

水中遺跡（沈没船）潜水調査における安全対策の検討

鉄 多加志^{1)*}・小野 林太郎²⁾・木村 淳²⁾・坂上 憲光³⁾・
中西 裕見子⁴⁾・片桐 千亜紀⁵⁾

Examination of safety measures at remains (Submergence ships) of water

Takashi Tetsu¹⁾, Rintaro Ono²⁾, Jun Kimura²⁾, Norimitsu Sakagami³⁾
Yumiko Nakanishi⁴⁾, and Chiaki Katagiri⁵⁾

Abstract

This paper examines the diving safety of underwater archaeological survey and work with consideration on developing an appropriate system for diving operations based on the understanding of various risks to SCUBA divers. The underwater archaeological survey was lately conducted by a joint team of many divers—some conducted nitrox diving while others used tanks filled with normal air. The different method of the diving will be comparatively analyzed and pursuit the appropriate practice of using mixed gas for archaeological diving at a depth of less than 20 m.

1) 東海大学海洋学部海洋フロンティア教育センター 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Marine Studies Frontier Education Center, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

2) 東海大学海洋学部海洋文明学科 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Department of Maritime Civilizations, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

3) 東海大学海洋学部航海工学科海洋機械工学専攻 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Course of Ocean Engineering, Department of Navigation and Ocean Engineering, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan

4) 大阪府教育委員会事務局文化財保護課文化財企画グループ 〒559-8555 大阪市住之江区南港北 1-14-16

Cultural Property Preservation Division Osaka Prefectural Board of Education, 1-14-16 Nanko-kita, Suminoe, Osaka 559-8555, Japan

5) 沖縄県立博物館・美術館 〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち 3-1-1

Okinawa Prefectural Museum & Art Museum, Omoromachi 3-1-1, Naha, Okinawa 900-0006, Japan

* Corresponding author : Takashi TETSU (tt958104@tsc.u-tokai.ac.jp)

(2016年2月1日受付／2016年2月10日受理)

緒 言

これまで、水中遺跡の一般公開を目指した「海底遺跡ミュージアム構想」が国内の研究者らによって推進されてきた(野上, 2007)。このうち、東海大学プロジェクト研究は、沖縄県的水中文化遺産を、ユネスコの指摘する観光や教育を目的とした、第3の海洋資源として認識し、その新たな保全と観光への利用、さらには教育資源としての活用を目的とした、発展的の海底遺跡ミュージアム構想の実現を目指すものである(Ono, 2016)。

2015年度における今回のプロジェクトでは、遺跡調査に関しては、前半期間は総合地球環境学研究所の研究プロジェクトを優先し、後半期間は東海大学プロジェクト研究を主体として、屋良部沖海底遺跡で確認された壺集積状況及び四爪鉄錨の継続的な実測を行った。一方、11月5日に行った水中文化遺産見学会のイベントに関しては東海大学プロジェクト研究、11月7日に行った水中ロボットを利用した環境教室については、総合地球環境学研究所の研究プロジェクトを主体として実施した。

以上の状況を踏まえ、本研究では今回のような、水深が20mを超える海域で行われる水中遺跡の調査において、しかも複数の組織のダイバーが関係する潜水時の安全管理法検討の一環として①確認書の作成②潜水管理表の記載③従来の圧縮空気使用時とEANガス使用時の各潜水状況、筆者は先行研究として浅海域での長時間潜水におけるEANガス使用の研究をおこなっているため(鉄, 2013)、経済的な側面についても配慮して、水中遺跡調査潜水におけるEANガス使用についての検討を行った。

方 法

本研究は、東海大学プロジェクト研究「沖縄の水中文化遺産と海底遺跡ミュージアム総合プロジェクト」(代表:小野林太郎)、および大学共同利用機関法人の総合地球環境学研究所(京都市)の研究プロジェクト「東南アジア沿岸域におけるエリアケイパビリティの向上」(代表:石川智士博士)の一環として実施された調査の中で、特に潜水を主体とした水中遺跡調査に関わる安全を、どのように確保するのかを検討するものである。

