

【 原 著 】

海上自衛隊に所属する飽和潜水員の記憶機能が正常に維持されていることについて

小沢 浩二
防衛省 海上自衛隊 潜水医学実験隊

海上自衛隊に所属する飽和潜水員の記憶機能が正常に維持されていることについて

短縮表題：飽和潜水員の記憶機能

本研究では、学習効果が影響することなく反復測定が可能な記憶検査を用いて、海上自衛隊に所属する飽和潜水員の記憶機能について検討した。被検者は36名の飽和潜水員であり、深深度のヘリウム・酸素飽和潜水（400 msw, 440 msw）の前後で測定を実施した。深深度飽和潜水実施前の測定では、被検者は年齢相応の記憶機能を保持していること、すなわち記憶機能は正常であることが明らかとなった。また、深深度飽和潜水の実施後においても記憶機能に変化は認められず、飽和潜水の実施自体による直接的な影響はないことが示された。さらに、事前測定時の記憶機能と飽和潜水員としての経歴（経験年数と経験深度）との間に関連は認められず、飽和潜水による長期的影響もないことが判明した。従って、加減圧が適切になされ、かつ実施回数が年1回にとどめられるならば、深深度飽和潜水の実施により、日常生活に支障を来すような記憶機能の悪化がもたらされることはないことが示唆された。飽和潜水の反復による神経心理学的機能への影響の可能性について、若干の考察を行った。

キーワード 模擬深深度潜水, 神経心理学的評価, 直接的影響, 長期的影響

【Original】

Normal memory function is maintained in saturation divers belonging to Japan Maritime Self-Defense Force

Koji Ozawa

Undersea Medical Center, Japan Maritime Self-Defense Force, Ministry of Defense

Abstract

Memory function of saturation divers belonging to Japan Maritime Self-Defense Force was evaluated with a computerized test developed to diagnose mild memory disturbance. This test comprised of six parallel contents with equal difficulty and thus enabled repetitive measurements without contamination of learning effect. Subjects were 36 male military divers who participated in simulated helium-oxygen saturation dives (400 msw or 440 msw). They were measured one week before the dive and at three time points after the dive: four to seven hours, one week and two weeks after decompression. The evaluation scores of memory function at the pre-dive measurement were comparable to those of age-matched normal adults group and the scores remained unchanged throughout the post-decompression measurements. These results suggest that the subjects maintained normal memory function and that there were no immediate effects of deep-sea saturation diving on memory function. Moreover, no relationships were found between the evaluation scores and saturation diving careers at the pre-dive measurement. This absence of relationship indicates that repeated saturation diving did not bring long-term effects on memory function. It is therefore suggested that deep-sea saturation diving causes neither immediate effects nor long-term effects on memory function, provided that an appropriate compression/decompression schedule is applied and also provided that its operation is limited to once per year.

keywords simulated deep-sea diving, neuropsychological assessment, immediate effect, long-term effect

I 緒言

飽和潜水による長期的影響については、欧米では1980年前後より問題とされてきた¹⁾。そして1990年代に入ると、この長期的影響をテーマとしてシンポジウム等も開催されるようになり、飽和潜水のみならず通常潜水においても、身体面から精神面に至る様々な問題が存在していることが認識されることとなった²⁾。我が国においては、平成25年度の第48回日本高気圧環境潜水医学会学術総会において、Thorsen³⁾により潜水が引き起こす長期的影響についての包括的な紹介がなされている。

飽和潜水がもたらすと考えられている長期的影響の一つに神経心理学的変化があり、特に記憶機能の悪化を示唆する研究もある。例えばTodmenら^{4,5)}やVærnes⁶⁾は、一部の潜水員についてではあるが、記憶機能を含む神経心理学的悪化が飽和潜水経験と関連していることを指摘している。しかしながら、神経心理学的機能には加齢を初めとして生活上の様々な要因が複雑に関与しているため、飽和潜水による長期的影響として神経心理学的悪化が引き起こされるのか否かについては、現在においても明確な結論は得られていない⁷⁾。

さらに、そもそも飽和潜水終了後に神経心理学的変化が認められるのか否か、すなわち飽和潜水の実施による直接的影響が減圧終了後にも残存しているのか否かについても、見解は一致していない。深深度への加圧によって引き起こされる神経学的及び神経心理学的症状、すなわち高圧神経症候群 (HPNS: high pressure nervous syndrome) は一過性の現象であり、加圧深度にもよるが概ね保圧中に、遅くとも減圧中には消失するとされている^{8,9)}。ただし、一部の潜水員には減圧終了後にも何らかの神経学的、神経心理学的変化が残存していたことが報告されており^{10,11)}、記憶機能の低下¹²⁾も指摘されている。

このように、飽和潜水による神経心理学的影響、特に記憶機能への影響については、知見は錯綜していると言わざるを得ない。記憶機能はヒトの精神活動の中核をなしており、その変化は生活全般に大きな影響を及ぼすことから、飽和潜水が記憶機能に及ぼす影響の把握は、飽和潜水員の健康管理という点から

重要な問題である。そこで、本研究では飽和潜水員の記憶機能は年齢相当なのか否か、つまり正常なのか否か、また、飽和潜水の実施後においても残存するような記憶機能の変化、すなわち飽和潜水による直接的影響が認められるのか否かについて検討した。さらに、飽和潜水員の記憶機能が飽和潜水経験年数や経験深度と関係があるのか否か、すなわち飽和潜水による長期的影響の有無についても検討を加えた。

II 方法

1. 研究の対象と年齢対応群

研究の対象は、2002年から2009年にかけて実施された8回のヘリウム・酸素飽和潜水 (400 msw × 1, 440 msw × 7; msw: meter sea water) であり、これらの飽和潜水に自らの意志で志願し、健康診断等の結果に基づいて選抜された、のべ48名の飽和潜水員に対して測定を実施した (Table 1)。飽和潜水員の健康管理は厳密になされており、減圧症の病歴を持つ者は皆無であった。飽和潜水員に対しては、本研究の目的、方法等の説明を行い、研究への参加について承諾を得た。研究への参加に対して報酬は支払われなかったが、彼らには防衛省の給与等に関する法律施行令に従って異常気圧内作業手当が支給された。

この、のべ48名の飽和潜水員から、36名を被検者としてデータの分析を実施した。平均年齢は34.3 (±4.6) 歳であった。被験者数が参加人数と違っているのは、この8年間に実施された飽和潜水に複数回にわたって参加した潜水員が7名おり、彼らについては、最後の飽和潜水時のデータのみを用いたためである。被検者の飽和潜水員としての経歴は1年から23年に及んでおり、平均値は7.9 (±6.3) 年であった。なお、Table 1には、飽和潜水によって被検者にもたらされた医学的変化の概略も示されている。

比較の対象として、35名の年齢対応群を設定した (設定方法については記憶機能の測定方法の項で説明)。彼らの平均年齢は33.9 (±6.8) 歳であり、*t* 検定の結果、被検者群との間に統計学的に有意な差異は認められなかった。

Table 1. General characteristics of the simulated saturation dives and medical status of the subjects.

