

● 総 説

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

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
III：The concept of M value and the limit of the
classic theory**

*Tomosumi Ikeda

*Division of Environmental Medicine, National
Defence Medical College Research Institute**Keywords：**decompression theory
decompression sickness
diving medicine**承 前**

前稿¹⁾²⁾において標準減圧表の制定過程を記したが、本稿では引き続いて減圧表の作成に大きな改革をもたらしたM値の概念について記すとともに、古典的減圧理論の限界等について簡単に述べることにする。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。

M 値

M値とは最大許容圧力の maximum からとったもので、それぞれの半減時間の組織がそれぞれの減圧点で減圧症に罹患しないで滞在できる不活性ガスの最大の許容圧力のことを示すわけだが、この概念が導入されるに至った経緯を示しておこ

う。

前稿で示したように、減圧症に罹患しない不活性ガスの許容値は許容比のほかに許容圧力として表すことも可能である。当初は許容比を用いていたのであるが、この場合、例えば減圧表の修正をしようとする、計算の最初からやり直さなければならず、微調整が非常に煩雑である。また、減圧症が発症した場合に、減圧のどこに問題があったのかを分析するのも容易ではない。そのようなところから、既にバンデオーの報告書³⁾において許容圧力に言及されているが、ドワイヤーの報告書⁴⁾では、許容比よりも許容圧力が減圧計算の指標として用いられている。ここで注意しておくことは、前述のとおりドワイヤーの場合許容圧力が架空の状態を想定して制定されていることである。即ち、そこでは環境大気が100%窒素であると看做して窒素の許容絶対圧力を求めているのである。

しかし、当然このように不自然なことをする必然性はどこにもないわけで、ワークマンは実際の窒素分圧を用いて許容圧力、即ち許容分圧を示すこととした⁵⁾。したがって、ワークマン以前の報告書の許容圧力をワークマンのそれと比較する場合は、その値に大気中の窒素の割合であるところの0.79を乗じなければならない。M値の単位は絶対圧力で示したところのフィート、即ち feet of sea water absolute、略して fswa である。

表1は先に示した基本となるドワイヤーの10乗式から求めた許容分圧即ちM値表で、この表を用いて減圧計算を行うと、ほぼ現行の米海軍標準減圧表がもたらされる。計算の実例は別稿⁶⁾に示し

*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 M値表1

組織の 半減時 間(分)	ゲージ深度(ft)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
5	104	126	150	174	195	220	242	263
10	88	107	128	148	167	189	208	228
20	72	90	106	124	141	158	174	192
40	58	72	87	99	113	128	141	156
80	52	65	78	90	103	115	128	142
120	51	64	76	88	101	114	126	140

ておいたので、参照されたい。

なお、M値表の原典ではそのゲージ深度からさらに10ft浅い深度まで減圧症に罹患することなく浮上できるM値を示しているのに対し、ここで示すM値表では、各ゲージ深度で減圧症に罹患することなく安全に滞在できるためのM値を示している。つまり、この表のゲージ深度は原典とは10ftずつずれていることに留意されたい。

ところが、同じ窒素を対象にしたM値表にもう一つのM値表があり、混乱する場合があるので、そちらの表についても記しておく（ヘリウムを対象としたM値表もあるが、本稿からは割愛する）。なお、先に示したM値表をM値表1、これから述べるM値表をM値表2とする。

M値表1をみると、M値が減圧点の深度が増すに従って大きくなっていることがわかる。そこで、ワークマンはこのM値を単純に深度の一次関数、つまり、

$$M = M_0 + a \times D$$

として表すことができなかつたか考えたわけである（ M_0 は水面での各半減時間組織のM値、 a は定数、 D はフィートで表した減圧点のゲージ深度をそれぞれ示す）。

但し、ここでも減圧計算に当たっての原則、つまり数値を人為的に操作する場合、潜水員にとって安全な方向に実施する、という原則が適用される。具体的には、各減圧点におけるM値がM値表1における値より大きくなってはならないということである。それをほぼ満足させる定数として表2に示す値が用いられ、それによって求められたM値表2は表3に示すとおりである。

