

【ミニシンポジウム2】

減圧表のあり方

池田知純

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

キーワード 減圧症, 減圧障害, 潜水, 潜水医学

What Decompression Tables Should Be?

Tomosumi Ikeda

National Defense Medical College Research Institute
Division of Environmental Medicine

keywords decompression sickness, decompression illness, diving, diving medicine

緒言

このほど、おそらく我が国で初めての減圧表に関する学術的な公開討論会がミニシンポジウム「日本の減圧問題を考える」と題して第39回日本高気圧環境医学会総会に於て実施された。そこで、筆者の担当分であった減圧表のあり方全般に関する考えを以下に記す。ただし、より広い視野から見た潜水における減圧表のあり方、すなわちヘリウム酸素潜水などのいわゆる混合ガス潜水における減圧表、あるいは減圧に密接に関係してくる酸素の取り扱い等については特には触れないことにし、今回は空気潜水の減圧表に焦点を絞って考察していくこととする。

減圧表とは

減圧症は潜水員が浮上減圧するにもなって窒素等の生理的不活性ガス(以下不活性ガス)が生体内で過飽和状態になり、気泡が形成されることによって生じる疾患である。したがって、減圧症に罹患しないためには過飽和の程度をある一定の限度内に抑えながら浮上しなければならない。そして、減圧症に罹患する頻度が許容限度内にあるように浮上速度を定めたものが減圧表である。

実用に足る減圧表は20世紀初頭にイギリスのハルデンによって開発されて以来¹⁾、多くのものが考案され使用されてきているが、その特徴は次のようなものである²⁾。その第一は、減圧表はあくまで潜るための手段であるということだ。つまり減圧表の制定は潜る現場の声と減圧表のベースとなる理論との間で揺れ動いてきたわけで、減圧表は一種の妥協の産物と言ってもよい。別の角度から見れば、潜るという行為が基本的に営利を目的とし、また許容できる減圧症への罹患頻度はそのときの社会の通念によることから、減圧表はその当時の経済的社会的状況に左右され、決して純粹の理論的産物ではないと言うことである。総じて時代が下るに連れて減圧時間が長くなり、減圧症に罹患する頻度の低い保守的な減圧スケジュールに移行している。

次に、これに関連して、減圧症に罹患する可能性のない減圧表は存在し得ない、ということが挙げられる。なぜならば、その減圧表を用いて減圧症に罹患する可能性がないとしたら、もっと減圧時間の短い減圧表があるはずで、企業はそちらの減圧表を採用するからである。これを言い換えれば、絶対に安全な減圧表という概念は存在しないことになる。

また、多くの減圧表において、減圧時間が長くなって

安全性が増加すると見込まれる一種恣意的な処理が減圧スケジュールを制定する際になされていることも知っておいた方がよい。これは安全要素、英語では safety factor あるいは Jesus factor と呼ばれるもので、表にはほとんど出てこない。

よくある質問に、減圧表は一世紀も前に制定されているのに、なぜ今なお減圧表の制定が問題なのか、というのがある³⁾。これにはおよそ次の三つの側面から答えることができる。一つは、当初減圧表を策定した時代には想定していなかったような深く長時間にわたる潜水が実際になされるようになってきたことである。二番目は、潜水員の健康状態により慎重な配慮がなされるようになってきたことが挙げられる。減圧表を制定した当時は問題にならなかった程度の減圧症が現在では許容されなくなっている。三番目に、次項に記すように、減圧表制定のもととなるいわゆる減圧理論が変化していることも減圧表が見直されてきている大きな要因である。

減圧理論

減圧プロフィールないし圧曝露と減圧症発症の間の関係を扱うのがいわゆる減圧理論であるが、その内容は複雑を極めていいる。ざっと見ただけで、不活性ガスの生体内外への取り込みと排出、過飽和圧力と気泡形成、気泡形成と減圧症の発症の関わり等が理論の主要な部分を占め、そのいずれも的確に把握するためには高度の数学的能力を要する。したがって、その詳細を具体的に述べることは筆者の手に余り紙幅の余裕もないが、減圧表のあり方を知るためには避けて通れない課題であるので、ごく簡単にその概念を記しておく。理論そのものに関する邦文としては、初歩的なものではあるが別稿にその一部を記しているので要すれば参照されたい^{4)~12)}。