1. 参加前条件の検討

今回の水中遺跡調査の参加には、特に条件等の規定がなかったため、共同執筆者である木村とともに、内部規定の作成と参加に際して記載を義務付けた「確認書」を作成した。

内部規定:

- ・潜水士免許の取得
- ・健康診断の受診(異常なしの確認)
- ・ダイビング認定講習の受講
- ・任意のダイビング指導団体が認定するアドバンスオープンウォーター取得後20本以上の潜水経験
- ・上記の内でも1つでも欠格がある場合は、ダイビングインストラクターが随行する
- ・バディ(相棒)潜水
- ・確認書の記載

この確認書については、この調査に参加した学生の見学ダイバーにも記載を義務付けた。

2. 潜水計画の作成

次に、潜水調査や作業を行う場合、減圧症を回避するため、一般的には潜水作業マニュアル「Ver.1」(一般社団法人日本潜水協会, 2015)に記載されている標準空気減圧表(今回はNSK-N1-24)を用いて潜水時間が決められ、厳守される。本水中遺跡の潜水調査時間は、この表を参照して決定した。

一般には、ほとんど目にする機会の少ない表であるため、ここで説明を加えたい。

これらの表(NSK-N1-24およびR1, R2)に示される潜水時間は、潜水時の呼吸によって体内に取り込まれる窒素の総量、およびその窒素が大気圧下に戻っても問題のないレベルであるか、あるいは窒素の排出される時間から決められたもので、その状態で水面まで浮上しても、減圧症などの高気圧障害に罹患することなく、安全が確保される潜水時間である。

潜水によって取り込まれる窒素量は、水深および潜水時間から算出されている。ただしこの場合、呼吸用の気体は圧縮空気であり、浮上速度は法令によって毎分10m以下と定められている。

NSK-N1-24										Standard Air Decompression Table		
Depth (m)	DiveTime (min)	Decompression Stops (min) at Different Depths (m)								Total Ascent (min)	Repetitive Group/sign (RG)	First Dive UPTD
		24	21	18	15	12	9	6	3			
10	-	-	-	-	-	-	-	-	3	A	5	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	3	C	8	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	3	D	10	
25	-	-	-	-	-	-	-	-	3	E	13	
30	-	-	-	-	-	-	-	3	6	F	15	
40	-	-	-	-	-	-	-	9	12	G	20	
50	-	-	-	-	-	-	3	11	17	H	25	
55	-	-	-	-	-	-	4	15	22	I	28	
60	-	-	-	-	-	-	5	21	29	J	30	
65	-	-	-	-	-	-	6	25	34	J	33	
70	-	-	-	-	-	-	6	30	39	K	36	
75	-	-	-	-	-	-	7	34	44	L	38	
80	-	-	-	-	-	-	8	37	48	M	41	
85	-	-	-	-	-	-	10	42	55		43	
90	-	-	-	-	-	-	12	46	61		46	
95	-	-	-	-	-	-	14	50	67		48	
100	-	-	-	-	-	-	15	55	73		51	
110	-	-	-	-	-	1	20	64	88	Dive Limit	56	
120	-	-	-	-	-	2	23	72	100		61	
130	-	-	-	-	-	3	27	82	115		66	
140	-	-	-	-	-	4	31	93	131		71	
150	-	-	-	-	-	6	36	104	149		76	
160	-	-	-	-	-	8	39	114	164		81	

1) If Repetitive Group (RG) falls under the dive limit, allow for a minimum surface interval of 14 hours before next diving, equivalent to the first dive.
 2) UPTD (Unit Pulmonary Toxicity Dose) values on Table is applicable only for the first dive, not for repetitive dives.

