

【 教育講演 】

# 減圧表の制定

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, 減圧コンピュータ

Establishment of Decompression Tables

Tomosumi Ikeda

National Defense Medical College Research Institute  
Division of Environmental Medicine

keywords decompression sickness, decompression illness, diving, diving medicine, dive computer

## 緒言

減圧は潜水作業を行うに当たって避けて通れない過程である。許容できる速度以内で減圧を行わないと減圧症に罹患する可能性が高くなる。そして、許容減圧速度を示しているのが、本稿の主題である減圧表だ。

このように、減圧表は潜水にとって重要な意味を有しており、欧米では活発な意見交換がなされているが、本邦においては減圧表を正面から扱った論調は意外に少ない。その一方で減圧に関する知見は従来とは比較にならないほど進んでいる。

そこで、減圧表とはどういうものか、減圧表はどのようにして制定されてきたか、その問題点ないし限界は何か、今後の動向はどうか、等について簡単に記すことにする。

## 減圧表とは

減圧表とは上に示したように、減圧症に罹患する頻度が許容範囲内で減圧できる最大の減圧速度を示したものである。

減圧表の作成ないし制定には次の三つの要因がからむ。

一つは、減圧表作成の基礎となる理論である。すなわち、減圧症発症の原因となる窒素などの生理的不活

性ガス(以下、不活性ガスないし文意の明らかなときは単にガスとする)がどのように生体に取り込まれ、また排出されるかを、数学的に把握することである。単にこれまでの経験に基づいた理論的根拠の乏しい減圧表もないではないが、それでは変化に対応できず、発展性が少ない。

二番目は、現場からのフィードバックである。減圧表作成時に実施した高圧チャンバーなどでの減圧実験の結果と実海面での減圧結果とが大きく異なってくることは往々にしてあることで、減圧表が安心して使われるためには、実潜水からのフィードバックは必須である。

三番目は許容し得る減圧症への罹患率で、これはそのときの社会経済情勢や人の考え方によって変化してくる。現在では、より安全に、言葉を換えれば、より長い減圧時間を設定する傾向にある。

重要なことは、減圧表はあくまで潜るための手段であるということだ。

## 基本となる理論と減圧表

減圧表作成の理論は大きく次の二つに分けることが出来る。一つは、不活性ガスの動態から減圧症に罹患するか否かを考えるもので、演繹的アプローチと言え、もう一つは減圧結果から減圧症に罹患する確率を求め、

その確率のもとでの減圧表を作成しようとするもので、帰納的ないし確率論的アプローチとして位置づけられる。

演繹的アプローチはさらにいくつかの方法に分けることができる。もっともオーソドックスなものは、生体への不活性ガスの出入りは血流によって支配されるとするもので、謂わば灌流モデルとも言うことができる。これは20世紀初頭に英国のハルデー (J.S. Haldane) によって提唱された方法<sup>1)</sup>、実効のあった最初の科学的アプローチとされ、米英海軍の減圧表をはじめ多くの減圧表がこの考えに基づいて作成、現在に至るも使用されている<sup>2~8)</sup>。

灌流モデルによる減圧表はこのように20世紀の潜水界をある意味で席捲したわけだが、しかし仔細に検討してみると問題点も多い。たとえば、灌流モデルではガスの出入速度は同じとみなしているが、今ではガスの排出の方が遅いことが解っている。また、減圧症の症状を呈する部分は通常血流に乏しいところが多く、灌流モデルは必ずしも当てはまらない。

そのような所から現れてきたのが拡散モデルである<sup>9~11)</sup>。これはガスの出入がガスの拡散によってなされる、というもので、灌流モデルとは対蹠にある。この拡散モデルはイギリスのヘンブルマン (H.V. Hempleman) によって1950年代から提唱されてきたとおり、その成果はイギリスの潜函工事用の減圧表、いわゆるブラックプール減圧表などに現れている。

ところで、ヘンブルマンの拡散理論ももとをたどればハルデーと同時代のヒル (L.H. Hill) にまで行き着く<sup>11)</sup>。ハルデーの階段式減圧法と対照的に直線的にゆっくりと浮上する方法を提唱していたヒルはハルデーが脚光を浴びるにつれて引き立て役の立場に立たされてきたが、このように重要な点で減圧理論の発展に貢献していることを忘れてはならない。

カナダにおける減圧表は後述するDCIEM減圧表として知られてきたもので、基本的には灌流モデルを4個直列に並べたものである。しかし、結果的には拡散モデルに近い値がもたらされているとされる<sup>12,13)</sup>。

