範囲がある。純酸素で安全に潜水できるのは水深6m程度までであるが、それに窒素等が加わった空気ではより深い潜水ができる。窒素は空気の主成分(約78%, 大気圧で0.78気圧)であるが、分圧が3気圧を越える水深30m頃から麻酔作用をもたらすようになる。これを窒素麻酔と呼ぶが、個人差が大きくまた訓練によってある程度軽減もできる。このため、空気スクーバでの最大潜水深度は40m程度となっている。ちなみに30m潜水した時に呼吸する空気の圧力は約4気圧、3 kg/cm²Gになり、組成ガスの分圧は酸素約0.84気圧、窒素約3.12気圧、その他約0.04気圧となる。また深度が深くなると、空気では密度が大きくなって呼吸抵抗が増加する問題点もある。このため、密度が窒素の約1/7のヘリウムが用いられる。ちなみに空気中で30m潜水した時のガス密度は大気圧の約4倍となるが、これはヘリウム80%、酸素20%のガスで約100m潜水したときのものとほぼ等しい。

減圧は、体内に溶け込んだ不活性ガスを、人体に悪影響のない速度で浮上することによって排泄するために行うものである。同一の不活性ガスでは、分圧が大きいと減圧もそれに従って長時間を要するようになる。米国でNOAAを中心に盛んに用いられている窒素・酸素潜水^{3,4)}は、酸素濃度を32%、37.5%等に高めて窒素濃度を下げ、空気潜水の場合よりも減圧時間を短くすることを目的にしている。ただし酸素分圧が高くなるので潜水可能深度は空気の場合よりも浅くなる。

4. 潜水呼吸器のメカニズム

潜水呼吸器は、ガス源、圧力調整装置、吸気ガス調整装置、呼吸空間、呼気ガス調整装置等から構成されている(図7)。この基本は深度に関わらず同様であり、潜水の目的によって様々の組み合わせで用いられる。

(1) スクーバ潜水と他給気潜水

呼吸ガス源の位置によって、潜水中のダイバーの活動には大きな相違が生ずる。ダイバーが呼吸ガスを携帯するものをスクーバ潜水(SCUBA: Self contained breathing apparatus)または自給気式潜水(SCUBA diving)、ガス源が水面上やダイビングベル等にあつて、そこから送気ホースでダイバーに供給する方式を他給気潜水(Surface-supplied diving)という。

一般の呼吸器は、ガス源のガスをその組成のまま吸気し、呼気ガスを水中に排気する方式で、これを解放式(Open circuit)と呼ぶ。構造が単純で呼吸抵抗が小さく、空気やあらかじめ正確に混合されたガスを使用するため安全性は高く、現在の呼吸器のほぼ総てがこの方式であると言っても過言でない。この他、呼気を回収再処理してガス源のガスに添加し、その混合気を吸気する、閉式、半閉式呼吸器があるが、詳細は後述する。

スクーバ潜水で用いる解放式スクーバ潜水器は、高压ガスを充填したガスボトルをダイバーが携帯し、2段階の減圧を経てダイバーが呼吸する空間にガスを供給する。第一段減圧部(圧力調整装置)はガスボトルのごく近くに置き、高压ガスを、上下するダイバーの環境水圧よりも6-10kg/cm²G程度高い圧力に自動的に保つように減圧

