

【第40回総会シンポジウム1：日本の潜水の問題点について】

飽和潜水における問題点 —海上自衛隊の場合を中心に—

只野 豊

海上自衛隊潜水医学実験隊

Problems of saturation diving (mainly in Japan Maritime Self Defense Force)

Yutaka Tadano

1. はじめに

環境圧潜水の領域全体からみると、飽和潜水がカバーする範囲は決して狭いものではない。しかしながら、これに携わる人の数や行われる頻度からみれば明らかに限定された潜水法であり、また他のいかなる潜水法よりもはるかに業務的要素が強く、レジャーやスポーツとしての意味合いはほとんどない。

このように飽和潜水はいわばマイナーな潜水法であり、抱える問題も要員の確保や医学的検討の困難さなど、十分な対象がないことに起因するところが大きい。

しかしその一方で、飽和潜水の必要性は未だ損なわれる気配をみせず、むしろ応用範囲の拡大や実用性の向上が図られている¹⁾。本稿では、飽和潜水の問題点とこれを取りまく情勢について海上自衛隊の場合を中心に述べる。

2. 飽和潜水の現状

(1) 飽和潜水の概念

潜水などの高圧状態では環境ガスが体内へ溶け込み、その量は時間とともに増加するが、やがて飽和状態に達する。飽和点は主に圧力に応じて決まるが、どれだけ長く高圧環境にいてもこの飽和状態に合わせた同一の減圧手順(スケジュール)を踏めば対応は可能となる。飽和潜水はこれを100mをはるかに超えるような深度帯の潜水に適用するとともにその特徴をリスクの軽減などに利用した潜水方法である。

飽和潜水を考える場合、海底居住構想と同等の概念として捉えると理解しやすい。ダイバーは船の上などに設置された居住用タンク(艦上減圧室=DDC deck decompression chamber)の中で加圧され、ここで生活しながら、必要に応じて潜水作業を行う。タンク内には簡易ベッドやトイレ、シャワーなどが備わっており、食事も2重構造のハッチを介して出し入れされる。水中作業をする場合はPTC(personnel transfer capsule)と呼ばれる移動用カプセルに移乗して、圧力を保ったまま当該深度まで降りる。そしてカプセルの内外が同圧となったところでハッチを開放し水中に出て潜水(作業)を行う。このようにしてダイバーは居住用タンクで生活しながら必要に応じて海中との間を行き来し(こうした一連の移動は「エクスカーション」などと呼ばれる)、すべての目的が終了した時点でゆっくりと減圧する。

(2) 飽和潜水の特徴

主に運用面からみた場合の長所、短所を表1に示す。このうち短所については現実にそれぞれが様々なかたちで障壁ともなる。まず高圧閉鎖環境への暴露が長期間に及ぶことによる様々な健康への影響(心理ストレス、酸化ストレス、環境制御、突発的疾患)が懸念される²⁾³⁾。またシステムや設備の特殊性から、実施する際だけでなく維持にも相当な経費がかかるとともに継続的な要員養成が必要となる。とくに300mを超える飽和潜水の実施

表1 飽和潜水の特徴

長所	<ul style="list-style-type: none"> 1 潜水作業時間に制限がなく、減圧時間が一定である。 → 作業時間が長くなるほど潜水効率(時間効率)が増す。 2 加減圧を繰り返さずに長期間の作業を完了させることができる。 → 減圧症の危険性が低下する。 3 安定した状態で減圧を正確に制御できる。 4 深深度、長時間の潜水が可能である。
短所	<ul style="list-style-type: none"> 1 潜水スケジュール全体が長時間になる。 2 高度な装備と要員が必要となる。

には高圧神経症候群や環境維持などの特異性の高い問題への対処が求められる。

(3) 海上自衛隊における飽和潜水

飽和潜水による潜水作業は、ほぼ他の潜水法と同様に多様なニーズに対応可能であるが、現在海上自衛隊では潜水艦救難をその主要な目的としている。またヘリウム酸素混合ガスを用いているが、民間で実施されている飽和潜水よりも更に深度域を延ばし、450mまでを実用深度とする能力を保持している⁴⁾。(加減圧法の改良もあり、深度300~450mにおいてもかなりの有効作業が可能である。とくに巧緻作業については大気圧とほぼ同等の能力を発揮することができる。)

