

【 第50回学術総会講演 】

## 改正高気圧作業安全衛生規則の問題点

池田 知純

東京慈恵会医科大学 環境保健医学講座

### 【要約】

減圧理論が明瞭でない、減圧時間が短い傾向にある、90mまでの無謀とも言える空気潜水を認めている、現在では常識の酸素及びヘリウムの使用を認めていない、など問題点が多かった高気圧作業安全衛生規則（高圧則）が2014年12月1日に改正されて、BühlmannのZH-L16モデルに基づくとされる減圧計算法が公示され、上に記した問題点の多くは改善された。しかしながら、減圧スケジュールを減圧表ではなく難解な計算式で示すのは世界に例がなく、また、減圧計算の根拠も曖昧で一部には極めて危険な減圧表が例示されているなど課題も多く、さらに高圧則が円滑な潜水作業を阻害している面があるのも否めない。高圧則の更なる改訂は急務である。

キーワード 潜水, 減圧表, 減圧症, 減圧障害, ダイビング, ビュールマン

### 【Review】

#### Problems with the newly revised regulations on diving in Japan

Tomosumi Ikeda, The Jikei University School of Medicine Department of Public Health and Environmental Medicine

#### Abstract

Japanese regulations on commercial diving were revised and promulgated in 2014. The previous regulations, despite many known problems such as unclear decompression theory, unrestricted air tables to the depth of 90m, prohibition of the use of oxygen and helium, and short decompression times for long and deep dives, were valid for more than half a century. The newly revised regulations, however, have many major difficulties. For example, decompression schedules are provided by mathematical formulas instead of tables, while the decompression theory is not fully disclosed; tables provided for repetitive dives are highly dangerous, and improper instructions that resulted in a fatality are still included. A thorough review and further revision of these new regulations are highly recommended.

keywords diving, decompression table, decompression sickness, decompression illness, Bühlmann

### I. 背景

問題点が指摘されることの多かった昭和47年（1972年）に制定された高気圧作業安全衛生規則（以下旧高圧則ないし高圧則）<sup>1-11)</sup>は、平成26年（2014年）12月1日42年ぶりに大きく改正され、平成27年4月1日から施行されている。もっとも、旧高圧則に別表1~3として記載されている減圧表は昭和36年（1961年）3月22日に労働省令第5号として交付された高気圧障害防止規則に記載されているものと同一なので、減圧表その

ものの改定は半世紀を超えた53年ぶりのこととなる。

改正に至った背景としては、①減圧理論が明瞭でないこと、②減圧時間が短い傾向にあること、③無謀とも言える深度90mまでの空気潜水を想定していること、④現在の潜水では無視できない酸素の使用を認めていないこと、⑤空気以外の呼吸ガスを想定していないこと、⑥規則に従えば致命的になる文言があること、⑦国際標準とはかけ離れた用語を使用していること<sup>4,12)</sup>、等が挙げられる。

これら旧高圧則の問題点について若干補足しておく、旧高圧則の減圧表は当時東京医科歯科大学衛生学教室の助手であった梨本一郎が抜擢されて中心となり、当時の極めて限られた情報の中で大変なエネルギーを注いで制定されている<sup>13-15)</sup>。その減圧表はフランスの減圧表<sup>16)</sup>を参照にして作成されているもようで、頻発していた減圧症の発症予防及び軽減に大きな効果があったが、残念ながら理論そのものの詳説はない。特にわからないのは、別表3として知られる繰り返し潜水の減圧時間を導く図である(図1)。世界に例をみない非常にユニークで興味深い変換グラフであり、何らかの根拠に基づくものであろうが、現在わが国でこのグラフの由来を正確に理解している者は皆無であろうと思われる。減圧時間については、特に滞底時間が長くなると、諸外国に比して減圧時間が著明に短い傾向にある<sup>7)</sup>。強調しておかなければならないのは、この減圧表が時代にそぐわなくなり改定の必要があることを梨本自身が20年以上前に明言していることである<sup>15)</sup>。

今回の高圧則改正の詳細を記した高気圧作業安全衛生規則改正検討会(以下検討会)報告書(以下報告

書)<sup>17)</sup>、同添付資料<sup>18)</sup>及び議事録<sup>19)</sup>をみると、減圧理論はBühlmannのZH-L16モデル<sup>20-23)</sup>に依ることとされ、減圧表を導くためのエクセルを用いた実際の計算方法が明示され、その方法に従えば誰でも減圧表を作成することが出来るようになった。その他にも、空気潜水の許容深度を無謀な90mから40mへと制限し、実施するには特別な審査をその都度要したヘリウム酸素混合ガスや純酸素を用いた潜水も煩瑣な手続き無く可能とする等、欧米では常態となっている潜水の現状により則したものに大きく改善されている。しかしながら、子細に見るとなお多くの問題があり、場合によっては問題をより複雑にしている点があるので、以下に詳説する。

なお、紙幅の関係上、空気潜水に重点を置いて記し、ヘリウムを用いた潜水についての言及は最小限に留める。

## II. 減圧計算の基本

高圧則を理解するためには、どうしても減圧の基本を知っておかなくてはならないので、以下にどのようにして減圧表が導かれるのか、基本的な概念を記す。

減圧症に罹患するのは、生体内に溶存している窒素などの生理的不活性ガス(以下不活性ガス)の分圧が生体が曝露されている環境圧力よりも限度を超えて大きくなるときに気泡が発生して発症するとされる。その不活性ガスの生体への取り込みと排出は肺を介して血流に乗って受動的に行われるので、生体内の不活性ガス分圧は時間の経過と共に吸気中の不活性ガス分圧と等しくなるように変化していく。これを一般的な数式としてあらわすと、経過時間の指数関数として示することができる<sup>24)</sup>。

ここで飽和の概念について触れておきたい。生体が高圧に曝露されると生体組織の不活性ガス分圧も指数関数に従って増加しそれ以上は増加しなくなる。この状態を飽和というが、減圧時には組織の不活性ガス分圧がその深度における飽和状態の不活性ガス分圧よりも大きくなることもあり、そのときの状態を過飽和、圧力を過飽和圧力という。

