

●資料

海上自衛隊で実施した空気及び窒素酸素飽和潜水

池田知純*

キーワード：飽和潜水，窒素酸素飽和潜水，潜水，減圧，減圧症

Air and nitrogen-oxygen saturation diving exposures done by the Maritime Self-Defense ForceTomosumi Ikeda*
Self-Defense Force Hospital Etajima
Defence Medical College Research Institute**Keywords** : _____
saturation diving, nitrox,
diving, decompression,
decompression sickness

緒言

浅深度の飽和潜水ではヘリウム酸素の代わりに、窒素酸素あるいはその特殊な構成としての空気が環境ガスあるいは呼吸ガスとして用いられることがある。欧米ではこのような飽和潜水が数多く実施され報告されているが、本学会に於てはまとまった形では報告されていない。そこで、これまで海上自衛隊において実施された窒素酸素ないし空気飽和潜水について、減圧面に重点を置いて紹介することにする。

なぜ窒素酸素飽和潜水か

窒素酸素を用いる理由としてヘリウムに比較して窒素が安価であることがよく挙げられる。確かに窒素そのものはヘリウムに比較して安く、特に空気は原料としては無料であるので、高压タンクそのものをヘリウムの代わりに純粋の窒素や空気

で加圧するのは費用を減じる上で大いに意味がある。しかし、表1に示すごとく窒素酸素混合ガスは精製費用が高くつきそれ程廉価ではないことに留意しておかなくてはならない。したがって、高压タンクの加圧や呼吸ガス用に窒素酸素混合ガスを使うのは費用の面からはあまり効率的な使用方法ではない。呼吸ガスとしては深度にもよるが空気を使用することが多い。

窒素酸素飽和潜水を用いるもう一つの大きな理由は減圧にある。例えば空気を用いて190ft(57m)まで潜って水面まで浮上する場合、現行の米海軍潜水教範によれば無減圧潜水が可能な滞底時間は僅か5分間であるのに対し、水面まで浮上する代わりに深度30ft(9m)まで浮上してそこに留まればよいとすると、滞底時間は23分に延び、深度60ft(18m)に留まるとすると実に83分にまで延ばすことが可能になるからである^(注)。このことはつまり、深度9mや18mの飽和潜水を行ってそこをベースとして深く潜るということになり、窒素酸素飽和潜水が用いられる所以になるわけである。

(注) 米海軍減圧表の作成に当たって用いられてきたある深度までに減圧症に罹患することなく浮上できる組織内窒素分圧は表2のようにになっている¹⁾²⁾。この組織内窒素分圧はM値といわれ絶対圧力(fswa: feet of seawater absolute)で示したフィートで示されている。これによると、半減時間5分の組織に於いて水面まで安全に浮上するためのM値は104fswaなのに対し、30ft即ち9mまで浮上すればよいのであればM値は174fswa、60ft(18m)までの場合は242fswaが増加することになる。したがって、浮上深度が深くなれば組織内の窒素分圧が高くて異常を来さなくなるので、その分多くの窒素が体の中に溜まってもよいことになり、滞底時間が増加する。

*自衛隊江田島病院(現所属：防衛医学研究センター)

表1 各種ガスの値段(1996年現在)

ガス	価格(円/m ³)
窒素	500
窒素酸素混合ガス	2500
ヘリウム	2000
ヘリウム酸素混合ガス	3500
酸素	500
三種混合ガス	4000

表2 水面, 30fsw(9m)及び60fsw(18m)におけるM値(fsw)

深度 (fswg)	半減時間 (min)					
	5	10	20	40	80	120
水面	104	88	72	58	52	51
30	174	148	124	99	90	88
60	242	208	174	141	128	126

fswa : feet of sea water absolute

fswg : feet of sea water gauge [文献1]から抜粋]

なお、このように空気を呼吸しながら深く潜った後に浮上して留まる環境のガスがヘリウム酸素であると、いわゆる isobaric bubble formation といって気泡が形成されるおそれがあるのに対し、構成要素は空気と同じである窒素酸素混合ガスが環境ガスの場合、ガス交換による気泡形成を考慮する必要がないのも、窒素酸素飽和潜水が用いられる理由の一つである。

