

# 浅海域での長時間潜水時における EAN ガス使用の研究

鉄 多加志<sup>1)</sup>

Study on the use of Enriched Air Nitrox (EAN) for safer shallow water dive

Takashi Tetsu<sup>1)</sup>

## Abstract

Decompression sickness (DCS) is a dangerous and occasionally lethal condition caused by nitrogen bubbles that form in the blood and other tissues of scuba divers who surface too quickly. To reduce the risk of DCS, enriched air nitrox (EAN), a mixture of oxygen and nitrogen that has an oxygen percentage greater than 21%, was innovated as a source of air supply for recreational and technical scuba diving. EAN was originally developed for a diving in deeper sea, which has at least a depth of 20 meter. Its values have been well studied in the context; we can usually stay down longer and get back in the water sooner. However, it is not clear whether EAN is also useful for a diving in shallow offshore water, which has a depth of 10 meter. We report here that EAN also enables divers to extend their duration of dive without causing DCS in shallow offshore sea. We investigated the effect of EAN on physical condition after diving for 90 min in shallow water of a 12-meter-deep. The attempt was made three times independently. We compared the result of each diving between commercial EAN use and conventional high-pressure air practice. Our results demonstrate that by diving with EAN, we will gain more time underwater safely even in shallow offshore water.

## 緒 言

1987年以来、著者は三保半島を中心に生物研究のため潜水調査を行ってきた。最近では、水産学科斎藤研究室と共同で三保に生息するフグ毒保有ヒトデ (*Astropecten polyacanthus*) の生態調査を行っている。この調査では、昼と夜の2回、最大深度12 mに各合計4時間ほど潜水し、ヒトデの個体数測定、写真撮影等の軽作業を行った。

このような潜水調査の場合、当然安全管理を行う

が、その際一般的に潜水士テキスト(中央労働災害防止協会, 2011)中の潜水業務時間表(Table1, 2)が使われる。この2つの表は、通常公的には別表第2および第3と呼ばれるが、本論文中では便宜のためにこれらを表1および表2と呼ぶ。これら潜水業務時間表により決められる潜水時間は、高気圧作業安全衛生規則(中央労働災害防止協会, 2011)に規定されており、遵守を義務づけられているものである。

この時間表や浮上速度を守らない場合、当然減圧症やその他の潜水障害が発症する危険性が高くなる。

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 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

Marine Studies Frontier Education Center, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka-shi, 424-8610, Japan.

(2012年12月28日受付 / 2013年1月7日受理)

特に減圧症は、圧縮空気を高気圧下で一定時間以上呼吸すると体内に多量の窒素が溶け込み蓄積し、短時間で不適切な浮上をすると蓄積した窒素が体内で気泡化して血栓症状を引き起こす、最も恐ろしい疾患といえよう。我が国においては、ここ数年において年間800~1,000人程度の減圧症患者が出ている現状がある(2011, 今村)。

そのため減圧症を予防する方法として潜水調査では水深や使用する圧縮空気の使用量および潜水時間から、呼吸で体内に取り入れた窒素量をダイビングコンピュータなどでモニターしておく必要がある。さらに、吸い込んだ窒素が安全なレベルまで体内から排出されるよう、十分な時間をかけ浮上することが是非に要求される。その具体的指針が前述の潜水業務用時間表である。

しかしながら、前述した様に最大水深が12 m前後の比較的浅海域での潜水作業では、水深が浅く水圧がさしてかからない故に安心し、潜水業務時間表による安全管理を軽視する傾向がある。ところが、このような浅海域の潜水でも、潜水時間が120分位の長時間になると、靭帯や脂肪など窒素の出入りの遅い組織にも多量の窒素が溶け込む危険性が考えられる(2011, 今村)。この観点で考えると、浅海域での潜水作業であるがゆえに注意が必要となってくる。というのは、浅海域潜水では深度が浅いと安心とあいまって、仕事に集中し過ぎて潜水時間が長引く傾向があるからである。

