

6-2 米国海軍・ヘリオックス減圧表の変遷及び作成の考え方要約

6-2-1 米国海軍・ヘリオックス減圧表の概要

本項では、1939年に発表された最初の米国海軍ヘリオックス減圧表（略称：Momsen 減圧表）の作成要領から、2001年改訂版減圧表までの変遷を紹介した。

Momsen 減圧表の実施に伴い、いくつかの不具合が発生したので、それは1950年に改訂されたが、減圧停止圧（原文は深度）や減圧停止時間を変えずに、酸素吸入深度の変更やヘリウム%したがって酸素%の管理値を設定することで対応してきた。

この姿勢は2001年版においてもほとんど変わっていない。ヘリオックス減圧表を理解するために、最初にMomsen 減圧表の考え方を要約して紹介し、次に1975年版の考え方を、最後に2001年版の考え方を紹介する。

6-2-2 最初のヘリオックス減圧表の考え方

Momsen 減圧表の解説は長い（原著・17ページ）ので、以下に要約を示す。

Momsen 減圧表の要約

- ①潜水水中の労働の影響（軽重）に配慮して、減圧計算上の高圧下滞在時間は実潜水時間の2倍にしている。
- ②高圧下滞在の不活性ガス分圧はホールデン式で求めている。
- ③人体内で不活性ガス溶解・排泄に関与する組織数は8種類で、ホールデンの5種類したがって空気減圧表の5種類（米国は3種類・Yarborough 減圧表）より多く区分している。
- ④しかしながら、組織の最長半飽和時間はホールデン（75分）より短い70分を仮定している。
- ⑤第1減圧停止圧は、減圧開始時の最も高いヘリウム分圧を減圧比1.7（一定値と仮定）で除して求めている。求められた商は絶対圧のため、それをゲージ圧に換算している。最高分圧は半飽和時間が短い5分組織で生じ、滞在60分クラスではほぼ飽和に近い。
減圧比 1.7 = 分子 / 分母
分子：滞在気圧と滞在時間に応じたヘリウム分圧
分母：分子で示されるヘリウム分圧が次に滞在できる気圧（atm）
- ⑥第1減圧停止圧の滞在時間は、半飽和時間の早い組織からのヘリウムの初期排泄を行うために、常に7分としている。ヘリウム分圧の程度によっては、それを超える時間も考慮している。
- ⑦次の減圧停止圧に移行可能なヘリウム分圧評価は、減圧比1.7を用いている。
- ⑧酸素吸入は、50fsw 停止から行うが、その場合最初の3分はヘリオックスから酸素100%吸入に移行する時間とし、計算上16%酸素のヘリオックス吸入と仮定している。次の時間（50fswでの減圧停止時間－3分）は酸素100%を実吸入しているが、計算上は安全要因として20%ヘリオックス（酸素80%）を吸入と仮定している。

6-2-3 USN ヘリオックス減圧表における総減圧時間の推移(1975年版と2001年版)

図9-1はUSNヘリオックス減圧表(1975年版と2001年版)の一部を抽出(潜水深度300fsw, 滞在時間100分)して作成した減圧プロフィール対比例である。

減圧表区分	空気 0.06MPaまで	呼 吸	ガ ス
2001	ヘリオックス(10%O ₂ , 0.3MPa迄)	ヘリオックス(50%O ₂ , 0.09MPa迄)	100%O ₂
1975	ヘリオックス(17%O ₂ , 0.15MPa迄)		100%O ₂