3. 問題点

飽和潜水にともなう問題について、とくに医学的要素との関連が強いものの例を以下に挙げる。(またその対処法についても一部言及する。)

(1) 潜水障害予防

飽和潜水の減圧速度は、潜水法の中でもっとも遅いものとなるが減圧症が生じる可能性はゼロではない。とくに水中作業時にはある程度の深度変化が生じるため、そのリスクは状況に応じて増減するが、こうした減圧症の発生については必ずしも十分な検証はなされていない。我々の施設においても水中作業時の深度幅が広い場合やD D C

内の飽和深度よりも浅い方向に遊泳する場合などについては実施例が少ない。

また、対処法としては症状が出ている深度より更に加圧することが原則となるため、実施する潜水深度と器機の限界との間にも十分な余裕を取っておく必要がある。

加圧時の問題としては高圧神経症候群がその代表である。とくに深度300mを超える潜水ではその予防に十分配慮した加圧法を用いなければ潜水作業が著しく制限されることになり、実用性を損なってしまう。水素を用いた飽和潜水の場合には、水素の持つ麻酔作用によるためかこの問題性も軽減しようとのことであるが²⁾、ヘリウム酸素による飽和潜水でも10mまでを空気加圧としたり加圧スケジュール自体を調整することでほぼ顕在化させずに加圧する方法が確立しており⁵⁾、現在は総加圧時間の短縮を含め、細部について改良中である。

(2) 環境制御

飽和潜水では通常の潜水よりはるかに高い環境圧となるが、酸素分圧を抑えるため百分比にするに極めて低濃度の酸素混合ガスを用いることとなる。ちなみに深度450mにおける酸素分圧0.5ATAは1%程度の酸素濃度となり、結果的によりレベルの高い精度管理が求められる。また酸素や二酸化炭素以外のガスも高圧、長時間の環境では問題が顕在化してくる。大気圧では問題とらなかった微量ガスは飽和潜水では微量ではなくなり(分圧が上昇するとともに蓄積が生じる)、更に長期間暴露の視点からも考えなければならない。現在既に支障をきたす可能性が示唆されているものとして一酸化炭素が挙げられるが、これについては触媒によって二酸化炭素に転化する対処法がほぼ確立しつつある。しかしながらその他の微量ガスについては現時点ではほとんど対応できていない。

環境ガスに加え、飽和潜水では温度制御が重要になる。高密度ガスであるとともに通常はヘリウム酸素混合ガスを使うため、対流熱伝達は大気圧

よりはるかに大きくなるが、その一方で蒸発熱伝達が小さくなる。このため僅かな環境温度変化が大きく体温調節に影響し、厳密な温度制御が維持できなくなれば深刻な体温異常に陥る。個人差もまた大きく反映されるので快適温度の設定はこの点でも容易ではない。(睡眠時には毛布の中は暑いが露出した手足は寒く、汗をかくとなかなか乾かないなど、睡眠障害や皮膚炎等の罹患にもつながる。)

(3) 飽和潜水中の疾患

飽和潜水の特徴を疫学的側面から検討すると、加圧関節痛、軽度の高圧神経症候群、毛嚢炎、外耳道炎等の既知のものを除くと、飽和潜水に特徴的と思われる疾病はみられなかった。また飽和潜水中に罹患する疾病の比率に関しても特異的な所見は得られていないものの、閉鎖環境での集団生活となることから感冒等の感染症が容易に蔓延する傾向がみられた⁶⁾。