ところで、以上は生体内に溶け込んだガスのみを対象としてきたが、浮上減圧中に気泡が出現することはよ

くみられる。気泡があれば、ガスは当然その気泡の中にも存在するわけで、さらにそれらの気泡は肺毛細血管で濾過されて体外に排出される可能性が高い。そうすると、ガスの動態も大きく異なってくるはずであるが、この気泡の存在を前提とした数学的捉え方をするためには高度の数学的知識が要求される。現在では、次に挙げる帰納的ないし確率論的取り組みとともに、数学的能力に長けた研究者が減圧問題に参画するようになって、気泡を考慮した減圧表も提示されている<sup>14)</sup>。

話が前後するが、灌流モデルにおいてガスの排出時間を遅く設定したのが、米海軍のソールマン (E.D. Thalmann) によるいわゆるELモデルである<sup>15)</sup>。これはガスの取り込みは指数関数的 (exponential) に、排出は直線的 (linear) にされるとしたもので、米海軍における酸素分圧を一定にした再呼吸式スクーバ潜水の減圧に用いられている。ソールマンは当初パラメータを変えらることによってガスの排出時間を遅くしようとしたが、変更があまりにも恣意的になるために、気泡の存在を考慮した数式を取り上げ、ある一定の条件ではガス排出が時間に比例して直線的な変化を示し得ることから導き出したモデルである<sup>13,15)</sup>。

なお、現在に至るも最初に挙げた灌流モデルが生き残っているのは、灌流モデルが気泡モデルや拡散モデルと異なり、初歩的な数学能力で充分対応できる点が大きく関与しているように思える<sup>16,17)</sup>。

次に、演繹的取り組みとは対照的な確率論的ないし帰納的な取り組みに基づく減圧理論について記そう。確率論的取り組みが脚光を浴びてきたのは、一つにはガスの動態が上に挙げたモデルが示すように単純ではないことが認識されだしたことと、もう一つは、減圧症の発症に関与するのは、ガスの分圧あるいはガスの量だけでなく、ダイバーの側の因子も多くあることが認識されだしたからである。

それに精力的に取り組んだのはウェザズビ (P.K. Weathersby) をはじめとする米海軍である<sup>18~22)</sup>。彼らはまず放射性同位元素を用いた実験から、生体内のガスの変化を時定数及び重み (weight) の定数を変化させることによってせいぜい2個の指数関数の組み合わせ

で表せることを示した。ついで、生体内のガス分圧が環境圧力より大きい場合には減圧症に罹患し得る危険性(リスク)があるとし、そのリスクを時間で積分して得られた値が全体としての減圧症罹患率になるとしたのである。そして、そのリスクは生体内のガス動態のメカニズムとは無関係にガス分圧の時間的推移などを示す2~5個のパラメータを有する数式でもって表現することが出来るとしたわけだ。そのパラメータは実際の減圧実験結果ともっとも合致する値を求め、今度はそれぞれの数式(モデルと呼ぶことが多い)ごとにそのパラメータを用いてリスクを計算し、最尤法(maximum likelihood)を用いてもっとも実際の結果と近い尤度の高いモデルを選ぶ。ついで、減圧時間と減圧プロファイルの膨大な数字に昇る組み合わせごとに罹患率を求め、許容できる罹患率のうちでもっとも効率の良い、言い換えれば減圧時間の短い減圧方法を決定する。以上がその概要である。もっとも、実際には膨大な数の組み合わせを避けるために、減圧時間を10分ごととか減圧停止深度を10フィート(約3m)ごととかに制限して計算しているようだ。

このアプローチはたしかに不確実な要素が多い減圧を、現在の水準で納得のいく客観的な根拠に基づいて処理したはじめての科学的方法と言ってもよいものであるが、問題はその結果として導かれた減圧時間がこれまで用いられてきたものよりは飛躍的に長時間になることだ。恣意性の少ないもっとも客観的アプローチで得られた減圧表であれば、それを採用すればよいように思えるかもしれないが、そうは行かないのが現実である。現に、米海軍ではこの減圧スケジュールを採用することに強い抵抗があり、まだ新しい減圧表は制定されていない。

### 様々な減圧表

近年になっていろいろと問題点が指摘されているとは言え、米海軍減圧表はもっとも広く喧伝されており、今に至るも基本となる減圧表の地位を失っていない<sup>36~8)</sup>。その理由として、今まで長期間にわたって広く全世界で使用されてきたことの他に、減圧表の制定に

至る詳細な過程が広く公開され、多くの議論がなされてきたこともあるのではなかろうか。

これは後述する我が国の減圧表と著しい対照をなしている。米海軍減圧表の問題点としては一つに、深く長い潜水を行った場合の罹患率が大きいことが挙げられる。米海軍自身、およそ30m以深の潜水については相当に懐疑的で、現に「えひめ丸」の捜索潜水では、別途考案した減圧表を用いている。

英国では作業用の潜水の他に、British Sub Aqua ClubのいわゆるBSAC減圧表<sup>23)</sup>が主にレジャー潜水用にひろく使用されているが、非常に安全サイドにたった減圧表であり、潜水可能深度及び時間の制限も大きい。

