

潜水作業の安全と作業効率向上について

芝山 正治

Diving safety and improving work efficiency

Masaharu SHIBAYAMA

I はじめに

水深30mを境として、それ以浅と以深では潜水の安全に関する対処の仕方は全く異なってくるといっても過言ではない。

空気を用いた SCUBA (スクーバ = Self-contained Underwater Breathing Apparatus = 自給器式水中呼吸装置) 潜水の安全深度を水深30mまでとする考え方は一般的で、窒素酔いの危険の生じる水深30m以深¹⁾³⁾ をレスキュー・ロープやアンビカル・ホースを有さないスクーバ潜水で作業することは、好ましいことではないばかりか、空気の消費量が大きいため緊急時に残された潜水時間に制限が加わり、パニックを起こす危険も大きい²⁾⁴⁾。

潜水医学の研究が最も進んでいるといわれる U. S. Navy⁵⁾⁶⁾ においても主たる潜水活動は潜水艦の救助活動などを想定し、艦からの脱出は水深 100ft(30m) をその限度としているので、100ft 以浅の潜水作業実績についてはめざましいものがあり、安全潜水に対する対応も十分であるが、水深 100ft を超えるとたとえ U. S. Navy のダイビング・マニュアル⁵⁾⁸⁾ にしたがった標準減圧を行っても、減圧症の発症は急増するといわれている。

すなわち、水深30mまでの潜水に関しては、かなり高いレベルでその安全が確認されているが、30mを超えると安全潜水に関する信頼性が下がり、この対策はそれぞれの潜水団体が試行錯誤しながら、独自の解決規範を付加させているのが現状である。

この水深30mを超える潜水作業の安全管理を行う機会が与えられ、ひとりの減圧症患者や潜水事故を発生させ

ないのみならず、潜水後遺症と呼ばれる無菌性骨壊死 (Aseptic Bone Necrosis)²⁾ などの後遺障害も生じることなく、安全な潜水作業が完遂できたのでその結果を報告する。ここで報告する内容は、長時間潜水作業 (30~90分、バースダイブ方式) を行った潜水作業安全管理システムのみにとどめ、短時間潜水作業 (30分未満) システムははぶかせて頂いた。

II 方法

1. 潜水の種類並びに潜水・減圧方法

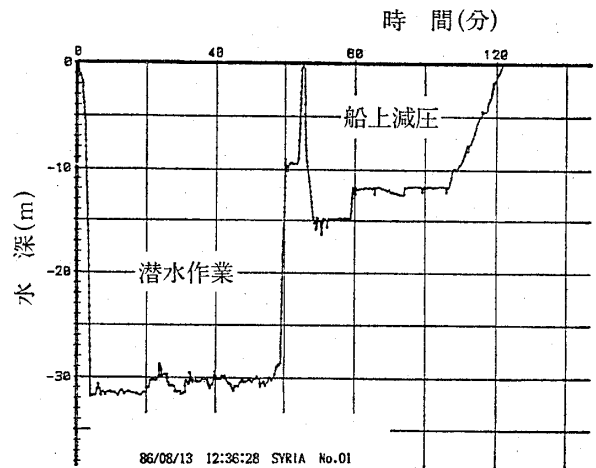


図1 Bounce Dive プロフィールの1例

ダイバーは水深32m下で約60分間の作業をした後、水深9mで第1段の水中減圧を行ない、その後、オープンベルで一気に海面へ引き上げて、直ちに再圧室にて水深15m相当まで加圧され、そこで10分間の保圧後、水深12m相当圧下で26分間の保圧をし、以後20分かけて大気圧へ復帰減圧した状況が知れる。これらの記録は DDR (ダイビング・データ・レコーダ) によって連続記録された。

表1 長時間潜水用の減圧表 (Bounce dive Decompression Table)
《水深35m》

潜水時間 (分)	第1停止水深 までの時間 (分)	水中減圧 (分)		船上酸素減圧時間 (分)			減圧合計時間 (分;秒) Total
		12m	9m	15m	12m	0m	
18	3;28	5		20			31;40
30		3		10	9	20	51;52
40		3		10	16	20	58;52
50		3		10	24	30	76;52
60	3;04	2	3	10	32	30	86;52
70		2	4	10	39	30	94;52
80		2	5	10	46	40	112;52
90		4	8	10	51	40	122;52