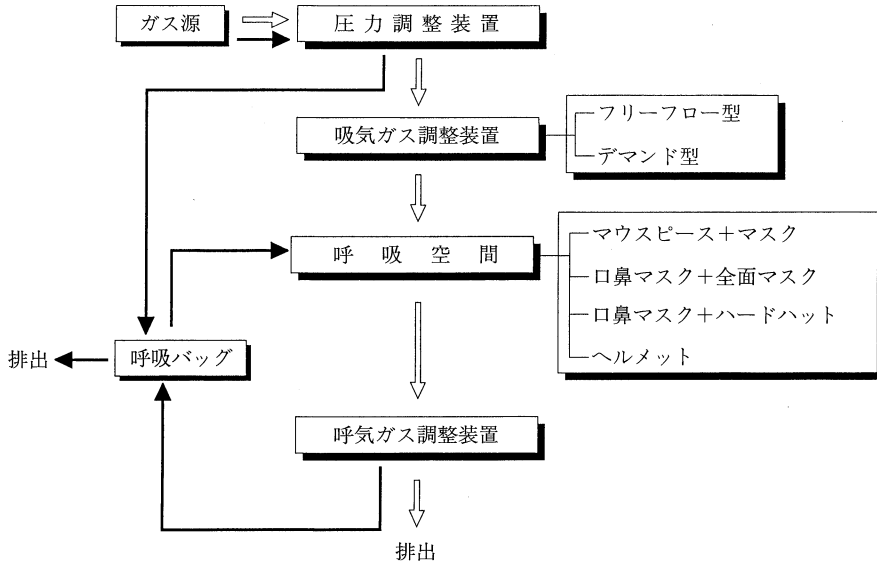


図7 潜水呼吸器の構成

⇒：解放式，→：閉式，半閉式

し、中圧ホースで第二段減圧部（吸気ガス調整装置）に送る。第二段部はダイバーの口近くに置き、適切な量を呼吸空間に供給する役目を果たす。

他給気潜水では、船上に置いた高压ガスボトルまたは低压貯気タンクから、ホースでダイバーの装備する潜水呼吸器までガスを送る。船上にスクーバ潜水器の第一段減圧部が置かれている状態と等しく、第二段減圧部以降のダイバー装備は基本的にはスクーバ潜水器のものと同一で、解放式呼吸器が用いられる。高压ガスを用いる場合、ガス調整装置の減圧弁によってダイバーの環境よりも6-10kg/cm²G程度高い圧力まで減圧してダイバーに送る。そして潜水器の第二段減圧部で呼吸できる圧力まで落とし、適切な量を呼吸空間に供給する。低压ガスを用いる場合、貯気タンクには空気圧縮機で常時ガスを充填する。深度圧より少し高めの圧力で、常時ほぼ一定圧力のガスを供給し、ダイバーが呼吸器の調整バルブで好みのガス流量に調整する場合が多い。

(2) 吸気的方式

潜水呼吸器でダイバーが吸気する場合、口腔部の圧力と等しいガスで満たされた呼吸空間から吸う必要がある。この呼吸空間にガスを供給する方

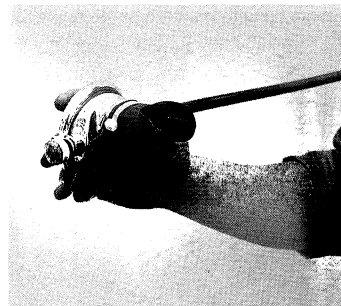


図8 マウスピース

法には、デマンド方式とフリーフロー方式の二種がある。

デマンド方式は解放式のスクーバ潜水器、マスク式潜水器やハードハット型潜水器で広く用いられている。ダイバーの吸気によって呼吸空間に生じた負圧を検知し、それに見合った量のガスを瞬時に供給する。ガスは、ダイバーの口元の第二段減圧部の直前まで、水深に応じた圧力よりも6-10kg/cm²G程度高い圧力で供給される。ガス供給量がダイバーの呼吸に追従するため、無駄な消費を



図9 全面マスク内の口鼻マスク

押さえることができる。また息を止めることで通信時の騒音を無くしたり、肺容積の範囲で微妙な浮力調節を行って同じ深度で浮遊状態を保つことができる等の利点がある。一方、差圧を検知してガスを送る機構のため、どうしても吸気抵抗が生じる。重作業そしてガス密度が高くなるに従ってその抵抗が増加し、呼吸に必要なガスの供給に支障をもたらすようになる。

デマンド方式では、吸気差圧を敏感に検知するために呼吸空間を極力小さくする必要があり、マウスピース(図8)をくわえて呼吸するか、口鼻マスク(図9)で口と鼻とを覆って呼吸をする。マウスピース方式は、口で吸気と呼気を行うため若干の慣れが必要であるが、簡便で、眼や鼻を覆う面マスクは自由な形のものが使用でき、脱着も容易である。ただし水中交話は困難である。口鼻マスク方式は、マウスピースに相当する部分を大きく広げて口と鼻をピッタリと覆うようにしたもので、全面マスクやハードハットの内部に取りつけられる。鼻で陸上に近い呼吸ができ、交話も楽にできる。ただし口鼻マスクと全面マスクやハードハット内の空間が通じているため、そこに呼気の炭酸ガスが蓄積しやすい欠点があり、これを減らす工夫が種々行われている。

フリーフロー方式は軟式ヘルメット潜水で用い

られている、呼吸空間内に常時ガスを供給し続ける方式である(図6)。ヘルメットと潜水衣の大きな空間に炭酸ガスが蓄積しないよう換気する必要があり、ダイバーが必要とする吸気量よりもはるかに多いガス量を常時供給する。

(3) 他給気潜水を支援する装置

スクーバ潜水は水中で軽快に活動できるが、ガスの携帯量が潜水時間を制限する最大要因となる。携帯できるガスは普通一種類のみで、そのために適用減圧表が固定され、ガスに応じた潜水深度の制限を受ける。またスクーバ潜水では、潜降速度、潜水時間と最大潜水深度によって異なる減圧過程の管理、ガス量管理等、潜水中の生命維持に関わることをすべてダイバー自身が適切に行う必要がある。

他給気潜水は大量の呼吸ガスを準備できる利点があり、ガスの消費量にあまり神経を使う必要はない。呼吸ホースの長さによって行動範囲が限定されまた活動も拘束される反面、水中通話用の電線、照明や作業のための動力線類等をガスホースに束ねて運搬できる利点がある。このため、港湾土木工事のようにじっくりと腰を据えた潜水や、船上の支援員が潜水計画を正確に監視制御する必要のある大深度潜水に適する。水深50mを超える大深度のヘリウム・酸素短時間潜水では、十分な