Table1 Japanese decompression table NSK-N1-24

例として、これらの表に記載されている水深(24 m)で25分の潜水を1回行う場合を見てみる。

無減圧潜水を前提としているので、浮上停止時間はなく、浮上時間の合計は、切り上げ表記されているので3分となる。その時の繰り返し潜水グループ記号はEとなる。

次に、NSK-R1の繰り返し潜水表の繰り返しグループ記号Eの欄を見て右に辿る。各待機時間(水面休息時間)は、2時間以上を目安にしているので、2:00→2:59の欄を下に辿り、E欄との交点である1.3を導き出す。この表は、2.0を上限とした、体内の窒素量を係数化したもので、2時間の待機時間によって、体内の窒素量が1.9から1.3に下がったことが分かる。

更に、導き出された1.3の数値の使い方であるが、下記の無減圧潜水繰り返し潜水表(NSK-R2)にある深度と数値の交点、その水深における減圧を必要としない潜水時間になる。例えば、同じ水深に繰り返し潜る場合は、16分が無減圧潜水の範囲内となる。

この16分を超えて潜水を行う場合は、減圧停止を指定された水深で、安全なレベルまで窒素を排出してから水面に戻ることになる。

NSK-R1										Repetitive Group Table										
Repetitive Factors and Surface Interval Table																				
Repetitive Group (RG)	Repetitive Factors (RF) for Surface Interval (SI) in hr:min																			
	0:00	0:15	0:30	1:00	1:30	2:00	3:00	4:00	6:00	9:00	12:00	14:00								
letters	0014	0029	0059	0089	0119	0179	0239	0299	0539	0719	0839	9999								
A	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1								
B	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1								
C	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1								
D	1.8	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1								
E	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1								
F	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1								
G		1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1								
H			1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0							
I				2.0	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1								
J					1.9	1.8	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1								
K						2.0	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1								
L	No Decompression Stop Limit										2.0	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1				
M	連続潜水範囲											1.8	1.6	1.4	1.2	1.1				
N									1.9	1.7	1.4	1.2	1.1							
O									2.0	1.7	1.4	1.2	1.1							

1). The section of No Decompression Stop Limit does not apply Repetitive Factors (RF). Alternatively, a total bottom time taking from the preceding dive and repetitive dive is calculated with a Table. If there is difference in depth between the preceding dive and the repetitive dive, allow for the bottom time of the preceding dive by adopting the depth of the repetitive dive.
 2). If there is the surface intervals of 14 hours (840min), the Repetitive Factors (RF) from the previous dive is less than 1.0, and therefore a dive is not considered as a repetitive dive.

Table2 Japanese decompression table NSK-R1

減圧停止時間は、超過する時間が多くなるに従って増加し、更には、指定された水深箇所も増えてゆくと、減圧を予定していない状態で水底に滞在すると、空気が無くなることが予測される。

NSK-R2										No-Decompression Repetitive Diving Table										
Depth (m)	Allowable No-Decompression Limits (min) for Repetitive Factors (RF)																			
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0										Deco. Stops (min) at 3m
letters	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200										
9	272	250	230	214	200	187	176	166	157	150										5
12	136	125	115	107	100	93	88	83	78	75										5
15	60	55	50	45	41	38	36	34	32	31										4
18	40	35	31	29	27	26	24	23	22	21										4
21	30	25	21	19	18	17	16	15	14	13										4
24	20	18	16	15	14	13	12	12	11	11										3
27	16	14	12	11	11	10	9	9	8	8										3
30	13	11	10	9	9	8	8	7	7	7										3
33	10	9	8	8	7	7	6	6	6	6										2
36	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5										2
39	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4										2
42	6	5	5	5	4	4	4	3	3	3										2

1). Allowable No-Decompression Limits (min) for Repetitive Factors (RF) is assigned to total DiveTime.
 2). If either Repetitive Dives or Multi-day Diving is assigned to No Decompression Diving, whatever the bottom time is, it is encouraged to conduct a decompression stop at 3m.