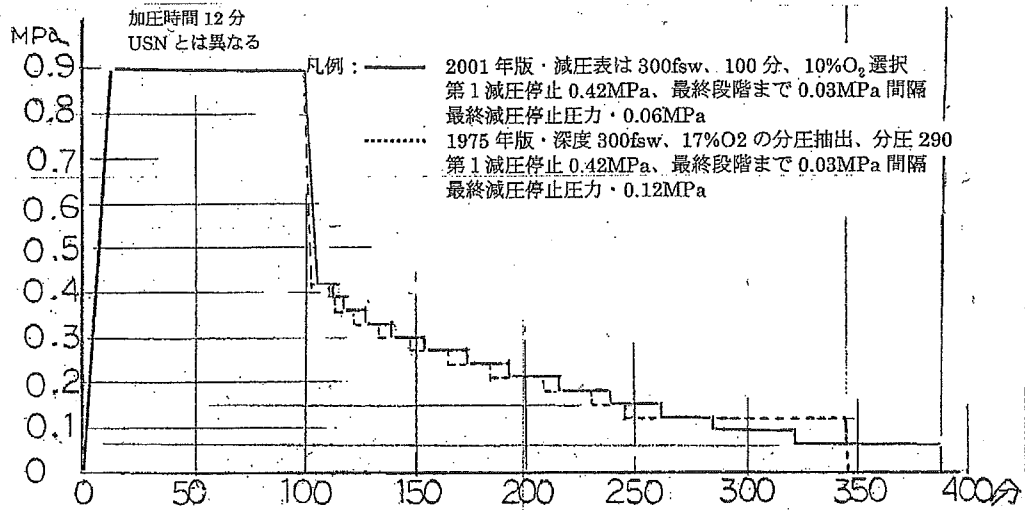


図9-1 USN・ヘリオックス減圧表(1975年版と2001年版)にみる減圧プロフィールの推移例
 縦軸の単位換算：300fsw ≒ 90m ≒ 0.9MPa ≒ 9.0kgf/cm²

6-3 米国海軍ヘリオックス減圧表作成要領と減圧表計算

6-3-1 米国海軍ヘリオックス減圧表作成要領と減圧表計算

注意

邦訳申請を行っていないので、読者は取り扱いに注意されたい。

出典：米国海軍・潜水教範（1981年版）12節・混合ガス・スクーバ潜水

Lesson51 大深度ヘリオックス減圧表の計算

1939年の最初の米国海軍ヘリオックス減圧表(MOMSEM TABLES:略称・Momsen減圧表)からヘリオックス減圧表改訂について整理した1981年の成書が表記の教科書(潜水医官用・潜水教範)である。Momsen減圧表は1950年に改訂されたが、その経過報告の中で、大気中にあった人体は窒素で飽和しているが、ヘリオックス呼吸により、窒素の人体外排泄とヘリウムの人体内吸収を扱うことになり、それらの規模を両ガスの分圧和で評価している。なぜ、分圧和を考えたのかを理解するためと、ここにおける解説の考え方がトライミックス呼吸あるいはヘリオックス呼吸での参考になると考えて、原著翻訳を試みた。難解な用語が突然出てくる箇所などについて原著邦訳文と区別した訳注欄(枠で囲って)を設けて補足説明をした。なお、圧力単位は、原著の1atm=10.08msw(meters of sea water)=33.07fsw(feet of sea water)を中心に用いた。以下は内容構成目次である。歴史、Momsen減圧表、Momsen減圧表への変更、減圧症発症、可変性浮上率理論、減圧表の計算、試行的第1停止圧の選択、第1停止圧への浮上時間の決定、試行的第1停止圧の検証(チェック)、次の停止圧の決定、80fsw停止時間の決定、70fsw停止時間の決定、60fsw停止時間の決定、50fsw停止、最終減圧

参考：米国海軍潜水教範 1981 概要紹介

Diving Medical Officer: Student Guide 1981 :