- 1) 第1停止水深までの浮上速度は、7.5m/min とする。
- 2) 水中減圧終了後、海面までに要する時間は1分とし、海面へ浮上後、船上の再圧室にダイバーを吸収するまでに要する時間 (Bounce interbal) は、2分以内、最大でも3分以内とする。
- 3) 15mまでの加圧時間は、2分以内、最大でも3分以内とする。
- 4) 船上減圧で12mより0mまでの減圧時間は、12分間の直線減圧 (減圧比1m/min) とする。

潜水作業はシリア、タルトス沖の海底に沈む沈船に搭載されているアンフォールについて、考古学的に調査し、これらを回収する目的のために所定の潜水を行なう。潜水作業の内容は、観察、調査、計測、位置確認、回収である。潜水深度は水深33m±2mの範囲内が大部分で、ダイバーは作業に応じて微妙に昇降を繰り返している (図1)。

ダイバーは日本人ダイバーが13名であり、これにシリア海軍よりサポートダイバーの協力を得た。

ダイバーは無減圧潜水あるいは30分間以内の潜水作業を課されているため、潜水器はスクーバを用い、減圧を要するような長時間潜水が想定される場合には、減圧時間までカバーできるWタンク (2本のタンク) か減圧地点で減圧用スクーバとして準備する方式を用いた。更に、バンス・ダイブ (誇上減圧法) を必要とするような長時間潜水 (表1) にはフーカー式の潜水方式によった。

潜水方式は、表1に示すとおり、水深35mまでの減圧表を用いて行った。

2. バンス・ダイブ (Bounce dive, 長時間潜水) について

この方法は水深32mに30分以上滞在した場合の船上減圧法の一つであり、最大90分以内の潜水作業が可能である。

潜水作業後、12mまたは9mまで浮上し、第1減圧停止点ないし第2停止点で減圧停止を行なった後、オープン・ベルにてできるだけ早く浮上し、呼吸器を外し、船上再圧室へ入り船上減圧法を実施する。これに要する時間は5分以内とする。

この船上減圧法のシステムによって、安全な長時間作業を可能としている。

しかし、このシステムは当シリア沖潜水作業のように海外でのみ使用できるもので、日本国内では未だ、規則上使用できないことになっている。

1) バンス・ダイブ・テーブル使用の要領

- ① 潜水終了後、第1減圧点までの浮上速度は、7.5m/min とする。
- ② 水中減圧終了より水面までは1分で浮上し (この間、エア・エンボリズムに注意しながら、クレーンを使用して引き上げ、ダイバーの労作を最小にする)、浮上1分以内に再圧室に入る。
- ③ テンダーが副室で介助しながら、直ちに加圧する。
- ④ バンス・ダイバーはできるだけ動かない。
- ⑤ テンダーがマスク、スーツの脱装、身体の乾燥を介助する。
- ⑥ 主室にて当初予定されている圧力 (15m) まで加圧されたら、直ちに酸素吸入を開始する。

- ⑦ 決められた時間（10分）の酸素吸入を行ない、第2減圧点まで減圧する。
- ⑧ 第2減圧（12m）点に減圧された後、5分の空気吸入を開始する。
- ⑨ 2回目の酸素吸入を開始してから5分後、異常がなければテンダーは副室へ移り減圧して、入室してよい。
- ⑩ 水深12m相当圧力下で決められた時間の酸素吸入を行うとき、20分毎に5分間のエアブレイクを挿入する。但し、5分の空気吸入時間は、減圧時間に含めない。
- ⑪ 12mで所定の酸素吸入が終了した後は、0m（大気圧）までの減圧時間は直線減圧とし、12分間で減圧する。その時の酸素吸入は、連続吸入とする。
- ⑫ 0mに減圧終了後、5分の空気吸入後、再圧室内での所定時間の酸素吸入を大気圧下で行なう。
- ⑬ 0mでの酸素吸入は連続吸入とする。
- ⑭ この減圧表を使用した後は、12時間以内の潜水を禁止する。

