

●原 著

港湾潜水作業における潜水プロフィールと減圧症罹患リスクの評価

小林 浩* 後藤與四之* 野寺 誠*
 荒木隆一郎* 梨本 一郎*

防波堤の海底基礎は、港湾潜水作業による碎石均しによって作られている。われわれは、港湾潜水ダイバーの潜水プロフィールを潜水記録装置を用いて記録し、12名のダイバーから25例72回の潜水プロフィールを得ることができた。彼らの減圧方法を評価するため、これらの潜水記録を用いて、WorkmanのM値による解析と米国海軍標準空気減圧表との比較を行った。また、調査時に潜水作業終了後のダイバーらの減圧性気泡の胸部計測を超音波ドプラー法で行った。これらの調査結果から、最大潜水作業深度は12.8~19m、潜水時間は6~111分の範囲であった。減圧の可否については、すべての潜水について米国海軍空気減圧表よりも短いことが知られ、一方、減圧性気泡については、40例中21例(53%)の発現であった。しかしながら、減圧症の発生はいっさい認められなかった。これらの結果から、港湾潜水におけるダイバーらは、正確に減圧コントロールを遵守せず、減圧性気泡の面からみても減圧症リスクがあるが、経験上体得した方法によって減圧コントロールしていることが知られた。

キーワード：減圧症、潜水プロフィール、港湾潜水、気泡

An analysis of dive profiles in harbor construction divers

Koh Kobayashi* Yoshiyuki Gotoh* Makoto Nodera* Ryuichiro Araki* and Ichiro Nashimoto*

*Department of Hygiene, Saitama Medical School

Harbor construction diving has been performed to level riprap for the foundation of a breakwater. Dive profiles of the harbor construction divers were recorded using a Dive Profile Recording and Analyzing System (DPRAS) in seventy-two dives on twenty-five occasions on twelve divers. Decompression procedures that the divers employ were analyzed based upon Workman's M-values and compared with U.S. Navy standard air decompression tables. Decompression-induced bubbles were also examined with a precordial Doppler bubble detector after surfacing. By analyzing their dive profiles, it was found that the maximum dive depth and bottom time ranged

from 12.8 to 19 meters and 6 to 111 minutes, respectively. Decompression requirements in their profiles were subsequently calculated. In all dive profiles, their decompression procedures were shorter than U.S. Navy air tables. The total venous gas bubble rate detected precordially was 53% or 21 cases of 40 examinations. No bends however occurred among them. From these results, it was suggested that conventional decompression procedures which the harbor construction divers utilize are not necessarily safe in terms of the venous gas bubble appearance although their decompression procedures have been learned from their long term experiences.

Keywords :

Decompression Sickness
 Dive Profile
 Harbor Diving
 Bubble

*埼玉医科大学衛生学教室

緒 言

潜水作業の際、潜水者は水深に応じた高圧環境に暴露され、高圧空気を呼吸するが、体内外に分圧差により体内に窒素が吸収され溶解する。一方、作業を終え海面へ戻り始めると環境圧力の減少により吸気窒素分圧が低下するので、体内から窒素が呼吸循環系を介して体外へ排泄される。この際に減圧が急速かつ過大であると、溶存窒素は過飽和状態となり遂には気泡を形成し、減圧症（潜水病）を引き起こす原因となることが知られている。その予防手段としてモデル組織の窒素分圧計算値と限界減圧比より求めた減圧閾値にもとづき、段階的に浮上（減圧）する方法を Boycott ら¹⁾が見いだして以来、実用に供されながら種々の改良が加えられてきた。その結果、潜水深度と存底時間の組合せに対応する減圧スケジュールをまとめた、いわゆる減圧表が作成され、実地潜水の際の潜降、浮上方法の指標として利用されている^{2)~4)}。しかしながら、実地潜水では海底の地形、作業の内容、進行状況などから、減圧表に記載されている基準的な潜水深度/在底時間区分にもとづく減圧スケジュールが固定的に遵守されるとは限らない。