無菌性骨壊死や高分圧酸素暴露による肺機能への影響などの長期的な問題については以前から懸念されており、北海油田に関連する商業ダイバーでは実際に記銘力低下、集中困難、関節痛、倦怠感及び抑うつ状態ならびに慢性閉塞性肺疾患(COPD)の有病率が高いことが指摘されている⁷⁾。これを受けて我々も飽和潜水ダイバーの記憶力等について確認調査を実施しているが、今までのところ飽和潜水の経験年数が10年以上の対象においても問題となる所見は得られていない。前述の商業ダイバーについては大部分が飽和潜水以上にバウンス潜水も経験していること、20%以上が複数回の減圧症罹患歴があり10%近くが潜水に関連した意識障害を起こしていることなど、一般的飽和潜水の長期的影響というよりもそれ以外の要素や内容の問題が大きく影響している可能性が考えられる。

飽和潜水の最大の弱点の一つはタンク内に長時間拘束せざるを得ないことであり、この点から考えると最も懸念されるのは特殊な疾患よりもむしろ

一般的な(突発的)事故や救急疾患であるともいえる。かりに大がかりな治療設備を要する重症患者が深度450mで発生した場合、減圧時間の大幅な短縮は不可能であるため、タンクから出すのに約20日の減圧日数を要する可能性がある。心筋梗塞や頭蓋内出血などが例として考えられるが、現在もっとも有効な対処法は事故ならびに疾患の予防に徹することである。例えば内科的疾患についてはできる限り事前にリスクの高い対象を除外することが重要となるため、我々はトレッドミル検査等を試験的に健診項目に追加するとともに生活習慣病予防を徹底させ、ダイバーの選抜基準としてこれらに関連する項目を重要視している。

このように優れた健康体の確保に努めることもさることながら、同時にタンク内で実施可能な医療行為の幅を広げる必要がある。我々の施設では短期間で終了する潜水を除いてはできる限り准看護師等の資格を持つ衛生員をダイバーとして加えるようにしており、その他のダイバーについても救急処置に関する教育を繰り返し実施している。また医療器具、医療器機に関しても高圧下での使用を前提としていないものが多いため、あくまで緊急避難的な選択肢の一つとして考慮する際の資料としてであるが、様々な検討をしておくことは大きな意義を持つものと考えられる⁸⁾。

(4) 要員の確保

海上自衛隊では飽和潜水の要員を約4ヶ月の課程教育で養成しているが、民間企業や飽和潜水の盛んな北欧・英国等でも何らかの養成コースを設定しているのが一般的である。

このように飽和潜水員の確保には時間がかかるため定期的に養成しておく必要があるが、海上自衛隊では慢性的な飽和潜水員不足の状態にあり、また候補者が確保されても身体適性で除かれる場合も少なくない。こうしたことからある程度の選別基準緩和も考慮せざるを得ない状況であり、その一環として我々の施設では飽和潜水におけるソフトコンタクトレンズの使用についても可能性を検

討している。しかしながら、前項でも述べたように生活習慣病など重篤な突発的障害を起こす可能性をできるだけ持たない、より健康な潜水員を確保する必要があるため、厳しい基準の維持と年齢層の上昇抑制もこれまで以上に求められている。

(5) コストの削減と装置の改良

運用面における飽和潜水の大きな短所としてこれに必要な経費が挙げられる。しかしながらコストの安易な削減は安全性を損なうことになりかねず、十分な配慮の下に進めなければならない。現在有望視されているとともに既に応用されている方法として、使用するヘリウムガスの再利用がある。ヘリウムガスは高価であり、この手段は大いに経費の削減につながる見込みがあるが、混入ガスの除去、酸素混合時の濃度の精度・安定性維持など完全には解決していない問題も少なくない。とくに深い深度の飽和潜水ではその削減効果もより大きくなるがこうした問題性もまた併行して大きくなるため、この手段の導入には更に慎重に対処する必要がある。

コストの削減と逆行せざるを得ない部分もあるが、装置の改良も同時に進めなければならない。例えば環境制御については今後対処が望まれるガスの種類が増える可能性がある。ダイバーホースやアンビリアルホース (DDCとPTCとを繋ぎ、ガスや温水を供給する)等、潜水作業に関わるものについては深深度においても高い耐久性、安定性が求められるとともに、潮流等へのより有効な対策も望まれている。また長時間の潜水作業を実施する場合には細部まで安定した温度環境が設定できるように温水服の改良を進める必要がある。