2) バンス・テーブル使用の注意点

- ① フーカー潜水器を使用して、船上とのコミュニケーションが確保される通信システムを設けなければならない。
- ② 浮上中の水中における第1段減圧終了より、船上の再圧室にダイバーを収容するためには、オープンベルを用いて浮上を司令室でコントロールする。

3. 水中モニタリングとDDRによる記録の方法

作業を安全に遂行するためには水中における労作量などの程度かを把握する必要がある。

このために生体監視モニタリングとして、ホルター心電計を水中で使用できるように改良し、ダイバーに装着

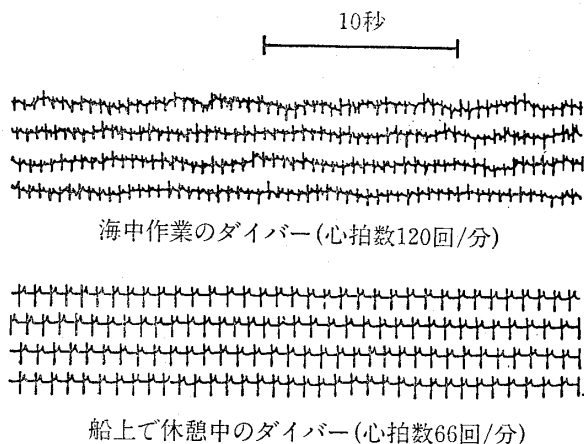


図2 ホルダー心電図の記録

連続的に心電図が記録されコンピューター解析され、異常の有無がチェックされると共に本研究では主として心拍数より、その時の労作負荷量が計算された。

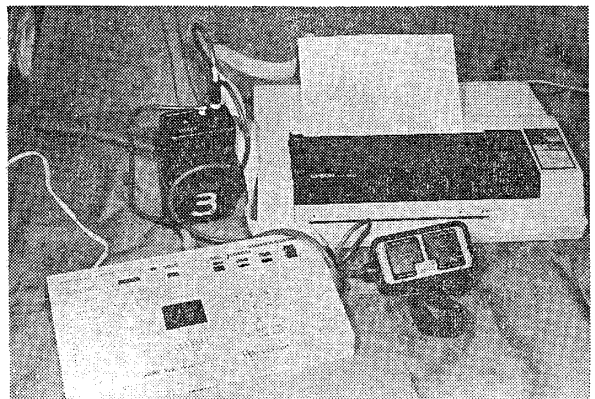


図3 ダイビング・データ・レコーダ

DDR はダイバーの水中における深度差が60m以上の変動を生じた場合に記録し、時間経過に応じて、深度とその時の水温を連続的に表示する。これによって、ダイバーの水中作業中のダイブ・プロフィールを正確に把握することが出来た。

させて、潜水中の全経過を通して心電図を記録した（図2）。これは、後日、コンピューター解析にて、潜水中の異常の有無をみると共に、シリア派遣前に、全てのダイバーの運動能について、オールアウトテスト（最大運動の生理機能テスト）が施行されており、既知のダイバーの最大酸素摂取量などの心肺機能から、水中における労作量が推計された。

また、同時にダイビング・データ・レコーダ（DDR）により、ダイバーの作業水深を克明に記録するため、アドニス・ダイビング・レコーダが利用された（図3）。

これらのモニタリング・システムは代表的な潜水作業において計測され、それによって本調査作業量を推定することとした。

4. ダイバーの衛生管理方法

潜水作業にかかわらず、同一労働に長期に渡って従事していると慣れが加わり、不安全行動を犯し勝ちになる。また、肉体的にも精神心理学的にも蓄積疲労を生じ、これも事故災害や疾病に至る危険を生じる²⁾⁶⁾。

これらの予防と潜水の安全意識、産業疲労の対策として、毎日、定刻にダイバーの「自覚症状しらべ」を行った¹⁰⁾。

これによって、ダイバーの全身的自覚症状、作業意志の減弱などの精神症状、自律系調節異常や不安などを観察し、シリア沖潜水作業が、ダイバーにどのような負荷を生じるのか、あるいはその場合の治療方法などを知る手段とした。

