

## ● 総 説

## 古典的減圧理論の展開

## II：米海軍標準空気減圧表の制定

池田知純\*

キーワード：減圧理論，減圧症，潜水医学

**The development of classic decompression theory  
II : Promulgation of USN standard air decompression table**

\*Tomosumi Ikeda\*

\*Division of Environmental Medicine, National  
Defense Medical College Research Institute**Keywords :**decompression theory  
decompression sickness  
diving medicine

## 承 前

前稿<sup>1)</sup>においてホールデン教授による古典的減圧理論の概要と初期のいわゆるヤーポロー・テーブルに至るまでの減圧表が如何に制定されていたかを記したが、本稿では引き続き標準減圧表の制定の過程について概説する。用語は前稿と同じものを用い、その場合はあらためて定義はしない。

## 第2の見直し：現行の減圧表へ

ヤーポロー・テーブルは艦隊に配布されて使用されてきたが、この減圧表に対する見直しの機運は海軍実験潜水部隊の軍医であるバンデオー (O. E. Van der Aue) 中佐 (当時) らのグループが水

上減圧法の確立を求めて実験を行っているときに必然的に生じてきたのである<sup>2)</sup>。というのは、水上減圧の対照群として通常の減圧を行った際に、場合によっては50%という減圧症の発症率をみたからである。これは先にヤーポロー・テーブルでの発症率が1.1%と小さい数字であったと記したのと矛盾するわけだが、その理由の一つとしてヤーポロー・テーブルを開発する時に実施された潜水の作業量が小さかったことと潜水深度が浅くかつ滞底時間が短かったことなどが挙げられている<sup>3)</sup>。

しかし、この50%という発症率は当然許容できないもので、引き続いて実施された酸素使用の水上減圧表の制定過程において減圧表の手直しが行われた。その一端は1951年に発表された実験潜水部隊の報告書に記されているが<sup>4)</sup>、減圧表の作成に関連する主な改正点は次の三つである。一つは半減時間が短い組織も浮上を規制することがあり得るとして、再び5分及び10分組織の許容値を制定したこと、二番目は、滞底時間が長くなると75分組織を超えてさらに長い半減時間の組織を考慮する必要があるとして、120分組織の概念を導入したこと、三つ目は許容比そのものも最終的には表1に示すようにさらに小さくしなければならなかったことである。さらに開発の途中では、許容比が半減時間によるのみでなく、実施した潜水の深度及び滞底時間によっても異なってくるのではないかとする考えも浮上してきたが、これは減圧表の次の改正に向けての一つのステップとなるものであろう。

なお、表1では許容比と共に許容比を基にして

\*防衛医科大学校防衛医学研究センター異常環境衛生研究部門

表1 酸素使用水上減圧表で採用された浮上時の許容比

半減時間組織	許容絶対圧力 (ft)	許容絶対圧力比
5分	125*	3.80
10分	112	3.40
20分	92	2.80
40分	75	2.27
75分	68	2.06
120分	66	2.00

\*原著では127となっているが、許容比から計算すると125になる。

計算された窒素の圧力が許容圧力として併記されているが、これは許容比よりも許容分圧を指標として減圧計算行っている現在の方法への移行の最初の状況を示すものではなからうか。但し、この時点で記載されている値は大気を100%窒素と見なしての圧力であって、現在用いられている実際の窒素分圧とは異なっていることに注意しておかなくてはならない。本稿では大気を100%窒素であると見なした窒素の生体内に於ける許容圧力のことを許容絶対圧力とし、実際の窒素の割合から導き出された許容圧力を許容分圧とする。

さて、水上減圧法の確立に引き続いて、米海軍ではその後も精力的に減圧表の改正に取り組んでいたわけだが、次の大きな飛躍は1955年から1957年にかけて公にされた実験潜水部隊の一連の報告書に認められる。