* 著者等 : E.T. Flynn, P.W. Cartron, C.G. Bayne

* 概要等 : 米国海軍・潜水医官用の教科書・非公開資料

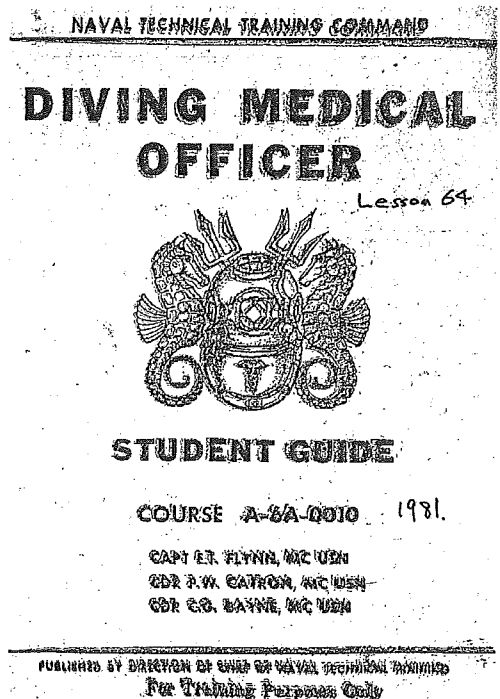
ダイビングマニュアルは実行すべき事項を記述しているが、この教範は潜水実務を監督する士官としての的確な指揮をとるために、なぜ、そうしてよいのか?

具体的な計算は、どのように進めるのか」を学習させることを目的として作成され、全14節・全70章(Lesson70まで)に亘って呼吸ガスの物理学、化学、生理学から減圧表の作成根拠(空気潜水、空気減圧、ヘリオックス潜水、酸素減圧)、潜水実務要領、潜水事故への対応等木目細かに解説している。

* 章などの構成 : 全章紹介は省略する。

- § 1 潜水物理学・2節に区分して学習・計22頁,
- § 2 静水圧の力学的影響・3節・計54頁,
- § 3 空気潜水・4節・計38頁,
- § 4 吸入ガスの毒性的影響・4節・計72頁,
- § 5 減圧症・3節・計41頁,
- § 6 減圧症予防・15節・計197頁,
- § 8 深部での心肺動作変化・5節・計113頁,
- § 9 海面下環境の危険・8節・計88頁,
- § 10 息こらえ潜水/潜水艦脱出と救助・2節・計33頁,
- § 11 深海ヘリウム-酸素潜水・4節
Lesson51 減圧表の計算・計46頁,
- § 12 混合ガス・スクーバ潜水5節・計24頁,
- § 13 飽和潜水・10節・計136頁,
- § 14 特異な診断と潜水事故報告・4節・計24頁。

表紙のコピー



大深度ヘリオックス減圧表計算 (原著 51-1~51-17 頁)

(Lesson51 : CALCULATION OF DEEP SEA HELIUM-OXYGEN TABLES)

原 著 : [Flynn ET, Catron PW. Bayne CG. In Diving Medical Officer Student Guide. 1981.]

歴史 (HISTORY)

ヘリウム-酸素混合ガスを空気の代わりに用いる可能性は、脂肪へのヘリウムの溶解減少は潜水後に要求される減圧規模を縮小するという事を Sayers、Hilderbrant や Yant が、提案した後に初めに海軍により 1925 年に見極められた。初期の研究は思わしくなく、さらなる研究は End が一連の深海潜水を成功裡に収めてヘリウム-酸素混合ガスの有効性を証明した 1937 年まで行われなかった。その直後に、海軍は、実海域にける 400fsw と水槽内での 500fsw の潜水実験を完了した。ヘルメット吐出の炭酸ガス除去という Hawkins による Venturi 循環方式の開発はヘリウム-酸素潜水の実行を海軍にさらに推進させた。

MOMSEN 減圧表 (MOMSEN TABLES)

1939 年に、Momsen は米国海軍ヘリウム-酸素減圧表を刊行した。かれらの計算で用いられた基準を以下に示す。

訳注) 基準 : criteria は criterion の複数形。英英辞典の解説を次に示す。A standard or principle by which something is judged, or with the help of which a decision is made.

灌流 (訳注 : 器官の血管内に液体を流すこと) や不活性ガスに対する血液組織区画に支配されるという指数関数的な割合で、種々の組織が不活性ガスを吸収したり排泄したりすると考えられた。計算には、半飽和時間 5,10,20,30,40,50,60,70 分が使われた。運動などで生ずる不活性ガス吸収の加速を相殺するために、実曝露時間は 2 倍とされた。減圧を制御する基準は、全ての組織においてヘリウム分圧対環境圧の比率一定値 1.7 : 1 に基づいていた。

訳注) ここは重要な箇所なので、原文を示す。To compensate for the acceleration of inert gas absorption which occurs with exercise, the actual exposure time was doubled. Limiting criteria for decompression were based on a constant 1.7 to 1 ratio of tissue helium partial pressure to ambient hydrostatic pressure in all tissues.