カナダのDefence and Civil Institute of Environmental Medicine (現在は Defence Research and Development Canada)が作成したいわゆるDCIEM減圧表<sup>12)</sup>も広く使用され高い評価を受けているが、これもBSAC減圧表ほどではないにせよ、かなり保守的な安全サイドにたった減圧表である。

問題なのは我が国の減圧表である<sup>24)</sup>。作業として潜水を行う場合、高気圧作業安全衛生規則の別表2に示された減圧表に従って減圧するようにされているが、その別表2は昭和36年(1961年)に高気圧障害防止規則に定められたものと基本的に全く変わっておらず、減圧時間が他と比較してかなり短い。90mまでの空気潜水を想定していることも気になる<sup>25)</sup>。

その他にも様々な減圧表が国や指導団体などから出されているが、紙幅の関係上すべて割愛する。

### 減圧表の作成と評価

減圧表をどのように作成し制定してきたか大雑把に示すと、まず理論に基づいて減圧スケジュールを求め、それらの内の一部について実験潜水を実施し、さらにそれを実海面で使用することによって減圧表の妥当性を評価し、その減圧表が実用に耐え得るか否かを判断してきたわけだ。もっともその試行段階から減圧結果をフィードバックして減圧表を変化させていったというよりは、一旦減圧表を制定したのちに不具合が多いことが判明してから減圧表を改訂していったというのが実状

のようだ。

ところで、先に記したように、問題となっている減圧は深く滞底時間の長い潜水で、そのときの減圧時間は概して長時間になる。そうすると当然一回の減圧実験を実施するにも長時間を要するわけで、実施可能な実験潜水の回数は限られる。現に米海軍で以前に実施された実験では同一曝露の潜水に対し4回の実験しか実施していない<sup>26)</sup>。

しかし、詳細は別の機会に譲りたいが、4回の実験で減圧症に罹患するダイバーがいなかったと言うことは、減圧症の発症が2項分布に基づくとして厳密に考えると、次回の5回目に減圧症に罹患する確率は危険率5%で0~0.602、逆に発症しない確率は同じく0.398~1ということを示している。また別の例を示すと、40例中2例5%発症した場合も、厳密に確率計算をすると発症確率は危険率5%で0.006~0.17になる。

このようなところから、現在の確率統計学的水準に耐え得る減圧実験を独自に行うことが至難の業であることが理解できると思う。したがって、減圧表の評価について議論されたワークショップ報告<sup>27)</sup>にもあるように、今後は実際の潜水からフィードバックしていくのがもっとも妥当性実現性のある方向になろうと思われるが、問題はデータの集積分析方法である。欧州潜水医学会においてそれについて討議されたことがあるが、その困難さがあらためて浮き彫りにされている<sup>28)</sup>。

## 減圧コンピュータ

減圧コンピュータはむしろ潜水コンピュータ (dive computer)、本邦では略してダイコンと言われることが多いが、本稿の主題上、ここでは減圧コンピュータという言葉を用いる。

減圧コンピュータ自体は圧力センサーと内蔵のアルゴリズム及び出力装置から成り立っており、基本的にはそれほど複雑な装置ではない。ところが、当初は広く流布しているたとえば米海軍減圧表を作成したのと同じアルゴリズムを用いてコンピュータを作成して潜ったところ、本来ならば安全に潜れるはずであったのが、無視し得ない頻度で減圧症に罹患することがわかってき

たのが実状である<sup>29~33)</sup>。その結果、深度の変化がほとんどない矩形潜水における深度ごとの無減圧滞底時間は年を追うごとに短くなり、現在ではかなり安全域に、言い換えれば潜水効率を悪くするように設定されている<sup>34)</sup>。

しかしながら、このように安全域に設定していながらも、コンピュータの指示通りに潜って減圧症に罹患した疑いのある情報がときに寄せられる。これらの事例が果たして本当に減圧症であるのか、空気塞栓症や他の疾病である可能性はないのか、厳密にはまだはっきりしない部分が多いのが実状であるが、用心するに越したことはない。より一層のデータの集積が待たれるところである。

矩形潜水に関する限り大きく安全域に設定されているながら減圧症に罹患する機序として一つの可能性のある説明は、その潜水プロファイルに求めることができる。というのは減圧コンピュータを用いて潜ることの多い潜水はスクーバ潜水であり、スクーバ潜水の特徴はヘルメット潜水などの作業潜水と異なり潜水深度が刻々と変わるいわゆるマルチレベル潜水であることが多いからだ。従来より、繰り返し潜水におけるガスの動態には不明な部分が多いとされてきたが、繰り返し潜水はマルチレベル潜水の特殊な形とも見なすことができる。そうであれば、単純な減圧計算でさまざまな変化する圧曝露プロファイルに対応するには限界があって当然かもしれない。したがって、今後は減圧という複雑な現象により適切に対応できる高度なアルゴリズムを組み込んだコンピュータが求められるであろう。