そこでは、数学者としてドワイヤー少佐が減圧表改正プロジェクトに関与することになり、次のような問題点があらためて挙げられた<sup>5)</sup>。まず、考慮する半減時間を40分に続いて75分という中途半端な数字であったのを80分に改めること、半減時間120分の組織も減圧計算に当たっては考慮しなければならないこと、許容比が減圧中の深度によって小さくなる可能性があること、及び毎分25ft以下の浮上速度というのは当時導入されつつあったスクーバ潜水を考えると遅すぎること等が主な提言事項である。従って、以後の実験潜水では毎分60ftで浮上することとなった。また許容比として前述の許容絶対圧力比と許容過飽和比が混同される可能性があることにも注意を促している。例えば、ヘリウム酸素潜水減圧表は許容比を1.7としているので、ホールデー教授の許容比2に較べ

て低い数字のようによく誤解されるが、この1.7という数字は許容過飽和比なので、ホールデー教授のいう許容絶対圧力比でいうと $1.7/0.79=2.15$ となって却って高いのである<sup>5)</sup>。

最初に、今回の減圧法改正の基本となる考え方を示しておこう。横軸に許容絶対圧力比、縦軸に窒素が100%であると想定したもとの生体内窒素の絶対圧力を示すグラフを描いてみる(図1)。各深度毎の減圧点におけるそれぞれの組み合わせを考えてみると、それはY軸にプラスの切片を有する右上がりの直線のいずれかに存在するはずである。すると、生体内の窒素の絶対圧力は先に示した基本式を利用して求めることができるので、減圧症に罹患した場合としない場合を分ける点を、その直線上に特定することができるようになる。つまり、この点より右側は減圧症に罹患し、左側は罹患しないことになる<sup>3)</sup>。また、この点での絶対圧力が許容絶対圧力になる。

したがって、このグラフを各半減時間ごとに作成していけば、理論的には適切な減圧方法を求めることができることになる。しかし問題は、ではどうやって各深度の減圧点において減圧症に罹患する場合としない場合を区別するかである。潜水終了後の水面、即ち深度0においては減圧症に罹患したか否かを判断するのは容易であるが、浮上途中の減圧点すなわち水中においてそれを判断するのは簡単ではない。

ここでドワイヤー少佐がとった方法<sup>6)</sup>を述べなければならぬが、これが極めて難解であり、これを解り易く述べた文献は邦文は勿論のこと、英文でも知る限りでは見当たらない。そこで、筆者の理解は非常に不十分であり、またその能力も乏

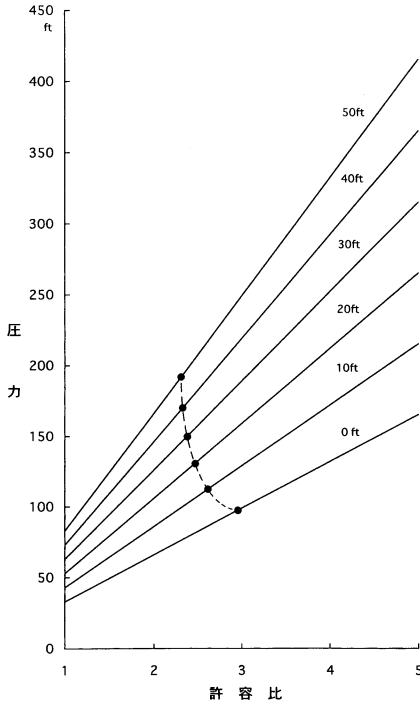


図1 許容比の求め方

しいのであるが、根気よくオリジナルの報告書を検討してみることにしよう。

実はこの報告書は本来は繰り返し潜水減圧表の制定に関するもので、そのうちの次の潜水までの時間 (surface interval) が720分 (12時間) のものを“single dive”とし、それを基本潜水として評価しようとするものである。その骨子は先にも述べたように、許容比が水中の減圧点で減圧中も水面への浮上時とも一律であるということは理屈に合わない可能性が高いこと (深度が深くなると同じ比の圧力変化で圧力そのものの変化は大きくなるので、許容比が小さくなるのが考えられる) から、水面着以前の許容比 (depth ratio: 本稿では水中許容比とする) を水面に達するときの許容比 (surfacing ratio: 本稿では水面許容比とする) よりも小さくしようとするのである。この場合の許容比は絶対圧力比である。