Table3 Japanese decompression table NSK-R2

以上のように、減圧症を防ぐためにNSK-N1-24およびR1, R2により潜水時間、水面休息時間、浮上の際の停止水深、停止時間が決められているのである。

ただし、最近の作業や調査潜水のみならず、レジャーダイビングにおいても浮上時の指標として、減圧停止が必要のない潜水時間であっても、5～3mの水深で「安全停止」を3～5分程度行うことが、潜水を安全に行う上での常識となっている。

上記の事を踏まえて、最大水深を24mとして、上記の表から潜水可能時間を算出し、2回目の潜水や3回目の潜水においては、減圧停止を行うことを予測した潜水計画を立て、その記録を行った。

3. EANx32の利用

この石垣島における調査では、減圧症のリスク要因として考えられる窒素の吸収を減らすために、窒素の分圧を下げ、代わりに酸素の分圧を上げたエンリッチドエアナイトロックス（以下EAN）の調達が可能だったため、32%の酸素分圧のEANx32を使用した。このガスの使用に関しては、別途講習が必要となるため、EAN講習の修了者のみが利用をした（石黒, 1998）。

この混合ガスのメリットは、圧縮空気と比べて、呼吸によって体内に取り込まれる窒素量を減らすことができる。しかしながら、この長所の一方でデメリットも存在する。それは、2つの異なる酸素中毒が発生する可能性が高くなることである。EANを作製する場合、選別透過方式（メンブレン方式）によって窒素を除外して分圧を下げ、酸素分圧を高める。それによって、減圧症になる可能性を低くする代わりに、酸素中毒に罹る危険性が高くなるという矛盾を抱える。

酸素中毒は、過剰な酸素吸入することによって起こる中毒症で、急性のものと慢性のものがある。急性の中枢神経系酸素中毒は、高分圧な酸素を吸うことで短期に起こってくるもので、これが生じると痙攣や耳鳴り、視力低下、目眩、吐き気、不快感などの症状が現れる（日本潜水科学協会, 2012）。一方、慢性の呼吸器系酸素中毒は、酸素分圧が急性酸素中毒を起こさない分圧のものでも、長時間に渡り、または繰り返して過剰な酸素摂取をする際に起こるもので、間質性肺炎になり、咳や胸痛という症状が生じてくる。それに伴い、長期にわたって

EANを使って調査を続ける場合、呼吸器系の酸素中毒に注意して、酸素毒性単位の許容限界を超えないように、酸素摂取量を追跡記録し、管理しなければならない必要性が生じるが、近年のダイビングコンピュータのEANモード機能があるものには、合計酸素摂取量を記録して、危険性が高まるとインジケータとアラームで知らせてくれるため、その管理が容易になった（日本潜水科学協会, 2012）。

空気潜水とEANを使った潜水の比較は、結果の項で示す。

結果および考察

1. 確認書の記述

潜水を伴う作業や調査を行う場合、健康（体調）管理を含んだ安全管理に関して、陸上で行われる同種のものに比べて、厳密に管理されている。当大学における潜水を伴う研究においても、今後は学科との連携をとり、検証や検討を行って、必要十分な内容を備えたフォーマットの作成が必要になると考えられる。

今回の「確認書」はそのベースになる書式と考え、提案した。

この書式の記載にあたっては、潜水作業や調査を、どんなに厳しく管理しても、自然および圧力環境下で行われる以上、その脆弱性を陸上と比較して、解消する事ができない点や自分自身の未熟さがパートナー（パディ）やチームに迷惑をかける点などを強調する事で、参加者に注意喚起をすることが狙いである。

調査や作業（学生が行う研究を含む）といった水中における「業務」が伴う以上、確認書の記載は最低限度必要であり、見学ダイバーを除く全ての潜水者に適応される。これは、労働安全衛生法第二十条九号に規定されている「潜水器を用い、かつ、空気圧縮機若しくは手押しポンプによる送気又はポンペからの給気を受けて、水中において行う業務」には潜水士免許を取得していることが前提にあり、同法第六十一条に就業制限で規定されていることに基づくからである。