なお、生体への不活性ガスの移動は一律に行われるわけではない。不活性ガスが速やかに移動する組

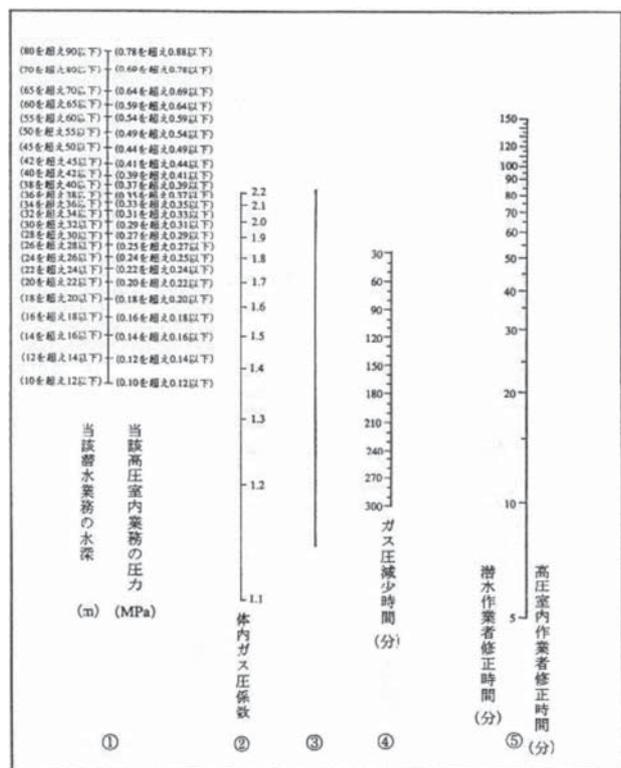


図1 旧高圧則の別表3

織もあれば、逆に移動に時間がかかる組織もある。それを数式としてあらわすために、半減時間ないし半飽和時間の概念を用いる。つまり、当初の深度から次の減圧あるいは加圧深度まで加減圧した際に、加減圧先で平衡状態に達したときの分圧と当初の分圧のちょうど中間に達するまでに要する時間を半減時間あるいは半飽和時間とし、その時間の短い組織では速やかにガスが移動し、長い組織ではガスの移動に時間がかかることになる。減圧の場合には半減時間、加圧の場合には半飽和時間という言葉が用いられることが多く、Bühlmannのモデルでは同一組織の半減時間と半飽和時間は同一として扱う。そして、想定した半減時間を有する組織をcompartment (区画あるいは分画)と呼ぶことが多いが、高圧則では表1のように1から16までの番号をつけた半飽和組織として示している。減圧時間の長短を具体的な組織に当てはめると、不活性ガスの移動速度は血流の多寡に比例することから、血流の多い脳や肝臓などの臓器や組織の半減時間は短く、血流の少ない健などの組織の半減時間は長いことになる。

次に、高圧則ではM値という用語<sup>21,25,26)</sup>が重要な意味を有している。M値はmaximum allowable valueのことで、日本語で言えば最大許容値になる。何の許容値かと言えば、減圧症に罹患する可能性が許容出来る頻度以内とみなせる各深度及び組織における最大の不活性ガス分圧、言い換えれば減圧症に罹患しない最大の過飽和圧力のことを指すわけである。そして、先に記した不活性ガスの移動を表す指数関数に基づ

表1 想定された16の半飽和組織とその半減時間及びa値とb値

半飽和組織	窒素半飽和時間(分)	窒素a値	窒素b値
第1半飽和組織	5.0	126.885	0.5578
第2半飽和組織	8.0	109.185	0.6514
第3半飽和組織	12.5	94.381	0.7222
第4半飽和組織	18.5	82.446	0.7825
第5半飽和組織	27.0	73.918	0.8126
第6半飽和組織	38.3	63.153	0.8434
第7半飽和組織	54.3	56.483	0.8693
第8半飽和組織	77.0	51.133	0.8910
第9半飽和組織	109.0	48.246	0.9092
第10半飽和組織	146.0	43.709	0.9222
第11半飽和組織	187.0	40.774	0.9319
第12半飽和組織	239.0	38.680	0.9403
第13半飽和組織	305.0	34.463	0.9477
第14半飽和組織	390.0	33.161	0.9544
第15半飽和組織	498.0	30.765	0.9602
第16半飽和組織	635.0	29.284	0.9653

いて各深度及び時間経過後の不活性ガス分圧を全ての組織について求め、それが全ての深度及び組織においてM値内に収まるような経過時間、すなわちその減圧深度に留まって減圧停止すべき時間を導くことによって減圧表を作成していく。

このM値は当然のこととして、生体が置かれている環境圧力、即ち深度が増せば、それに比例して増加することになる。言い換えれば、深度の一次関数としてM値を表すことができる。また、半減時間の長短もM値に関わってくる。半減時間の短い組織では速やかに不活性ガスを排出できるので、より大きい過飽和圧力にも耐えることが出来、M値は大きく設定されることになる。と言うことはつまり、減圧表を作成するためには、各半減時間組織及び各減圧停止深度のM値を定めておく必要があることを示している。

### III. 減圧表の作成

改正高圧則における減圧計算は高圧則と同日に告示された厚生労働省告示第457号に定めるところに依るとされており、以下この告示による減圧計算の概要を適宜補足しながら記していくこととする。なお、式の表記方法は数式に用いられることが常態となっているイタリック体ではなく、告示と同様の通常の書体とした。

改正高圧則に採用された減圧理論はスイス・チューリッヒ大学のBühlmann教授によるZH-L16モデルで、ZHは大学の所在地Zurichから、Lはlimitあるいはlinearを示唆し、16は想定した半減時間の区画の数に由来している<sup>20-23)</sup>。

減圧表を作成するためには、まず生体内の不活性ガス分圧を求めなければならない。潜水に使われる不活性ガスには窒素とヘリウムがあるが、以下窒素の場合のみを考える。ヘリウムに関しては、ここに記した方法を準用されたい。

高圧則における当該半飽和組織における窒素分圧は

$$P_{N_2} = (P_a + P_b) N_{N_2} + R N_{N_2} \left( t - \frac{1}{k} \right) - \left[ (P_a + P_b) N_{N_2} - Q_{N_2} - \frac{R N_{N_2}}{k} \right] e^{-kt} \quad \text{i)}$$

によって示される。

ここでそれぞれの記号は

- $P_{N_2}$  当該区間において時間経過後の窒素分圧  
(キロパスカル)
- $P_a$  大気圧として100キロパスカル
- $P_b$  当該区間が始まる時点(ある深度で停止した場合の最初の時点)のゲージ圧力(キロパスカル)
- $N_{N_2}$  当該区間の窒素濃度(パーセント)
- $R$  加圧又は減圧の速度(キロパスカル/分)
- $t$  当該区間の時間(分)
- $k = \frac{\log_e 2}{\text{半飽和時間}}$
- $Q_{N_2}$  当該区間が始まる時点での窒素分圧  
(キロパスカル)

ただし、潜水業務の最初の場合は水蒸気圧を除いた74.5207キロパスカル

$e$  自然対数の底

である。ここで、当該区間というのは、減圧のために一定の深度に停止した場合、あるいは一定の速度で加減圧した場合などのその区間を指す。

ところで、減圧計算に当たっては、ダイバーの安全サイドに立つ、という原則がある。そうすると、加圧開始と共に直ちに目標の深度に到達する、と仮定すると、到達深度に滞在している時間が加圧潜降時間の分長くなるので、計算で導かれるダイバーの生体内の窒素分圧は加圧速度を考慮して計算する場合よりも大きな値になる。これは、次の減圧を考えた場合に安全側に立つ、ということになるので、計算上は望ましいことになる。そうすると上の加減圧速度が0となるので、i)式は整理して

$$P_{N_2} = Q_{N_2} + \{(P_a + P_b) N_{N_2} - Q_{N_2}\} (1 - e^{-kt}) \quad \text{ii)}$$