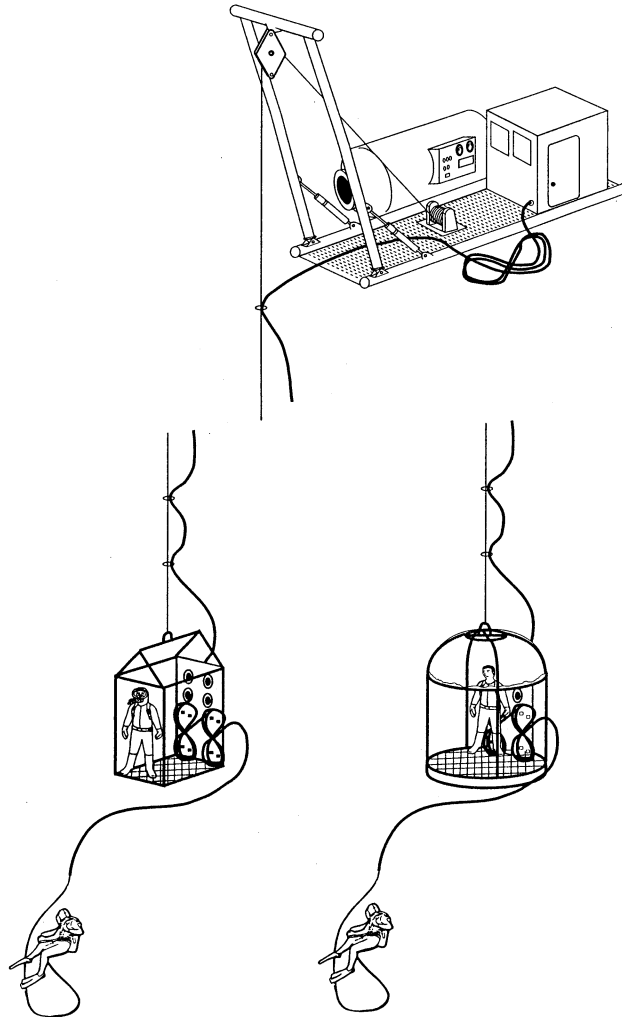


図10 潜水ステージとオープンベル

量のガスを容易に供給でき、潜降中や減圧中、必要に応じて異なった組成のガスを送気できることから、通常、他吸気潜水が用いられる。

他給気潜水では長時間または大深度の作業を行うことが多く、安全かつ計画的な潜水を行うため、ダイバーの潜降・浮上そして減圧を補助するための各種の潜水支援装置が用いられる(図10, 11)。これには潜水ステージ、オープンベル、ダイビングベルと、水上で減圧を行うための船上減圧タンク等がある。これらの支援装置により、ダイバーは自力での潜降・浮上や減圧管理をすることなく、

水上支援員によって厳格な潜水管理が行われることで安全性・作業性は著しく向上する。なお他給気潜水では、供給ガス停止等の事態に備えて非常用の小型ガスボトルを携帯する事が多い。

5. 特殊な潜水呼吸器

呼吸によって呼吸ガスの酸素の一部が消費され、それとほぼ同量の炭酸ガスに置き換えられるが、潜水では圧力に応じて増える呼吸ガス量(N ℓ)に対し、消費される酸素の量(N ℓ)が大気圧の場合と同じため、酸素の利用比率はかなり小

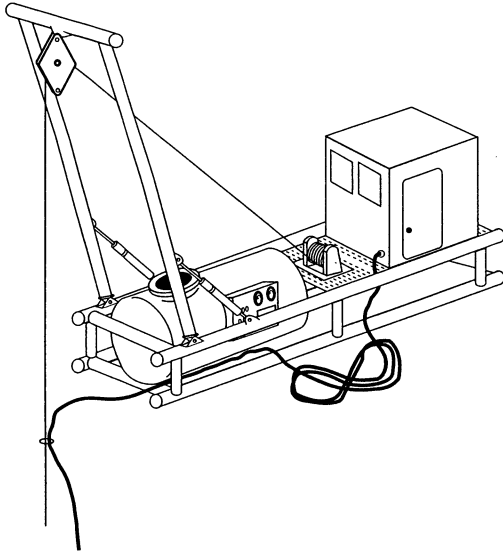


図11 ダイビングベル

さい。スクーバ潜水器では、ガスの携帯量が限られるため、閉式及び半閉式と呼ばれる、呼気ガスを回収精製して酸素を添加して再利用する装置が種々開発されている(図12-15)。