## 結語

減圧表の制定について、減圧表の本質から理論、実用化に至るまでを簡単に概観してみた。減圧表を理解し使用する上で参考になれば幸甚である。

## 〔謝辞〕

教育講演の機会を与えていただいた第38回日本高気圧環境医学会総会会長、岩手医科大学鎌田桂先生に衷心より感謝申し上げます。また、数学的処理に関し

てご教示下さいました防衛医学研究センター情報システム研究部門の芦田廣先生にも篤くお礼申し上げます。

#### 〔文献〕

1. Boycott AE, Damant GCC & Haldane JS: The prevention of compressed-air illness. *J Hygiene* 8:342-443, 1908.
2. Des Granges M: Standard Air Decompression Tables. U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 5-57. Washington DC; Experimental Diving Unit, 1956.
3. Workman RD: Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 6-65. Washington DC; Experimental Diving Unit, 1965.
4. Workman RD, Bornmann RC: Decompression theory: American practice. In: *The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*, 2nd Ed. Ed by Bennett PB & Elliott DH. London; Baillière Tindall, 1975, pp.307-330.
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. Hempleman HV: Investigation into the Decompression Tables, Report III. Part A: A New Theoretical Basis for the Calculation of Decompression Tables. UPS 131. London; Royal Naval Personnel Research Committee, Medical Research Council, 1952.
10. Hempleman HV: Decompression theory: British practice. In: *The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*, 2nd Ed. Ed by Bennett PB & Elliott DH. London; Baillière Tindall, 1975, pp.331-347.
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. 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.
13. Tikuisis P, Gerth WA: Decompression theory. In: *The Physiology and Medicine of Diving*, 5th Ed. Ed by Brubakk AO & Neuman TS. Edinburgh; Saunders, 2003, pp.419-454.
14. Wienke BR: Basic Decompression Theory and Application. Flagstaff AZ; Best Publishing Co., 1991.
15. Thalmann ED: Development of a Decompression Algorithm for Constant 0.7 ATA Oxygen Partial Pressure in Helium Diving. NEDU Report 1-85. Panama City FL; Navy Experimental Diving Unit. 1985.
16. 池田知純: 減圧をめぐる諸問題. *防衛医科大学校雑誌*. 23:149-162, 1998.
17. 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.
18. Weathersby PK, Barnard EEP, Homer LD & Mendenhall KG: Stochastic description of inert gas exchange. *J Appl Physiol* 47:1263-1269, 1979.
19. Weathersby PK, Mendenhall KG, Barnard EEP, Homer LD, Survanshi S, Vieras F: Distribution of xenon gas exchange rate in dogs. *J Appl Physiol* 50:1325-1336, 1981.
20. Weathersby PK, Homer LD & Flynn ET: On the likelihood of decompression sickness. *J*

- Appl Physiol 57:815-825,1984.
21. 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.
  22. 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.
  23. The BSAC '88 Decompression Tables; Sea Level. London; British Sub-Aqua Club, 1996.
  24. 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.
  25. 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.
  26. 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. Washington DC; Navy Experimental Diving Unit, 1951.
  27. Schreiner HR, Hamilton RW (eds): Validation of Decompression Tables. Bethesda MD; Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1989.
  28. Sterk W, Hamilton RW (eds): Operational Dive and Decompression Data: Collection and Analysis. European Undersea and Baromedical Society Workshop. The Netherlands; Academic Medical Center, University of Amsterdam, 1991.
  29. Lang MA, Hamilton RW (eds): Proceedings of Dive Computer Workshop. Costa Mesa CA; American Academy of Underwater Sciences. 1989.
  30. Lang MA, Vann RD (eds): Repetitive Diving Workshop. Costa Mesa CA; American Academy of Underwater Sciences. 1992.
  31. Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD: The DSAT. Recreational Dive Planner. Development and Validation of No-Stop Decompression Procedures for Recreational Diving. Diving Science and Technology Corp, 1994.
  32. Wending J, Schmutz J (eds): Safety Limits of Dive Computers. Decompression Computers in SCUBA Diving. A Workshop of the Swiss Foundation for Hyperbaric Medicine. Basel Switzerland; Foundation for Hyperbaric Medicine, 1995.
  33. Hamilton RW (ed): The Effectiveness of Dive Computers in Repetitive Diving. Kensington MD; Undersea & Hyperbaric Medical Society, 1995.
  34. 池田知純, 野澤徹: ダイビングコンピュータの特性について(第1報) -基礎的所見-. 日本高気圧環境医学会雑誌, 38:185,2003.