それでは、浅海域潜水における適切な安全管理法が明確に提示されているかといえば、今のところ適確なもの提案されていないのが現状である。

これに関連して、近年減圧症に対する安全管理の一環としてエンリッチドエアナイトロックス(EAN)ガスの使用が提案されている(1998, 社会スポーツセンター; 2008, NAUI エンタープライズ)。このガスは窒素の分圧を下げ、代わりに酸素の分圧を上げた混合ガスである。そのため潜水時にEANガスを使用すると、従来の圧縮空気使用時よりも、体に溶け込む窒素の量を少なくすることができる。

ところが、このガスはリクリエーションダイビングの運用に適した水深、すなわち水深30 m前後のやや深部の潜水用に開発されてきた経緯があるため、10 m前後の浅海域における潜水ではほとんど使用されていない。そればかりか、このような浅海域での

EANガス使用については考察例が皆無といっても過言ではない。

以上の状況を踏まえ、本研究では三保の真崎海岸のような、水深が12 m前後の浅海域での、しかも長時間に及ぶ潜水時の安全管理法検討の一環として、従来の圧縮空気使用時とEANガス使用時の各潜水状況さらには経済的な側面も比較し、浅海域潜水におけるEANガス使用の是非を検討した。

## 方 法

### 潜水業務時間の決定法

先述したように潜水調査を行う場合、減圧症を回避するため一般的には潜水士テキスト(2011, 中央労働災害防止協会)に記載されている潜水業務用時間表(Table1, 2)を用いて理想的な潜水時間が決められ、かつ厳守される。今回、狙上に上げる浅海域の潜水業務時間はこれらの表を用いて決定した。

一般には、これらの表に関わりが薄いと思われるので、ここでさらに詳細に述べておきたい。

これらの表に示される潜水業務時間は、潜水時呼吸によって取り込まれる窒素総量およびその窒素が安全なレベルまでに排出される時間から決められたもので、当然安全が保障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、水圧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、浮上速度は毎分10 m以下と定められている。

例として、これらの表に記載されている「10 mを超え12 m以下」の水深で一回60分の潜水を合計3回行う場合を見てみることにする。

まず、表1(Table1)によると「30分を超え60分以下の潜水時間」における体内のガス圧係数は1.4となっている。体内ガス圧係数というのは、大気圧下での体内の窒素量を「1」として、潜水によって体内に残留している窒素量の割合を係数化したものである。つまり、この場合「10 mを超え12 m以下」で「30分を超え60分以下の潜水時間」を行うと、体内に大気圧下より1.4倍の窒素が溶けていることとなる。この時の「業務間ガス圧減少時間」を見ると30分となる。この30分は潜水と潜水の間の水面休息時間を意味している。この水面休息時間は大気圧下で呼吸を通じて窒素の排出を行うための時間で、法律で取ることが義務付けられている(2011, 中央労働災害防止協会)。