閉式、半閉式とも呼吸に際しては、図14に示したように、柔らかい吸気バッグから吸気し、呼気

は呼気バッグに回収する。呼吸バッグとして両者が一体になったものもある。呼気は炭酸ガス吸収剤を詰めたキャニスター(充填容器)に通して炭酸ガスを除去し、吸気バッグに戻して酸素を添加する。この一連のガスの循環経路を呼吸回路と呼ぶ。ダイバーはマウスピースまたは口鼻マスクで呼吸するが、回路内のガスが逆流しないように吸気逆止弁と呼気逆止弁が設けられている。回路内のガスの循環はダイバーの呼吸に頼るため、呼気・吸気抵抗ともに解放式に比較するとかなり大きく、呼吸仕事量が大きくなる。炭酸ガス吸収剤は使い捨てで、ソーダソーブまたはその同等品を用いる。吸収剤の量は、低水温の場合には吸収効率が大きく低下するため、潜水器の使用条件をいかに想定するかで異なるが、一般的に2-4 kgを詰めるものが多い。

閉式、半閉式のスクーバの開発と利用の現状はあまり良好ではない。この原因は、安価で信頼性の高い解放式スクーバが、ガスボトルが高圧化して小型になったりレギュレータの能力が向上して呼吸抵抗がますます小さくなる等、安全性・信頼性・価格の面で圧倒的に有利なためである。また潜水後の減圧は不活性ガス分圧に応じて異なるが、潜水中にその値が不確実なため、安全性を配慮して、長めの減圧を行うなどの注意が必要である。さらに、閉式・半閉式では決められた組成の混合ガスを準備する必要があるが、国内においてそうした混合ガスを、空気のように安価に、なおかつ、いつでもどこでも得られる状態にはないのも不利である。

(1) 閉式呼吸器

閉式潜水器は消費した酸素のみを添加するもので、原理的にガスを最も節約できる方式である(図12, 13)。呼気の酸素分圧を酸素計(安全のために複数使用)によって計測し、不足分の酸素のみを添加し、深度変化に関わらず酸素分圧を一定範囲に制御する。実際の潜水では漏れやマスクの曇り防止等のために呼吸回路内からガスがかなり漏れるため、適時、酸素を窒素などで希釈した混合ガスで内部空間を満たす必要がある。酸素と混合ガスの2種のガスボトルを用いるかわりに、両者ともやや酸素濃度の高いガスを用い、酸素添加時に強制的に多少の外部放出を促進する方式とすることも多い。潜水中の酸素分圧は、呼吸回路が

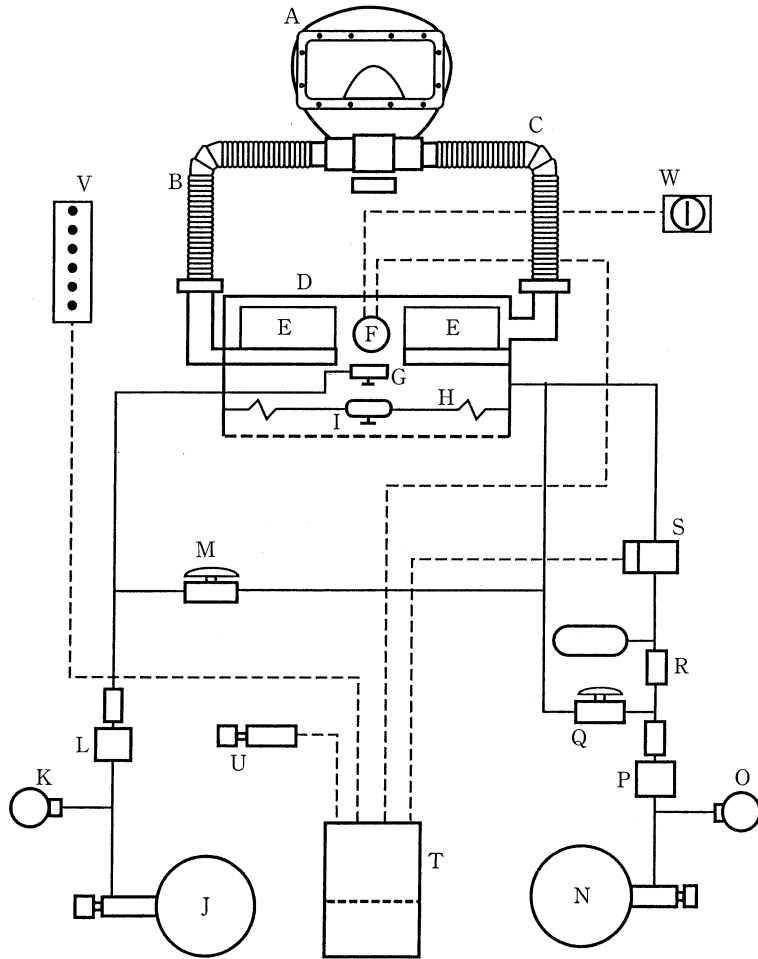


図12 閉式スクーバ潜水器の構成 (U.S.Navy MK15)

A: 全面マスク, B: 呼気ホース, C: 吸気ホース, D: 回収精製部, E: 炭酸ガス吸収剤, F: 酸素センサー, G: 混合ガス添加弁, H: 呼吸ダイアフラム, I: 排気弁, J: 混合ガスボトル, K: 圧力計, L: 減圧弁, M: バイパス弁, N: 酸素ボトル, O: 圧力計, P: 減圧弁, Q: バイパス弁, R: オリフィス, S: 電磁弁, T: 主エレクトロニクス, U: スイッチ, V: 主表示装置, W: 副表示装置