減圧理論には大きく分けて、減圧モデルから減圧表を求める演繹的方法と、減圧した結果から減圧表を求める帰納的ないし確率論的取り組みの二つがある。

演繹的方法には、不活性ガスが血液の灌流によって移動するとする灌流モデル^{1),13)}と拡散によって移動す

るとする拡散モデル^{11),14),15)}がある。また、生体内の不活性ガスの量を把握する方法として、不活性ガスの分圧を指標とするものと容積を指標とするものがある。さらに、生体内の液相の不活性ガスのみならず気泡を問題とする捉え方もある。あるいはまた、発症に関与する生体組織として、組織をひとつのものとして取り扱うものと複数の組織を想定する取り組みとがある。このように演繹的方法にも多種の取り組みがあるが、言及されることの多い現在の米海軍減圧表は不活性ガス分圧を指標とした多組織灌流モデルである。一部の減圧コンピュータに採用されているウインケのモデルは気泡の存在を考慮している¹⁶⁾。

一方、帰納的方法は、減圧症の発症には不活性ガスのみならず生体の側の多くの要因も関与し演繹的アプローチには限界があるところから、実際の減圧の結果から減圧表を求めようとするものである。これは信頼性のある減圧結果が蓄積されている米英海軍及びカナダが中心となって提唱されたもので^{17)~19)}、その背景には飛躍的に向上したコンピュータ能力がある。

なお、減圧表の作成に当たっては理論だけでは不十分で、どうしても人が実際に潜った結果からその妥当性を評価する必要がある。なぜなら、減圧症への感受性が人と動物とで異なるために、動物によって代替することが出来ないからだ。また軽微な減圧症は痛み等の自覚症状だけを訴えることが多いのも動物実験では減圧表の評価を行いにくい要因の一つである。

本邦の減圧表

我が国における高圧下作業の歴史について詳しい石井通夫によると²⁰⁾、20世紀初頭から高圧下作業は実施されていたものの、最初に法令として減圧要領が定められたのは昭和12年(1937年)のことで、関門海底隧道の工事に使用されている。その10年後の昭和22年(1947年)に労働省令として全面改定されているが、この減圧表は減圧症の予防の見地からすると不十分なものであったらしい。そこで、昭和36年(1961年)に現在も使用されている減圧表が高気圧障害防止規則として制定されたのである。なお、帝国海軍においても減圧

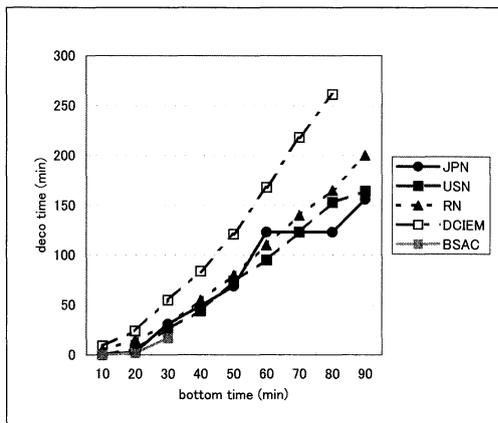


図1 深度40mの潜水における滞底時間と減圧時間

図中、JPNは別表第2、USNは米海軍標準減圧表²²⁾、RNは英海軍減圧表²³⁾、DCIEMはカナダのDCIEM減圧表²⁴⁾、BSACはBritish Sub Aqua Clubの減圧表²⁵⁾を示す。またここで示す減圧時間は基本的に減圧停止深度での停止時間のみを含み、減圧停止深度間の上昇時間は含まない。図2も同様

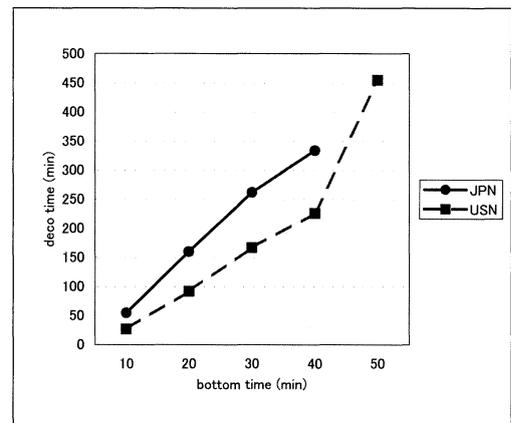


図2 深度90mの潜水における滞底時間と減圧時間

表が示されているが²¹⁾、その出自は明瞭には示されていない。

このように、現行の減圧表は昭和36年(1961年)の労働省令第5号における高気圧障害防止規則として制定されているが、昭和47年(1972年)労働基準法から労働安全衛生法が分離したために、労働省令第40号による規則としてあらたに公布されることとなった。さらに昭和52年(1977年)労働安全衛生規則の改定に伴い高気圧作業安全衛生規則と改題され、その後国際単位(SI)への移行を実施して現在に至っている。