また、高気圧作業安全衛生規則第十二条に事業者は、潜水士免許を受けたものでなければ、潜水業務につかせてはならない、とある（中央労働災害防止協会, 2015）。

— 確認書 —

件名：八重山水中文化遺産プロジェクト2015

調査名：屋良部沖海底遺跡調査

私_____は、ダイビングを伴う水中調査が、大きな危険(死亡や重大な障害含む)を内包した潜水作業であり、また、安全を確保する技術や設備が完全ではないことを良く認識しています。

また、私_____の無謀な行動が、他の参加者を大きな危険に遭わせる可能性があることも認識しています。

よって、_____に参加するにあたり、私_____は、別紙の計画書を熟読し、行われる調査内容ならびに計画を把握し、確認したことを署名または捺印によって証明いたします。

更に、インストラクターならびに監督者の指示を尊重し、事故が発生しないように最大限の努力を払うとともに、自分とパートナーなどの安全確保について十二分に留意して、_____に参加することを誓約します。

尚、潜水調査当日に体調が悪い場合は、インストラクターまたは監督者に必ず申し出て、無理に潜水しない事を誓います。

〈確認事項〉

今年度、健康診断を受診して、体調に問題ない事を確認していますか(Yes or No)

本調査参加にあたり、体調は万全ですか(Yes or No)

— 緊急連絡先 —

住所：_____

フリガナ

電話番号：_____氏名：_____ (続柄：_____)

2015年11月 日

氏名(自署)_____ 印(又はサイン)

保護者氏名_____ 印(又はサイン)

* 未成年者は保護者の同意を明らかにするため、印又はサインが必要です(中田誠, 2001)。

一般に、レジャーダイビングの講習や水中ツアーガイドの際には、「免責同意書」の記載が義務づけられていて、この記載がない場合は、講習やガイドを受ける事ができないのが通例である。しかしながら、最近の傾向としては、この「免責同意書」の記載を強要することは、商法上の問題を含み、また免責同意書が効力を持つと考えられる司法や法廷の場では、逆に裁判員や裁判官の心証が悪く、かえって記載させた事が、責任逃れをしているように捉えられ、マイナスに働いている事例がある。よって、レジャーダイビングの通例には従わず、目的を明確に

して、気持ちを引き締める意味で「確認書」の記載をお願いした。記載に当たっては、内容の説明とともに、質疑の時間を設けられることや管理者と参加者(学生を含む)の意思疎通を図ることができることから、この確認書を記述することの意味は大きいと考えられる(中田誠, 2002)。

2. 潜水記録

本潜水調査では、下記のように潜水時間と残圧を記録して、ダイバーの空気消費を把握し、潜水の状況をモニタリングした。また、記録することで、安

全な潜水を意識させ、空気が水中で無くなる事(エア切れ)の予防を喚起した。

以下の記録は、全日程における全潜水の潜水開始時間、潜水終了時間、開始時残圧(kg/m²)、終了時残圧(kg/m²)である。

屋良部沖海底遺跡調査 潜水記録 1 (11/4)

No.	ダイバー	1回目		2回目	
		in → out	in → out	in → out	in → out
		9:55 → 10:30	12:59 → 13:36		
1	A	220 → 110	210 → 80		
2	B	200 → 100	200 → 50		
3	C	200 → 70	210 → 40		
4	D	200 → 110	200 → 50		
5	E	200 → 110	200 → 60		
6	F	200 → 100	200 → 30		
7	G	200 → 110	210 → 100		
8	H	200 → 90	195 → 20		
		10:45 → 11:46	13:03 → 13:35		
9	I	200 → 40	200 → 40		
10	J	200 → 60	200 → 50		
11	K	210 → 140	200 → 130		
12	L	190 → 70	200 → 50		

屋良部沖海底遺跡調査 潜水記録 2 (11/5)