	2002	2003	2004	2005
Characteristics of the dive				
subjects/divers ¹⁾	6/6	3/6	2/6	5/6
maximum depth ²⁾	400 msw	440 msw	440 msw	440 msw
Compression time	34 h	40 h	40 h	40 h
Medical status of the subjects				
HPNS				
drowsiness, sleepiness	5/6	3/3	1/2	4/5
vertigo, nausea	4/6	2/3	2/2	5/5
EEG θ augmentation ³⁾	6/6	3/3	2/2	5/5
Increase in body sway ⁴⁾	6/6	3/3	2/2	5/5
Tremor ⁵⁾	0/6	0/3	0/2	0/5
DCS ⁶⁾	0/6	0/3	0/2	0/5
	2006	2007	2008	2009
Characteristics of the dive				
subjects/divers	5/6	5/6	5/6	5/6
maximum depth	440 msw	440 msw	440 msw	440 msw
Compression time	40 h	40 h	39 h	39 h
Medical status of the subjects				
HPNS				
drowsiness, sleepiness	3/5	5/5	4/5	5/5
vertigo, nausea	4/5	3/5	5/5	4/5
EEG θ augmentation	5/5	5/5	5/5	5/5
Increase in body sway	5/5	5/5	5/5	5/5
Tremor	0/5	0/5	0/5	0/5
DCS	0/5	0/5	0/5	0/5

- 1) Some of the divers participated in saturation dives twice or more. In these divers, only the last data was used for analysis.
- 2) Compression to 10 msw was performed with air to raise oxygen partial pressure to 0.42 ATA; this procedure inevitably raised nitrogen partial pressure to 1.58 ATA. The following compression to the designated depth was done with helium. Therefore, these dives are classified as trimix diving in strict definition.
- 3) Multi-channel EEG was analyzed using a topographic mapping method.
- 4) Body sway was measured with a gravicorder.
- 5) Tremor was evaluated with manual dexterity measurement (i.e., a pegboard test) instead of physiological measurement. No impairment was found in the test performance during compression and bottom.
- 6) Decompression was done according to a method based on Duke-GUSI Saturation Decompression Schedules. None of the divers including the subjects suffered from DCS, and all of the divers returned to their routine works after one-week compensatory day-off.

2. 加減圧法

400 msw及び440 mswへの加圧は、潜水医学実験隊の研究に基づく独自の方法によって実施した。この加圧方法の検証も、今回の研究の対象とされた飽和潜水の目的の一つであった。減圧は、BennettとSchafstall¹³⁾が示している減圧表に基づいて実施した。飽和潜水の所要日数は、400 msw潜水が35日間、440 msw潜水が29日もしくは30日間であった。

3. 記憶機能の測定方法

記憶機能の測定には、STM-COMETという軽度記憶障害を判別するために開発されたソフトウェアを用いた。これは、老年精神医学の分野で開発された

検査用ソフトウェアであり、パーソナルコンピュータを用いて記憶機能の検査と評価を簡便に行うことができる。STM-COMETには、難易度が等しく設定された内容の異なる6組の並行検査が用意されており、学習効果が影響することなく反復測定が可能となっている。また、STM-COMETには20歳~89歳の健常成人(各種神経心理学的検査の後、精神科医によって正常と判断された成人)から測定されたデータが付属しており、前述の年齢対応群は、このデータより抽出した。具体的には、飽和潜水員と年齢の範囲が重なる健常成人を選択した。

STM-COMETの大きな特徴は、検査の内容がAtkinsonとShiffrinが提唱した2段階貯蔵理論¹⁴⁾に

基づいて構成されており、記憶機能の様々な側面（短期記憶の容量とリハーサル機能、短期記憶を作業記憶ととらえた場合の情報処理機能、長期記憶の再生機能と再認機能）を評価できるとともに総合的な評価（記憶機能の悪化度）も可能なことである。

短期記憶の容量は、ディスプレイに15個の単語を順次提示し、その直後に想起させて、正確に再生された単語数により評価している。リハーサル機能については、無作為に選ばれた10個の「ひらがな」をディスプレイに提示し、30秒後から4分30秒後にかけて4回にわたり想起させ、その再生総数（リハーサル数）により評価している。

作業記憶の情報処理機能は、Sternberg Memory Scanning Testを用いて情報検索時間を測定することにより評価している。これは、ディスプレイに3～5個の数字を提示した後に、新たに1つの数字を提示し、その数字が直前に提示された数字の中にあつたのか否かを判断させるテストであり、その判断に要した時間がミリ秒の精度で測定される。

長期記憶の再生機能については、短期記憶の容量測定時に提示された15個の単語を20分後に想起させ、正確に思い出された単語数（再生数）で評価している。再認機能については、新たに15個の単語を混在させて表示し（総数：30）、それらが短期記憶の容量測定に用いられた単語か否かを判断させ、その正答数（再認数）により評価している。

総合評価としての記憶機能の悪化度は、これらの5指標（記憶容量、リハーサル数、情報検索時間、再生数及び再認数）に基づいた数値である。この数値は、経験的に設定された数式により算出され、その値が小さいほど悪化度は低くなる（つまり記憶機能は良好）と判断される。

4. 測定時点

測定は、事前測定として加圧開始日の1週間前に1回、事後測定として減圧終了時点から4～7時間後、1週間後及び2週間後の3回、計4回にわたり実施した。減圧終了時点からの4時間後は飽和潜水員の待機時間が終了する時点であり、この時点で心身に異常がなければ飽和潜水員は帰宅が許可されることにな

る。何らかの影響が減圧終了後も残存する可能性を考慮し、減圧終了日から1週間後（代休後）及び2週間後にも測定を実施した。

5. 統計的検定

統計的検定にはSPSS (11.0J) を用いた。2群間の比較にはt検定を、測定時点間の比較には反復測定のある一元配置分散分析を行った。記憶の悪化度については、算出された数値の等間隔性の問題を考慮し、ノンパラメトリック検定（Mann-Whitney U 検定、Friedman 検定）も併用した。