これをみると、M値表2に示すM値のうちの大

多数がM値表1のM値よりも小さくなっており、M値表2の方がより安全サイドに立っていることがわかる。

なお、非常に混乱することであるが、代表的な潜水医学のテキスト⁷⁾⁸⁾に記載されているM値はこのM値表2によるものであり、その一方、現行の標準減圧表の制定は基本的にはあくまでM値表1に示すM値に基づいて行われていることを、理解していなければならない。

その他に公にされているM値表として、米国の海洋気象局が空気乃至窒素酸素飽和潜水の減圧のために半減時間の長い組織についてより深い減圧点からのM値を示した表がある⁹⁾。この表では先に述べたM値表よりもより慎重な数値、言い換えればより小さい数値を用いて表が制定されているが、その成立の過程が審らかでないので、言及するに止めておく。

このM値の概念は現在でも減圧表を制定するに当たって広く用いられている。減圧表の改訂を行う場合、M値表（これをマトリックスともいう）を微調整して減圧計算を行うのだが、しかし、これにも限界があることを知っていなければならない。例えば、長時間の潜水を扱おうとすると、当然長い半減時間を想定しなければならないのだが、その場合M値を僅か1fsw変化させるだけで、減圧プロファイルは大きく変わってくる。従って、長時間の潜水にこの方法をそのまま適用することは困難である¹⁰⁾。

古典的減圧理論の限界

以上、古典的減圧理論に基づく減圧表の制定過程について記してきたが、これには様々な限界が

表2 M値表算出のための定数

半減時間(分)	M ₀	a	M
5	104	1.8	104 + (1.8 × D)
10	88	1.6	88 + (1.6 × D)
20	72	1.5	72 + (1.5 × D)
40	56	1.4	56 + (1.4 × D)
80	54	1.3	54 + (1.3 × D)
120	52	1.2	52 + (1.2 × D)

表3 M値表2

組織の 半減時 間(分)	ゲージ深度(ft)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
5	104	122	140	158	176	194	212	230
10	88	104	120	136	152	168	184	200
20	72	87	102	117	132	147	162	177
40	56	70	84	98	112	126	140	154
80	54	67	80	93	106	119	132	145
120	52	64	76	88	100	112	124	136

あることも事実である。それらは、まず第一に減圧理論そのものが孕んでいる問題、第二に生体の側の問題、第三に減圧表そのものの位置づけから来る問題として分けることができる。

前稿¹⁾で記したように、古典的減圧理論はガスの動態を単純化した様々な仮定の上に成り立っているが、それらの中で最も大きなものは、ガスの取り込みと排出を同一の過程とみなしていることである。しかし現在ではガスの排出は取り込みに比較してかなり緩徐であることが明らかとなっているので¹¹⁾、特に繰り返し潜水にこの理論をそのまま用いることには慎重でなければならない。また、2種類以上の不活性ガスをを用いた場合の限界もわきまえておかなければならない^{12)~14)}。例えば、窒素とヘリウムを混合した潜水を考えた場合、ガス組成に従って半減時間やM値を設定していることが多いが、それが実態に沿っているか否か確実に検証されているわけではないのである。さらに先に記したように、減圧時間が長くなる潜水の場合、許容値を1フィート変動するだけで、減圧スケジュールが大きく変わってくるという問題点も有している。

生体の側からみれば、まず放射性同位元素を用

いた検討によって生体内のガスの分布が理論からはかなり離れていることが実証されていることが挙げられる¹⁵⁾¹⁶⁾。また、潜水や減圧中の運動量あるいは温度等によってもガスの動態は大きく影響されるが、これらを数量的に評価して減圧表の制定に反映させることは至難である。あるいはまたもっと基本的な問題として、減圧症の発症機序としての気泡に関する評価がある。果たして気泡の出現は減圧ストレスの大小と一定の関係にあるのか、出現した気泡と減圧症の発症はストレートに関連するものか否か、等々である¹⁷⁾。そして、それらの究極の問題として固体の感受性がある。減圧症に罹患しやすい者とそうでない者がいることは明らかであるが¹⁸⁾¹⁹⁾、これらをどのように評価し取り入れるか、次の減圧表そのものに対する考え方と関連して取り組んでいかなければならない。また、忘れてはならないのが、他の多くの分野でも近年とみに問題となっている長期的観点からの健康評価である²⁰⁾。これまでの減圧表の開発は急性の減圧症を予防することに主眼を置いてなされてきたが、それで充分なのか否か今後の課題である。