ダイバーは水深 60fsw 相当圧 (酸素 2.8ATA) で純酸素に交換され、50fsw から水面浮上のために最後の 5 分間を減圧しながら水面に引き揚げられた。

全ての初期停止は早い組織からのヘリウムの初期急激排泄をするために、その区間 7 分であった。それに続く減圧停止圧は最小 10fsw 刻みであった。

滞底時の最高酸素曝露は 2.5ATA に設定された。初期の酸素毒性の研究は、窒素環境におけるよりもヘリウム環境でダイバーは、より高い酸素耐性をもっていると説明していた。

これらの減圧スケジュールはまた、静脈血液が呼吸で酸素分圧に密接に対応する分圧室をもっているという理論や肺を通じてほぼ 0.7 分できれいになるという事実に基づいた浮上割合表を含んでいた。初版減圧表は浮上割合が 33fsw で刊行されたが、最終版は 50fsw に変更された。

訳注) 分圧室 : 酸素窓のことか? 肺胞内と組織内で N_2 は均衡しており、吸気圧 = 肺胞気圧 = 760mmHg とすると N_2 圧はいずれも 573mmHg の圧力をもっている (吸気のは 0mmHg、水分は 5.7mmHg)。 O_2 は組織で消費され CO_2 が生産される。 CO_2 生産量は 50mmHg で酸素消費量より少ない。組織内の PO_2 は 20mmHg しかなく、水分は 47mmHg である。それで組織総圧は $573+20+50+47=690$ mmHg となっている。肺胞気圧と組織総圧の差は $760-690=70$ mmHg $\div 0.1bar \div 0.01MPa$ となる。この圧力差は不均衡のまま補われない。この肺胞と組織の圧力不均衡は『固有の不飽和』とか『酸素窓』といわれる。

Momsen 減圧表は分圧表示で提供され、潜水規模 410fsw、240 分まで含まれていた。空気とヘリウム-酸素の緊急減圧表が 1939 年に計算された。これらの表は現在まで変更されていない。

訳注) 現在 : 原本は 1981 年に刊行された。巻末記載の表はこの時点の減圧表である。1975 年版 U.S.N.ダイビングマニュアルの船上供給方式ヘリオックス減圧表の第 1 停止圧滞在時間は、どの深度でも最短 7 分以上となっている。2001 年版も同様である。

Momsen 減圧表への変更 (Changes to the Momsen Tables)

1950 年に Molumphy は Momsen 減圧表を再評価した。この時点で当該減圧表に行われた主な変更は、酸素吸入への減圧停止圧の深度移行であった。これらの停止は初版で 60 と 50fsw であったが、新版ではそれぞれ 50 と 40fsw であった。これらの変更は酸素中毒の出現を低減するためになされたが、初版にお

ける実酸素中毒の出現は記録されていなかった。同時に、半飽和時間 100 分までの組織と 1.6 と 1.5 対 1 の比率をもつ 追加減圧表が計算された。

これらの減圧表の検証結果と減圧症データは、減圧症の大部分が 50 分より早い組織制御中に生じたことを示した。それで、430fsw 以深、滞底時間 10 分以上の潜水作業に対して、減圧の物理学は妥当でないと言ったことが結論された。けれども、これらの減圧表にしたがった作業は、それらの妥当性にいくつかの疑惑をもたらした。特に、基本的に現在の形式で刊行されている範囲の深度端においてである。それは、Momsen の初版減圧表からの唯一の重要な変更が酸素減圧停止における移行という点にある。

減圧症発症 (Decompression Sickness Incidence)