Ⅲ 結果

1. 飽和潜水の影響についての概要

記憶検査の結果には、記憶機能のみならず意識水準や遂行機能等も影響する¹⁵⁾。従って、飽和潜水の実施によって被検者に生じた様々な変化が、飽和潜水終了後の記憶機能測定に影響を及ぼしていた可能性もあることから、飽和潜水時に確認された医学的变化の概要を以下に記した（Table 1）。

(1) 加圧による影響（HPNS 関連）

a. 自覚症状

加圧中に多くの被検者から、ぼんやり感、眠気、めまい、むかつき等の報告があつたが、加圧終了の翌日には概ね消失していた。

b. 脳波の変化

加圧中から保圧初日には、全ての被検者で、前頭部—中心部に θ 波増強が認められた。この増強は保圧中に著明に減弱したが、一部の被検者では減圧中にも、ある程度、持続していた。全ての被検者において、この変化は減圧終了から1週間後には概ね消失していた。

c. 重心動揺（平衡機能）

加圧中には全ての被検者に重心動揺の増加が認められ、特に閉眼時で顕著であつた。この状態は保圧中にも持続していたが、減圧とともに減弱し、減圧終了後には加圧前の状態に戻っていた。

d. 振戦

一般職業適性検査に用いられている巧緻性作業検査（ペグボード検査）により評価した。加圧中のみ

らず保圧中にも、全ての被検者で作業成績に悪影響は認められず、実用的なレベルでは振戦の発生はないか、あるいは最小と判断された。

(2) 減圧による影響

60 msw以浅の減圧中には、1日に2回(原則として午前10時と午後6時)、自覚症状が調べられたが、減圧症の発生を示唆する報告はなかった。減圧終了直後及び待機時間中にも有所見の被検者はおらず、被検者を含む飽和潜水員総員が記憶機能測定の後には帰宅を許可された。1週間の代休後の測定時には、体力の低下等を訴えた潜水員はいたものの、神経心理学的変化や減圧症を示唆するような自覚症状は報告されず、飽和潜水員総員が通常業務に復帰した。2週間後の測定時においては特記すべき自覚症状は報告されなかった。

2. 被検者の事前測定値と年齢対応群による測定値との比較

Table 2には、5つの記憶機能指標、すなわち短期記憶の容量(capacity)とリハーサル数(rehearsal)、作業記憶の情報検索時間(scanning time)、長期記憶の再生数(recall)と再認数(recognition)、並びに総合評価としての記憶機能の悪化度(Degree of Deterioration)について、年齢対応群と被検者群の測定値を比較した結果が示されている。このTableに

は、参考として数値の違いの意味も記されている。

短期記憶の容量については、年齢対応群では一度に平均8個の単語を想起することができたのに対し、被検者群では平均9.2個の単語の想起が可能であり、両群間には統計学的に有意な差異が認められた。リハーサル数については、飽和潜水員の事前測定値は年齢対応群の測定値とほぼ等しく、統計学的にも有意な差異は認められなかった。

作業記憶の機能を示す情報検索時間については、被検者群の事前測定値は年齢対応群の測定値よりも遅延していたものの、統計学的には有意な差異は認められなかった。

長期記憶からの再生数については、被検者群は年齢対応群よりも多くの単語の想起が可能であり(平均値で0.9個の差)、両群間には統計学的に有意な差異が認められた。再認数についても被検者群の方が多かったが、統計学的には有意な差異は認められなかった。

記憶機能の悪化度は、被検者群の方が年齢対応群よりも低くなっていたが、両群間に有意差は認められなかった。なお、Mann-WhitneyのU検定でも同様の結果が得られた。

3. 深深度飽和潜水による直接的影響

Table 3には、加圧前、減圧終了から4~7時間後、

Table 2. Comparisons between the age-matched group and the subject group.

Memory Index	Comparison of memory function			Meaning of the difference between the groups ³⁾
	Age-matched (n = 35)	Subjects (n = 36) ¹⁾	Statistical test ²⁾	
Short-term memory				
Capacity	8.0 (±2.0)	9.2 (±1.2)	$p < .01, t(55.62) = 2.84$	better
Rehearsal	39.0 (±3.3)	39.3 (±1.5)	n. s., $t(47.81) = .37$	almost equal
Working memory				
Scanning time (msec)	532.0 (±105.5)	573.6 (±74.0)	n. s., $t(69) = 1.93$	worse
Long-term memory				
Recall	7.3 (±2.3)	8.2 (±1.1)	$p < .05, t(48.14) = 2.23$	better
Recognition	25.8 (±3.1)	27.0 (±1.9)	n. s., $t(55.67) = 1.97$	better
Total evaluation				
Degree of Deterioration	21.5 (±7.3)	18.9 (±4.1)	n. s., $t(53.20) = 1.86$	better

Numbers are means and standard deviations (in parenthesis)

1) The data measured at the pre-dive day (one week before the compression day) was used for comparison.

2) t test was used for statistical analysis ($\alpha = .05$). Mann-Whitney U test also indicated a non-significant difference in Degree of Deterioration: $U = 477.50, z = -1.75, p = .08$.

3) "better" suggests that the subject group is superior to the age-matched group.

Table 3. Immediate effects of simulated deep-sea saturation diving: comparisons among the measurement time points.

Memory Index	pre-dive ¹⁾	after decompression			Statistical test ²⁾
		4 - 7 hrs	1 week	2 weeks	
Short-term memory					
Capacity	9.2 (±1.2)	9.5 (±1.2)	9.5 (±1.1)	9.4 (±1.1)	n. s., $F(3,105) = 2.62$
Rehearsal	39.3 (±1.5)	39.7 (±.8)	39.7 (±.8)	39.5 (±1.0)	n. s., $F(2.02, 70.67) = 2.03$, Greenhouse-Geisser correction
Working memory					
Scanning time (msec)	573.6 (±74.0)	589.2 (±79.8)	593.4 (±99.9)	585.2 (±89.8)	n. s., $F(3,105) = 1.31$
Long-term memory					
Recall	8.2 (±1.1)	8.5 (±1.0)	8.4 (±1.0)	8.3 (±.9)	n. s., $F(3,105) = 2.39$
Recognition	27.0 (±1.9)	26.6 (±2.3)	26.9 (±1.8)	27.0 (±1.9)	n. s., $F(3,105) = .37$
Total evaluation					
Degree of Deterioration	18.9 (±4.1)	18.3 (±3.7)	18.2 (±3.4)	18.5 (±3.3)	n. s., $F(3,105) = 1.72$

Numbers are means and standard deviations (in parenthesis)

1) Pre-dive measurement was done one week before the compression day.

2) One-way repeated-measures ANOVA was used for statistical analysis ($\alpha = .05$). Friedman test also indicated a non-significant difference in Degree of Deterioration: $\chi^2(3) = 5.68, p = .13$.