別表第 2

Table 1 Japanese decompression table NO.2

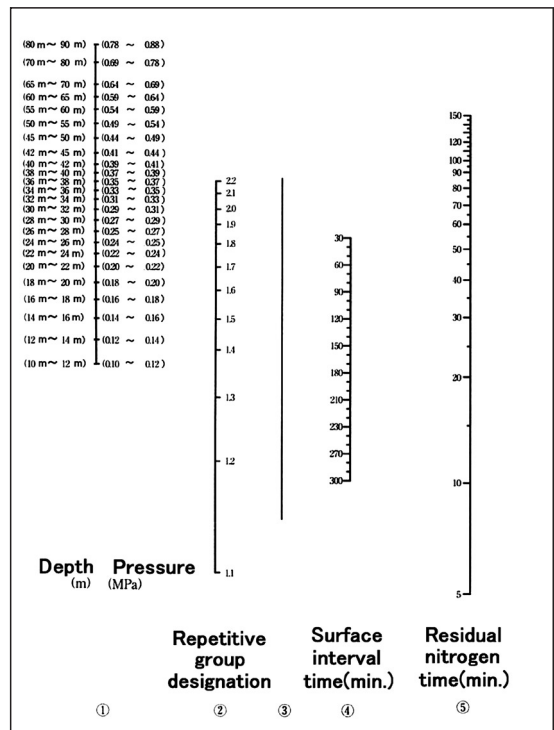
Pressure (MPa)	Depth (m)	Highpressure time	Decompression(min.)							Repetitive group designation	Surface interval time	Surface interval time afterwork	High- pressure time at oneday	
			0.24 MPa	0.21 MPa	0.18 MPa	0.15 MPa	0.12 MPa	0.09 MPa	0.06 MPa					0.03 MPa
			Ascent(min.)										Bottom time	Bottom time at oneday
24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m							
0.10 ∩ 0.12	10 m~ 12 m	10 min.									1.1	30	30	480
		10 min. ~ 30 min.									1.2	30	30	
		30 min. ~ 60 min.									1.4	30	30	
		60 min. ~ 90 min.									1.5	30	30	
		90 min. ~ 120 min.									1.6	30	30	
		120 min. ~ 180 min.							3	1.8	60	30		
		180 min. ~ 240 min.							5	1.9	60	30		
240 min. ~ 360 min.							7	2.1	150	60				
0.12 ∩ 0.14	12 m~ 14 m	10 min.									1.1	30	30	420
		10 min. ~ 30 min.									1.3	30	30	
		30 min. ~ 60 min.									1.5	30	30	
		60 min. ~ 90 min.									1.6	30	30	
		90 min. ~ 120 min.							4	1.7	60	30		
		120 min. ~ 150 min.							6	1.8	60	30		
		150 min. ~ 180 min.							7	1.9	60	30		
		180 min. ~ 210 min.							9	2.0	60	30		
210 min. ~ 240 min.							10	2.0	150	60				
240 min. ~ 300 min.							12	2.1	150	60				

(2011, 中央労働災害防止協会)

さて、上記の 30 分後、2 回目の潜水で同じ水深に同じ作業時間の調査を行った場合は、表 2 (Table 2) から修正時間を求めなくてはならない。この修正時間というのは、業務間ガス圧減少時間の間に体内から排出した窒素を差し引いてなおも残る窒素量を前回の潜水の影響として時間に換算したものである。この場合は 60 分ということになる。

これを 2 回目の潜水時間である 60 分に付加し、潜水時間を 120 分とみなす。120 分は、「90 分を超え 120 分以下」の項に該当する。この時、浮上後の体内ガス圧係数は 1.6 となる。3 回目の潜水では、60 分の水面休息時間後に、再び同じ水深で同じ潜水時間の調査を行う場合、修正時間は 95 分となり合計 155 分となる。これは「120 分を超え 180 分以下」の項に相当することになる。この場合、減圧停止時間を見ると水深 3 m で 3 分間を指示しており、この間に体内から窒素を安全なレベルまで排出することになる。すなわち、3 回目の潜水では浮上時に水深 3 m で 3 分間停止しなければならない。この時の浮上後の体内ガス圧係数は 1.8 になり、潜水終了後には 30 分のガス圧減少時間を安静状態で過ごすことになる。

Table 2 Japanese decompression table NO.3



(2011, 中央労働災害防止協会)

以上のように、減圧症を防ぐために表1 および2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。

ただし、最近の安全潜水の推奨として、減圧停止が必要ない時間内の潜水であっても、5～3 m の水深で「安全停止」を3～5分程度行うことが通例となっている。

## 結果および考察

### 1. 浅海域における圧縮空気を使用した潜水

浅海域の潜水では、水深が浅いことに対する慢心から、予定より潜水時間が長くなることがある。このような場合、当然ながら当初の潜水計画より減圧症を初めとするリスクが増大することになる。

このリスクの増大を、以下に挙げる2つの典型例で考えてみたい。

まず一つは、水深12 m 以下で各60分の潜水を3回行った場合(以下、60分潜水)である。もう一つは、潜水時間が各30分超過してしまい、それぞれ90分となった場合(以下、90分潜水)である。

先述の表1と表2を用いて、総潜水時間等を計算すると次の結果となった。

総潜水時間は、60分潜水では195分、90分潜水では290分となる。この場合潜水時間が長い分、後者の方が体内に取り込む窒素量は当然多くなり、減圧症のリスクが増大することになる。60分および90分潜水における最終潜水終了時の体内ガス圧係数は、前者では1.8、後者では1.9となる。そして、減圧時間は、60分潜水の3分間に対して90分潜水では2回目の3分に3回目の5分間が加わり合計8分間となる。