(6) その他

高圧環境下における居住では、様々な点で予想もしなかった特殊性が生じてくる。我々の経験している現象を挙げると、例えば鉛玉を不用意になめると、鉛玉の中の小さな空洞が吸い付いてきて口腔内が傷つきやすく、また慌てたり話したりしながら食事を取ると、環境ガス密度が高いため口

の中の食物を吸い込んでしまいやすい。咳やくしゃみをするときにも、急激に強く息みすぎると胸郭に衝撃を受けるという。

DDC内コミュニケーションにも支障が出てくる。圧力やヘリウム混合ガスを使用している影響で音声が高音域にシフトすることに加え、少し距離が離れるだけで大きく音量が減衰するため、ジュエチャーや雰囲気や相手の意図を汲まなければならない。DDCの中と外との交話には音声の修正機を利用しているため不便はかなり軽減されているが、今後ダイバー間の日常のコミュニケーションにもこうした技術の活用を考慮する必要がある。

飽和潜水が長期に及ぶ場合には、DDC内での個々の生活にも配慮が必要となる。狭い閉所での集団生活となるため、十分な娯楽を確保するとともに規則正しい生活を維持し、適宜軽いストレッチ運動などによって心身の健康を保つことが必要である。

4. おわりに

飽和潜水そのものはさほど新しい技術ではなく、我々の施設においても既に20年を経過している。また冒頭でも述べたようにその目的はもっぱら業務的なものであり、有効な代替技術が開発されれば飽和潜水の必要性は否応なく低下せざるを得ないであろう。しかしながら、例えば同じ深海で作業する際の技術として大気圧潜水器や無人潜水機といったものがあるが、こうした遠隔操作やロボット技術の進歩は著しいとはいえ、宇宙での有人船外作業にもみられるようにとくに緻密性や多様性などの点で人間が直接手で作業することには未だに到底かなわないのが現状である。

このように飽和潜水の出番は無くなるかのようでまだその時期がみえない状況であり、少なくともその見通しが明らかになるまでは、より実用性の高い技術として維持向上させる必要があるものと考えられる。

なお、本稿はすべて筆者個人の意見であり、海上自衛隊ならびに潜水医学実験隊の公式見解を示すもの

ではない。

参考文献

- 1) Captain Mark Helmkamp: Topside ; Red Diver..., FACEPLATE, 9 (1): p23-24, 2005
- 2) 池田知純, 潜水の世界-人はどこまで潜れるか, 東京;大修館書店, 2002
- 3) 藤井茂範, 中林和彦, 小此木國明, 鷹合喜孝, 佐々木良紀, 大塚八左右 : 深深度飽和潜水における尿中ビリルビン酸化物(バイオピリン)の変化. 日本高気圧環境医学会雑誌, 38(3): 183, 2003.
- 4) 小此木國明:440m(エクスカーシヨン450m)飽和潜水に関する研究. 潜水医学実験隊報告 12 : 19-32,1996
- 5) 潜水教範(飽和潜水)第377号, 海上幕僚監部, 1997
- 6) 岡本武, 塩見達志, 杉浦崇夫, 島崎英幸, 只野豊, 大塚八左右: 飽和潜水中に生じた疾患-シミュレーター訓練での集計結果. 日本高気圧環境医学会雑誌, 38(3):184, 2003
- 7) Yrkesmedisinsk avdeling Haukeland universitetssykehus : Helsestatus hos tidligere nord-sjodykkere. Rapport til Arbeids- og sosialdepartementet Bergen:2004
(<http://www.helse-bergen.no/avd/yrkesmed/forskning/rapporter/Yrkesmedisin.htm>)
- 8) 杉浦崇夫, 松尾洋孝, 磯井直明, 岡本武, 藤井茂範, 小此木國明, 只野豊, 西見幸英, 和田孝次郎, 北村勉: 高気圧下で使用可能な医療機器の検討. 日本高気圧環境医学会雑誌, 37(3): 162, 2002