No.	ダイバー	1回目		2回目	
		in → out	in → out	in → out	in → out
		9:24 → 9:57	12:18 → 13:03		
1	I	200 → 50	200 → 50		
2	F	200 → 50	200 → 20		
3	G	200 → 70	210 → 70		
4	H	200 → 30	200 → 60		
		10:21 → 11:01			
5	A	200 → 60			
6	D	200 → 80			
		10:18 → 10:51	13:12 → 13:42		
7	E	200 → 120			
8	C	200 → 40			
9	J	200 → 50	210 → 80		
10	M	200 → 20	200 → 30		
11	N	210 → 70	210 → 80		
12	K	200 → 110	210 → 130		
13	L	190 → 40	200 → 50		
14	O	210 → 80			

屋良部沖海底遺跡調査 潜水記録 2 (11/6)

No.	ダイバー	1回目		2回目		3回目	
		in → out	in → out	in → out	in → out	in → out	in → out
		9:22 → 10:04	12:01 → 12:39	13:57 → 14:37			
1	F	200 → 40	200 → 30				
2	G	200 → 60	210 → 90				
3	J	200 → 80	210 → 60	210 → 50			
4	K	210 → 140	210 → 120				
5	D	200 → 100	200 → 120	210 → 100			
6	P	200 → 50	200 → 40				
7	H	190 → 190	200 → 110				
		10:11 → 10:48	12:27 → 13:03				
8	M	200 → 200	200 → 40				
9	N	210 → 210	210 → 90				
		10:33 → 11:17	13:00 → 13:44				
10	O	200 → 200	200 → 200				
11	L	190 → 190	190 → 190				

屋良部沖海底遺跡調査 潜水記録 4 (11/7)

No.	ダイバー	1回目		2回目	
		in → out	in → out	in → out	in → out
		9:32 → 10:25	11:46 → 12:31		
1	J	210 → 40	210 → 60		
2	K	210 → 110	210 → 130		
		9:47 → 10:22	12:19 → 12:57		
3	F	200 → 40	200 → 10		
4	Q	210 → 80	200 → 80		
		10:11 → 10:58	12:11 → 12:49		
5	D	200 → 80	200 → 100		
6	H	205 → 80	205 → 30		
		10:11 → 10:54	12:44 → 13:07		
7	L	200 → 40	200 → 100		
8	O	210 → 50	210 → 110		
		10:35 → 11:14	13:17 → 13:56		
9	P	200 → 30	200 → 50		
10	N	210 → 100	210 → 90		

空気の消費量は、ダイバーの経験レベルや性別、気温、水温、潜水深度、体格差、年齢、その日の体調、労作負荷の状況等によって変化する。そのため、このようなモニターをすることで、ダイバーごとの空気消費の状況を把握することが可能になり、消費量の多い人に対して、アドバイスや水中で注意を向けることができる。

大まかな空気消費量は、簡単な計算で算出することが可能で、その数値を目安に、個人のダイビングスキルや傾向が確認できる。

例えば、水深24mで軽作業をしている場合の空気消費量の目安は、 $18 \ell / \text{分} \times 3.4 \text{ATA} = \text{約} 62 \ell / \text{分}$ となる。(中央労働災害防止協会, 2015)

この潜水調査では、10ℓタンクを使用したので、平均で19.8メガパスカル(200 kg/cm²)の圧力で充填された状態では、約2,000ℓの空気を消費することができる。安全のため、5メガパスカル(約500ℓ)を残した状態で出水することを前提とすると、 $1,500 \ell \div 62 \ell / \text{分} = 24 \text{分}$ が、潜水可能な時間として導き出される。

NSK-N1-24の表から、1回目の無減圧潜水時間は25分だったので、この潜水時間内であれば、減圧障害のリスクに対しても、空気消費量(エアークレ)に対しても問題の無い数値である事が分かる。