たかだか8分間の減圧時間と思われがちだが、筆者の経験ではこの3+5=8分間は大きなリスクになる場合が少なくない。特に冬期、そのリスクは増大する。具体的にいうと、水が冷たいために血液循環が悪くなることに加え、寒さ対策でドライスーツを着用して潜水するので排尿ができないうえに水分補給を著しく制限することになる。その結果、体の窒素排出機能が低下し、当然のこととして減圧症のリスクが増大する。また波やうねりがある海況では、3 mでの減圧停止は、波の影響で体が上下動して停止水深を一定に保ち難いため、動揺の少ない深い場所での減圧停止を余儀なくされる。その分、より長い停止時間が必要となり、冷たい海でさらに長時間潜水することになる。

このように、高圧空気を使用した潜水では、特に寒くかつ波と風が強い場合には、各回30分の潜水時間の延長で生じる上記の8分間は、減圧症のリスクのみならず、より長く冷たい海中にいることから体温が奪われ体力が低下することによって思わぬ事故を起こすリスクをも増大させることになる。

### 2. 浅海域におけるEANを使用した潜水

ここでリスクファクター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混合ガス(EANガス)を使うことを考えてみたい。

本ガスの長所は、圧縮空気に比して、呼吸で体内に取り込まれる窒素量が少なくなること、そして一旦取り込まれた窒素をより速く排出できることにある。しかし、これらの長所の一方で短所もある。それは、酸素中毒のリスクが発生することである。EANガスを製造する場合、窒素分圧をできるだけ下げられるが、これは当然酸素分圧を高めることでもあり、酸素中毒の危険が増大することを意味する。

酸素中毒は、高分圧の酸素を吸入することによって起こる中毒症で、急性のものと同慢性のものがある。脳酸素中毒は、高分圧の酸素を吸うことで短期に起こってくるもので、痙攣発作などの中枢神経の障害を引き起こす(2012, 日本潜水科学協会)。これが急性の典型例である。一方、肺酸素中毒は、酸素分圧が急性酸素中毒を起こさないレベルでも、潜水時間が長く呼吸量が多くなる際に起こるもので、間質性肺炎という症状が生じる(2012, 成山堂書店)。この場合が、慢性酸素中毒である。

EANガスを使用する際、水圧が低い浅海域といえども酸素分圧および潜水時間如何によっては上記の酸素中毒になる可能性がある。

そこで、望ましい酸素分圧のEANガスを使用する必要であるが、実際の潜水を考えるとここで一つの制約が出てくる。それは、酸素分圧がより高く、かつ入手しやすい市販EANガスは酸素50%・窒素50%のものしかないという現状である。

このEANガス(以下EAN50%)を使用して、「1. 浅海域における圧縮空気を使用した潜水」で組上に上げた「60分潜水」と「90分潜水」を行った場合を考えてみよう。

まず、EAN50を用い潜水が酸素中毒の観点から安全か否かについて検討しておきたい。

水深 12 m (2.2ATA) における EAN 50 の酸素分圧 (以下,  $PO_2$ ) は,  $0.5 \times 2.2ATA = 1.1ATA$  である. 同様に窒素分圧は通常の空気 (窒素 79%) が  $0.79\% \times 2.2ATA = 1.7ATA$  であるのに対して, EAN 50 では酸素同様 1.1ATA に過ぎないことになる.

ここで, NOAA (アメリカ海洋大気局) の酸素限界の表を参照すると, 1.1ATA における 1日当たりの合計許容時間, すなわち酸素中毒を生じない酸素吸入許容時間の合計は 270分となっている. また, 単一潜水の許容時間は 240分と定められている (2012, 成山堂書店).

以上から, ENA 50 を使用して 1日に 3回の潜水調査を行う場合, 酸素中毒のリスクから見て 1回当たり 90分の潜水は充分安全であることが分る.

ただし, 連続した日数において高濃度 EAN ガスを使い続ける場合, 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なければならない.

次に, ENA 50 を使用した際の窒素量についてである.