これらは全作業終了後、集計されてコホート解析を始めとした、いくつかの決められた手法で検討された。

Ⅲ 結 果

潜水作業は1986年8月13日から10月5日まで行なわれた。潜水作業に従事した13名のダイバーの総潜水作業時間は27,235分、減圧に要した時間は、23,280分であり、潜水時間の合計は50,515分(841時間55分)であった。8月は作業準備に追われ15日間の潜水作業にとどまり、10月は台風の接近などにより2日間の潜水作業となり、主たる作業は9月に27日間行なわれた。本作業における潜水作業日数の合計は44日間であった。13名のダイバーの中、最も潜水時間の短かった者で2,589分であり、長かった者で3,898分であった。潜水作業時間が3,000分未満のダイバーは2名のみで、全員ほぼ同じような潜水作業に従事していたことが知られた。

1日における潜水作業回数は、1回ないし、2回の作業が多く、短時間潜水の潜水計画が最もよく利用された。全経過を通して減圧症は1例も発症せず、潜水事故も生じなかった。

減圧表はホールデンの定律による日本の労働省標準減圧表¹⁾や米国海軍減圧表⁵⁾⁶⁾より、減圧時間の長い、フランスの労働省による減圧表⁷⁾¹¹⁾を採用した。さらに安全性を高める目的で船上における酸素吸入をその日の潜水終了時に実施するシステムをとった。わが国においては潜水後の酸素吸入を認めていないが、欧米では減圧症予防対策として日常、一般的に用いられている方法である。

表2 長時間潜水(Bounce Dive)を実施した回数(水深32m)

年月日	Dive 開始時間 (時:分)	潜水時間 (分)	ダイバー 氏名
1986.8.13.	12:37	59	吉崎, 酒井
8.14.	15:22	60	吉崎, 酒井
8.21,	12:06	60	吉崎, 酒井
9.13.	09:28	57	吉崎, 酒井
9.25.	16:06	69	吉崎, 酒井

バンス・ダイブによる潜水作業は水深32mにて59分から69分の作業時間として行なわれた(表2)。常に2名のダイバーが1組で行動し、適時サポート・ダイバーが監視すると共に、浮上時には船上との交信により、司令室の指示にしたがい、まず第1減圧停止点の9mまで自力で行き、そこで、オープン・ベルに乗り、待機しているサポートダイバーの介助でウェットスーツを脱装したが

ら、一気に船上に引き上げる⁵⁾⁶⁾。水中で脱装する理由は水温が高い(28.6°C)ので支障がなく、時間の節約と再圧室の乾燥を維持する為である。

第1減圧停止点から再圧室に收容し、加圧完了する(水深15m相当圧力)までの時間は、すべて5分以内に行なわれる。目的の水深15m相当圧力へ加圧されるとただちに酸素吸入が開始され、ダイバーは空調の整った再圧タンク内で快適に減圧された。この方式により減圧症の発症の危険も皆無であった。

Ⅳ 考 察

日本においてバンス・ダイブを行なうことは現行法規下では規制外であり、水中減圧が主流である¹⁾。しかし、水中減圧は天候や海象の変化に対応することが難しく、冷水環境や減圧中のコミュニケーションなどの問題点が多く、さらに波高の変化は正しい水深を維持できなくさせるなどの困難な点が多い。

欧米では、これに代わる船上減圧が一般的で、潜水作業の中の40%は船上減圧であり、水中減圧は20%以下といわれている。特に本作業のように水深30mを超えるような深い水深では、減圧は避けられず、全ての潜水を無減圧で行なうことは不可能である。

本作業においても潜水時間の合計が50,515分であったがその中の23,280分は減圧を要し、潜水効率¹²⁾は53.9%となっていた。日本の標準減圧表¹⁾にしたがった潜水方法を採用したとすると潜水効率は65%に上昇するが、このように潜水効率を低下させた理由は一例は減圧症を発症させないために、無減圧潜水でも減圧時間をとらせており、かつ、フランス労働省のより長い減圧時間を要する減圧表を用いたことによる¹³⁾。

本作業においても水中減圧が著しく長くなるような長時間潜水はバンス・ダイブによる船上減圧法を採用したので、実質的にはダイバーは水中減圧の苦痛がそれほど大きくならなかった。