1週間後及び2週間後における記憶機能指標の測定値と記憶機能の悪化度が示されている。これらのいずれについても、測定時点による大きな違いはなく、分散分析の結果、有意な差異は認められなかった。悪化度についてはFriedman 検定も実施したが、同様の結果が得られた。

4. 飽和潜水による長期的影響

飽和潜水経験の程度が記憶機能に及ぼす影響を検討するために、事前測定時のデータについて、記憶機能指標の測定値及び悪化度と、飽和潜水経験年数との相関係数を算出した結果がTable 4に示されている。これらのいずれについても飽和潜水経験年数との相関は低く、統計学的にも有意な相関関係は認められなかった。記憶機能の悪化度に対しては順位相関係数も算出したが、やはり有意な相関関係は認められなかった。

「方法」で述べたように、7名の被験者は8年間に2回以上の飽和潜水に参加していた。これらの被験者からは、飽和潜水経験の積み重ねに伴う記憶機能の変化についての直接的な情報が得られるので、最終飽和潜水時の加圧前データと初回飽和潜水時の加圧前データとの比較を行った。記憶指標等の平均値(及び標準偏差)を比較したところ、短期記憶の容量(最終回:9.7±1.6, 初回:10.1±1.5)、リハーサル数(最

終回:39.1±1.4, 初回:39.3±1.4)、情報検索時間(最終回:658.8±62.0, 初回:649.2±89.4)、再生数(最終回:8.0±1.2, 初回:7.9±1.0)、再認数(最終回:27.7±1.4, 初回:27.1±1.3)及び悪化度(最終回:17.0±4.6, 初回:17.1±6.2)のいずれについても、実質的な違いは認められなかった。

Table 4には、記憶機能の測定を受けた時点で300 msw もしくはそれ以深の飽和潜水を経験していたのか否かによって被検者を分類し、事前測定時の記憶機能指標の測定値及び悪化度を比較した結果も示されている。このような比較を行った理由は、ヨーロッパにおいては深深度、特に250 msw以深の飽和潜水の安全性に疑問を呈する研究者もいるからである^{11),16)}。事前測定時における被験者の経験深度(深海潜水訓練装置及び実海面飽和潜水)が60 msw前後、100 msw前後、200 msw, 300 msw, 320 msw, 330 msw, 400 msw, 440 msw及び450 mswであったことを考慮し、300 msw を分類の基準とした。36名の内の19名が、測定が実施された飽和潜水以前に300 msw もしくはそれ以深の飽和潜水を経験していた。なお、経験群の方が年齢は高く(経験群:36.1(±4.3)歳, 未経験群:32.4(±4.2)歳)、かつ長い飽和潜水経験年数を有しており(経験群:11.6(±6.2)年, 未経験群:3.6(±3.0)年)、これらの差異は統計学的に有意となった(年齢: $p < 0.05$, $t(34) = -2.62$; 飽和潜水年数:

Table 4. Long-term effects of simulated deep-sea saturation diving on memory function.

Memory index	Years of experience as a saturation diver ¹⁾		The maximum depth of previously experienced dives ³⁾		
	Pearson's r ²⁾	Statistical test	300 msw <	300 msw \geq	Statistical test ⁴⁾
Short-term memory					
Capacity	-.026	n. s., t (34) = .15	9.4 (\pm 1.3)	9.0 (\pm 1.2)	n. s., t (34) = .86
Rehearsal	.203	n. s., t (34) = 1.21	39.1 (\pm 1.9)	39.4 (\pm 1.1)	n. s., t (34) = -.49
Working memory					
Scanning time (msec)	.071	n. s., t (34) = .41	551.6 (\pm 55.4)	593.3 (\pm 84.0)	n. s., t (34) = -1.74
Long-term memory					
Recall	-.085	n. s., t (34) = .50	8.3 (\pm 1.1)	8.0 (\pm 1.0)	n. s., t (34) = 1.00
Recognition	.092	n. s., t (34) = .54	26.4 (\pm 2.3)	27.4 (\pm 1.5)	n. s., t (34) = -1.70
Total evaluation					
Degree of deterioration	-.021	n. s., t (34) = .12	19.5 (\pm 4.7)	18.4 (\pm 3.6)	n. s., t (34) = .82

1) Years of experience as a saturation diver differed considerably among the subjects (range: 1 – 23 years, mean: 7.9 years).

2) The data measured at the pre-dive day was used for calculation of Pearson product-moment correlation coefficient. No statistically significant correlations were found in memory indices ($\alpha = .05$). Spearman rank correlation coefficient was also calculated for Degree of Deterioration ($r = .050$, $p = .772$).

3) Nineteen subjects experienced a dive (or dives) greater than or equal to 300 msw before the dive at which the measurement was done. Numbers are means and standard deviations (in parenthesis)

4) t test was used for statistical analysis ($\alpha = .05$). Mann-Whitney U test also indicated a non-significant difference in Degree of Deterioration: $U = 141.50$, $z = .526$, $p = .08$.

$p < 0.001$, t (34) = -4.83)。

5つの記憶機能指標について、経験群と未経験群の測定値を比較したところ、いずれの指標についても統計学的に有意な差異は認められなかった。悪化度については、 t 検定及びMann-Whitney U 検定のいずれによっても、両群間に有意な差異は認められなかった (Table 4)。

経験群と未経験群間の平均年齢の差 (3.7歳) が、健常成人の記憶機能に如何なる影響を及ぼしているのかを把握するために、年齢対応群を平均年齢が35.7 (\pm 7.1) 歳の高年齢群 (18名) と31.9 (\pm 5.7) 歳の低年齢群 (17名) に分割して (平均年齢差: 3.8歳)、各記憶機能指標及び悪化度を算出した。記憶容量については高年齢群が8.1 (\pm 2.2)、低年齢群は8.0 (\pm 1.9)、リハーサル数については高年齢群が39.3 (\pm 1.7)、低年齢群は38.8 (\pm 4.4)、情報検索時間については高年齢群が554.4 (\pm 111.9)、低年齢群は508.2 (\pm 95.9)、再生数については高年齢群が7.4 (\pm 2.7)、低年齢群は7.1 (\pm 1.8)、再認数については高年齢群が25.4 (\pm 2.8)、低年齢群は26.2 (\pm 3.4)、そして悪化度については高年齢群が21.6 (\pm 7.5)、低年齢群は21.5 (\pm 7.4) となった。前述の方法により検定を行ったところ、これらのいずれについても両群間