さらに、一般の潜水作業とは関係ないが、潜水艦救難作業を実施する場合にも窒素酸素飽和潜水を考慮しておかなければならない。というのは、潜水艦が事故によって浮上不可能に陥りさらに潜水艦内部の空気の圧力が上昇した場合、潜水艦の乗員はとりもなおさず上昇した圧力で飽和する事になり、その状態から大気圧まで浮上するためには窒素酸素飽和潜水からの減圧が必要になって来るからである(環境圧力にもよるが空気のままでは肺酸素中毒に罹患することがある)。

なお、かつてはヘリウムの産成地域が一部の国に限られていたことからヘリウムが戦略物資とし

て扱われたこともあり、窒素がどこでも得られることに窒素酸素潜水を用いる意義があるとも言われたが、現在の世界情勢及び技術の進歩発展を考えると、その面からの窒素を用いる意義は少ない。

窒素酸素飽和潜水の概要

海上自衛隊で実施した飽和潜水に触れる前に、窒素酸素飽和潜水の実施方法について簡単に記しておく。

まず、所定の酸素分圧を得るまで空気をを用いてタンクを加圧する。所要酸素分圧が0.42ataであれば、深度10mまで加圧することになる。その後は純窒素を用いて予定の深度まで加圧し、潜水員はそこに留まり飽和することになる。実際に潜水作業を実施する場合は、通常の飽和潜水と同じようにタンクからPTC(personnel transfer capsule, 潜水鐘, 潜水エレベータ, 潜水ベル, SDCともいう)と呼ばれる潜水装置に潜水員を移して所要の深度まで空気をを用いて加圧してPTCを水中に沈め、ハッチを開いて海中に潜水員を出し、潜水員は空気を呼吸しながら水中で作業を行うのである。予定の作業が終われば潜水員はPTCに戻り、PTCをつり上げてタンクに接続し、潜水員はタンクに戻ってそこで休養することになる。この一連の作業を作業潜水あるいはエクスカージョンないしエクスカージョン潜水という。エクスカージョンを繰り返して作業が全て終了したならば今度はタンク内の圧力を徐々に下げて大気圧まで浮上する。この場合の減圧は通常のヘリウム酸素飽和潜水における減圧と異なり環境ガスが窒素酸素なので、減圧時間の長い窒素酸素飽和減圧を用いなければならない。

なお、当初のやや高い酸素分圧を維持しようとすると、深度が浅くなるに従って酸素の割合を大きくしなければならなくなり火災の危険性が増加してくるので、通常は大気圧近くになるに従って酸素分圧を徐々に下げていくようにしている。

また、空気をを用いてエクスカージョンを実施するのは費用の面からは廉価で望ましいが、酸素と窒素の割合が固定しているので酸素中毒や窒素酔いに陥りやすくなっていることにも注意しておかなくてはならない。さらに窒素はヘリウムに較べて格段に密度が大きいため、呼吸抵抗が大きくなることにも留意しておく必要がある。

表3 海上自衛隊最初の空気あるいは窒素酸素飽和潜水 (1968~69)

潜水名	被験者 (名)	深度 (m)	ガス	酸素分圧 (ata)	滞底時間 (時間)	減圧時間 (時間:分)	罹患者 (名)
Prex-1	3	30	air	0.83	24	11:07	0
Prex-2	2	30	air	0.83	72	13:03	1
Prex-2R	3	30	nitrox	0.3	72	29:25	2

文献3)から一部改変して掲載

海上自衛隊で実施した飽和潜水

海上自衛隊が行った窒素酸素飽和潜水は次の三つのシリーズがあるが、いずれもエクスカージョンは実施していない。

1. 30m 空気及び窒素酸素飽和潜水

これは1968年から69年にかけて行われたもので、表3に示すような潜水が実施されている³⁾。表中被験者の数が原論文の数と異なっているのは、原論文に於ては採血などの作業に当たった潜水員を被験者に含めていない為であるが、減圧の面からみれば被験者としても差し支えないのでこのようにした。なお、この潜水は原論文に拠れば高分圧酸素の毒性を見るために行ったものようである。