従って、潜水作業での潜降、浮上がどのように行われているかの実態を詳細に把握し、またその減圧リスクの評価を行うことは、潜水病予防対策上きわめて有意義となる。そこで著者らは、わが国で最も広く行われている代表的な作業潜水とし

て港湾潜水をとり上げ、潜水者に潜水記録装置を装着させ、詳細な潜水プロフィールを得るとともに、それに基づき海面浮上時のモデル組織の窒素ガス分圧を計算で求め、減圧閾値(M 値)⁵⁾と比較、さらに超音波ドプラ法による気泡検査結果と併せて減圧症罹患リスクの評価を行った。

調査対象と方法

1. 対象とした潜水作業と被験者

調査対象とした潜水作業現場は、福島県と静岡県内の2カ所の防波堤設置工事現場であり、双方とも作業内容は海底々面基礎石均し作業であった。港湾潜水では、フーカー、SCUBA、および送気式ヘルメット潜水の3つの潜水方式がとられているが、この潜水業務における潜水の形態は、送気式ヘルメット潜水器と潜水服を用いた方法であり、吸気として空気をを用い、国内に於ける港湾潜水作業の一般的な方法であった。また、調査対象ダイバーの被験者は総計12名であり、すべて潜水士免許を有する専門職業ダイバーであった。被験者の年齢、身体条件および潜水作業従事年数は表1に示した。なお、被験者AとCについては不明であった。

2. 潜水プロフィールの記録

潜水作業時の潜水深度の経時的変化を知る目的で、自記々憶式の潜水深度メモリレコーダ（以下DMRとする）を、ダイバーに1日の作業を通して携行させ潜水深度データを得た⁶⁾。DMRのsam-

表1 被験者の体格と潜水作業経験年数

被験者	年齢(歳)	体重(kg)	身長(cm)	経験年数(年)
A	—	—	—	—
B	40	57	167	13
C	—	—	—	—
D	49	65	168	23
E	37	78	172	16
F	55	60	157	23
G	46	55	167	23
H	41	72	162	15
I	36	67	172	3
J	50	65	161	13
K	55	73	159	33
L	35	66	171	6

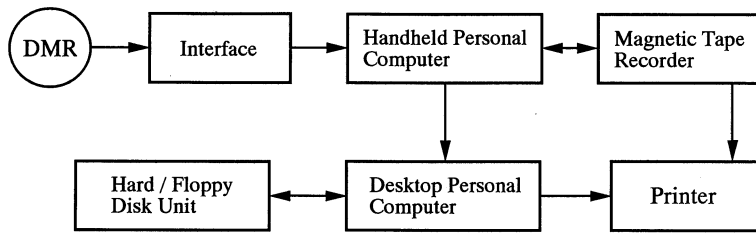


図1 潜水プロフィール記録再生装置の構成図
(DMR: Diving Memory Recorder)

表2 超音波ドブラー気泡検知における気泡判定グレード

Zero	No bubble heard
Grade I	Occasional bubble
Grade II	Bubbles heard in less than half of the cardiac cycles
Grade III	Bubbles heard during more than half or all cardiac cycles
Grade IV	Bubble signal obscures normal heart sound and is continuous

M. P. Spencer による⁹⁾

pling period は30秒であり、これに記憶された深度データは、図1に示した方法によりデータの保存、解析を行い潜水プロフィールとして得た。

3. モデル組織の窒素分圧の計算

得られた潜水プロフィールから、米国海軍標準空気減圧表（以下減圧表と称す）の近似値が得られ、また減圧閾値（減圧停止深度および時間）を求めることが可能な、Workman の M 値計算法⁵⁾により、ダイバーの潜水作業終了の浮上開始時点での浮上安全限界値を求めた。この減圧閾値は、潜降、在底および浮上の潜水プロフィールの経時変化量に対応する体内窒素分圧と M 値とを比較して求めた。