小さいために厳密に制御することは難しく、0.7ないし0.75気圧設定でも、0.4-0.9気圧程度の範囲幅となる²⁾。

本方式は原理的には優れているが、呼吸回路内にマウスピース部等から浸水すると、炭酸ガス吸収剤が湿って吸収効率が低下したり、酸素濃度計測センサーが漏れて計測不能になったりする恐れがある。また吸収剤のキャニスター（充填容器）

への充填が偏っていたり、潜水呼吸器内でのキャニスターの取り付け部のシールが不十分なこともある。酸素分圧管理については混合ガスを強制的に注入することで緊急対処が可能であるが、炭酸ガスが回路内に増加した場合、適切な計測器がないためその濃度を計測監視することができない。価格・ランニングコストともに高く、また操作に十分習熟することが必要で、30年近く前に開発さ



図13 閉式スクーバ潜水器
(バイオマリン CCR1,000)



図15 半閉式スクーバ潜水器
(ドレーゲル FGG-III)

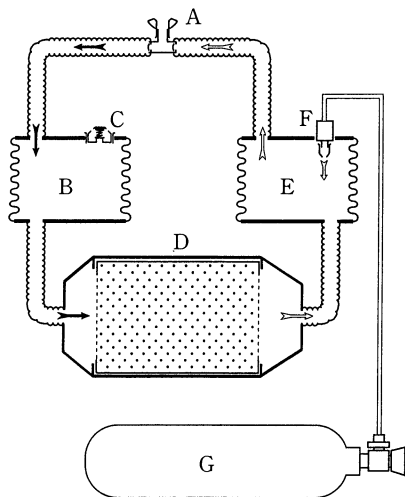


図14 半閉式スクーバ潜水器の構成
A：マウスピース，B：呼吸バッグ，C：排気弁，D：炭酸ガス吸収剤，E：吸気バッグ，F：オリフィス，G：ガスボトル

れたエレクトロラング以来、各種のものが開発されてきたが、軍用以外では未だ実用に耐えるものは見あたらない。ただし近年、炭酸ガス計測装置を有したものが出現しており、優れた潜水器との評価も高いため今後が期待される。

閉式の特殊なものとして、軍用の酸素呼吸器がある。呼吸回路内が酸素で満たされ、呼吸で生じた炭酸ガスの吸収によって減った容積分だけ酸素を添加する。理想状態で用いれば、気泡が出ず、

長時間静かに潜水することが可能である。ただし酸素中毒の防止のため潜水深度は約6mまでに限定される。

(2) 半閉式潜水器

半閉式潜水器(図14, 15)は、酸素濃度の高い混合ガスを、呼吸回路に一定量(Nℓ)ずつ連続添加するもので、酸素濃度の計測は行わない。添加には深度が変わっても流量が変化しないオリフィス方式が用いられる。酸素添加は、軽作業からやや重作業までを想定した酸素消費量によっても酸欠や過酸素分圧にならない量とするが、広い深度範囲を同一のガスと流量でカバーすることは困難なため、潜水深度範囲によって数種の組成のガスを用い、またガス流量を切り替える方式のものもある。ドレーゲル社のFGG-III(図15)を例にとると、水深60mまでの範囲では、酸素29%、窒素71%の混合ガスを毎分20Nℓずつ供給する。これによって酸素消費量0.8-3.0Nℓの作業を行っても酸欠や過酸素分圧にならないようになっている。

半閉式潜水器は、閉式に比較すると構造が簡単で価格も比較的安い。しかし閉式と同様の各種の問題点を有している。軍用という特殊用途に用いられている例はあるが、商業潜水での実用に耐えられる能力を有したものは見られない。また近年いくつかの製品が見られるが、レジャーダイビングの特殊領域で少数が用いられているのみである。

半閉式の特殊な例として、呼吸抵抗を軽減するためにフィゴ型の呼吸バッグ部にカウンターウェ

表3 NPDによる呼吸器の無人評価基準

試験圧力	空気またはそれに準ずるガス用	0, 10, 30, 60msw
	ヘリウム・酸素またはそれに準ずるガス用	0, 50, 100, 200, 300, 400msw
試験水温		5℃±2℃
呼吸抵抗		±1.5kPa 以内, ±2.5kPa (上限)
分時換気量 (RMV)		15.0, 22.5, 40.0, 62.5, 75.0, 90.0 ℓ/min
呼吸仕事量 (W)		W (J) = k + (f · RMV)
	ここで180msw 以浅, RMV=15-75 ℓ/min では	k=0.5J/ℓ, f=0.04
	ただし RMV=15-75 ℓ/min では	Wは5 J/ℓ 以下

表4 呼吸試験時の呼吸条件

RMV (A ℓ/min)	1回の容積 (A ℓ)	毎分の呼吸数 (回)
15.0	1.0	15
22.5	1.5	15
40.0	2.0	20
62.5	2.5	25
75.0	3.0	25
90.0	3.0	30