となり、より簡潔に計算することが出来る。

逆に、浮上減圧の場合は、直ちに目標深度に到達したとすると、次の減圧開始時点に到達する時点での窒素分圧がより小さく算出されるので、ダイバーにとっては安全側に立った対応とは言えず、海底から最初の減圧停止深度に至るまでの時間が長いこともあって、その間は浮上速度を無視する方法はとるべきではない。もっとも、それ以降の各減圧停止深度間の減圧

には所要時間が少ないので、簡便のため浮上減圧過程を無視し直ちに次の減圧深度に至るとみなすことが多い。

実際に計算する場合には、状況に応じ、上のi)とii)を使い分けて計算するとよいだろう。

次に、高圧則で採用されている半減時間について述べる(半減時間も半飽和時間も同じである)。高圧則では、表1に示すように、半減時間からみた分画を第1半飽和組織から第16半飽和組織までの16分画に分割して取り扱っている。Bühlmann教授によれば、ヘリウムにおける半減時間を1分から240分と設定し、窒素の半減時間を分子量の平方根に比例して長くした2.65倍の値を取って当初は2.65分から635分としていたが、今はより一般的な5分から635分としている。

生体に含まれている不活性ガスの分圧と考慮する半減時間を決めただけでは、まだ減圧表は作成できない。次には減圧中の各深度で許容できる不活性ガス分圧、即ちM値を全ての半減時間組織について決定しなければならない。M値は先に述べたように深度の一次関数になるので、 $\Delta M$ を傾き、 $M_0$ をゲージ深度0でのM値(定数)として

$$M = \Delta M \times \text{Depth} + M_0$$

で表すことができる。この用語用法は米海軍のWorkman大佐によるもので、減圧表の評価や微調整に使いやすく、減圧計算の基本となる概念として広く受け容れられてきている<sup>21,25,26)</sup>。

一方Bühlmann教授はこれに対し、内容は同じであるが別の記号を用い、 $a$ と $b$ を定数として

$$P_{t,\text{tol},g} = \frac{1}{b} \times P_{\text{amb}} + a$$

の式を当てはめたのである。ここで $P_{t,\text{tol},g}$ は許容組織不活性ガス分圧、 $P_{\text{amb}}$ は環境絶対圧力を示す。定数 $a$ と $b$ はそれまでの膨大な減圧記録から経験的に導かれる<sup>20-23)</sup>。

WorkmanとBühlmannとの大きな違いはWorkmanがゲージ深度の一次関数であるのに対し、Bühlmannは環境絶対圧力の一次関数であることである。これはWorkmanが海軍を対象としているので海水面である1絶対気圧以下を考慮しなくてよかったのに対し、Bühlmannは山岳地方の陸軍を対象としたため

に、環境圧力として1絶対気圧以下もカバーしなければならなかったことを考えれば納得できる。注意しておきたいことは、高圧則ではWorkmanによるM値という言葉を使用しているが、その意味するところはBühlmannによる許容組織不活性ガス分圧 $P_{t,oi.g.}$ であるということである。Bühlmann自身はM値という言葉を使っていないことは知っておいた方がよい。

M値とBühlmannのa値とb値の関係を示すと、 $P_{amb}$ は絶対環境圧力であるので、

$$M = \frac{1}{b} \times P_{amb} + a = \frac{1}{b} \times (P_a + P_c) + a$$

と表すことが可能である。 $P_a$ は前出のとおり大気圧であり、 $P_c$ を潜水中の環境ゲージ圧力とする。定数aとbは高圧則に記されているものと同一で、16の半飽和組織ごとに定められているので、この式から全ての組織の任意の深度に於けるM値が導かれることになる。なお、定数aとbについてみると、bは傾き $\Delta M$ の逆数、すなわち $1/b$ が傾きとなり、環境圧力が絶対0のときのy軸切片がaになる(図2)。

実際に減圧表を作成するには、ここに記した方法によって潜水中の16分画全ての組織不活性ガス分圧を求め、それが当該減圧深度のM値を超えないように減圧停止する時間を定めることによってなされる。

#### IV. 問題点

##### 1 数式で示された減圧表は非常識である

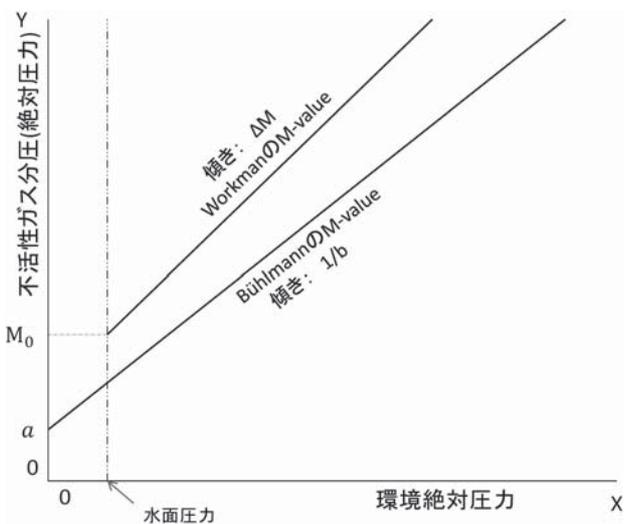


図2 BühlmannとWorkmanの数式の関係(Baker<sup>21)</sup>を改変)

改正高圧則の大きな特徴は、減圧表が表として示されたのではなく、減圧表を作成するための数式及びそれを用いた減圧表作成法が強制力のある規則として公に示されたことである。用いられる数式及び方法の骨子は「減圧表の作成」に記したとおりで、その計算の具体例は別稿<sup>27)</sup>を参照されたい。そこに見るように、たしかに高卒程度の数学の知識があれば理解可能で減圧計算もできるが、操作は煩雑を極め、実際に減圧表を作成するのは容易ではない。欧米諸外国で法規として減圧スケジュールを数式で示した例はなく、高圧則の対象が数学者ではなく潜水士あるいは潜水関連の会社等であることを考えると、非常識な法規であると言わざるを得ない。

##### 2 Bühlmann教授のZH-L16モデルに基づくと言えるのか

報告書によると、今回の改正高圧則における減圧スケジュールはBühlmannが提唱したZH-L16モデルに基づく、とされているが、疑問である。

減圧速度を規制するのはM値であり、M値はy軸切片をaとする環境圧力の一次関数である。aが大きくなればM値、すなわち許容組織不活性ガス分圧も大きくなるので、減圧速度を速く設定することが可能になる。ところが、実はZH-L16モデルにはABC三つの群のa値がある(表2)<sup>21-23)</sup>。というのは、当初に示されたA群のa値は理論値であるのに対し、減圧表として提示する際にやや厳しい値として採用されたのがB群のa値、さらに減圧コンピューター用としてC群の