に統計学的に有意な差異は認められなかった。

IV 考察

1. 飽和潜水後における神経心理学的変化

加圧により発生したHPNS関連の症状は従来の知見^{8,9)}と比較すると軽微であり、しかも飽和潜水中における一時的な現象であった。減圧終了後においても、記憶機能測定に間接的に影響を及ぼすような神経心理学的変化 (意識水準の低下、運動機能の異常等) は、いずれの飽和潜水員も認められなかった。従って、本研究の結果から、深深度飽和潜水が記憶機能そのものに及ぼした影響について検討することが可能である。

2. 飽和潜水員の記憶機能の特徴と年齢対応群との比較

(1) 短期記憶

一般に、ヒトの短期記憶の容量、すなわち一度に記憶できる量は7 \pm 2チャンク (単位) である¹⁴⁾。この短期記憶の容量の限界は、日常生活の様々な面に影響を及ぼしており (郵便番号等の桁数、「世界の七不思議」等の記憶のまとめ方)、マジカルナンバー7として知られている。検査付属の健常者データから抽出し

た年齢対応群では、短期記憶の容量は平均8.0個であり、予測値と一致していた。飽和潜水員については、事前測定時に測定した短期記憶の容量は平均9.2個であり、年齢対応群よりも約1個、多くなっていた。この両群間の差は統計学的に有意となり、飽和潜水員では年齢相当の健常者よりも短期記憶の容量が大きいことが示された。

短期記憶のもう一つの特徴は、その持続時間が短く、記憶を保持するためにはリハーサルが必要なことである。リハーサル機能については、飽和潜水員の事前測定値は年齢対応群の測定値とほぼ同等であり、飽和潜水員が年齢相当のリハーサル能力を保持していることが明らかとなった。従って、飽和潜水員の短期記憶は全体として年齢相応もしくはそれ以上に機能していると言えることができる。

(2) 作業記憶

2段階貯蔵理論では、短期記憶は記憶の一時的貯蔵庫としての機能が重視されていたが、近年においてはその情報処理機能が重視され、作業記憶あるいは作動記憶として研究が進められている¹⁴⁾。作業記憶の情報処理機能を評価するために測定された情報検索時間を比較したところ、飽和潜水員の事前測定値は年齢対応群による測定値よりも遅延していたが、統計学的には有意差は認められなかったことから、飽和潜水員の作業記憶の情報処理能力は年齢相応に機能していると言えることができる。

ただし、統計学的には有意差は認められなかったとはいえ、情報検索時間の遅延は情報処理機能の低下を意味しており、今回の測定結果の中で、飽和潜水員が年齢対応群よりも劣る傾向の見られた唯一の記憶機能指標であることから (Table 2)、若干の考察が必要と思われる。情報検索時間の測定では、被検者に選択判断 (提示された数字が、直前に提示された複数の数字の中にあっただか否か) を求める手続きをとっている。この選択判断に要する時間には、情報検索に基づく判断に要した時間、すなわち情報処理の能力以外にも、判断の速度を重視するのか、それとも正確度を重視するのかという方略も影響する。つまり、ヒトが行う判断では速度と正確度が両立することはなく、速度を重視する場合には正確度は低下し、正確

度を重視する場合には速度は遅延するという特徴があり (speed- accuracy tradeoff)、この特徴は記憶の想起プロセスにも影響を及ぼしていることが知られている¹⁷⁾。そこで、飽和潜水員は、年齢対応群よりも正確度を優先する判断を行っており、その結果、情報検索時間の見かけ上の遅延が引き起こされたという可能性が考えられる。その理由として、潜水時には素早さよりも正確さを求められる作業が多いことから、潜水員には正確度重視の方略が身に付いてしまっているのではないかと考えられる。この推論については今後の検証が必要である。

(3) 長期記憶

短期記憶において何らかの処理を受けた情報は長期記憶に転送されて、永続的に貯蔵されることになる。長期記憶の機能については再生と再認の検査によって評価される。再生は文字通り、記憶した情報を再生させる検査であり、記述式の試験に相当する。再認は、記憶した情報をそれ以外の多くの情報の中から選別させる検査であり、選択式の試験に相当する。再生はできなくても再認は可能なことは、日常的にもしばしば体験される現象であるが、記憶情報の想起のメカニズムの差を反映していると考えられている。飽和潜水員の事前測定時における単語の再生数は年齢対応群よりも多かったこと、また、再認数については年齢対応群と同程度であったことから、飽和潜水員の長期記憶は全体として年齢相応もしくはそれ以上に機能していると言えることができる。ただし、現時点では想起の具体的なメカニズムが解明されていないため¹⁸⁾、年齢対応群と比較して飽和潜水員の再生機能は優れていたのに対し、再認機能には差異は認められなかったことの説明はできない。

(4) 飽和潜水員の記憶機能の悪化度 (総合評価)

事前測定時における飽和潜水員の記憶機能の悪化度と、年齢対応群のそれとの間には統計学的に有意差は認められなかったことから、飽和潜水員は年齢対応群と同程度の記憶機能を保持していると言えることができる。飽和潜水員の方が短期記憶の容量は大きく、かつ長期記憶の再生機能は優れていたものの、その他の指標では年齢対応群との間に統計学的に有意な差異はなかったため、総合的には年齢相応の記憶機

能を保持していると評価されたものと考えられる。以上の所見から、今回の研究の対象となった飽和潜水員は正常な記憶機能を保持している、と結論することができよう。

3. 深深度飽和潜水による記憶機能への直接的影響

5つの記憶機能指標及び悪化度のいずれについても、減圧終了から4~7時間後、1週間後及び2週間後の測定時には、事前測定時と比較して統計学的に有意な変化は認められなかった。従って、400 msw及び440 msw 飽和潜水の実施自体は、記憶機能に減圧後にも残存するような影響を及ぼすことはないと言いうことができる。

ただし、今までに実施されてきた研究では、飽和潜水の実施後における神経心理学的影響についての知見は一致していない。米海軍は1982 ~1986年にかけて198 ~337 mswの5回のヘリウム・酸素飽和潜水を実施している。Curley¹⁹⁾は、それらの飽和潜水の前後で、計25名の海軍所属の飽和潜水員に対して記憶機能を含む神経心理学的検査(11種類)を実施し、減圧終了後(1週間以内)の検査結果には如何なる変化も認められなかったことを報告している。減圧直後には情緒面や体調等に何らかの変化が報告されたものの、これらの変化も10日以内に全て消失してしまったことを付記している。一方、ノルウェーで実施されたAarliら¹²⁾による研究では、対象となった潜水員は300 msw及び350 mswヘリウム・酸素飽和潜水に参加した23名の商業職業潜水員であり、飽和潜水後には、個人差は顕著であるものの、様々な神経心理学的変化が認められ、1ヶ月後においても記憶機能の悪化等の変化が残存していたことが報告されている。