減圧表そのものは高気圧作業安全衛生規則の中の別表第1～第3として示されている。このうち、別表第2が潜水用の減圧表で、別表第1は圧気土木作業等いわゆる潜函工事に用いる減圧表であり、圧曝露の様相がかなり異なっている。別表第3は減圧表と言うよりも、繰り返し潜水のための計算用ノモグラフである。

別表第2の特徴としては、図1に示すように、滞底時間の増加に対して減圧時間がなだらかに増加するのではなく急激な変化を示すこと、一部の圧曝露に於て米海軍標準減圧表よりも減圧時間が短いこと(逆の箇所も多い)、深度90mまでの空気潜水用減圧表が設定されていること(図2)、などが挙げられる。

さて、その別表第2の根拠となる理論についてみる

と、具体的な記述に乏しく容易には理解しがたいところが多い。たとえば、おそらく過飽和比のようなものに該当するであろう“体内ガス圧係数”にしても、その時間的推移を示すグラフはあるものの、グラフを導く数式そのものは明瞭には示されていない。したがって、その値が生体全体を表しているのか、あるいは生体の一部の組織を指標としているのか、判然としない。ということは採用している減圧モデルそのものについても確証が持てないことになる。

わずかに残る資料によると、過飽和の許容比を1.7、半減時間を120分として計算した可能性があるが^{26),27)}、別表1はともかく、別表2はこの方法では求められない。減圧スケジュールそのものはフランスの減圧表に酷似するが²⁸⁾、詳細は不明である。さらに、別表3に関してはどのようにしてこのノモグラフを導いたかは現段階では不明である。

また、高気圧作業安全衛生規則で用いられている用語及び概念も世界で流通している減圧表とはかけ離れている点が多い。“業務間ガス圧減少時間”や“業務終了後ガス圧減少時間”は、欧米では全く馴染みのない概念である。“体内ガス圧係数”という用語も不自然に感じられる。“係数”とするよりも、むしろ“比”とした方が理解しやすいのではなからうか。さらに細かいこ

とではあるが、“bottom time”と呼ばれるところの潜降を開始してから浮上を開始するまでの時間は減圧スケジュールを求めるのにもっとも重要な要素で、欧米で広く用いられているのに対し、我が国では“潜水時間”という用語でこれを表すことにしている。その一方で“bottom time”によく似た“在底時間”という言葉も、海底に着いてから浮上を開始するまで、という通常は減圧スケジュールを求めるとして用いている。なお、本稿では“bottom time”を“滞底時間”という言葉で表すことにする。

以上が我が国の減圧表の特徴であるが、かなり特異的な減圧表であることが理解していただけたらと思う。一読して推測できるように、そこには多くの問題が横たわっているのが実状である。そこで、以下簡単に問題点に触れることにする。

まず第一に、あまりに当然なこととは言え、基本となる理論が明らかにされていないことが挙げられる。

二番目に、この減圧表が制定されてから40年以上経過するのに、その間信頼できる評価がなされてこなかった点が挙げられる。先に記したように、その減圧表によって減圧した場合にどの程度の頻度で減圧症に罹患するかは、人が実際に潜ってみないとわからない。そうすると、この一種強制力のある減圧表がその特性も危険性もわからずに半世紀近くも通用していたことになり、奇異の念にかられる。

ではなぜ信頼性の定かでない公的減圧表が長期間検証もされずに、あるいは問題とならずに続いてきたのだろうか。さまざまな理由が考えられるが、その一つとして問題が存在すること自体が明らかにされなかったことが挙げられる。具体的には、軽微な減圧症は報告されなかった、あるいは実際は減圧時間の長い減圧表を使っていたにも拘わらず別表第2を使用して潜ることにしていた、などの可能性があり、これらは巷間さやかかれていたことではあるものの、公の形で明らかにされることはなかった。しかしながら、先に筆者が潜水会社にてアンケート調査した結果では、あきらかにこの傾向が示されていた^{29), 30)}。

三番目の問題として、上と関連することではあるが、使用者からの信頼性が非常に乏しいことが挙げられる。これはアンケート調査で減圧表が信頼できる、と答えた者の割合が2%に過ぎなかったことから、容易に裏付けられる。