しかし、現在から見て興味深いのは減圧である。それは、深度30mからの減圧時間が11時間7分から29時間5分までと欧米での報告例に比較して極めて短いことである。この減圧スケジュールが導き出された詳細は不明であるが、基本的には飽和潜水ではない一般の潜水の減圧計算に用いられるWorkmanの方法⁴⁾によって計算されたものようである³⁾。ところが、Workmanの方法によって窒素酸素飽和潜水の減圧スケジュールを計算しようとすると、極めて長い半減時間組織の窒素許容分圧が必要になってくるが、その当時はその値が明らかにはされていなかったのが実状である。したがって、実際にどのような根拠に基づいて減圧計算がなされたのかは今となっては不明と言わざるを得ない。

この飽和潜水において3名が減圧症に罹患しているが、潜水医学実験隊に残されている治療記録によると、いずれも膝の痛みを訴えており、重篤

な症状は見られなかったようである。まず1例はPrex-2潜水において0923浮上後1230頃から左関節痛を訴え、1426から再圧治療表5を用いて再圧治療を実施し治癒している。約1年後に行われた次のPrex-2R潜水で発症した2例のうち1例は先の例と同一被験者で、2025浮上し翌朝0500ごろ左膝関節痛が発生したため、0533から再圧治療を実施している。再圧治療は165ftまで再圧してヘリウム酸素ガスを呼吸し、0948に60ftまで浮上した後は再圧治療表6に準拠して治療を行い、左膝の重い感覚は残るものの1457大気圧に戻ったもようである。もう一名は衛生員で、浮上中20ftで左膝関節痛発症、30ftまで再圧しヘリウム酸素、窒素酸素、酸素及び空気を呼吸しながら再圧開始から約13時間後に大気圧まで浮上し症状は残らなかったもようである。また、これら3名とも海上自衛官であるが、以降骨壊死に罹患していることは指摘されていない。

なお、この報告以前にも窒素酸素ないし空気飽和潜水実験が実施されていたもようであるが、治療を除く実験資料が散逸して不明なので、本論からは割愛した。

2. 40m 窒素酸素飽和潜水

この潜水は潜水艦脱出訓練の一環として、5気圧まで加圧された潜水艦内部から大気圧まで減圧症に罹患することなく浮上するための減圧方法を検証することを第一の目的として1987年に実施されたものである⁵⁾。

このような目的を持った潜水としては、先に米海軍によるNISAT計画があるが、そこで用いられた飽和潜水の減圧理論による減圧速度Cは

$$C = (PO_2 + \Delta P) \times 1n2 \times 60 / H$$

であらわすことができ(ΔP は許容分圧, Hは半減

表4 40m 窒素酸素飽和潜水における減圧プロフィール

深度		減圧速度		所要時間		
fsw	msw	fsw/h	msw/h	h	min	sec
131-125	(40.0-38.1)	2.00	(0.61)	3	00	00
125-33	(38.1-10.1)	1.38	(0.42)	66	40	00
33-33	(10.1-9.2)	1.34	(0.41)	2	14	20
30-20	(9.2-6.1)	1.21	(0.37)	8	15	52
20-10	(6.1-3.1)	1.07	(0.33)	9	20	45
10-0	(3.1-0.0)	0.93	(0.28)	10	45	10
				100	16	07

文献5)による

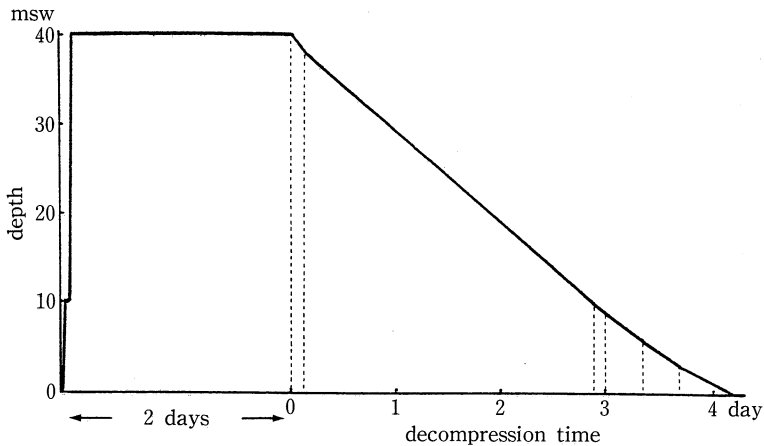


図1 潜水プロフィール〔文献5)から転載〕

時間(分))⁶⁾,それぞれの値は,許容分圧2.29mswa (meters of sea water),半減時間640分,環境の酸素分圧0.3気圧(3.00mswa)が用いられている⁷⁾。