米国とノルウェーの研究では、飽和潜水実施の諸条件が相違しているため、上述の知見の不一致の原因を特定することは困難であるが、研究の対象となった飽和潜水員の特性が異なっていたことも大きく影響しているのではないかと考えられる。ノルウェーの研究においては、様々な背景(潜水経歴、病歴)を持った民間の商業潜水員が対象とされており、この研究対象者の多様性が、個人差の多い結果が得られた原因ではないかと推測される。一方、米国の研究の対象者は、

海軍所属の軍事潜水員であり、健康状態や潜水経歴が長期間にわたり管理され、しかも類似した訓練や経験を積んだ等質な飽和潜水員であったために、比較的明確な結果が得られたのではないかと考えられる。今回の研究の対象となった海上自衛隊の飽和潜水員については、健康状態や潜水経歴は厳密に把握されており、減圧症の病歴を持つ者は皆無であった。この研究対象者の等質性という点では、本研究は米国で実施された研究の条件に近いと言える。従って、本研究及び米国による研究結果を総合して判断すると、健康及び潜水経歴が厳密に管理されている潜水員に関しては、深深度飽和潜水の実施により、記憶機能に減圧後にも残存するような悪影響がもたらされることはない、と言いうことができるのではないだろうか。

ノルウェーの商業潜水員(他給気式空気潜水員とヘリウム・酸素飽和潜水員)の神経学的変化についてなされた大規模な疫学的調査⁴⁾では、職種別の分析はなされていないが、商業潜水員全体としての減圧症の罹患率が極めて高いこと(51%)、そして減圧症の病歴が神経学的悪化のリスクファクターとなっていることが報告されている。別の調査⁵⁾では、ノルウェーの飽和潜水員(40名)の65%が減圧症の病歴を有していることも報告されている(I型とII型の両方もしくはいずれか一方の場合。II型のみの場合35%)。また、やはりノルウェーで実施された360 msw 飽和潜水前後の神経学的変化についての研究では、減圧後の神経学的症状の発現が、減圧症等による中枢神経損傷の既往歴のある飽和潜水員に認められる傾向があることが指摘されており、潜在していた神経系の病変が飽和潜水の実施によって顕在化したのではないかという仮説が示唆されている¹⁰⁾。従って、前述した飽和潜水後に神経心理学的機能の悪化が認められたというAarliら¹²⁾の研究結果についても、深深度への加圧による影響が減圧後にも残存することを示す証拠と考える以外に、上記仮説による解釈も可能ではないと思われるが、彼らの研究では飽和潜水員の減圧症等の既往歴について言及されていないため論証はできない。

4. 深深度飽和潜水による記憶機能への長期的影響

本研究では、事前測定時のデータを用いて飽和潜

水員としての経験年数と記憶機能との関係を検討したところ、5つの記憶機能指標及び悪化度のいずれについても、飽和潜水経験年数との間に有意な相関関係は認められなかった。さらに、2回以上の飽和潜水に参加した7名については、最後の飽和潜水時のデータと初回の飽和潜水時のデータを比較したが、5つの記憶機能指標及び悪化度のいずれにも実質的な差異は認められなかった。従って、飽和潜水員としての経験年数の増加は記憶機能に影響を及ぼしていなかった、とすることができる。

また、1回の300~500 mswの飽和潜水により、3.5年間の浅深度飽和潜水の反復に匹敵するような影響が生ずることを示唆している研究もあるので¹¹⁾、被検者を300 msw以深の飽和潜水の経験の有無により2群に分類し、事前測定時の記憶機能指標及び悪化度のそれぞれについて群間の違いを比較したが、2群間に統計学的に有意な差異は認められなかった。ただし、300 msw経験群の方が年齢は高く(平均年齢差:3.7歳)、飽和潜水経験年数も長かった(平均経験年数差:7.9歳)、この分類結果には経験深度以外にも年齢と経験年数が関与している可能性を考慮しなくてはならない。

経験年数に関しては、前述したように、記憶機能との間には相関関係は認められなかったことから、要因として作用していなかったと考えられるが、年齢の影響については検討する必要がある。そこで、年齢対応群を平均年齢差が3.8歳の2群に分割し、記憶機能指標及び悪化度を比較したところ2群間に有意な差異は認められず、4歳弱程度の年齢差は健常成人の記憶機能に影響していないことが判明した。従って、300 mswの経験の有無を基準とした今回の分類結果には、経験深度だけが差異をもたらす要因と考えられるが、経験群と未経験群の間に統計的に有意な差異は認められなかったことから、経験深度という要因も記憶機能に影響を及ぼしてはいなかったことになる。

以上のように、本研究では飽和潜水経験が記憶機能に影響を及ぼしていないという結論に達したが、飽和潜水による神経心理学的機能への長期的影響に関しても、従来の知見は錯綜している。米海軍が実施した最大深度の飽和潜水(555 msw, 40日間)で

は、その3年後に神経心理学的機能についての追跡調査が実施されている²⁰⁾。その結果、6名中5名は正常範囲内と判定され、1名については有所見(軽度の感覚機能の低下)であったが、その原因は以前に被った潜水とは無関係の障害にあるのではないかと推測されている。この報告の後に実施された大規模な研究では²¹⁾、48名の飽和潜水員に対し、飽和潜水の実施から最低7年を経過した時点で各種神経心理学的検査を再度施行し、6種類の検査の内、5種類については改善か無変化であり(ウェックスラー記憶検査により評価された記憶機能は改善)、1種類の検査(SDMT: Symbol Digit Modalities Test, 幾何学模様を数字に置き換えるテスト)にのみ低下を認めている。ただし、SDMTについては、年齢が対応した健常成人にも低下が認められる傾向がみられたことから、加齢による機能低下と考察されている。このような結果をふまえて、飽和潜水員の神経心理学的機能には、飽和潜水の実施による長期的影響は認められなかったとの結論が出されている。また、フランスで実施された450 msw以深の飽和潜水(450 msw, 500 msw, 613 msw, 675 msw及び701 msw)に参加した8名の潜水員(COMEX と仏海軍所属)に対する研究結果では、発生したHPNS症状は可逆的であり、長期的影響の存在を示唆する神経心理学的変化はなかったことが報告されている²²⁾。一方、ノルウェーで実施された研究結果では、一部の飽和潜水員には持続的な神経心理学的悪化(集中力の低下や記憶機能の悪化等)が認められ、しかもそれは飽和潜水の経験年数と関係のあること、すなわち長期的影響が存在することが指摘されている⁴⁻⁶⁾。