第三の減圧表の本質からみた問題というのは、

端的に言って“安全な減圧表”という概念が成り立つのかということである¹⁷⁾²¹⁾。減圧症に罹患しないためには減圧時間を長くすればよいが、それが長すぎる場合、減圧時間の短い減圧表の方が減圧症に罹患する危険性が高いにも拘わらず結局より多く使われるようになってしまう。したがって求めるべきは安全よりも“信頼性のある減圧表”であろうが、問題はどこに信頼性の基準を置くかである。そして結局それは経済的社会的な意味あいも含めた“考え方”の問題にまで還元されてくるのである。

また、減圧症のように発生頻度が小さい事象を扱う場合、特に減圧時間が長時間にわたる潜水になってくると、統計学的に信頼性のある検討を実施することが極めて困難になってくることも認識していなければならない²²⁾²³⁾。

結 語

以上、ホールデー教授の所謂古典的減圧理論に基づいて、現行の米海軍標準減圧表がどのようにして改善修正されていったかを詳述した。ここに示したとおり、標準減圧表の制定過程においては多くの単純化された仮定と恣意的とも言える処理が折り込まれているが、それでもなおこの減圧表は他の多くの減圧表の基準として世界中で最も広く用いられているのが実状である。そこで、結語に於いて標準減圧表の特徴を示しておくことにする。この減圧表のうち、滞底時間が短く深い潜水は減圧症に罹患する可能性が小さい。特に標準減圧表の一部として位置づけられる無減圧表の深い部分は信頼性が高く²⁴⁾、他の機関による減圧表の改善に当たっても殆ど変更を加えられないことが多い。逆に、例外曝露のように滞底時間が長かつ深い潜水では減圧症に罹患する可能性が極めて高いので注意しなければならない¹⁸⁾²⁵⁾。また浅い潜水でも滞底時間が長期になれば減圧症に罹患する可能性が高くなる²⁶⁾²⁷⁾。

最後に標準減圧表の開発に当たった米海軍の動きについて触れておこう。先に記したように、生体内でのガスの動態も古典的減圧理論の示すものとは大きく異なることが現在では明らかになっており、古典的減圧理論のような演繹的な方法による減圧表の制定には自ずから限界がある。そこで米海軍ではこれまでの考えを一変して、膨大な実

験データ及び潜水記録から帰納的に減圧表を制定することにし、現在も精力的に取り組んでいるもようであるが、1993年に改正された潜水教範でも未だ明らかにはされていない。そこで用いられる統計法は maximum likelihood method (最尤法)と言われるもので²⁸⁾²⁹⁾、それぞれの減圧スケジュールにおいて減圧症に罹患する可能性 (likelihood) を明らかにしたものであるが、その場合の減圧時間は飛躍的に長くなるものと予想される。

古典的減圧理論及びそれに基づく減圧表はこのように多くの問題を含むが、それでもこの理論が具体的に理解しやすかつコンピュータ処理しやすいため、今後とも本法による減圧表の改善ないし応用が様々な規模の潜水作業において実施されていくものと思う。その際、古典的減圧理論にはここに記したような問題があることを認識するのに拙稿が役立てば幸甚である。

謝 辞

当方の愚問とも言える質問に対して丁寧にお答えしていただき、かつ必要とする資料をお送りいただいた米海軍の E.T. Flynn 大佐 (退役) 及び E.D. Thalmann 大佐、さらに有意義なディスカッションをいただいた海上自衛隊潜水医学実験隊の橋本昭夫博士に衷心より深謝する。また、資料の整理にご助力いただいた防衛医学研究センターの尾立貴史 3 等陸佐にも謝意を表する。

〔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) 池田知純：古典的減圧理論の展開 II：米海軍標準空気減圧表の制定。日本高気圧環境医学会雑誌，31(4)：229-237，1996
- 3) 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
- 4) Dwyer JV: Calculation of Repetitive Diving Decompression Tables. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 1-57. 1956
- 5) Workman RD: Calculation of Decompression schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-