3. 調査海域におけるEANを使用した潜水

EANを使う事で、空気に比べて体内に残留する窒素の量は11%程度抑えられるため、減圧症に対して十分に効果がある事が分かる。

空気相当水深(EAD)の計算式を使って、32%のEANガスが空気中で潜水した場合に、何mに相当するのか試算をしてみると

$$EAD(m) = \{(1.0 - FO_2)(D + 10) / 0.79\} - 10$$

FO₂: ナイトロックスの酸素濃度(分圧・ATA)

D: 潜水深度(m)

0.79: 空気中の窒素濃度(分圧・ATA)

(NAUI エンタープライズ, 2012)

$$(1.0 - 0.32) \times (24 \text{m} + 10 \text{m}) / 0.79 - 10 = \text{約} 19 \text{m}$$

となり、本ガスを使用して水深24mに潜水した場合、空気潜水の19mに相当することになる。この場合の潜水深度19mは、NSK-N1-21(19mに対応した表が無いので、次の深度ランクである21mの表を用いる)の表を見ることで、無減圧潜水時間ならびに、潜水時間に応じた減圧時間を含めた浮上時間を知る事ができる。

この表から無減圧潜水時間は35分であることが分かり、EANx32ガスを使用することで、空気に比べて10分の無減圧潜水の延長が可能となって、安全に約3割増しの調査時間が得られたことになる。

NSK-N1-21										Standard Air Decompression Table		
Depth (m)	Dive Time (min)	Decompression Stops (min) at Different Depths (m)								Total Ascent (min)	Repetitive Groups (RG)	First Dive UPTD
		24	21	18	15	12	9	6	3			
10	-	-	-	-	-	-	-	-	3	A	4	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	3	C	8	
25	-	-	-	-	-	-	-	-	3	D	10	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	3	D	12	
35	-	-	-	-	-	-	-	-	3	E	13	
40	-	-	-	-	-	-	-	4	7	F	15	
50	-	-	-	-	-	-	-	9	12	G	19	
60	-	-	-	-	-	-	-	11	14	H	23	
70	-	-	-	-	-	-	2	17	22	J	27	
80	-	-	-	-	-	-	3	25	31	K	31	
90	-	-	-	-	-	-	4	32	39	M	35	
100	-	-	-	-	-	-	5	39	47	N	38	
110	-	-	-	-	-	-	7	46	56	Dive Limit	42	
120	-	-	-	-	-	-	9	54	66		46	
130	-	-	-	-	-	-	13	62	78		50	
140	-	-	-	-	-	-	16	71	90		54	
150	-	-	-	-	-	-	19	77	99		58	
160	-	-	-	-	-	-	22	85	110		62	
170	-	-	-	-	-	-	27	93	123		65	
180	-	-	-	-	-	-	31	101	135		69	
190	-	-	-	-	-	-	35	109	147		73	
200	-	-	-	-	-	-	38	117	158		77	

1) If Repetitive Group (RG) falls under the dive limit, allow for a minimum surface interval of 14 hours before next diving, equivalent to the first dive.
 2) UPTD (Unit Pulmonary Toxicity Dose) values on Table is applicable only for the first dive, not for repetitive dives.

Table4 Japanese decompression table NSK-N1-21

上記のことから空気を使った潜水と比較して、EANを利用した潜水は、安全だけでなく、調査時間の延長にもメリットの高い潜水調査が可能であることから、本調査海域における潜水調査には、EANガスを利用することは安全で、適切であることが分かった(山見, 2010)。

しかしながら、EANガスの調達には、空気に比べると取り扱っている地域や施設が少なく、一般的に流通量が少ない現状がある。また、コスト面においても空気が10リットル19.8Mpa(約200 kg/cm²)の容器レンタルが2,000円だとすると、同じ容量のEANガスを借りる場合、石垣島ではプラス1,000~1,500円程度の加算になるので、予め計画の中に予算を含めて考慮しなければならない。