四番目に、深度90m滞底時間40分にも及ぶ空気潜水の減圧表が何らの注意喚起もなく公にされていることも問題である。半世紀前ならともかく今やこのような減圧表は稀有の存在である。誤解されがちなのは、米海軍の減圧表については、別表第2以上の圧曝露の潜水に対する減圧表がたしかに存在していて、しかもその減圧時間が図2に示すように別表2よりも短いことから、別表第2ではそれなりに安全サイドに配慮されていると思われることだ。しかしながら、大きな違いは、米海軍減圧表をその圧曝露に使用することの危険性については周知徹底されていることで、それをそのまま使う者は少ない。それに引き替え、我が国では深度90mまでの公的減圧表が存在し、過去にはその減圧表を用いて深い潜水を実施した実績もあることから、いまなお別表第2を用いて潜ればいいではないかという考えの人が特に使用者側に少なくないと仄聞する。

望ましい姿

以上述べたことから、別表第2による減圧表には多くの問題があり、およそ現代の減圧表としては相応しくないことが理解できると思う。したがって、減圧表の抜本的改正が必須であることは自明であるものの、問題は、ではどのような減圧表であればよいかである。

簡単に言ってしまうと、すべての圧曝露に対して減圧症に罹患する割合が一定の減圧表がもっとも望ましい。そして、目標とする罹患率はその社会が妥当と考える値に合わせればよいのである。これはしかし、先に記したように減圧症の発症に関与する複雑な要素を考えた場合、ほとんど不可能に思えるが、その試みがないではない。それは前述の米海軍による帰納的取り組みである^{17)~19)}。理論的には恣意性を極力排し、しかも罹患率ごとの減圧プロファイルが導き出されるので、もっとも理想的なアプローチの筈であるが、導き出され

た減圧時間が米海軍の標準減圧表よりも1.5倍から2倍も長いことから現場サイドからの反対意見が相次ぎ、頓挫しているのが現実の姿である。ことほど左様に減圧表の制定は一筋縄では行かないわけで、このような事情を踏まえて、正解か否か保証の限りではないが、留意しておくべき点を敢えて記しておこう。

まず、基礎となる理論が明瞭でなければならない。理論は必ずしも最新のものであったり複雑高度なものであったりする必要はないが、荒唐無稽なものは論外で、少なくとも現在の水準で第三者による検証が可能でなければならない。その意味で、必要な情報はしっかりと開示されるべきである。ただし、誤解してはならないのが、特にヘリウム酸素ガス等を用いたいわゆる混合ガス潜水の場合、今なお減圧表自体が知的財産と見なされる場合があることで、ここではそのような減圧表まで情報を開示すべきと言っているのではない。あくまで、公的な減圧表等、基本となる減圧表に関してである。

そこで、どうにも気になるのが彼我の研究水準の差である。いくら最新の理論である必要はないと言っても、筆者も含めて我が国のレベルはハルデンやワークマンの所謂古典的減圧理論からほとんど抜け出しておらず、その差は歴然たるものがある。しかも、欧米では実際の減圧結果から減圧プロファイルが修正されているのに対し、我が国ではその種の蓄積は皆無で、たとえ独自に減圧表を作成しても、独善的なものに終わる可能性が高い。そのような所からすると、すでに定評のある外国の減圧表を導入するのも一つの現実的な対応かも知れない。

なお、先に触れたように、減圧表の評価は人が実際に潜ってみないとわからないことから、どのような減圧表を採用するにせよ、少なくとも当初は減圧結果からその減圧表を評価する態勢がある程度備わっていることが望ましい。その際、統計学的検討が必要になってくると思われるが、是非、現在の水準にふさわしい規模で調査を実施すべきであろう³¹⁾。そして、もしその減圧表に従うことによって許容頻度以上の減圧症患者が発生したならば、あるいはまた長期的な健康管理の観点

から当初は予想していなかったような不具合を認めたら、減圧表をより安全サイドに修正する柔軟性を持って欲しい。別表第2のように、何の検証もされないまま不十分な減圧表が40年も存在するというのは醜悪である。

最後に、減圧表の原点に帰って一つのことを述べておきたい。それは、減圧表は高圧下の潜水という健康上は決して好ましくない作業を行いながらも、それに伴う悪影響を許容限度内にとどめるための手段であると言うことだ。もしこの減圧表に何らかの強制力があるのなら、それを潜水員を保護する方向に使えるようにしたい。具体的には、減圧時間を理不尽に短縮することによって潜水コストを抑えることのないよう、その減圧表が許容最短減圧時間を示すものであってほしい。ところが、現状は、とうてい現在の考えでは受け容れがたい短時間の減圧時間が別表第2に示されているがために、却ってその短い減圧時間で潜水計画を立てざるを得なくなり、潜水員の健康が保証されないと言う、減圧表の本来の趣旨とは正反対の結果に終わっている可能性がある。改定された減圧表ではこの様なことのないよう、充分心がけて欲しい。