我々が実施した潜水では,酸素分圧を0.42気圧と上昇させた他はこの値と同じ値を用いて減圧速度を計算した。つまり,環境の酸素分圧が大きい分だけ浮上速度を増して浮上したことになる。40mから水面まで浮上するのに要した時間は4日4時間16分であった。個々の浮上速度及び潜水プロフィールは表4及び図1に示したとおりである。

本潜水の被験者は6名で,明らかな減圧症に罹患した者は認められなかったが,超音波Mモード法による気泡検知⁸⁾⁹⁾では,1名に浮上直前に僅かに気泡を認めている。

このことは,当初極めて安全領域にあると考えられていたNISAT計画による減圧方法によっても気泡が発生し得ることを示すものであった。

3. 6~8 m 空気飽和潜水

本潜水は先の40m窒素酸素潜水で用いられた浮上速度をさらに短縮出来ないかを検討するために,最大許容分圧をもっと大きく設定できないか検討することを第一の目的としてなされたもので

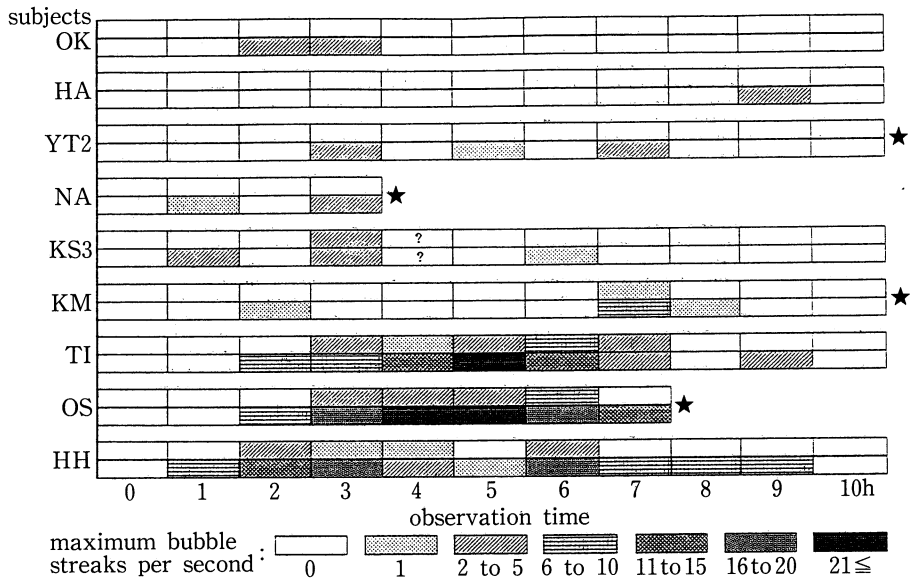


図2 8 m 空気飽和潜水から浮上後の9名の被験者における気泡発生状況

縦軸に各被験者、横軸に浮上後の経過時間を示し、超音波 M モード法で1秒間に検知された気泡の数の多寡を濃淡で示してある。上段の枠は安静時、下段の枠は四肢の筋肉の収縮を繰り返している時の成績である。星印は減圧症ないし疑似減圧症に罹患したことを示す。〔文献10)から転載〕

あるが、それは必然的に飽和潜水のように長時間潜った場合に、その深度から特に減圧しないで水面に直接浮上しても減圧症に罹患しない最大深度を明らかにするものでもあった¹⁰⁾。

本潜水の概要は次のとおりである。すなわち、潜水深度は6m、7m及び8mの3種類で、滞底時間はいずれも72時間の空気飽和潜水、減圧速度は1m/分、被験者は6m及び7mでは10名、8mでは9名で、1988年から89年にかけて実施された。

超音波 M モード法による浮上後の気泡検知では、6 m 潜水では1名に1個の気泡を検知し、7 m 潜水では4名の被験者に1秒当たり最大9個の気泡を認めたと、いずれも減圧症に罹患するものはいなかった。8 m 潜水では図2に示すように全員に気泡を認め、うち4名が減圧症ないし疑似減圧症(膝等に軽い違和感を訴えるもので、ニグル(niggle)ともいう)に罹患し再圧治療を受けた。