このような飽和潜水による長期的影響についての知見の不一致の原因の一つとして、既に飽和潜水による直接的影響の項で指摘したことではあるが、調査の対象となった飽和潜水員の特性の差をあげることができよう。すなわち、米海軍及びフランスの研究では、飽和潜水員は軍人もしくは研究所所属の潜水員であり、健康管理等も充分になされているのに対し、ノルウェーの研究の対象となった飽和潜水員は様々な潜水経験を持った民間の商業潜水員であり、潜水員としての資格を喪失した者や減圧症に罹患した経歴を持つ者

も含まれていたことである。本研究の対象となった被検者は、潜水経歴が管理された心身ともに健康な飽和潜水員であり、減圧症の既往歴のある者は一人もいなかったこと、かつ減圧自体も安全に実施されていたことが (Table 1)、米国やフランスで行われた研究と一致する結果が得られた理由と考えられる。

減圧症が、潜水による神経心理学的機能への長期的影響の有無に大きく関与していることは、既に Dutka²³⁾ によって指摘されている。彼は、神経心理学的所見のみならずMRI所見や病理学的所見を検討した結果、減圧症の既往歴がない潜水員の中樞神経系に長期的影響が認められるとは言い難いと論述している。また、近年、北海油田に従事した商業潜水員に対してなされた疫学的調査でも、潜水経験の増加とともに健康度の評価は低下する傾向があるものの、飽和潜水による健康への悪影響は減圧症に罹患した飽和潜水員に限られるとの報告がなされている²⁴⁾。このような知見をふまえ、最近のノルウェーの研究者による総説においても、深深度飽和潜水が神経心理学的機能に長期的な悪影響を及ぼすのか否かは不明である、との見解が表明されるに至っている⁷⁾。

5. 飽和潜水の反復による神経心理学的機能への影響の可能性

本研究では、飽和潜水員としての経歴と記憶機能との間に関連は認められなかったことから、飽和潜水による長期的影響は否定された。ただし、本研究と、長期的影響の存在を示唆しているノルウェーで行われた研究とでは、既に論じた飽和潜水員の特性に加え、飽和潜水員が従事した飽和潜水回数(従って潜水日数)も異なっていることにも留意しなくてはならない。

海上自衛隊の飽和潜水員については、諸規定に基づき飽和潜水日数は年間数十日以内であり、深深度飽和潜水については、事実上、年に1回に制限されている。一方、本論文で言及したノルウェーの研究には、年間の飽和潜水回数や潜水日数が明示されていないので、調査の対象とされた潜水員が、実際にどの程度の頻度で飽和潜水に従事していたのかは定かではない。ただし、北海油田の最盛期(1985~1993: 調査の対象とされた飽和潜水員が活動していた時期)

には、潜水医学実験隊の旧深海潜水訓練装置で過去25年間にわたり累積してきた飽和潜水時間(man-hour)に匹敵もしくはそれを上回る時間の飽和潜水が、毎年のように実施されていたこと²⁵⁾を考えると、同一潜水員が年間に反復して飽和潜水に従事していたことが推測される。言うまでもなく、飽和潜水の反復により、加圧及び減圧を繰り返し受けることになり、それらに伴うリスクが増大することになる。

加圧に関しては、しかるべき速度で実施されるならば、相当の深度(高压下)まで生体組織に不可逆的な変化が起こることはない。加圧により、原理的には気体のみならず液体や固体も圧縮されるが、生物の生存する深度帯(高压環境)では、器官のレベルにおいて生理学的・医学的に問題となる程の圧縮は起こらない。ただし、細胞骨格等の構造には微細な可逆的変化が起こり、そのために機械刺激受容(mechanosensitive)イオンチャンネルが活性化されて細胞機能に変化が起こるのではないかという仮説が提出されている²⁶⁾。また、圧力は物質に熱力学的作用を及ぼすことから、化学変化の過程(反応速度等)が変化することになり、特にシナプス伝達の機能に大きな影響が現れることも示唆されている²⁷⁾。そして、このような細胞レベルにおける機能的変化がHPNSの根本的な原因なのではないかと推測されている。なお、圧力の操作により、生体組織の重要な構成成分であるタンパク質や脂質の構造に不可逆的な変化を引き起こすためには数千気圧まで加圧する必要があり、このような高压下においては、生卵は常温でも「ゆで卵」に類似した状態へと変化する²⁸⁾。

以上のような理由から、ヒトの潜水深度帯への加圧によって発生するHPNSは、器質的变化を伴わない一時的な機能的変化であり、加圧を反復したとしても中樞神経系に残存するような悪影響がもたらされることはないと推定されている。この問題を正面から取り上げた基礎研究として、アカゲザルを用いた記憶実験がなされている²⁹⁾。この研究では、重篤な高压神経症候群(けいれん発作の発生等)が誘発されるような深深度への急速加圧を反復して行った後にも、記憶機能に悪化は認められなかったことが報告されている。

一方、減圧に関しては、しかるべき速度で実施され

るならば圧外傷は回避できるとしても、気泡の発生という問題が残る。気泡が不活性ガスの過飽和の状態から発生する以上、減圧中に気泡が出現する可能性は常に存在している。気泡が発生すれば、それらによって生体組織に何らかの微細な器質的变化が引き起こされている可能性も否定できない。しかも、気泡が発生しているにもかかわらず、潜水員からは自覚症状の報告がない現象が存在することは、減圧症の発生に至らないまでも、減圧により生体組織に何らかの悪影響がもたらされている可能性を示唆している³⁰⁾。このような悪影響が中枢神経系において生起するの可否は不明であるが、潜水の繰り返しによって、減圧による悪影響が累積されていくことを更に想定するならば、減圧症に罹患しなかった潜水員にも、記憶機能を含めた神経心理学的機能に長期的影響がもたらされる可能性を完全に否定することはできない。従って、海上自衛隊の飽和潜水員の記憶機能に長期的影響が認められなかったことには、諸規定に基づき、深深度飽和潜水が事実上、年に1回とされ、必然的に飽和潜水員が受ける減圧の回数も少なくなっていたことも寄与していたのではないかと考えられる。

V 結語

海上自衛隊の飽和潜水員の記憶機能について検討した結果、彼らは年齢相応の記憶機能を保持していること、すなわち記憶機能は正常であることが示された。また、深深度飽和潜水(400 msw, 440 msw)の実施自体による直接的な影響はないこと、さらには飽和潜水の経験増加による長期的影響もないことが判明した。従って、加減圧が適切になされ、かつ実施回数が年1回にとどめられるならば、深深度飽和潜水が記憶機能に有害な影響をもたらすことはないと考えられた。