表2 BühlmannのABC3群と高圧則のa値

区画	A (理論)	B (減圧表)	C (コンピューター)	高圧則
1	116.96	116.96	116.96	126.885
2	100.00	100.00	100.00	109.185
3	86.18	86.18	86.18	94.381
4	75.62	75.62	75.62	82.446
5	66.67	66.67	62.00	73.918
6	59.33	56.00	50.43	63.153
7	52.82	49.47	44.10	56.483
8	47.01	45.00	40.00	51.133
9	41.87	41.87	37.50	48.246
10	37.98	37.98	35.00	43.709
11	34.97	34.97	32.95	40.774
12	32.23	32.23	30.65	38.680
13	29.71	28.50	28.35	34.463
14	27.37	27.37	26.10	33.161
15	25.23	25.23	24.80	30.765
16	23.27	23.27	23.27	29.284

a値が定められたのである。

そこで、高圧則のa値とABC三群のa値を比較してみると図3のようになり、C群は勿論のこと、A群に比べても、高圧則のa値はかなり大きい。では、この大きいa値が減圧スケジュールにどのように反映されているのか、深度24m滞底時間80分の潜水を例にして見てみよう。B群のa値を用いて計算すると、減圧時間は大きく異なり、図4に示すように深度6mで5分、3mで5分、総計10分間、BühlmannのZH-L16モデルに基づく減圧時間の方が高圧則の減圧時間より長いことがわかる。

では、何故このように大きく異なる減圧時間を導くa値を高圧則に適用したのであろうか。報告書にその理由は明示されていないが、改正高圧則と同じa値が高圧則改正に当たったのと同じグループによる総括研究報告書<sup>28)</sup>に用いられており、そこにそのa値を採用した理由の一端が記載されている。それによると、英国の減圧表の一つであるブラックプール減圧表に近似す

る形に減圧停止時間を補正することとした、となっている。そうであれば、少なくとも報告書に明記されているところの“Bühlmannが提唱したZH-L16モデルに基づく減圧時間を基準”としたものとは言えないことになる。

### 3 安全率の適用基準があいまいである

潜水作業においては、一定の減圧表に基づいて減圧するにしても、安全率の概念を用いて潜ることが多い。なぜならば、例えば海底での作業が重作業である場合、不活性ガスの取り込みが大きくなり減圧症の発症の危険性が増すことから、安全率をかけた減圧表を採用することが、作業に当たる者の当然の留意事項とされているからである。その場合、安全率として、滞底時間を実際より長くとり、潜水深度を実際よりも深いものとする、あるいは減圧停止時間を長くするのも安全率の取り方の一つであるが、高圧則としては、M値を小さくすることで、安全率を考慮していることに

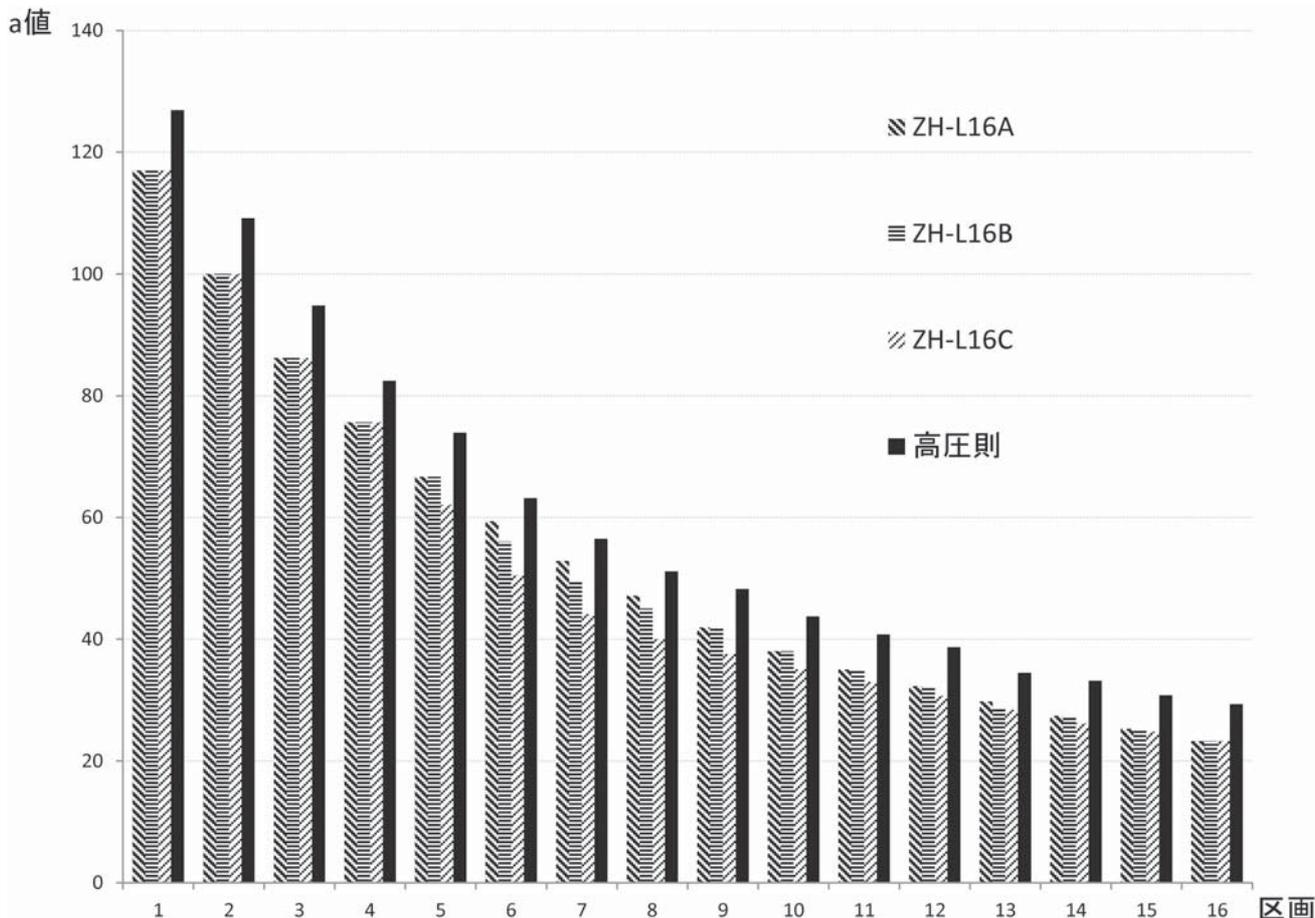


図3 ZH-L16モデル及び改正高圧則における a 値の比較

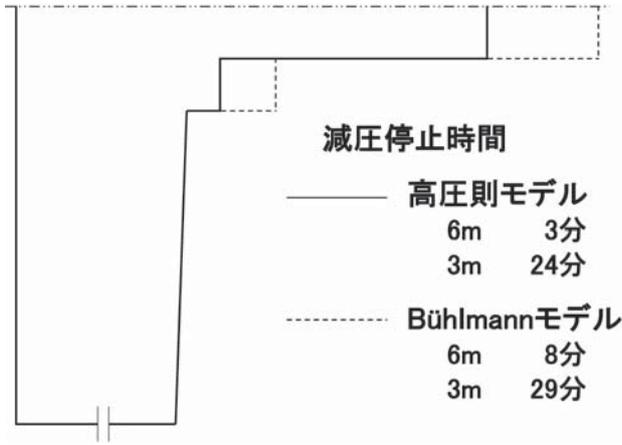


図4 24m80分の潜水の減圧プロフィール

している。具体的には、安全率 $\alpha$ として、安全率を考慮した換算M値を次の式で表している。

$$\text{換算M値} = \frac{M \text{ 値}}{\alpha} \quad \text{但し } \alpha \geq 1.0 \text{ (安全率)}$$