浮上時の減圧停止深度は、下記に示した①式により求められた各半飽和時間毎の体内に溶解した窒素分圧 (Pt) と M 値とを比較し求め、また減圧停止時間 (td) は、②式により求めた。

$$Pt = Po - (Pa - Po) \cdot (1 - \text{Exp}^{-kt/HT^{1/2}}) \quad \text{---①}$$

ただし、

Pt: 体内窒素分圧, Po: 組織内窒素分圧,

Pa: 環境窒素分圧, k: $\ln 2$,

t: 暴露時間 (分), HT $1/2$: 組織半飽和時間

(5, 10, 20, 40, 80, 120)

$$td = -\ln \left(1 - \frac{(M - Po)}{(Pa - Po)} \right) \cdot HT \cdot \frac{1}{2 / \ln 2} \quad \text{---②}$$

ただし、

td: 減圧停止時間, Po: 減圧停止深度における体内窒素分圧, M: M 値,

Pa: 減圧停止深度環境窒素分圧

4. 減圧表による減圧コントロール

潜水の際にダイバーらが用いている減圧コントロールは、Square 潜水プロフィールとする条件の最大潜水深度と在底時間を区分として使用されているので、各々の実際の潜水プロフィールの最大潜水深度と在底時間から減圧表による減圧コントロールを求め、計算により求められた減圧閾値との関係を比較した。

ダイバーらが使用している減圧表は、労働省が高気圧作業安全衛生規則で規定している別表2⁷⁾であるが、水面休息時間が30分以内の場合は規定されていないため、今回比較に用いた減圧表は米国海軍標準空気減圧表であった。

5. 減圧性気泡の検査

ダイバーが潜水作業を終了し海面に浮上後、体

表3 潜水プロフィールと減圧停止時間および超音波ドブラー気泡検知結果

No.	被験者	潜水回数	最大潜水深度(m)	潜水時間(分)	水面休息时间(分)	減圧停止(1) (分)		減圧停止(2) (分)		減圧停止(3) (分)	減圧性気泡 グレード
						6m	3m	6m	3m	3m	
1	A	1	15.9	101	27				26	3	
		2	15.5	59	86				69	5	II
		3	15.7	86	25				69	4	
2	B	4	15.5	53	—				79	12	II
		1	16.1	99	28				14	3	
		2	15.9	58	92				56	5	0
3	C	3	15.7	78	27				56	4	
		4	15.9	52	—			2	79	12	0, 0
		1	18.2	96	28				14		
4	E	2	18.1	57	93				48		0
		3	18.1	91	—				56		0
		1	17.5	63	45				2		
5	G	2	17.5	59	105				48		0, I
		3	17.7	55	—				48		II
		1	15.9	12	8				—		
6	F	2	15.7	35	46				0		
		3	15.3	53	111				26		I
		4	15.3	73	—				48		III
7	F	1	17.1	51	41				0		
		2	17.3	61	101				39	2	
		3	16.7	77	—				56		I
8	D	1	15.9	65	—				2		I
		1	19.0	46	36				0		
		2	17.3	52	—				39		0
9	E	1	18.6	76	46				18		
		2	17.5	6	—				26		0
		1	15.5	102	40				26	2	
10	E	2	15.7	61	115				56		II
		3	15.7	101	—			1	69	6	II
		1	14.9	111	37				5		
11	D	2	14.9	67	101				29		0
		3	14.9	110	—				35		III
		1	14.7	116	35				5	1	
12	D	2	15.1	69	97				29	3	0
		3	15.1	110	—				35	11	0
		1	14.1	70	31				0		
13	I	2	13.7	56	103				21		0, II
		3	15.3	107	—				35		III
		1	13.1	64	33				0		
14	H	2	12.8	56	106				21		0, 0
		3	13.6	102	—				40		0
		1	13.4	66	34				0		
15	B	2	14.0	54	100				21		0, 0
		3	14.3	104	—				40		0
		1	18.0	95	23				14		
16	I	2	15.5	40	—				56		0, II
		1	16.6	59	8				—		
		2	13.6	27	22				14		
17	H	3	15.5	39	—				56		0, 0
		1	13.4	89	30				0		
		2	13.7	37	—				21		0, 0
18	B	1	13.6	35	30				0		
		2	13.6	57	—				5		0, III
		1	14.0	36	32				0		
19	J	2	14.9	54	—				5		0, 0
		1	16.7	59	—				0		0, I
		1	15.9	74	36				7		
20	K	2	15.7	50	105				48		0, 0
		3	15.7	59	37				48		
		4	14.3	57	—			20	119		0, 0
21	L	1	14.4	69	35		2		0		
		2	12.8	48	104			3	10		IV, III
		3	13.1	54	35		2	6	21		
22	K	4	13.1	49	—	1	8		47		II, II
		1	15.7	82	35				14		
		2	15.1	62	104				29		I, 0
23	L	3	15.9	71	40				48		
		4	15.9	34	—				56		0, 0
		1	14.2	62	37		1	9	0		
24	K	2	14.2	51	112				10		III, II
		3	15.8	60	33				39		
		4	15.3	38	—			1	56		II, III