この潜水の結果からは気泡を発生させ得ない許容分圧 ΔP は $16 \times 0.79 - 10 = 2.64 \text{mswa}$ 、減圧症

に罹患しない許容分圧は $17 \times 0.79 - 10 = 3.43 \text{mswa}$ となるが、この値に基づいた減圧実験は実施されていない。

この潜水のより重要な意義は、滞底時間が長くなった場合の減圧症に罹患しないいわゆる無減圧潜水が可能な深度が明らかにされたことである。従来、Haldane の論文等¹¹⁾¹²⁾の影響からか、深度10mの潜水であればどんなに滞底時間が延びても減圧症に罹患しないものとされてきたが¹³⁾、本潜水によって減圧症に罹患しない最大深度は7m前後であることが実証された。

結論に代えて

以上にみたように、海上自衛隊で実施された一部空気を含む窒素酸素飽和潜水はエクスカージョンを伴わない、言い換えれば直接潜水とは関係しないものであったが、飽和潜水実験は要する人員器材時間が大きく、また今となっては実施不可能な実験も含まれており、ここで得られた知見を有

効に利用していくことが望まれる。

本論旨は第30回日本高気圧環境医学会総会パネルディスカッション「浅海域潜水をめぐる諸問題」(1995年(平成7年)11月17日於名古屋)において発表した。また、ここで述べた意見は著者の個人的な見解である。

〔参考文献〕

- 1) Miller JW (ed): Vertical Excursions Breathing Air from Nitrogen-Oxygen or Air Saturation Exposures. Washington D.C.; U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration. 1976
- 2) Hamilton RW Jr, Kenyon DJ, Freitag M, Schreiner HR: NOAA OPS I & II: Formulation of Excursion Procedures for Shallow Undersea Habitats. Tarrytown NY; Environmental Physiology Laboratory, Union Carbide Technical Center. 1973
- 3) Matsuda M, Ito Z, Kaminaga T, Nakayama H, Morita A: Toxic effects under high-pressure oxygen atmosphere. In: Wada J & Iwa T eds. Proceedings of the Fourth International Congress on Hyperbaric Medicine. Tokyo; Igaku Shoin. 1970; 5-9
- 4) Workman RD: Calculation of air saturation decompression tables. U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 11-57. Washington DC; U.S. Navy Experimental Diving Unit. 1957
- 5) 池田知純, 鈴木信哉, 岡本安裕: 40m 窒素酸素飽和潜水の一例. 産業医学. 30: 284-5, 1988
- 6) Schreiner HR, Kelly PL: Computation methods for decompression from deep dives. In: Lambertsen CJ, ed. Underwater Physiology Proceedings of the Third Symposium on Underwater Physiology. Baltimore; The William & Wilkins Co. 1967; 275-99
- 7) Hamilton RW, Adams GM, Harvey CA, Knight DR: SHAD-NISAT: A Composite Study of Shallow Saturation Diving Incorporating Long Duration Air Saturation with Excursions, Deep Nitrox Saturation, and Switch from Nitrogen to Helium. Naval Submarine Medical Research Laboratory Report 985. Groton CT; Naval Submarine Medical Research Laboratory. 1982
- 8) Ikeda T, Suzuki S, Okamoto Y, Shimizu K, Nitahara K, Hashimoto A: Application of M-mode ultrasonic method to the use in a dive simulation chamber to detect intraventricular microbubbles. In: XVIIth Annual Meetings of the EUBS, conference paper No. 29. Aberdeen; 1988
- 9) Ikeda T, Suzuki S, Shimizu K, Okamoto Y, Llewellyn ME: M-mode ultrasonic detection of microbubbles following saturation diving: a case report and proposal for a new grading system. Aviat Space Environ Med 60: 166-9, 1989
- 10) Ikeda T, Okamoto Y, Hashimoto A: Bubble formation and decompression sickness on direct ascent from shallow air saturation diving. Aviat Space Environ Med 63: 121-5, 1993
- 11) Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS: The prevention of compressed air-illness. J Hygiene 8: 342-443, 1908
- 12) Workman RD: Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 6-65. Washington DC; U.S. Navy Experimental Diving Unit. 1965
- 13) U.S. Navy Diving Manual Vol 1 (Air Diving), Revision 3. Flagstaff AZ; Best Publishing Co. 1993

(1996年提出)