イトを装備し、また呼吸バッグの作動に応じてガスを断続的に供給している呼吸器 (AGA ACSC) もある。

6. 潜水呼吸器の評価基準と評価方法

(1) 潜水器の無人評価手法と呼吸シミュレータ

潜水呼吸器は、前述のようにガス源、圧力調整装置、吸気ガス調整装置、呼吸空間、呼気ガス調整装置からなる。潜水の目的によって様々な組み合わせで用いられるが、ダイバーの立場からみると重要なことは二点に集約される。まず、呼吸器のうちでダイバー自身が運搬しなければいけない装備品が扱いやすい大きさと重量であるか、また呼吸空間内での呼吸が容易であるか否か、である。前者は潜水の目的とダイバーの好みに左右されるため、どれが優れているといった評価はあまり意味はない。しかし後者の呼吸の容易さについては、呼吸に要する仕事量が少なければ良好であるのが明白であり、欧米の商業潜水分野では、表3-5に示したNPDの基準⁵⁾で評価・認定が行われている。

呼吸器の試験は数段階の圧力下で、呼吸器が用

表5 炭酸ガス吸収剤を用いる呼吸器の試験条件

RMV (A ℓ/min)	炭酸ガス注入量 (N ℓ/min)
15.0	0.6
22.5	0.9
40.0	1.6
62.5	2.5
75.0	3.0
90.0	3.6

いるガスを用い、水温5℃±2℃の無人状態で行われる。試験圧力は、空気または同等の呼吸ガスを用いる呼吸器では、0, 10, 30, 60mswの4段階、ヘリウム・酸素または同等のガスを用いるものは、0, 50, 100, 200, 300, 400mswである。

呼吸は正弦波を形成する人口肺により、分時換気量、15.0, 22.5, 40.0, 62.5, 75.0, 90.0 ℓ/min (0℃, 101.3kPa, 乾燥ガス)の6段階で行い、その時の呼吸差圧と呼吸仕事量が規定値以下であることが求められる。呼吸差圧は±1.5kPa (15

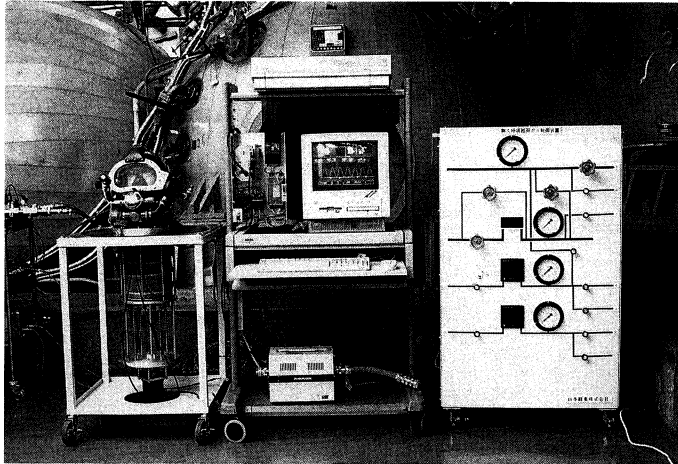


図16 呼吸器評価試験装置

左から；呼吸器を装備した人工肺, 人工肺制御装置, ガス供給パネル

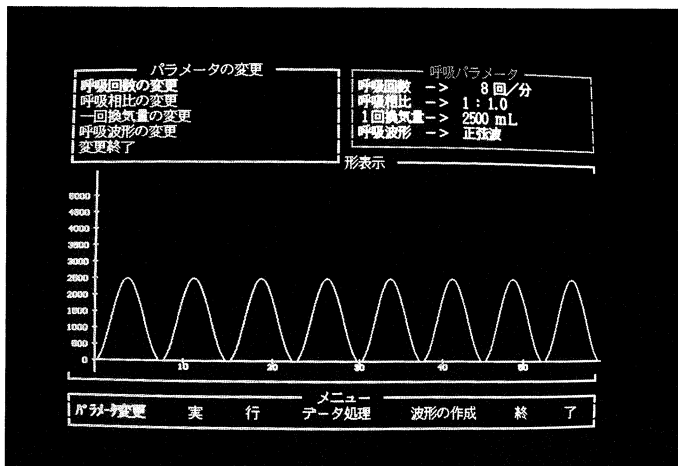


図17 人工肺での呼吸波形の例

cmH₂O) 以下であることが望ましく、最大許容範囲は±2.5kPa 以内である。

呼吸仕事量 W (J/l) は、一呼吸のなかで、呼吸空間内の圧力 P (周囲環境との差圧) と呼気及び吸気ガスの流量 V の変化とを細密に計測し、 $P-V$ 値の積分による呼気仕事量と吸気仕事量の和から求められる。潜水深度180m 以浅用の呼吸器では、最大呼吸仕事量 W は、分時換気量15-75 l/min において、 W (J/l) = 0.5 (J/l) + 0.04 × RMV (l/min), そして90 l/min において5 J/l を超えないことと規定されている。