留意しておかなければならないのは、例えば $\alpha = 1.1$ の場合に減圧症に罹患する頻度を10%低いものにした、あるいは減圧時間を10%延ばしたというわけではないことである。あくまで、M値を1/1.1、約91%に小さくしたことを示すにすぎない。

では安全率を設定した場合、減圧時間はどのように変化するのであろうか。実際に改正高圧則に当てはめて計算してみると、深度24m滞底時間80分の潜水での減圧停止時間は、安全率を考慮しない場合、6mで3分、3mで24分、総計27分であるのに対し、 $\alpha = 1.1$ では、6mで17分、3mで39分、総計56分、 $\alpha = 1.2$ では、9mで10分、6mで31分、3mで69分、総計110分と極めて長くなっている。

さらに安全率を設定した場合の減圧時間を他の減圧表と比較してみる。図5は添付資料に記された減圧表から深度38m潜水の減圧時間を求めたもので、カナダDCIEM減圧表<sup>29)</sup>及び旧高圧則の減圧時間も提示している。比較的安全で保守的と言えるカナダの減圧表と問題点が多いと言われていた旧高圧則の減圧時間が、安全率を1.1に設定した場合としまなかった場合の改正高圧則の間に収まっている。

以上から明らかなことは、安全率の設定によって減圧時間が大きく異なってくることだ。安全率 $\alpha$ を0.1変更する、というと小さな変更のような印象を受けるが、

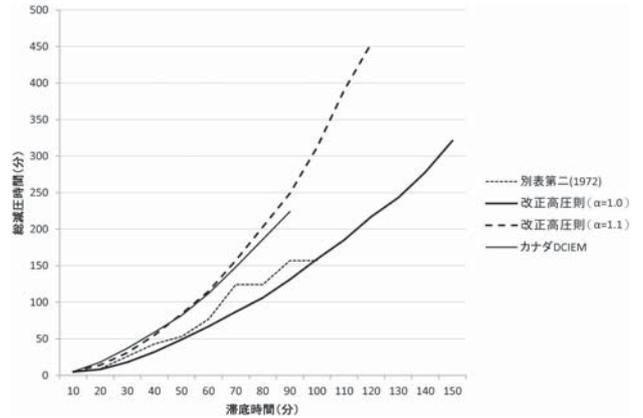


図5 各種減圧表における深度38mの潜水の滞底時間と総減圧時間

実際は上に記したように減圧時間は極めて大きく変化する。したがって重要なことは、安全率をどのような基準に従って変更し適用するかである。しかるに、報告書の添付資料によると、 $\alpha = 1.1$ とされた減圧表が「奨励」と記されており、これでは、安全率を適用していないもとの減圧表は何なのかということになる。さらに、 $\alpha$ の値も1.1のみならず、深度ごとに $\alpha$ が異なっている場合もあり、これではどのような根拠に基づいて $\alpha$ をいくらに設定したのか皆目わからない。少なくとも、改正高圧則の趣旨が減圧表作成の計算方法を明示することにあるのであれば、安全率の適用基準を明らかにすることは、減圧表作成のために避けて通れないプロセスである。それが出来ないとすれば、一種ブラックボックスであった従前の高圧則と本質的に変わりはないことになる。

このようなことでは、極論であるかもしれないが、単純に減圧停止時間を一律に例えば10%延長する等の方がより理解しやすく実用的であると言えるだろう。

なお、ZH-L16モデルを用いたトンネル工事の結果が公表されているが、それによると曝露圧力が増大するにしたがって減圧症に罹患する頻度が著明に増加している<sup>30)</sup>、潜水深度によって安全率を変更するのも有力な一つの方法であろう。

#### 4 繰り返し潜水の減圧表は危険である

潜水作業は一回だけの潜水で終わらず、一旦水面に浮上して休憩し、それから再び潜って作業することが多い。これを繰り返し潜水というが、最初の潜水に

よって生体内の不活性ガス分圧が通常よりも大きくなっており、2回目以降の潜水に於ては増加している不活性ガス分圧を考慮しなければならない。その際、最初の潜水によって気泡がいわゆる励起状態にされているためか、不活性ガスの移動を圧曝露に素直に従って計算して減圧スケジュールを作成することは極めて危険なことになる。現に、未公表であるが海上自衛隊において通常の減圧計算に基づいて短時間の繰り返し潜水を行ったところ、4名中2名が重症の脳型減圧症に罹患している（直ちに再圧治療を行って事なきを得ている）。

そこで、2回目以降の潜水に於ては様々なペナルティを科した減圧計算を行っていることが多い。米海軍では、2回目の潜水開始時点での生体内の不活性ガス分圧を計算し、2回目の潜水深度でその値に達するまでに要する時間を2回目の潜水の滞底時間に加えて減圧計算をすることとしている<sup>31)</sup>。

一方、高圧則に於ける繰り返し潜水の減圧計算では、そのようなペナルティを科している形跡は認められず、そのまま減圧計算を行った模様である。そこで、諸外国の繰り返し潜水の減圧時間<sup>29,32,33)</sup>を比較してみると図6のようになり、改正高圧則の減圧時間が諸外国ばかりか旧高圧則に比しても著しく短いことが一目瞭然である。結論として、報告書に記されている繰り返し潜水の減圧表は極めて危険で使用すべきではないと考える。

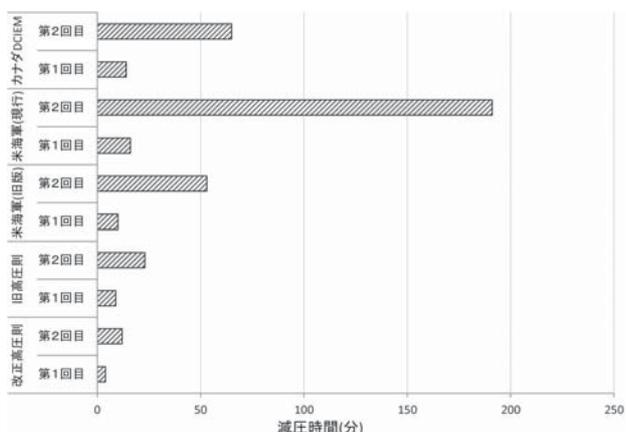


図6 繰り返し潜水における減圧時間の比較  
 深度20m 滞底時間60分の潜水を60分の間隔において2回行った場合

## 5 M値の超過は常に不可か

高圧則の減圧計算は生体内の不活性ガス分圧が全ての分画においてM値以下であることを基本として成り立っている。しかしながら、このM値はいかなる場合にも絶対に遵守しなければならない金科玉条の基準値であろうか。