減圧停止：(1)；潜水プロフィールより，(2)；米国海軍標準空気減圧表より，(3)；減圧計算より

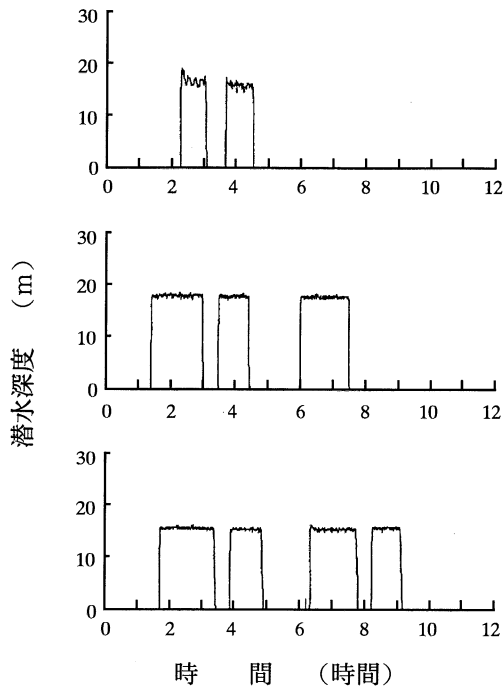


図2 港湾潜水における繰り返し潜水プロフィール

内に溶解した窒素が過飽和となり形成された気泡が血中に存在するか否かを確認するために、胸部式超音波ドプラー気泡検知器 (Institute of Applied Physiology and Medicine 製, 1032G, 5 MHz) を用いて減圧性気泡音の検査⁸⁾を行った。検査時間は、ダイバーが潜水服を脱ぐ昼休み、および1日の作業終了時の浮上後30分と60分経過後の2回行うことを原則としたが、作業の状況によっては30分経過後の検査のみの例もあった。また検査と同時に、テープレコーダに録音を行い、後日気泡音を明瞭に弁別するために音響バンドパスフィルター (リオン社製 SA-33D) を用い、560~2240Hzの音域を除去し、Spencer⁹⁾の分類 (表2) により気泡量の判定を行った。

結 果

1. 潜水プロフィール

被験ダイバー12名から表3に示した25例の潜水プロフィールが得られ、潜水の総回数は72回であった。また、得られた潜水プロフィールは2~4

回の繰り返し潜水パターンの典型例を図2に示した。これらの潜水プロフィールから、潜水作業の最大潜水深度、在底時間、潜水回数および水面休息時間について調べた。

(1)潜水回数

1日の潜水作業パターンは、基本的には、午前2回、午後1回または2回の合計3~4回であったが、作業の工程または海象により1日1回もしくは2回の潜水作業のこともあり、1日の潜水回数は、1日1回が2例、2回が6例、3回が10例そして4回が7例であった。