本潜水作業においては序文でも示したように各種の安全対策がほどこされたため、ごく安全な潜水が保証されたといえる。

バンス・ダイブの減圧表は海象の変化が生じても第1段階の水中減圧は9m以深であって、影響を受けにくく、かつ、浮上はダイビングベルに乗って船上操作されるので、ダイバーの負担はなく、かつ、確実に船上で減圧できるので、多少の荒天でも潜水作業は可能である。

日本人によって始めて行なわれたといってもよいバンス・ダイブはこれからのかなり深い潜水作業において、

有用な手段であることが証明されたものといえ、その意義は大きい。

バンス・ダイブが最もよく利用される潜水は水深 200 m までの比較的深い深度の潜水で、特にヘリウムを用いるベル・バンスにおいてその効力を発揮することができる。しかし、この方法を水深 50 m 以浅の空気による潜水に応用することは安全潜水の上からごく有用な手段として認識されている。そして、特に本潜水作業における水中計測、保存状況の観察や調査といった、潜水時間に拘束されないで十分時間を費やす必要のある作業において、かつ、減圧を気にしないで潜水業務に打ち込める本方法は有力で安全な潜水を保証してくれる。

バンス・ダイブの実行回数は少なかったが、通常の無減圧潜水業務においてバンス・ダイブにいつも切り替えることができるという潜水システム体系はほかの潜水手段に対してもゆとりを生じるので長期にわたる潜水作業の安全衛生の立場からもバンス・ダイブの潜水手段をこのシリア沖遺跡発掘作業に採用したことはより成功裡に潜水作業を進展させることができた要因の一つといっても過言ではあるまい。

実際の潜水作業では短時間潜水を最もよく利用した。そして、たとえ無減圧潜水であったとしても、必ずその日の最終潜水作業終了後には減圧停止を実行させ、かつ、浮上後直ちに船上にて酸素吸入を課した。このように安全潜水に対して、二重、三重の対策を施した理由は、序文においても記述したごとく、この国際的な潜水作業においては、通常の潜水作業で最も問題にされる、減圧症の危険は有り得てはならず、それを 100% 予防することは至上命令であるばかりでなく、更に慢性の減圧症ともいわれる無菌性骨壊死 (Aseptic Bone Necrosis) の予防対策をも考慮した結果である。

この遺跡発掘にかかわる潜水作業は考古学的な調査研究がスムーズに行われるための単なる手段ではなく、安全潜水とは如何になすべきかのモデル潜水でもあらなければならない。

水中考古学に伴う潜水作業では、必ずしも潜水技術に秀でた職業ダイバーばかりが潜水作業をするとは限らず、潜水をあまり得意としない考古学者にも潜水をさせなければならない。今回のケースは潜水に習熟した考古学の研究者がダイバーとなったので問題はなかったが、潜水の得意でない研究者が調査のために潜水しなければならない場合であっても、その安全を保証しなければならない。このような状況が将来生じることも想定した上で、この潜水作業の安全対策が立案された。従って、作業に従事されたダイバーの諸兄にとっては、余りにも仰

仰しい安全対策と映ったかも知れない。そして、彼らは、自分がこのような立場の安全潜水のモルモットと感じたかも知れないが、黙々と決められたこの方法に従ってくれて、かつ、毎日の疲労度調べに対しても協力してくれた。特に浮上した後は、ダイバーにとってしなければならない船上の作業も山積されているので、減圧症に対して安全であると分かりきった、無減圧潜水における水中減圧や、船上での酸素吸入に対して、ベテラン・ダイバーである彼らたちは普段やりつけないだけに時間の浪費と映ったかも知れない。また労働衛生管理をも考慮した、毎日のアンケート調査に対してもうんざりしたかも知れない。しかし、これらの一つ一つの行動は、将来のビギナーといってもよい、研究者ダイバーの安全潜水を確保する上で欠かすことのできない管理手段でもある。