というのは、潜水の世界では水上減圧あるいは水面減圧 (surface decompression) と言って、減圧途中で水面まで浮上し、いったん大気圧に戻った後に、船上の再圧室で再び加圧を受け、そこから徐々に大気圧まで減圧する方法があるが、その場合、大気圧に戻った状態は明らかにM値を大きく超過しているからである。

水上減圧を用いた最初の潜水は1925年に米海軍の潜水艦S-51のサルベージ潜水で実施され<sup>34)</sup>、1939年の潜水艦Squalusの救難潜水で常態化され<sup>35)</sup>、米海軍の潜水教範に収録されるに至っており、大きな問題なく広く実施されてきている実績がある<sup>36)</sup>。

そのような水上減圧は通常の潜水方法の一つとして認識されているのみならず、例えば海象状況の変化、ダイバーの緊急時等にそなえて当然前もって考慮しておかなければならない対応方法である。さらに、減圧時間を短縮することを目的として酸素を用いる潜水を行うためには、原則として水上減圧の方法をとることとされている。

なお、わが国では潜水漁師の間で水上減圧を使用して潜ったために極めて高い頻度で減圧症に罹患し、骨壊死等の恒久的な障害を残した例が多いことから、水上減圧に否定的な意見もあるが、これはもともと無謀な減圧方法によるものと考えるべきで<sup>37)</sup>、水上減圧そのものの欠点ではない。

このように、水上減圧は現在の潜水技術として当然考慮されるべきであるが、高圧則に則る限り水上減圧は認められないことになる。この件に関して直接厚労省の担当者にたずねてみたが、以上の状況を伝えた後もやはり水上減圧は不可ということであった。これでは、高圧則は現代の通常の潜水に対応できないことになり、この点からも高圧則の見直しは避けられないと考える。

## 6 深度制限は適切か

旧高圧則では深度90mまでの空気潜水減圧表が特に制限無く制定されており、90mまでの空気潜水が当然のこととされていたが、職業としてのダイバーの安全性を重視する今日の眼からすると余りにも無謀であると言わざるを得ない。そのようなところから、潜水の深度制限が持ち出され、高圧則第15条で窒素分圧の上限を400kPaに定めている。告示及び報告書では1気圧を100kPa、深度10mにつき1気圧の増加としているので、400kPaに相当するゲージ圧力は $400 \div 0.79 - 100 = 406\text{kPa}$ となり、深度40.6mになるが、一般的には40mを限度とすると解されている。

そうすると、高圧則に従えば、深度40mを超える潜水の空気潜水は不可でヘリウム酸素あるいはヘリウム窒素酸素の三種混合ガス潜水によらなければならないことになる。果たしてこの制限は妥当であろうか。報告書に依れば、窒素分圧を制限する理由として窒素による中毒(窒素酔い)を挙げているが、これまで40m以深の空気潜水に直接間接に関わってきた者の感覚として、40m以深の空気潜水がそれを一律に禁止しなければならないほど危険なものであるとはとても思えない。

しかしながら、これではあまりに素朴かつ主観的な判断になるので、潜水先進国と言える欧米諸外国の規制を見てみよう。表3はいわゆる潜水先進国といわれる国の公的機関の潜水教範<sup>29,33,38-40)</sup>に示されている深度制限であるが、40mという浅い深度を制限深度として設定しているところはない。カナダの減圧表は減圧時間が長く、ダイバーの安全性に留意した保守的な減圧表として知られるが、それでも深度制限は72mである。米海軍では例外曝露(exceptional exposure)として、旧高圧則より深い深度を設定しているが、この実施には厳しい制約が掛けられており、通常は標準減圧表の範囲内で潜る。これらを勘案すれば、例え

ば深度60m前後を深度制限とすることを一種のコンセンサスとみなしても問題はないと思われる。結論として、高圧則の深度制限40mがいかに異様で世界の常識から外れているかが一目瞭然である。そしてこの規制は円滑な潜水業務を阻害していると言っても過言ではないだろう。

さらに最近では別の見地からも、この40mの規制に疑問が投げかけられている。それはヘリウムの枯渇である。半導体や光ファイバー等の製造あるいはMRIの冷却等のために大量のヘリウムが必要であり、また中国韓国等の経済発展もあって、近年ヘリウムの需要が急速に増加しており、もはや遊園地で風船を膨らます目的でヘリウムを使用するなど不可能な状況になってきている<sup>41,42)</sup>。そのような中、潜水に於ても同様で、ヘリウムを使わなくてすむならそれに越したことはない。このような見地からも、空気潜水の許容深度を40mとするのは浅きに過ぎると思われる。

では、なぜ改正高圧則では40mという浅い制限深度を採用したのであろうか。報告書に記された窒素酔いの防止からという理由は先に見たように根拠が乏しい。

検討会の議事録を見ると、旧高圧則の圧気土木作業用の減圧表である別表1が400kPa(深度40m相当圧力)を最大圧力としているのに従ったとしているが、圧気土木用の制限をそのまま潜水に当てはめるのは聊か乱暴である。なぜならば、労働安全衛生規則によって300kPa(深度30m相当圧力)よりも高い圧力に曝露される大規模な圧気土木工事の場合は前もっていわゆる大臣審査を個別に受けなければならない、逆に言えば400kPa以上の圧気作業も同様の審査を受けることによって実施可能であったからである。このように、圧気土木作業はそもそも急を要することが少なく、事前に対応することが可能であるのに対し、潜水ではそうは行かない。突然40m以深の潜水作業が必要になることはよくあることで、その度に審査を受ける余裕はないのである。

その他に、スクーバ潜水の深度制限を40mとしていることを深度制限の理由として挙げているが、これも正確な認識ではない。40mという制限深度は、米海軍では携行できる呼吸ガスの量に厳しい制約があるス

表3 諸外国における潜水深度制限

米国	米海軍標準減圧表	57.9 m	190ft
	米海軍例外曝露	91.5 m	300ft
英国	RNPL減圧表	75 m	
フランス	標準減圧表	60 m	
カナダ	DCIEM減圧表	72 m	
ノルウェー	標準減圧表	60 m	

クーバ潜水は無減圧潜水（浮上途中に減圧停止時間を設けなくてよい潜水）の範囲で潜ることとされ、米海軍の旧版減圧表では深度130ft（約39m）滞底時間10分が無減圧で潜れる最大深度であることから、その範囲内の潜水しか許されていなかったことに由来することが大きい。しかしながら、高圧則の対象とする潜水はスクーバ潜水に限らないことから、スクーバ潜水用の深度制限をそのまま呼吸ガスが無尽蔵にある送気式潜水に当てはめるのは理に適った考えではない。

以上のことから、改正高圧則における深度制限は見直すべきと考える。その際の制限の一例として先に記したように60mを挙げたが、誰でも安易に60mまで潜れるわけではないことも認識しておくべきではない。60mまで安全に潜るには相応の知識技量経験が必要であることをどこかで明記しておくべきであろう。