呼吸器の無人評価試験を行うために欧米諸国ではいくつかの装置が開発・利用されてきた。しかし日本では未だ実用に耐える装置は製作されていない。著者らは、海洋科学技術センターの潜水シミュレータに装備し、水深500m 相当圧下までのドライまたはウェットの状態でNPDの基準に沿って各種の呼吸器を評価するための呼吸シミュレータを開発している(図16, 17)。本装置では、呼吸波形、一回の呼吸量、呼吸回数を任意に設定することができる。後述の呼吸モニタリング装置と組み合わせて、呼吸器の評価を正確に行うことが



図18 呼吸モニタリング装置のチェンバー外装置

左：高圧用呼吸ガス分析計（質量分析計）

右上：監視用及び解析用コンピュータ

右下：左から、心拍計、圧力変換器、大気圧用ガス分析計、温湿度用アンプ

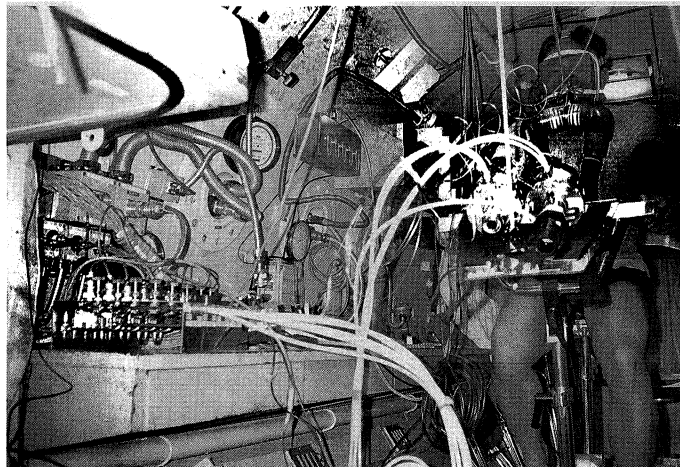


図19 呼吸モニタリング装置のチェンバー内ダイバー装備品

左：圧力センサー箱、右：呼吸・吸気流量計測装置

可能である。現在、大気圧下での作動試験を完了し、今後、圧力下無人評価試験を開始する段階である。

（2）潜水状態のダイバーの生体情報監視計測

呼吸器の評価は前述の呼吸器無人評価試験によって行われる他、ダイバーが実際に使用しての評価試験も行われる。ダイバーが行う試験は、呼吸器のバランス、操作性、騒音、作業性などの感覚

的なものであり、明確に数値化できる内容とはなっていない。

ところで潜水作業は、陸上の場合に比較して疲労が大きい。この原因には、呼吸による疲労のほか、低水温による体熱損失、潜水衣による拘束、視野が狭いことによる心理的な不安感などの様々な要因がある。これらのなかで、呼吸器と潜水衣等のダイバーの個人装備品は、潜水時の基本的な

表6 呼吸モニタリング装置による計測監視および解析項目

リアルタイム計測項目	事後解析項目
ダイバーの状態	呼吸毎または所定時間内
皮膚温度 3点	吸気ガス量
直腸温度	呼気ガス量
心拍数	炭酸ガス呼出量
呼吸ガスの状態	酸素消費量
供給圧力	最大吸気差圧
吸気ガス流量	最大呼気差圧
吸気ガス温度	P-V ループ
呼吸時の差圧	呼吸仕事量
呼気ガス流量	分時呼吸数
呼気ガス温度	
ガス組成	
(O ₂ , CO ₂ , Ar, N ₂ , He)	
環境条件	
温度	
チェンバー壁温度	
輻射温度	
湿度	

負荷要因として一括して考えることが可能である。これを適切な方法で客観的に評価できれば、負荷を軽減するための改造に寄与することが確実であり、またダイバー個人の微調整によって最適な状態にして使用する等のことが可能になると考えられる。

こうした計測を圧力下水中で行うことは困難であるが、潜水装備の実的な評価を行うためには極めて重要であり、評価手法の開発が必要と考える。著者らは、ダイバーの生体情報と呼吸器を装着して呼吸していることによる呼吸仕事量をリアルタイムで監視評価するとともに、事後に詳細な解析を行うことのできる呼吸モニタリング装置を開発した⁶⁾ (図18, 19)。

本装置は、海洋科学技術センターの潜水シミュレータで、水深500mまでの深度で、ウェット潜水もしくはドライ環境で、呼吸器を装備した状態で計測が可能である。計測と解析の項目を表6に示した。これによって、呼吸器のみならず、潜水衣や呼吸ホース、ウエイト等を完全装備した状態で、ダイバーが呼吸をするためにどれだけの呼吸仕事量を必要としているか、また個人装備品によって