また現状では、高等教育においてEANガスの使用を教員や学生に対して徹底している訳ではなく、今後は同ガスの利用をどの程度浸透させるかは、検討が必要である。

ま と め

今回の水中遺跡調査は、①潜水前条件の検討および確認書の作成・記載、②潜水計画と潜水管理、③EANの利用の3つの側面から安全に配慮した。

①に関しては、この条件や確認書を基本として、今後の法改正や安全管理の通例の変化によって適宜、整合性をとってゆく必要があると考える。

②に関しては、減圧と空気の管理を適切に行う事で、安全性の高い調査環境を整える事ができた。

今後は、記録管理だけでなく、各個人の空気消費量から、参加者ごとに分時換気量を算出して、調査当日に潜水者個人に対して、情報をフィードバックできるような体制をとってゆくべきだと考える。

③に関しては、EANの取り扱いの有無が前提になるが、調達が可能であれば、EANを積極的に使えるように環境を整え、調査に参加している全員がEANガスでの潜水が可能になるよう指導することを推奨する。

水中遺跡の潜水調査における安全性の獲得は、単一方向からのアプローチでは、達成できないことは明白である。今後も、多角的な側面から安全性を検討し、快適で信頼性の高い、潜水の方法を提言してゆきたいと考える。

謝 辞

今回の潜水調査に当たり、貴重な助言や協力をいただきましたフジマリンサービスの藤井成児氏に深く感謝をいたします。

また、ご多忙中にもかかわらず、査読をいただきました匿名の先生と東海大学海洋学部水産学科中村雅子先生に対して、謹んで感謝の意を述べます。

要 旨

本研究は、水中遺跡の潜水調査や作業が、安全に行われているかを検証し、その危険性を認識した上で、安全に潜水するためには、どのような準備や仕組みが最適なのかを検討するものである。

今回、酸素の分圧を増やしたエンリッチドエアナイトロックス (EAN) という混合ガスを用いて調査を行った班と従来から使われている空気を利用して行った班があることから、その比較も行い、水深20 m前半における調査時のガス運用に関しても検討する。

引用文献

- 野上建紀 (2007) 海底ミュージアム構想 アジア水中考古学研究 研究会報号外 NEWSLETTER
- 鉄多加志 (2013) 東海大学海洋研究所 研究報告第34号, 53-58.
- 潜水作業マニュアル 一般社団法人 日本潜水協会, 413-414, 441, 2015.
- 石黒信雄 (1998) ナイトロックスダイビング 社会スポーツセンター
- 最新ダイビング用語事典 日本潜水科学協会 著 成山堂書店, 2012.
- 中田誠 (2001) ダイビングの事故・法的責任と問題 潜水士テキスト 中央労働災害防止協会, 208, 270, 306, 2015.
- 中田誠 (2002) ダイビング事故とリスクマネジメント NAUI ナイトロックス NAUI エンタープライズ, 2012.
- 山見信夫 (2010) 減圧症にならない潜り方 日本高気圧環境・潜水医学会関東地方会誌第10巻
- 小野林太郎・片桐千亜紀・坂上憲光, 他3名 (2013) 「八重山における水中文化遺産の現状と将来—石垣島・屋良部沖海底遺跡を中心に」『石垣市立八重山博物館紀要』22号: 20-43.
- Ono, R., C. Katagiri, H. Kan, N. Nagano, Y. Nakanishi, Y. Yamamoto, F. Takemura, and N. Sakagami (2016) Discovery of Iron Grapnel Anchors in Early Modern Ryukyu and Management of Underwater Cultural Heritages in Okinawa, Japan. *International Journal of Nautical Archaeology* 45. 1, 75-91.
- NOAA diving manual 社会スポーツセンター, 1996.
- 後藤興四之, 橋本昭夫 (1995) 潜水医学テキスト 水中造形センター
- 池田知純 (1995) 潜水医学入門 大修館書店
- US. NAVY ダイビング・マニュアル 朝倉書店, 1987.