さて、実際の計算方法であるが、ドワイヤー少佐は次のような10乗式が組織中の窒素の圧力を表すのに適当なのではないかと考えた。なお、この式そのものは生理学的な意味合いを有するもので

は全くなく、単に既存のデータに合致するような数式を用いたとのことである (Thalman: 私信)

$$J = (s/r)^{10}$$

$$J = (Q/33) - (r-1)$$

r: 水中許容比

s: 水面許容比

Q: 生体内の窒素の絶対圧力 (大気中の窒素を100%と見なしている)

これを書き直すと、成書<sup>7)</sup>でお馴染みの

$$Q = 33\{(s/r)^{10} + r - 1\}$$

が導き出される。

この式を見て当然不思議に思われるのが、どのようにして未知の値 r を導き出したかである。つまり、上に示した二つの式双方に未知の値 r があることで、これからは r そのものを導き出すことはできない筈である。

これに対して、医官のソールマン (E.D.Thalman) 中佐 (当時) らは次のように解説している (当該文献<sup>8)</sup>及び私信)。上の Q の代わりに組織の窒素分圧を N という符号を用いて表すと、N は Q の 0.79 倍なので上式は

$$N = 0.79 \times 33 \times \{(s/r)^{10} + r - 1\}$$

となる。ここで、 $P_A$  を絶対フィートで表した環境の窒素分圧とすると、 $P_A = (\text{計器深度} + 33) \times 0.79$  とできるが、 $r = N/P_A$  とするところがポイントである。そこで、ここで得られた N と実際の N の差が限りなく小さく 0 であるのが求める N、つまり減圧を制御する要因であるところの N になるわけである。

とすると、この式は r に  $N/P_A$  を代入して

$$N / (0.79 \times 33) - \{(s \cdot P_A / N)^{10} + N / P_A - 1\} = 0$$

となって、未知数は N だけであるので (s は実験結果から判っており、 $P_A$  は環境窒素分圧である)、この数式を解けばよいわけである。

以上のことをグラフに表してみる。即ち、図2の右下がりの曲線のグラフは各半減時間組織ごとに組織内の窒素圧力が増加するに従って水中許容比がどのように減少していくかを示したもので、縦軸は Q、横軸は許容比 r を示すものである。これらのカーブより左側は減圧症に罹患せず安全、右側は減圧症に罹患するものとして捉えることが可能である。これに、先に示した右上がりの直線のグラフを重ね合わせると、水面から10ft深くなるごとの水中許容比の変化、即ち減圧点の深度が

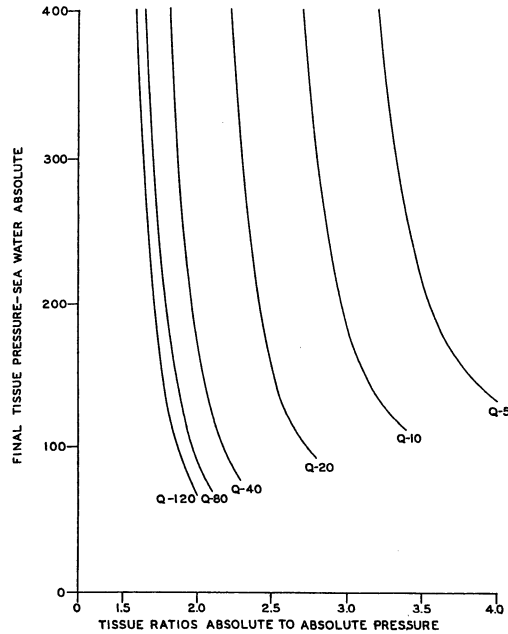


図2 各半減時間ごとの許容比の変化 (文献<sup>9)</sup>より引用)