(2)潜水深度

潜水プロフィールからみて、今回調査した港湾潜水の特徴は、作業の主体が同一の潜水深度で捨て石を平面に均すため、ダイバーの作業中の大きな潜降と浮上の変化が見られず、すべての潜水において同一の潜水深度を保って作業を行うプロフィールであった。最大潜水深度の平均は15.4m (SD=1.49)、範囲は12.8mから19mであった。

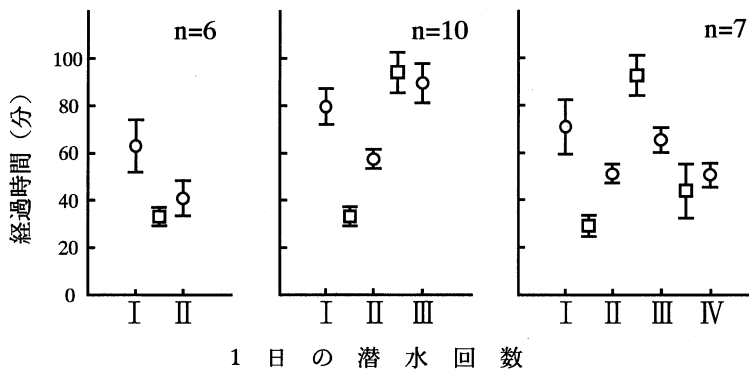


図3 1日の繰り返し潜水作業時の在底時間と水面休息時間の比較
○：在底時間(平均±S.E.)，□：水面休息時間(平均±S.E.)

(3)在底時間

1日の潜水の在底時間を潜水回数ごとに比較した結果を図3に示した。すべての潜水の在底時間の平均は65.1分(SD=23.7)であった。1日2回潜水の場合では、各潜水の在底時間に差は認められないが、1日3回と4回の繰り返し潜水においては、2回目よりも3回目の潜水の在底時間が有意に長くなっていた($p < 0.05$)。

(4)水面休息時間

1日1回潜水の2例を除く繰り返し潜水23例の水面休息時間の変化を図3に示した。1日の繰り返し潜水のうち2回目と3回目の潜水間における水面休息時間は、他のそれよりも有意に長く取っていた($p < 0.05$)。呼吸用ポンベの空気量によって潜水時間に制限があるSCUBA潜水と異なり、送気式のヘルメット潜水では潜水時間が自由に取ることができる。このため、ほとんどのケースにおいて、昼食を取るために正午を挟んだ休息時間帯に浮上し、減圧表から求められる水面休息時間を考慮しているとは認められなかった。

2. モデル組織窒素分圧

潜水プロフィール25例につきM値を用いて各潜水の減圧閾値を計算したところ表3に示したごとく72回の潜水のうち15回の潜水において減圧コントロールを要求される潜水であったが、15回すべてに減圧コントロールは実施されていなかった。

3. 減圧表との比較

25例の潜水プロフィールから得られた最大潜水深度と在底時間から、米国海軍標準空気減圧表による減圧コントロールを求めたところ、表3に示したように72回の潜水のうち減圧を必要としない14回の潜水を除く58回の潜水に対しては減圧コントロールが必要であったが、なんらかの浮上停止を実施した潜水は2例であった。

4. 減圧性気泡

超音波ドプラー気泡検知器による減圧性気泡の検査は、25例72回の潜水のうち40回の潜水に対して実施することができたが、すべての潜水において作業の状況により全例については実施できなかった。減圧性気泡は表3に示したgradeであり、40回の潜水に対して21回、53%の気泡出現率であった。このうち浮上(減圧)停止が実行されていた2例の潜水においても気泡が検知されていた。