## 7 危険な文言

高圧則にはそこに示されているとおりにすれば致命的になる文言があり、問題とされてきた<sup>9)</sup>。それは、第32条において、「事業者は、…浮上の速度を速め、又は浮上を停止する時間を短縮したときは、浮上後、すみやかに当該潜水作業者を再圧室に入れ、当該潜水業務の最高の水深における圧力に等しい圧力まで加圧し、又は当該潜水業務の最高の水深まで再び潜水させなければならない。」とあることである。しかし、実際にこのようなことを実施すれば、再加圧後の減圧が難澁を極め、最悪の場合は致命的になるであろう<sup>43)</sup>。

この文言の廃止ないし修正については、高圧則の改正検討会でオブザーバーから再三にわたり言及されているが、考慮されておらず残念である。

## 8 国際標準とはかけ離れた用語

潜水の世界では、米海軍が潜水の発展に大きく寄与してきた実績を踏まえ、米海軍潜水教範に記載されている用語が使用され国際標準となっているが、我が国においては、旧高圧則及びそれを補足する潜水士テキストに所収の国際標準とは異なった用語が独自に用いられ、混乱を招きやすくなっている<sup>4,12)</sup>、それについて示しておきたい。

その一つは時間に関する用語で、図7に示すように、潜降開始から浮上開始までの時間は国際標準としてはbottom timeが使われ、海上自衛隊ではこれに滞底時間という用語を充てて長期間使用してきている。一方、高圧則ではbottom timeを潜水時間とし、潜水時間をさらに潜降に要する潜降時間と海底に滞在する在底時間と分けている<sup>12)</sup>。このbottom timeはこれと潜水深度によって適用減圧表が決まる極めて重要な要素であるのに対し、在底時間は減圧表の適用に当てはめあまり意味が無く殆ど無視されているのが実情である。このように重要なbottom timeに対し日本語では潜水時間を当てはめ、日本語の潜水時間は実はbottom timeをあらわすというのは、これからの国際化を考えた場合、あまりにも人為的に過ぎかつ不自然であろう。海上自衛隊の長期間にわたる実績を踏まえ、bottom timeには滞底時間という用語を当てはめ統一するのが望ましいのではなかろうか。

なお、図7にある英語のtotal time of diveは日本語に訳すると総潜水時間とするのが妥当ではないかと思われるが、旧高圧則を基とした潜水士テキストに記載の総潜水時間はいわゆる繰り返し潜水をおこなった場合のbottom timeの合計を示すことになっていて、ここに示した内容とは異なっている。その他の時間に関する用語も詳細は省くが複雑を極めており、抜本的に見直すべきであろう。

もう一つはベンズ (bends) である。ベンズという言葉の由来は、19世紀半ばのミシシッピ川に架かるSt. Louis Bridge (Eads Bridge) の建設に伴う圧気工事で減圧症に罹患した人の痛みや麻痺のために膝を曲

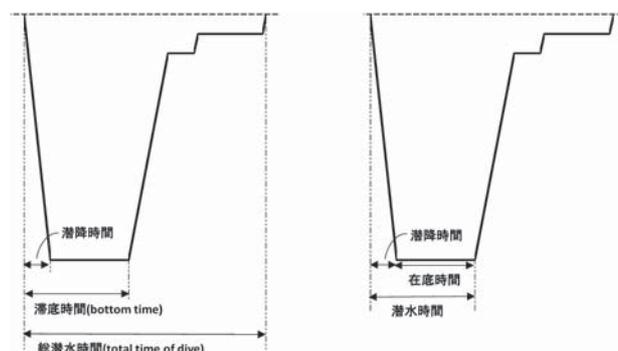


図7 潜水の時間に関する用語の比較。左は国際標準、右は高圧則における用語。

げる (bend) 歩き方が、当時の若い気取った女性の間で流行した Grecian bends と呼ばれる歩き方に似ていることから、減圧症をベンズと呼んだことによる<sup>44)</sup>。したがって当初は関節等の痛みを訴える減圧症をベンズと呼ぶ傾向にあったが<sup>45)</sup>、現在では減圧症とベンズは同義でありその示す内容に差はなく、現に、英語圏の辞書を見ても bends = 減圧症となっている<sup>46)</sup>。もし、軽症の四肢の減圧症をベンズというのであれば、英語でわざわざ limb bends, pain only bends あるいは mild bends という必要があろうか。また、英語では spinal bends, neurological bends, serious bends などという語が頻繁に使われるが、もしベンズが軽症減圧症をさすのであれば、これは矛盾した用法になる。

ではなぜ同じ内容を減圧症とベンズという異なった言葉で表すか、というと、単純に decompression sickness という言葉が堅苦しい響きを有するのに対し、ベンズがシンプル、言い換えれば俗で一般に使いやすいからである。潜水医学の泰斗 Elliott はベンズが本来俗語であり、正確な定義も定まっていなかったところから、(少なくとも学術的な場では) ベンズという言葉は使わない方がよいとしている<sup>44)</sup>。

ところが、日本では、旧版の潜水土テキストで関節や筋肉の痛みを訴える軽症の減圧症をベンズとしていたことから、今に至るもベンズを軽症の減圧症の意味で使用することが多く、検討会の報告書でもその意味で使われている。

この適切とは言えないベンズの用法は具体的には次のような問題を引き起こしかねない。というのは、例えば日本人が海外でベンズに罹患したと現地の人に言われれば、それが軽症の減圧症に罹患した、と誤解して認識される可能性がある。したがって、学術的あるいは公的な場ではベンズという言葉の使用を差し控えるか、あるいはベンズと減圧症は同義であると認識して使用した方が賢明であろう。

## V. 結語

改正高圧則によって減圧理論はある程度明らかにされ、混合ガスや酸素の使用が煩瑣な手続きなく可能になる等、問題点は大きく改善されたが、いまなお判然としない部分も少なくない。さらに極めて危険な減

圧表も見受けられ、円滑な潜水業務の支障になりかねない部分も残っていることから、速やかな改正が望まれる。

## VI. 謝辞

貴重な講演の機会を与えてくださいました第50回学術総会会長齋藤繁先生に深謝いたします。また、有益なディスカッションを賜りました潜水技術センターの望月徹氏にも衷心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 池田知純：減圧をめぐる諸問題。防衛医科大学校雑誌。1998;23:149-162.
- 2) 池田知純：減圧表の制定。日本高気圧環境医学会雑誌。2004;39:1-6.
- 3) 毛利元彦：日本の減圧問題を考える。日本高気圧環境医学会雑誌。2005;40:11.
- 4) 池田知純：減圧表のあり方。日本高気圧環境医学会雑誌。2005;40:13-19.
- 5) 眞野喜洋, 山見信夫, 外川誠一郎, 他：形成気泡数からみた我が国の標準減圧表評価。日本高気圧環境医学会雑誌。2005;40:21-24.
- 6) 石井通夫：日本の土木工事における高気圧作業と減圧要領の変遷。日本高気圧環境医学会雑誌。2005;40:25-35.
- 7) 池田知純：本邦の職業潜水用減圧表に関するアンケート調査。日本高気圧環境・潜水医学会雑誌。2006;41:237-248.
- 8) Ikeda T: A questionnaire survey on the use of Japanese decompression tables: a preliminary report. In: Mano Y, ed. The First Panel on U.S./Japan Diving Physiology, Technology and Aerospace Medicine (Formerly UJNR). Tokyo; Japanese Society of Hyperbaric and Undersea Medicine, 2006; pp. 51-53.
- 9) 池田知純, 望月徹：職業潜水に於る減圧障害の実態。日本高気圧環境・潜水医学会雑誌。2007;42:121-126.
- 10) 合志清隆, 玉木英樹, 石竹達也, 他：高気圧作業安全衛生規則と労働災害。産業衛生学雑誌。2008;50:A31-33.
- 11) 池田知純, 望月徹, 小林浩, 柳澤裕之：職業潜水の安全性に関するアンケート調査。日本高気圧環境・潜水医学会雑誌。2009;44:51-60.
- 12) 池田知純：混乱しやすい潜水用語。In: 潜水医学入門。東京；大修館書店。1995; pp.26-27.
- 13) 梨本一郎：わかりやすい潜函病予防法の解説—高気圧障害防止規則による減圧症予防の原理と実際。東京；