窒素量は, 空気に比べて 6割程度に抑えられるため, 減圧症に対しても安全性が高くなっている.

ここで, 以下に示す空気相当水深 (EAD) の計算式を使って, 水深 12 m で EAN 50 を使用した場合に呼吸される窒素量を, 従来の高圧空気を使用した潜水の場合と比較してみたい. この式を用いると, ENA 50 を使用した潜水時の水深を, 高圧空気を使用した場合の水深に換算できる (石黒, 2006).

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

$FO_2$ : EAN 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)

すなわち,

$$(1.0 - 0.5) \times (12 \text{ m} + 10 \text{ m}) / 0.79 - 10 = 4 \text{ m}$$

となり, ENA 50 ガスを使用して水深 12 m に潜水した場合に呼吸される窒素量は, 高圧空気 で水深 4 m に潜水した場合に相当することになる.

前述した表 1 では最浅水深が 10 m であり, それ以上浅い水深が記載してあるダイブテーブルは, 著名な U.S.NAVY や NOAA にもない. すなわち, 10 m に満たない水深では, 長時間潜水しても全く問題ないほど安全であることが充分示唆される.

また, これまで水深 6 m 以下の潜水において減圧症が発症した事例は無く, まして水深 4 m では確実に安全な潜水調査が可能といえる (2010, 山見).

以上を踏まえ, 先に述べた「1. 浅海域における圧縮空気を使用した潜水」で組上に上げた「60分潜水」と「90分潜水」の場合を考えてみよう.

ENA 50 を使用し水深 12 m の潜水を行った場合, 呼吸される窒素量は潜水時間が 60分でも 90分でも, 高圧空気による潜水の水深 4 m 相当であり, 減圧症の危険は無いということになる. そのため, 当初 60分間の潜水を 3回計画していたにもかかわらず各回 30分間あるいはそれ以上延長したとしても, 海中に止まり窒素を排出するための減圧停止は必要ない. したがって, 先にあげた冬期の寒く波風の強い時でも, 窒素排出のための時間が削減できる分, 体が冷えることによって生じる減圧症のリスクは当然のこと, 体力消耗による事故のリスクも確実に減らせることになる.

以上のことから, 浅海域における長時間の潜水調査では EAN 50 の利用は安全かつ, 適切であると結論される.

とはいえ, EAN ガスは, 圧縮空気に比べると取り扱っている施設が少なく, 一般的に流通量が少ない. またコスト面においても, 空気が 12リットル 19.8 MPa の容器レンタルが ¥2,000 とすると, 同じ容量の EAN ガスの場合, その約 2倍の金額になる. しかし, 減圧症発症や寒さによる事故のリスクが少なくなることを考えれば, 特に冬期には, 浅海調査での ENA ガス使用の利点は予算面でのコスト高を補って余りあると言えよう.

今後は, 実際に EAN 50 を使った潜水を行うことによって, 安全性と利便性を検証すると共に, 潜水者の使用感, さらにドブラープロファイラーを使ってマイクロバブルの発生状態なども追跡したい.

## 謝 辞

今回の研究に当たり、貴重な助言を給りました東海大学海洋学部水産学科斎藤俊郎先生に深く感謝します。また、査読者には、謹んで感謝の意を表します。

## 引用文献

2011 潜水士テキスト 中央労働災害防止協会  
 1987 US.NAVY ダイビング・マニュアル 朝倉書店  
 2012 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  
 2006 ダイビング・テクノロジー 石黒信雄 全日本潜水連盟

2008 NAUI ナイトロックス NAUI エンタープライズ  
 1995 潜水医学テキスト 後藤與四之 橋本昭夫 水中造形センター  
 1996 NOAA diving manual 社会スポーツセンター  
 1998 ナイトロックスダイビング 石黒信雄 社会スポーツセンター  
 1995 潜水医学入門 池田知純 大修館書店  
 2011 ダイブコンピュータが示す「無減圧潜水時間」の危険性 今村昭彦 日本高気圧環境・潜水医学会関東地方会誌 11 : 42-49  
 2010 減圧症にならない潜り方 山見信夫 日本高気圧環境・潜水医学会雑誌 45 : 89-98