深くなるにつれて水中許容比が小さくなっているのがわかる。

この曲線は水面許容比やべき数を変えることによって当然変わってくる。例えば、水面許容比を2.3から2.1に減ざると図の40分組織のカーブは80分組織のカーブの所、即ち左に移動するが、ほぼ妥当であると思われる水面許容比を変更することには問題がある<sup>9)</sup>。

この時に用いられた水面許容比は表2のようになっている、先に示したバンデオーによる許容比(表1)と殆ど同じである。

さらに、減圧点の深度が増加するに従って水中許容比が減少していく様子を数字で示しておく(表3)。この値は別の引用文献<sup>9)</sup>からであるので、許容過飽和比が用いられている。

ドワイヤー少佐は10乗式による繰り返し潜水の減圧計算を David Taylor UNIVAC というコンピュータを用いて実施し、その中で繰り返し間隔、即ち水上時間 (surface interval) 720分 (12時間) の潜水の減圧表を single dive table という基本になる減圧表として公表した。この減圧表が次に述べる標準減圧表の基本となるのである。この減圧表の全容はドワイヤーの報告書<sup>9)</sup>ではなくて次

に述べるデス・グランジェス (M. des Granges) の報告書<sup>9)</sup>に記載されているので、必要な場合はそちらを参照されたい。

#### 標準減圧表の制定：デス・グランジェス及びワークマンの報告書

標準減圧表は二つの報告書より成る。一つはデス・グランジェス中佐によるもので、潜る機会の多い190ft60分までの潜水の減圧表である<sup>9)</sup>。もう一つはワークマン少佐 (医官) による深くより長い潜水の減圧表で<sup>10)</sup>、米海軍潜水教範では赤字で記された例外曝露、海上自衛隊ではいわゆる別表と呼ばれている。

まずデス・グランジェス中佐の報告書を詳しく見ることにしよう。

そこでは1潜水に2名の潜水員が被験者として潜り、一つの潜水スケジュールに対して6回の潜水を行うように計画したもようである。海中では重量物の上げ下ろしの運動を課し、より実際の潜水作業に近づけるように心がけたが、水温の制御は不可能であったので実施しなかったと記されている。そして、減圧症に罹患することのない正常な潜水を少なくとも4回行うことによって、その

表2 減圧計算に用いられた水面許容比

組織	許容絶対圧力比	組織	許容絶対圧力比
5分	4.0	40分	2.3
10分	3.4	80分	2.1
20分	2.8	120分	2.0

表3 減圧点深度における許容過飽和比

組織半減時間	水面	40ft	70ft
5分	3.16	2.67	2.55
10	2.69	2.29	2.21
20	2.21	1.93	1.86
40	1.90	1.55	1.52
80	1.58	1.41	1.38
120	1.53	1.38	1.36

減圧スケジュールが安全であると評価したようである。結局全てで609潜水が実施されている。

実験潜水は4段階に分けて行われ、最初の段階では88スケジュールに対して453潜水が実施され、うち13スケジュールにおいて計18名の潜水員が減圧症に罹患している。これを検討してみると80分組織の窒素分圧が許容値に近い場合に罹患していることが多いこと、及び20分組織に於ても同様の傾向を示すことから、80分組織の水面許容比を小さくし、他の許容比もそれにならって減少させて、次の第二段階の実験を行った。実験は先の段階で減圧症をみた13スケジュールについて実施したのであるが、それでもなお4つのスケジュールで減圧症が再び発生することとなった。そこで、第3段階として恣意的に許容比をさらに減少させて、第二段階で減圧症の発症をみた4つのスケジュールについて実験潜水を行ったところ、なお二つのスケジュールで減圧症の発症をみた。最後の第4段階として、第二段階の実験が比較的良好な結果を示していることを参考にして、120分と40分組織の水面許容比を下げると共に80分組織の許容比もさらに下げて実験潜水を実施したところ、今度は減圧症が発生することはなかった。そこで、この許容比に基づいてあらためて全体を計算し直して制定された減圧表が、今日なお使用されている米海軍標準減圧表になるわけである（1993年に浮上