1958 年から 1961 年に行われた分析に基づき、これらの減圧表による減圧症発症は 0.83%であったことを Doll は報告した。彼の解析は、米国海軍潜水手順にしたがった 721 件を基にしていた。Norfolk の海軍安全センターによるさらに最近の報告は、1976 年の海軍の潜水について、1072 件のうち 0.84%の発症率であった。

可変性浮上率理論 (Theory of Variable Rate of Ascent)

水面において、組織中至るところの血液移行中に、炭酸ガス分圧は 40 から 46mmHg に上昇し、酸素分圧は 103 から 40mmHg に下降する。窒素と水蒸気圧はそれぞれ 570mmHg (空気に対して)、47mmHg の一定値にとどまる。炭酸ガス分圧が増大する程度以上に酸素分圧が減少するので、静脈血中への溶解ガス分圧の和は、環境圧より 57mmHg 低い。

$$760 - (PN_2 + PH_2O + PO_2 + PCO_2) = \text{不飽和}$$

$$760 - (570 + 47 + 40 + 46) = 57\text{mmHg} = 0.08\text{ATA}$$

深いところでは、吸入ガスや動脈(arterial)中の酸素分圧は劇的に増大する。しかしながら静脈(venous)の PO₂ は相対的に少しも変化しない。ヘモグロビンの酸素解離曲線における上限の相対的扁平性により、PO₂ が非常に増大しても、いちじるしく増大した酸素量を動脈血が運ばないからである。組織の酸素摂取が溶解酸素により行われると静脈の PO₂ は 100mmHg まで上昇する。

血液中の酸素溶解率は 0.003ml/100/ml mmHg なので、溶解酸素による容積率 6% という動脈—静脈の残差を与える動脈の PO₂ は $6 = 0.003 \times PaO_2$

$$\text{したがって } PaO_2 = 6 / 0.003 = 2000\text{mmHg} \text{ あるいは } 2.6\text{ATA}$$

2.6ATA は Momsen 減圧表で許容された最大 2.5ATA・PaO₂ より高いので、動脈 PaO₂ はダイバーの最も深い深度において 100mmHg より増大してはならない。

訳注) この章は別途報告「等圧力気泡形成」と合わせて読んでください。

訳注) ①ヘモグロビンの酸素解離曲線上限の相対的扁平性：血液中のヘモグロビンは酸素を取りこんだり、離したりする。直交座標系で横軸に PO₂、縦軸に酸素飽和度を目盛って、両者の関係を示した曲線がヘモグロビンの酸素解離曲線である。これは座標系の原点を通り、上に凸状の曲線である。飽和度の増大は PO₂ が 60mmHg 程度から緩やかになり飽和度 89%程度を示し、100mmHg で飽和度 97.5%を示す。このように増大が緩やかな曲線の状況を相対的扁平性と表現している。

参考：医科・生理学展望 原書 12 版、図 35・2 (丸善・昭和 61 年、訳・松田他)
②2000mmHg/760mmHg ≃ 2.63ATA ≃ 2.6ATA

例：80%He、20%O₂ の混合ガスで、10ATA 環境のときの動脈不飽和を計算すると、

$$760 \times 10 - (PHe + PH_2O + PO_2 + PCO_2) = \text{不飽和}$$

$$7600 - (6042.4 + 47.0 + 100.0 + 46.0) = 1364.6\text{mmHg}$$

$$1364.6\text{mmHg} = 1.8\text{ATA}$$

訳注) 6042.4 の算出方法不明。下記の意味？
 $PHe = 7600 \times 0.79505 \doteq 6042.4$

例：84%He、16%O₂ の混合ガスで、10ATA 環境のときの動脈不飽和を計算すると、

$$760 \times 10 - (PHe + PH_2O + PO_2 + PCO_2) = \text{不飽和}$$

$$7600 - (6344.5 + 47.0 + 100.0 + 46.0) = 1062.5\text{mmHg}$$

$$1062.5\text{mmHg} = 1.4\text{ATA}$$

訳注) 6344.5 の算出方法不明。下記の意味？
 $PHe = 7600 \times 0.8348 \doteq 6344.5$

したがって、どの混合ガスにダイバー深度を与えても、あるいはどんな深度で混合ガス中の酸素成分を

増大させても動脈不飽和の程度は増大する。動脈不飽和は混合ガス中の酸素分圧よりおよそ0.2ATA低い。
もし、ダイバーを取り囲む環境圧が動脈不飽和に等しい量まで突然低下した場合、溶解ガス分圧はまさに環境圧にまで等しくなる。Momsenによれば、そのような減圧で気泡形成はないとされていた。