飽和潜水の反復による神経心理学的機能への影響の可能性について考察したところ、減圧自体がリスクファクターとなりうることを示唆された。現時点では、飽和潜水による神経心理学的機能への長期的影響の有無についての見解は分かれているが、飽和潜水を実施する際には、特に潜水経歴、特に以前に参加した飽和潜水の回数を考慮した人選を行う必要があろう。

(付記)本論文の内容の一部は第48回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会において発表された。なお、本論文で表明された意見等は著者の個人的見解であり、潜水医学実験隊、海上自衛隊、並びに防衛省の公の見解ではない。

参考文献

- 1) Shields TG, Minsaas B, Elliot DH & McCallum RI (Eds): Long Term Neurological Consequences of Deep Diving. Stavanger: A.s.Verbum. 1983; pp.1-190.
- 2) Hope A, Lund T, Elliot DH, Halsey MJ, & Wiig H (Eds): Long Term Health Effects of Diving. Bergen: NUTEC & Univ of Bergen. 1994; pp.1-391.
- 3) Thorsen E: Health effects of diving. 日本高気圧環境・潜水医学会雑誌2013; 48: 235-236 (第48回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会プロシーディング)
- 4) Todnem K, Nyland H, Kambestad BK, & Aarli JA: Influence of occupational diving upon the nervous system: an epidemiological study. Br J Ind Med 1990; 47: 708-714.
- 5) Todnem K, Nyland H, Skeidsvoll H et al.: Neurological long term consequences of deep diving. Br J Ind Med 1991; 48: pp. 258 - 266.
- 6) Værnes RJ: Neuropsychological effects of saturation diving. A result summary. In: Hope A, Lund T, Elliot DH, Halsey MJ & Wiig H (Eds), Long Term Health Effects of Diving. Bergen: NUTEC & Univ of Bergen. 1994; pp243-250.
- 7) Gronning M & Aarli JA: Neurological effects of deep diving. J Neurol Sci 2011; 304: 17-21.
- 8) Bennett PB & Rostain JC: The high pressure nervous syndrome. In: Brubakk AO & Neuman TS (Eds), Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving. Edinburgh: Saunders. 2003; pp.323-357.
- 9) 小沢浩二: 窒素麻酔と高圧神経症候群. In: 赤松知光, 足立一彦, 緒方克彦ら(編), 防衛医学. 所沢:防衛医学振興会. 2007; pp.356-361.
- 10) Todnem K, Nyland H., Dick APK et al.: Immediate neurological effects of diving to a depth of 360 meters. Acta Neurol Scand 1989; 80: 333-340.
- 11) Værnes RJ, Kløve H & Ellertsen B: Neuropsychologic effects of saturation diving. Undersea Biomed Res 1989;16: 233 - 251.
- 12) Aarli JA, Værnes RJ & Brubakk AO: Central nervous dysfunction associated with deep-sea diving. Acta Neurol Scand 1985; 71: 2-10.

- 13) Bennett PB & Schafstall H: Scope and design of the GUSI international research program. *Undersea Biomed Res* 1992;19: 231-241.
- 14) 三宅晶: 短期記憶と作動記憶. In: 高野陽太郎 (編), 記憶 (認知心理学2). 東京: 東京大学出版会. 2001; pp.71-99.
- 15) Scott J.G: Components of Neuropsychological Evaluations. In: Schoenberg MR & Scott JG (Eds) , *The Little Black Book of Neuropsychology*. New York NY: Springer. 2011; pp.127-138.
- 16) Smith-Sivertsen J: Deep diving, a controversial medical problem. In: Shields TG, Minsaas B, Elliot DH & McCallum RI (Eds) , *Long Term Neurological Consequences of Deep Diving*. Stavanger: A.s.Verbum. 1983; pp.13-15.
- 17) Wickelgren WA: Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics. *Acta Psychol* 1977;41: 67 – 85.
- 18) 寺沢孝文: 記憶の測定—再生と再認. In: 太田信夫 (編), 記憶の心理学. 東京: 放送大学教育振興会. 2008; pp.56-69.
- 19) Curley MD: U.S. Navy saturation diving and diver neuropsychologic status. *Undersea Biomed Res* 1988;15: 39-50.
- 20) Becker B: Neuropsychologic sequelae of a deep-saturation dive: a three-year follow-up. In: Bachrach AJ & Matzen MM (Eds) , *Underwater Physiology VIII*. Bethesda MD: Undersea Medical Society. 1984; pp.707-712.
- 21) Curley MD, Wallick, MT & Amerson, TL: Long-term health effects of U.S. Navy diving: Neuropsychology. In Hope A, Lund T, Elliot DH, Halsey MJ, & Wiig H (Eds) , *Long term health effects of diving*. Bergen: NUTEC & Univ of Bergen. 1994; pp.209 – 228.
- 22) Rostain JC: The high pressure nervous syndrome: Neurophysiological and cognitive studies. In: Hope A, Lund T, Elliot DH, Halsey MJ, & Wiig H (Eds) , *Long term health effects of diving*. Bergen: NUTEC & Univ of Bergen. 1994; pp.191-207.
- 23) Dutka AJ: Long term effects on the central nervous system. In: Brubakk AO & Neuman TS, (Eds) , *Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving*. Edinburgh: Saunders. 2003;pp.680 – 699.
- 24) Irgens A, Gronning M, Troland K et al.: Reduced health-related quality of life in former North Sea divers is associated with decompression sickness. *Occup Med* 2007; 57: 349-354.
- 25) RAPPORT FRA DYKKEDATABASEN DSYS 2012. http://www.ptil.no/getfile.php/PDF/DSYS/Rapport%20dykkedatabasen_DSYS2012.pdf
- 26) Dean JB & D'Agostino DP: Pressure effects on human physiology. In: Neuman TS & Thom SR (Eds) , *Physiology and Medicine of Hyperbaric Oxygen Therapy*. Edinburgh: Saunders. 2008; Pp.187 – 201. (小沢浩二 (訳) : 圧力によるヒトの生理機能への影響. In: 高気圧酸素治療のための医学・生理学. 東京: ヘルス出版, 2013; pp.144-155.)
- 27) Talpalar AE & Grossman Y: CNS manifestations of HPNS - revisited. *Undersea Hyperb Med* 2006;33: 205-210.
- 28) 林力丸: 高圧下現象の食品分野への利用. In: 林力丸 (編), 食品への高圧利用. 京都: さんえい出版. 1989; pp.1-30
- 29) Overman HW, Brauer RW & Burke ER: Failure to find residual memory deficits in monkeys after repeated HPNS. *Undersea Biomed Res* 1989; 16: 115- 127.
- 30) 池田知純: 潜水医学入門. 東京: 大修館書店. 1995;pp.115-133.