結語

問題点の多い我が国の減圧表について概観し、減圧表のあるべき姿を述べた。拙稿が減圧表の改訂の参考になれば、そして、21世紀とは思えない労働環境の中で潜っている人々の作業状況の改善に資することができれば、無上の幸いである。

文献

1. Boycott AE, Damant GCC & Haldane JS : The prevention of compressed-air illness. J Hygiene 8 :342-443, 1908
2. 池田知純：潜水の世界—人はどこまで潜れるか。東京；大修館書店。2002
3. Schreiner, H.R. and Hamilton, R.W. (eds) : Validation of Decompression Tables. Bethesda MD ; Undersea and Hyperbaric

- Medical Society, 1989
4. 池田知純：潜水医学入門—安全に潜るために. 東京;大修館書店. 1995
 5. 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
 6. 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. 31：181-187, 1996
 7. 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. 31:229-237, 1996
 8. 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. 32:101-105, 1997
 9. 池田知純：減圧をめぐる諸問題. 防衛医科大学学校雑誌. 23:149-162, 1998
 10. 池田知純：減圧と減圧症. 日本高気圧環境医学会雑誌. 35:197-203, 2000
 11. 池田知純, 芦田廣：単一組織拡散モデルによる減圧理論の展開. 日本高気圧環境医学会雑誌. 35：131-146, 2000
 12. 池田知純：減圧表の制定. 日本高気圧環境医学会雑誌. 39: 1-6, 2004
 13. Workman RD, Bornmann RC：Decompression theory：American practice. In：Bennett PB & Elliott DH, ed., The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work, 2nd Ed. London；Baillière Tindall, pp. 307-330, 1975
 14. Hempleman HV：Decompression theory：British practice. In：Bennett PB & Elliott DH, ed. The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work, 2nd Ed. London；Baillière Tindall, pp. 331-347, 1975
 15. Ashida H, Ikeda T, Tikuisis T, Nishi RY. Relation between two different functions derived from diffusion-based decompression theory. Undersea Hyperbaric Med, in press.
 16. Wienke, B. R.：Basic Decompression Theory and Application. Flagstaff AZ；Best Publishing Co., 1991
 17. Weathersby PK, Homer LD & Flynn ET：On the likelihood of decompression sickness. J Appl Physiol 57:815-825, 1984
 18. Weathersby PK, Hays JR, Survanshi SS, Homer LD, Hart BL, Nishi RY, Flynn ET & Bladley ME：Statistically Based Decompression Tables. I. Analysis of Standard Air Dives：1950-1970. NMRI Report 85-16. Bethesda MD；Naval Medical Research Institute, 1985
 19. Weathersby PK, Hays JR, Survanshi SS, Homer LD, Hart BL, Flynn ET & Bladley ME：Statistically Based Decompression Tables. II. Equal Risk Air Diving Decompression Schedules. NMRI Report 85-17. Bethesda MD；Naval Medical Research Institute, 1985
 20. 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. 40:25-35, 2005
 21. 海軍省：潜水用減圧標準表. In：潜水教範. 1927.
 22. Des Granges M：Standard Air Decompression Tables. U. S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 5-57. Washington DC；Experimental Diving Unit, 1956
 23. BR 2806. Diving Manual. London；Ministry of Defence, Director of Naval Warfare, 1972.
 24. Nishi RY, Lauckner GR：Development of the DCIEM 1983 Decompression Model for Compressed Air Diving. DCIEM 84-R-44. Ontario；Defence and Civil Institute of Environmental Medicine. 1984
 25. The BSAC '88 Decompression Tables；Sea Level. London；British Sub-Aqua Club, 1996
 26. 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一. 東京;工学出版. 1962
27. 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 Limited pp. 46-55, 1967
28. Tailliez P, Dumas F, Cousteau JY, Alinat J, Devilla F: La Plongée en Scaphandre. Paris; Éditions Elzévir, 1949
29. 池田知純: 我が国の現行減圧表に関するアンケート調査. 潜水 No. 60, pp. 16-20, 2004
30. 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. Tokyo; Jpn Society of Hyperbaric Medicine, in press.
31. Berghage TE, Woolley JM, Keating LJ: The probabilistic nature of decompression sickness. Undersea Biomed Res 1: 189-196, 1974