考 察

1. 潜水作業の実態

本調査研究における港湾での潜水作業の主体は、港湾を取り巻く防波堤設置の海底面基礎造成作業であった。このため作業深度が平均15m程度と比較的浅い深度の部類に入る潜水であり、作業工程が短期間に集中し一回の潜水作業が長時間であった。しかしながら、浮上に伴う減圧コントロールは、潜水プロフィールとそれに対応する減圧表からみて、ダイバーらが経験的に減圧症に罹患

しない過去の潜水の条件を越えない程度であれば、減圧を要する潜水であっても減圧を行っていないことが推測された。

2. 潜水プロフィール

得られた潜水プロフィールからみて、港湾潜水作業は潜降後同一の潜水深度で作業を行う、いわゆる square 潜水が特徴であった。漁業潜水などでは体内への窒素溶解量を減少させるため、作業中に深い深度から浅い深度に移行することが知られており¹⁰⁾¹¹⁾、このような行動が地形の状況から不可能なため、在底時間および水面休息時間を調整することにより減圧症罹患へのリスクを回避していると考えられた。

Workman による M 値減圧時間計算法は、Hal-dane の概念¹⁾を基にしたものであり、6種の半飽和時間毎に体内に摂取された窒素分圧を安全減圧限界比 (M 値) で比較することにより減圧閾値が求まる。しかしながら、減圧表による減圧コントロールは、潜水した最大潜水深度と在底時間の区分によって求まるため、在底深度での浮上潜降による上下動での体内溶解窒素分圧の変動が考慮されない。このため最大深度から浅い深度に移行した際にも最大深度で求めた減圧コントロールを実行しなければならず、その条件での比較的長時間の浮上 (減圧) 停止は、ダイバーにとってはかえって苦痛となるため、過去に減圧症罹患が発現しなかった同じ深度、同じ在底時間の条件では減圧コントロールを実行していないと考えられる。

本研究における潜水作業では、実施された潜水の在底時間と深度が減圧表による時間/深度区分の上限よりも低く、むしろこの区分にあてはまらない実時間と実際の深度から計算によって求めた減圧閾値に近似していたため、表3に示した長い減圧時間の減圧コントロールを遵守しなくとも減圧症罹患の恐れはなかったと考えられる。さらに、潜水のプロフィールを記録することは、実施された潜水が安全であったか判断することが可能であるばかりでなく、それ以後に実施する潜水作業に反映させることができ、潜水条件の記録にとどまらずに減圧症罹患リスクの低い減圧表の評価、改訂、および作成に威力を発揮することが示唆された。

3. 減圧性気泡と減圧症罹患リスク

潜水後の浮上 (減圧) 方法が適切であるかどうかを判定する方法は、従来から結果として得られる減圧症発症率に統計的手段を用いて解析されているが、個人差、圧力変動、環境温度などの諸条件に左右されるために、同一の減圧症罹患状態の再現性が困難である。そこで、1968年に Spencer⁹⁾らによる超音波ドプラー気泡検知器の開発により、減圧症の早期診断が可能となり、潜水時の減圧コントロールの適否が即時に的確に判断されるようになった。しかしながら、超音波ドプラー法による減圧性気泡が検知されていたにもかかわらずダイバーらが減圧症に罹患しない、つまり気泡が体内に発生しても無症状である silent bubble が実験潜水やフィールドでの調査で報告¹²⁾されて以来、減圧症と減圧性気泡の関連性は気泡量の多さに依存せず、減圧症発症には直接関与しないことが知られている。今回の調査においてダイバーらの気泡出現率が53%であったが、減圧症発症が皆無であったことからみて、これらの silent bubble の存在が大きく関係したことが示唆された。さらに、減圧症に罹患しやすい、言い換えれば減圧症に弱いダイバーは、Rivera¹³⁾が指摘するように若年層のうちに自然淘汰されている。このため調査対象のダイバーらが中高年齢層であり、かつ経験の長いダイバーであったにもかかわらず、減圧症罹患が見られなかったと考えられる。