速度が毎分30ftに半減されたが<sup>11)</sup>、表そのものは変わっていない)。ドワイヤーの減圧表に比して浅深度減圧点での減圧時間が長くなっている。図3に40分組織における許容比と深度の関係がこれら4つの試行でどのように変化しているかを表したグラフを示しておく。

この潜水実験で用いられた許容比はワークマン<sup>10)</sup>に拠れば表4のようにになっている。なお、ここから導き出された水中許容比は、実験潜水を行った限りでは半減時間の比較的短い組織では妥当とされたが、半減時間の長い組織、即ち40分組織では40ftまで、80分では10ftまで、120分組織では水面についてしかテストされなかったようである。

次に、このデス・グランジェスの報告書の続きとして、より深く長い潜水の減圧表について記しているのが、先に述べたようにワークマンの報告書<sup>10)</sup>である。ここでタイトルが空気飽和潜水の減圧計算となっているが、実状は飽和潜水というよりも滞底時間が数時間までにわたる長時間の潜水の減圧計算について記したものである。この報告書も難解であり筆者が十分に理解できない記述が多いが、じっくり見ていくことにしよう。

この減圧表の制定は、次に示すような考えに基づいて実施された。まず最初は、先に示したドワイヤーの10乗式に基づいて減圧計算を行って、そ

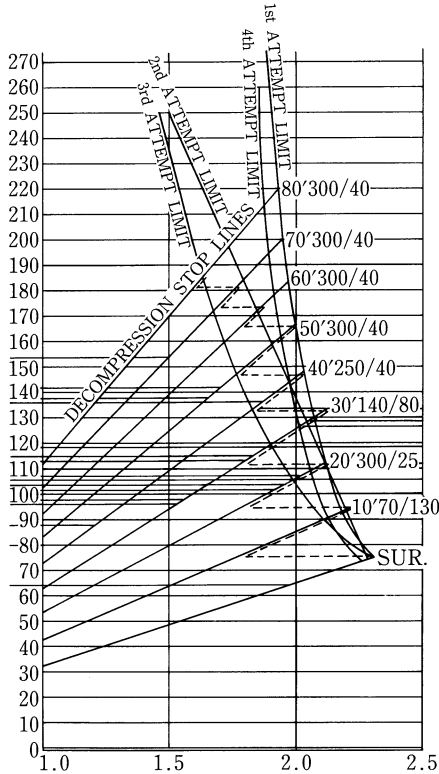


図3 40分組織における許容比の修正 (文献<sup>9)</sup>より引用)。第1回(1st attempt limit)から第4回(4th attempt limit)にわたる許容比の変化を示している。横軸は許容比、縦軸は圧力(ft)を表す。

表4 修正された水面許容比

組織	水面許容比	組織	水面許容比
5分	4.0	40分	2.4
10分	3.4	80分	2.0
20分	2.8	120分	1.94

それぞれの減圧点での許容絶対圧力を求め、それによって140ft240分までの潜水が実施されたが、ここで高率に減圧症の発症を見ることになった。

そこで、今度はダフナー (G.J.Duffner) 大佐の提唱するところの、pressure-diameter relationship(詳細は不明だが、圧力とその圧力下での気泡の直径の変化を関連づけて減圧を考えようとする

ものか)によって減圧計算を行うこととなった。こうすると、減圧時間が大幅に延びるのだが、それでも減圧症が発症したので、今度は考慮すべき半減時間を120分からさらに延長する必要があると考えて、半減時間160分の組織を想定し、その許容絶対圧力を66ftに設定して、140ft180分の潜水を6回行ったが、1名が減圧症に罹患して再圧治療を受け、さらに3名が違和感等を訴えることとなった。

そこで、160分組織の許容絶対圧力をさらに小さく64ftに設定して240分間の潜水を2回行ったが、2名が減圧症に罹患している(2潜水で被験者が2名だったか否か判然としない)。