本来、潜水作業とはダイバー個人が一人で潜水計画から減圧管理は勿論の事、機械の保守管理まですることになっており、潜水とは孤独なものであった。しかし、バンス・ダイブで代表される、近代的な潜水計画及び手段ではシステム潜水と呼ばれ、団体で協力して、ハードとソフトとを有機的に運用しなければならない。そのためには個人の意思は尊重されにくく、プロジェクト・リーダーの指揮系統の基に行動をとらざるを得ず、このような対応には、ダイバーは本来慣れてはいない。

従って、たいていのシステム潜水において作業が暗礁に乗り上げたり、潜水事故が生じたりする場合には、予測される医学的な安全対策の欠落ではなく、不測の事態が生じる心理学的な意思の疎通を欠くことが多い。そしてそれは多くの場合、リーダーとの衝突である。今回の潜水作業形態では、リーダーは考古学者であり、潜水作業の安全管理には不相当であるといえたかも知れない。しかし、ごく幸運にもこのリーダーのパーソナリティーはダイバーに同化したために、ダイバーとの間に極めて友好的な信頼関係が生まれ、この事が本潜水作業を成功裡に導いた最大の理由にあげることができたといっても過言ではない。

水中の活動を船上でコントロールするのであるから、潜水作業では陸上での作業とは違った安全性への配慮が必要であり、管理潜水の難しさともどかしさが生じてくる。これを克服するには、心理要因としての人間のキャラクターが必要で、宇宙飛行士でありかつ、海中居住計画シーラブⅡのアクアノートでもあった、カーペンター中佐は「海は宇宙より難解であった」と述べ、チームワークの大切さを強調していた。

本潜水作業においては、この問題を見事にクリアした

ものと評価することができた。それは、このプロジェクトに参加された全ての人の一致団結した協力体制の結果にほかならない。

V まとめ

シリア沖遺跡発掘に伴う潜水作業において極めて安全意識の高い潜水作業が実践され、かつ極めて優れたリーダーとダイバーに恵まれ、また、それに対する万全なサポート体制の下で、減圧症をはじめとしたあらゆる潜水事故を1例も発症させずに初期の目的を達成できた。

安全潜水に対しては格別の配慮を払った。

その主な項目は配下の通りであった。

1. 無減圧潜水範囲内でも減圧停止を行った。
2. 減圧表はフランス労働省のテーブルを用いた。
3. 潜水作業後には船上にて酸素吸入を行った。
4. 長時間潜水に備えて、バンス・ダイブ・システムを用意した。

水深30mを越える空気潜水において、これらの安全対策のシステムと潜水計画が立案され、かつそれが実行されたことはわが国においては初めての試みであり、このような有機的な安全対策の組合せにより、考古学研究者をはじめとして、一般の人も無減圧潜水範囲を逸脱した長時間潜水でさえ、それが必要であるのならば安全に行えることが可能となった。

システムとしての潜水作業を安全に行う上でチーム・ワークの重要性が改めて認識され、今回の調査作業においては、それが極めてうまく行えた。

文 献

- 1) 労働省：潜水士テキスト，中央労働災害防止協会，東京，1986
- 2) 眞野喜洋，芝山正治：安全潜水のすすめ，全日本潜水連盟，東京，1987
- 3) 眞野喜洋，芝山正治ほか：安全と健康のダイビング科学，朝倉書店，東京，1992
- 4) 芝山正治，眞野喜洋ほか：潜水に伴う労作強度の検討，日高圧医誌，21(3)：139-145，1986
- 5) Department of the Navy：U. S. Navy Diving Manual, Washington, D. C. 1985
- 6) Department of the Navy，関邦博，眞野喜洋ほか訳：U. S. Navy ダイビング・マニュアル，朝倉書店，東京，1992
- 7) 眞野喜洋：芝山正治ほか：潜水医学，朝倉書店，東京，1992
- 8) 眞野喜洋：高気圧障害とその対策，海中開発技術協会，東京，1974
- 9) 関邦博，眞野喜洋：ダイバーとパニック，井上書店，東京，1988
- 10) 吉竹 博：産業疲労—自覚症状からのアプローチ，労働科学研究所，38-85，東京，1981
- 11) Department of Labor：Standard decompression table in France, J. Officiel, du 29, 157-158, 3935-3976, Paris, 1974