どのような負荷を受け、疲労状況はどのようになっているのか、といった点を定量的に把握して評価することができる。

呼吸器の無人評価試験の時には、呼吸シミュレータで呼吸器を無人で作動させ、本装置で呼吸仕事量等を計測する。

7. おわりに

潜水呼吸器のうち、短時間の混合ガス潜水に用いるものについて概要をまとめるとともに、潜水作業における呼吸器の占める位置、呼吸器の評価基準そして潜水することがダイバーに与える負荷の計測等について述べた。

軽くてガスがたっぷり詰まった超高压ボンベ、呼吸抵抗の殆ど無いレギュレータ、柔らかくて暖かいウェットスーツ等の現在のスクーバ潜水用具を用いていると、潜水することに強い体力を必要とした時代は既に遠く、ダブルホース方式のレギュレータの大きな呼吸抵抗も今は昔なつかしく感じられるほどである。呼吸器の進歩はレジャーダイビングという巨大なマーケットを背景に大きく進歩してきた。またそれによって商業潜水用の機

器もめざましく進歩した。しかしながら、この進歩は解放式潜水呼吸器にのみ当てはまるといっても過言ではない。閉式スクーバ潜水器は、人体が消費する1時間当たり数十リットル(Nℓ)の酸素さえ準備すれば、ごく小型のポンペを備えた装置で水中を自由に長時間活動できるとの期待を担っていた。しかし、最初のもので出現して30年を経ても未だ同じ問題を抱えており、実用化とはほど遠い。酸素分圧の正確な制御と炭酸ガスの確実な除去と計測を、数リットル(Aℓ)のごく狭い呼吸空間で完結しなければならないことが、如何に困難であるかを示しているものであろう。技術的にかなり容易と考えられる半閉式呼吸器ですら、商業潜水での使用に耐えうるものが無い。著者らが実海域での300m潜水実験を行う過程においても、非常用の半閉式スクーバ潜水器でさまざまなトラブルを経験し、その殆どが炭酸ガス吸収剤に関連したものであった⁷⁾。著者らのグループは潜水に関しては一応の知識と技量を有すると自負しているが、それでも安全に使いこなすことは難しかった。近年、レジャーダイビングの分野でいくつかの半閉式スクーバ潜水器が出現しているが、解放式に比較して呼吸抵抗が大きいのと原理的に危険な要素があることを十分に踏まえ、解放式スクーバよりも熟練を要する装置であると認識して扱うことが重要である。

ところで、閉式呼吸器は水深50m以深の飽和潜水分野では当然の装置となっている。ただしスクーバ潜水器ではなく、他給気潜水器である。解放式他給気潜水器の呼気ガス調整装置を改造し、呼気を回収して排気ホースで船上に導く。船上で有害ガスを除去し、酸素及び炭酸ガス分析計でそれらの濃度を正確に計測して酸素濃度を調整し、再度圧縮してポンペに充填し、ダイバーに送気する。閉式とはいいながら、呼吸回路の容積は数百リットル(Aℓ)以上に及び、なおかつガスの精製、酸素添加、分析は大気圧の良好な環境条件のもとで行い、安全を期している。呼気ガスを安全に再利用するためには、このくらいの慎重さが必要な

のが実態である。

呼吸器は、理想的には、装着していることさえ忘れるほど小型軽量で呼吸抵抗が無く、なおかつ安全確実なことが必要である。30年前の潜水器が体力と冒険的要素を要していたという事実と、現在の潜水の実態とを比較すると、今後10年程度のうちには、閉式や半閉式スクーバが実用化し、また潜水呼吸器を装備していることすら意識せずに潜水できる時代がくるようになることを期待したい。筆者らはその実現に少しでも寄与できるよう、呼吸気試験装置や呼吸モニタリング装置を開発し、潜水呼吸器の適切な評価を行うだけでなく、呼吸器そして潜水装備品によるダイバーの疲労を軽減すべく、研究を進める所存である。

最後に、本稿をまとめるきっかけを賜った、埼玉医科大学後藤興四博士に深謝するとともに、幾多の呼吸器の評価と運用の場を与えて頂いた、海洋科学技術センター旧潜水技術部そして海域開発・利用研究部の多くの関係者のかたがた、そして研修室の各位にお礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) Flook V.: Basic Respiratory Physiology, Lung Physiology and Diver's Breathing Apparatus, Best Publishing Company, 1-16, 1992
- 2) U.S. Naval Sea Systems Command: U.S. Navy Diving Manual Vol.1 & 2., Best Publishing Company, U.S.A., 1993
- 3) U.S. Department of Commerce: Workshop on Enriched Air Nitrox Diving, NURP Research Report 89-1, 1989
- 4) U.S. Department of Commerce: NOAA Diving Manual, 1991
- 5) Norwegian Petroleum Directorate: Guideline for evaluation on breathing apparatus for use in manned underwater operations in the petroleum activities, Norway, 1993
- 6) 岡本峰雄: 呼吸モニタリング装置の開発, JAMSTECTR, 33, 65-76, 1996
- 7) 岡本峰雄他: 大循環式潜水呼吸装置について, JAMSTECTR, 21, 179-201, 1989