また、調査結果から得られた、浮上 (減圧) 停止を実行しているダイバー (L; No. 23) から grade 4 というような高い度合の気泡が検知されたが、これはダイバー自身、過去に調査時の深度/時間での潜水減圧症罹患の経験があり、経験による減圧コントロールを実行してもなお減圧性気泡の面から減圧症罹患のリスクがあったと推測された。

一方、超音波ドプラー式の気泡検知器による減圧性気泡の検知は、超音波断層法による検査方法に比べて客観的解析が困難とされているが¹⁴⁾、簡便性に優れたドプラー気泡検知器の使用と、正確に記録された潜水プロフィールを同時に比較することにより減圧症の早期発見よりも、むしろ浮上 (減圧) 方法の評価に有用であることが示唆された。

ま と め

潜水深度メモリレコーダと超音波ドブラー気泡検知器を用いて実作業下の港湾潜水ダイバー12名の潜水プロフィール25例において、潜水プロフィールと減圧性気泡から減圧症罹患リスクに関して調査を行った。

- (1)ダイバーは、正確に減圧コントロールを遵守しないが、経験上体得した方法によって減圧閾値をコントロールしていることが知られた。
- (2)減圧症に罹患するダイバーは認められなかったが、減圧症気泡が53%検知され罹患リスクは低いことが明らかであった。
- (3)水面休息時間を長く取ることは、減圧症罹患リスクを有意に減少した。
- (4)時間経過とともに深度が変動する潜水の減圧閾値の評価には、潜水深度メモリレコーダの使用が有効であった。

【参 考 文 献】

- 1) Boycott AE, Damant GCC and Haldane JS. Prevention of compressed air illness. In: J Hygiene Camb 8: 342-443: 1908
- 2) Hempleman HV. History of evolution of decompression procedures. In: Bennett PB, Elliott DH eds. The physiology and medicine of diving. London: Bailliere Tindall, 1982: 319-351
- 3) Navy Department. Standard air decompression tables, US Navy Diving Manual Vol2. NAVSEA 0994-lp-001-9020, 1979: 7,1-24
- 4) CIRIA. RNPL metric air diving tables. 1976
- 5) Workman RD. Calculation of decompression tables for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. US Navy Experimental Diving Unit. Research Report 6-65. Washington DC. 1965
- 6) 後藤與四之, 梨本一郎, 小林浩, 野寺誠, 江田文雄. ICメモリによる潜水データの記録について(続報). 産業医学. 25: 643; 1983
- 7) 労働省. 潜水士テキスト, 東京, 中央労働災害防止協会, 1989: 284-293
- 8) 後藤與四之, 梨本一郎, 高気圧作業者にみられる減圧性気泡. 日本衛生学雑誌 32: 529-533; 1977
- 9) Spencer MP and Campbell SD. Development of bubble in venous and arterial blood during hyperbaric decompression. Bulletin of Mason Clinic, 22: 26-32; 1968
- 10) Nashimoto I, Kobayashi K and Gotoh Y. An appraisal of dive profiles in shell-fish divers with reference to the risk of decompression sickness. In: Proceedings of the 11th EUBS annual meeting, 1985: 213-219
- 11) 芝山正治, 眞野善洋. 追込み漁潜水作業における潜水プロフィールと労作強度. 日本衛生学会雑誌. 44: 587-594; 1989
- 12) Nashimoto I and Gotoh Y. Relationship between precordial doppler ultrasound records and decompression sickness. In: Underwater Physiology VI, 1978: 497-501
- 13) Rivera JC. Decompression sickness among divers: An analysis of 935 cases. Military medicine. Vol 129. 4: 314-334; 1964
- 14) 江田文雄. 超音波断層法による減圧性気泡の検知. 埼玉医科大学雑誌. 14: 147-154; 1987