これと前後して、ダフナー大佐の方法では減圧時間が大幅に延びることからドワイヤーの方法と折衷した減圧方法も提示され実験されることとなった。しかしそれでも高率に減圧症に罹患することとなり、次の方法に向かった。

即ち、1937年から1945年にかけて実施された深度30~99ft、滞底時間最大36時間の未発表の潜水記録を掘り起すことから始めることとした。すると、まず減圧症に対する被験者の感受性に大きな個人差があることが見出されてきた。例えば、160分組織の絶対圧力が69ftを超えていて無症状の者もいることが判ってきたのである。

以上のことから、まず、これまで滞底時間の長い潜水の減圧がスムーズにいかなかったのは、許容圧力が大きすぎたというよりも、むしろより長い半減時間を想定しなかったためではなかったかということが認識されだした。具体的には、40分や80分組織の許容絶対圧力比を非常に厳しく1.75にしても、それは安全な減圧に直ぐにはつながらず、160分さらに240分組織を想定してそれらの許容比を1.94(許容絶対圧力では64ft)にした方がよいということが判ってきたのである(120分では65ft)。

つまり、要約して言えば、深く長い潜水では当初の10乗式による減圧計算は満足できるものではなく、経験に基づいて許容圧力を下げると共に、想定される半減時間をより長時間に延ばすことによって、何とか減圧の道筋を明らかにすることができたわけである<sup>712)</sup>。

表5に最終的な許容絶対圧力を示しておく。ここに至るまでの許容圧力の変遷は報告書の表1-

表5 例外曝露潜水減圧表に用いられた最終的な許容絶対圧力

組織の 半減時 間(分)	減圧深度(ft)													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
40	74	94	112	128	142	155	167	179	190	201	212	223	234	245
80	67	85	101	115	128	140	152	163	174	185	196	207	218	229
120	65	82	97	110	122	134	145	156	167	178	189	200	211	222
160	64	80	94	107	119	131	142	153	164	175	186	197	208	219
240	64	79	92	104	116	127	138	149	160	171	182	193	204	215

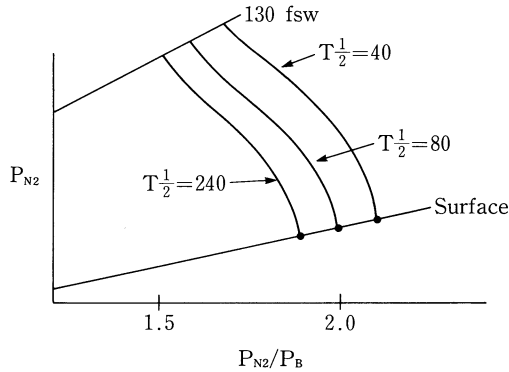


図4 例外曝露における許容比の変化(文献<sup>9)</sup>より引用)

Aから1-Fに記されているので、そちらを参照されたい。

この例外曝露における各深度の許容比と生体内ガスの圧力の関係を示したグラフを図4に示しておくが、一見して判るとおり、図2や図3に見られる曲線とは趣を異にしている。例外曝露の現行減圧表は極めて信頼性に乏しく、場合によっては100%減圧症に罹患することが示されているが<sup>9)</sup>、その要因がこのような不自然な許容比の修正曲線に表れているのかもしれない。

減圧理論の変遷の最後に、これら一連の減圧理論によって実際の減圧表がどのように変わったかを示そう。例として150ft30分の潜水と、200ft15分の潜水をそれぞれ表6及び表7に挙げる。表中C&RとあるのはC&Rテーブル、ホーキンスはホーキンスの改善提案による減圧表、ヤーポローはヤーポロー・テーブル、ドワイヤーはドワイヤーによる減圧法、標準は標準減圧表をそれぞれ示す。この表から、C&Rテーブルでは許容比を半