- Oxygen Dives. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 6-65. 1965
- 6) 池田知純：古典的減圧理論による減圧計算の実例。防衛衛生, 43: 391-395, 1996
 - 7) Hempleman HV: Decompression theory. In: Shilling CW, Carlston CB, Mathias RA eds. The Physician's Guide to Diving Medicine. New York: Plenum Press, 1984; 223-272
 - 8) Hempleman HV: History of evolution of decompression procedures. In: Bennett PB & Elliott DH eds; The Physiology and Medicine of Diving, 4th ed. London: W. B. Saunders Co, 1993; 343-375
 - 9) Miller JW (ed): Vertical Excursions Breathing Air from Nitrogen-Oxygen or Air Saturation Exposures. Washington DC: U. S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976
 - 10) 池田知純：海上自衛隊で実施した空気及び窒素酸素飽和潜水。日本高気圧環境医学雑誌。印刷中
 - 11) D'Aoust BG, Smith KH, Swanson HT: Decompression-induced decrease in nitrogen elimination rate in awake dogs. J Appl Physiol 41: 348-355, 1976
 - 12) Webster AP: Some theoretical aspects of the use of multiple-gas mixtures for deep-sea diving. In: Proceedings of the Underwater Physiology Symposium. Washington DC: National Academy of Sciences - National Research Council, 1955; 79-83
 - 13) Keller H: Use of multiple inert gas mixtures in deep diving. In: Lambertsen CJ ed. Underwater Physiology Proceedings of the Third Symposium on Underwater Physiology. Baltimore; The Williams & Wilkins Co, 1967; 267-274
 - 14) Berghage TE, Donelson VI C, Gomez JA: Decompression advantages of trimix. Undersea Biomed Res 5: 233-242, 1978
 - 15) Weathersby PK, Barnard EEP, Homer LD, Mendenhall KG: Stochastic description of inert gas exchange. J Appl Physiol 47: 1263-1269, 1979
 - 16) Weathersby PK, Mendenhall KG, Barnard EEP, Homer LD, Survanshi S, Vieras F: Distribution of xenon gas exchange rates in dogs. J Appl Physiol 50: 1325-1336, 1981
 - 17) 池田知純：減圧。In: 潜水医学入門。東京：大修館書店, 1995: 106-114 & 264-266
 - 18) Workman RD: Calculation of Air Saturation Decompression Tables. US Navy Experimental Diving Unit Research Report 11-57. 1957
 - 19) Golding FC, Griffiths PD, Paton WDM, Walder DN, Hempleman HV: Decompression sickness during construction of the Dartford Tunnel. Br J Ind 17: 167-180, 1960
 - 20) Elliott DH & Moon RE: Long-term health effects of diving. In: Bennett PB & Elliott DH eds. The Physiology and Medicine of Diving, 4th ed. London: W. B. Saunders Co, 1993; 585-604
 - 21) Hamilton Jr RD: Fundamental principles involved in the development of decompression tables. In: Nashimoto I & Lanphier EH eds. Decompression in Surface-Based Diving. Bethesda MD: Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1987; 59-63
 - 22) Berghage TE, Woolley JM, Keating LJ: The probabilistic nature of decompression sickness. Undersea Biomed Res 1: 189-196, 1974
 - 23) Homer LD & Weathersby PK: Statistical aspects of the design and testing of decompression tables. Undersea Biomed Res 12: 239-249, 1985
 - 24) Hempleman HV: Existing decompression tables: Experience and comparisons. In: Nashimoto I & Lanphier EH eds. Decompression in Surface-Based Diving. Bethesda MD: Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1987; 2-6
 - 25) 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
 - 26) Berghage TE & Durman D: U.S. Navy Air Decompression Schedule Risk Analysis. NMRI Report 80-1. Bethesda MD: Naval Medical Research Institute, 1980
 - 27) Ikeda T, Okamoto Y, Hashimoto A: Bubble formation and decompression sickness on direct ascent from shallow air saturation diving. Aviat Space Environ Med 64: 121-125, 1993
 - 28) Weathersby PK, Homer LD, Flynn ET: On the likelihood of decompression sickness. J Appl Physiol 57: 815-825, 1984
 - 29) Weathersby PK, Hays JR, Survanshi SS, Homer LD, Hart BL, Flynn ET, Bradley ME: Statistically Based Decompression Tables. II. Equal Risk Air Diving Decompression Schedules. Naval Medical Research Institute Technical Report 85-17. Bethesda MD: Naval Medical Research Institute, 1985