- 工学出版. 1962.
- 14) Nashimoto I: Decompression schedules in civil engineering work in Japan. In: McCallum RI, ed., Decompression of Compressed Air Workers in Civil Engineering. Proceedings of an International Working Party Held at the Ciba Foundation, London 1965, Newcastle upon Tyne; Oriel Press Ltd, 1967; pp.46-55.
- 15) 梨本一郎: 高圧則の誕生. In: バブルとの闘いーわが潜水医学・高気圧医学の歩みー. 私家版. 1991; pp.20-21,
- 16) Tailliez P, Dumas F, Cousteau JY, Alinat J, Devilla F: La Plongée en Scaphandre. Paris; Éditions Elzévir, 1949.
- 17) 高気圧作業安全衛生規則改正検討会報告書. 東京; 厚生労働省労働基準局. 2014; pp.1-29. <http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyo-Soumuka/HP-Report.pdf>
- 18) 高気圧作業安全衛生規則改正検討会報告書ー別添資料. 東京; 厚生労働省労働基準局. 2014 ; pp.1-24. <http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyo-Soumuka/HP-Appendix.pdf>
- 19) 第1回高気圧作業安全衛生規則改正検討会議事録. 東京; 厚生労働省労働基準局. 2012. <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002cq7g.html>
- 20) Bühlmann AA: Decompression - Decompression Sickness. Berlin, Springer-Verlag, 1883; pp.1-87. ISBN 3-540-12514-0
- 21) Baker EC: Understanding M-values. Immersed. 1998;3 (3) ,23-27.
- 22) Bühlmann AA, Völlm EB, Nussberger P: Tauchmedizin: Barotrauma Gasembolie - Dekompression Dekompressionskrankheit Dekompressioncomputer, 5th ed. Berlin, Springer-Verlag, 2002; pp.1-253. ISBN978-3-642-62753-8
- 23) Schröder K, Reith S: Saturation effects in diving, the Model ZH-L16, operation of dive computers,2000. [http://www.achim-und-kai.de/kai/tausim/saett\\_faq\\_e.html](http://www.achim-und-kai.de/kai/tausim/saett_faq_e.html)
- 24) 池田知純: 付録2 ホールデー教授による減圧理論. In: 潜水医学入門. 東京; 大修館書店. 1995; pp.264-266.
- 25) Workman RD, Bornmann RC: Decompression theory: American practice. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work, 2nd ed. London; Baillière Tindall, 1975; pp.307-330.
- 26) 池田知純: 古典的減圧理論の展開 Ⅲ: M値の概念及び古典的減圧理論の限界. 日本高気圧環境医学会雑誌. 1997;32:101-105.
- 27) 池田知純: 減圧表作成の実際. In: 潜水士テキスト 第6版. 東京; 中央労働災害防止協会. 2016; pp.350-359.
- 28) 眞野喜洋, 山見信夫, 芝山正治: 新しい標準減圧表作成に伴う実地調査および検証調査研究. 平成19年度厚生労働科学研究費補助金 労働安全衛生総合 研究事業 平成19年度 総括研究報告書. 東京; 眞野喜洋 (東京医科歯科大学大学院健康教育学) 2008; pp.1-229.
- 29) DCIEM Diving Manual: Air Decompression Procedures and Tables. Department of National Defence - Canada, 1992
- 30) Ruegger M, Bühlmann AA, Völlm: Decompression in tunnel construction using the hydroshield process. In: Jardine FM, McCallum RI, eds. Engineering and Health in Compressed Air Work. Proceedings of the International Conference, Oxford September 1992. London; E & FN Spon, 1992; pp.319-327.
- 31) Flynn ET, Catron PW, Bayne CG: Lesson 20. Repetitive dive theory. In: Diving Medical Officer Student Guide. Naval Technical Training Command 1981
- 32) US Navy Diving Manual, Revision 1. 1985.
- 33) US Navy Diving Manual, Revision 6. 2008.
- 34) Gouze FJ: A method and study of surface decompression as a routine procedure. US Navy Med Bull 1944;42: 578-580.
- 35) Behnke A, Willmon TI: U.S.S. Squalus; medical aspects of rescue and salvage operation and use of oxygen in deep sea diving. U.S. Navy Med Bull 1939;37:629-640
- 36) Flynn ET, Catron PW, Bayne CG: Lesson 21. Surface decompression procedures. In: Diving Medical Officer Student Guide. Naval Technical Training Command 1981
- 37) 川瀧真人, 田村裕昭, 高尾勝浩, 他: 不活性ガスと減圧性骨壊死ーダイビングプロフィールと骨壊死ー. 日本高気圧環境医学会雑誌 1995;30:177-185.
- 38) RNPL Metric Air Diving Tables. London; CIRIA Underwater Engineering Group Report UR7. 1976.
- 39) Arntzen AJ, Eidsvik S: Norsk dykke- og behandlingstabeller. Bergen; 1991. English translation; Norwegian Diving- and Treatment Tables. Bergen; Barotech, 1993.
- 40) Travaux en milieu Hyperbare Mesures Particulière de Prévention. Paris; Direction de Journoux Officiels, 1992.

- 41) 共同通信社 2012年12月7日 ヘリウムガスが不足 風船, 医療にも影響 中国の需要急増で
- 42) 日経テクノロジー 2013年2月14日 ヘリウム枯渇
- 43) Barnard EEP, Elliott DH: Decompression sickness: paradoxical response to recompression therapy. *Brit Med J* 1966;2:809-810
- 44) Elliott DH: What is “BENDS”? The development of current definitions and the need for a new classification. In: Nashimoto I, Lanphier EH: eds. *What is Bends?* Bethesda MD, Undersea Hyperbaric Medical Society, Inc. 1991; pp.2-8.
- 45) *Glossary of Diving and Hyperbaric Terms*. Undersea Medical Society, Bethesda MD, 1978.
- 46) *Diver Reference Dictionary*. Best Publishing Company, San Pedro CA, 1986.