減時間に拘わらずほぼ一定にしていたため第一減圧点が深い深度にあること、ホーキンスとヤーポローによる減圧表では5分及び10分組織の許容比を無視したことから深く短い潜水での第一減圧点が浅すぎることを、ドワイヤー及び標準減圧表では半減時間を長く設定しかつ許容比を小さくしたことから最終減圧点での停止時間が長く、全体としてより妥当な減圧スケジュールになっていること、などがよくわかる。また、減圧表の改訂によって深い深度での減圧停止が無くなるなどして、減圧時間はむしろ減少していることも明らかである。

以上をまとめると、標準減圧表の制定は、考慮すべき組織の半減時間を延長し、かつ同じ半減時間の組織であっても減圧点の深度の増加に伴って許容比を小さく設定することによって、実施されてきたのである。その過程で許容比よりも許容圧力を減圧表作成の指標とする新しい考え方が生まれてきたが、これは次のM値の考え方につながる

表6 各種減圧表における深度150ft 滞底時間30分の潜水の減圧スケジュール

減圧点深度(ft)	減圧停止時間(分)				
	C & R	ホーキンス	ヤーボロー	ドワイヤー	標準
50	3				
40	5				
30	10				
20	15	19	13	8	8
10	20	19	21	20	24
総減圧時間*	53	38	34	28	32

\* 第1減圧点までの浮上時間は総減圧時間に算入していない。

表7 各種減圧表における深度200ft 滞底時間15分の潜水の減圧スケジュール

減圧点深度(ft)	減圧停止時間(分)				
	C & R	ホーキンス	ヤーボロー	ドワイヤー	標準
60	3				
50	3				
40	5				
30	7			1	1
20	10			4	4
10	20	15	32	8	10
総減圧時間*	48	15	32	13	15

\* 第1減圧点までの浮上時間は総減圧時間に算入していない。

ものである。

### 結語に代えて

前稿に引き続いて、標準減圧表の制定過程を示した。次の最終稿において古典的減圧理論による減圧計算にとって欠かすことのできないM値の概念について述べると共に、古典的減圧理論の限界等について簡単に記すことにする。

### 〔参考文献〕

- 1) 池田知純：古典的減圧理論の展開 I：最初の改訂減圧表まで，日本高気圧環境医学会雑誌，31(3)：181-187，1996
- 2) Van der Aue OE, Brinton ES, Kellar RJ：Surface Decompression and Testing of Decompression Tables with Safety Limits for Certain Depths and Exposures. Project X-476, US Navy Experimental Diving Unit Research Report 1. 1945
- 3) Flynn ET, Catron PW, Bayne CG：Lesson 18：Historical evolution of U.S. Navy air decompression procedures and decompression concepts. In：Diving Medical Officer Student Guide. Naval Technical Training Command. 1981
- 4) Van der Aue OE, Kellar RJ, Brinton ES, Barron G, Gilliam HD, Jones RJ：Calculation and Testing of Decompression Tables for Air Dives Employing the Procedure of Surface Decompression and the Use of Oxygen. U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 13-51. 1951
- 5) Dwyer JV：Calculation of Air Decompression Tables. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 4-56. 1955
- 6) Dwyer JV：Calculation of Repetitive Diving Decompression Tables. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 1-57. 1956
- 7) Workman RD, Bornmann RC：Decompression theory：American practice. In：Bennett PB &



- Elliott DH eds. The physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work. London: Baillière Tindall, 1975; 307-330
- 8) Thalmann ED, Buckingham IP, Spaur WH: Testing of Decompression Algorithms for Use in the U.S. Navy Underwater Decompression Computer; Phase I. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 11-80. 1980
  - 9) Des Granges M: Standard Air Decompression Table. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 5-57. 1956
  - 10) Workman RD: Calculation of Air Saturation Decompression Tables. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 11-57. 1957
  - 11) U.S. Navy Diving Manual, Volume 1 (Air Diving) Revision 3. Flagstaff AZ: Best Publishing Co, 1993
  - 12) Thalmann ED: USN experience in decompression table validation. In: Shreiner HR & Hamilton RW eds. Validation of Decompression Tables. Bethesda MD: Undersea Hyperbaric Medical Society, 1989; 33-44