訳注) 下線部の原文 : Bubbles would not be expected to form on such a decompression, according to Momsen.

Momsen 減圧表において、第1停止圧や停止圧間への浮上割合は、最も末端の組織からの静脈血が肺に到達する前に静脈飽和が生じないように計算された。組織から肺への移動時間は0.7分と想定された。Momsen 減圧表の浮上割合は表一1に示される。

表一1 ヘリウム・酸素潜水浮上割合(fsw/min)

浮上深度	FIO ₂ (酸素濃度)							
	10	15	20	25	30	35	40	45
600	50							
550	50							
500	40							
450	40		他は全て : 75fsw/min					
400	30							
350	30							
300	20	50						
250	20	50						
200	10	40	50					
150	10	30	40	50				
100	10	20	30	40	50			
50	10	10	20	30	30	30	40	50

*要求される酸素%間は補間推定のこと。
*第1停止圧への浮上は浮上表に加えて他の要因に支配される。
*第1停止圧への浮上割合は変更されず、現在も使用されている。
しかしながら、停止圧間の浮上は一定浮上割合60fsw/minを選んで1968年に廃棄された。

訳注) ①表一1は以降の原文では ascent table : 浮上表と表現している。
②FIO₂ : 定義が見当たらない。Lesson50では FIO₂を fractional concentration of oxygen in the supply gas.と定義している。これより FIO₂を酸素濃度(分母100の分子)と推測する。
10は10/100すなわち10%のこと?

ここで、この章は終わり、次ページから「減圧表の計算」に入る。

訳注) 閑話休題 : 原著翻訳に伴う話題あれこれ

1. Momsen 司令官のプロフィール

インターネットのGoogleでキーワードとして「Momsen C.B.,Diving,Helium,Oxygen」を入力すると、Momsen 減圧表を作成した「米国海軍太平洋艦隊・潜水艦部隊・司令官 RADM C. B. Momsen」の写真と略歴が紹介される。彼は1896年に生まれ、1967年に没した。翻訳は省略するが、興味のある読者への話題提供として、巻末にGoogleからプリントしたMomsen 司令官のプロフィールを転載した。

また、2005年2月に光文社文庫から「海底からの生還」が刊行された。これは1935年に沈没した米国海軍潜水艦SQUALUSの生存者救出と艦体引き上げに貢献したMomsenの活躍も描いたノンフィクションである。生存者救出は水深75mにおける窒素酔いのなかでの空気潜水や艦体引き上げにはヘリオックス潜水(減圧表は試行段階)の苦闘が記述されている。開発秘話である。

2. Momsen 減圧表策定当時の組織の半飽和時間

ヘリオックス潜水用のMomsen 減圧表は1939年に公開された。この当時の減圧表で扱っている人体組織区分数と半飽和時間を概観すると下の表のようになる。

溶解と排泄のガス区分	提案者(年代): 減圧表区分	組織数	半飽和時間(分)
窒素	Haldane(1908) 空気減圧表 及び英国海軍	5	5, 10, 20, 40, 75
窒素	Hawkins(1935) 3000潜水の分析	5	5, 10, 20, 40, 75
窒素	Yarborough(1937)米国海軍減圧表	3	20, 40, 75
ヘリウム	Momsen(1939)Momsen Tables 米国海軍ヘリオックス減圧表	8	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70

減圧表の計算

例：深度—345fsw、滞底時間—10分、
 混合比—80%ヘリウム、20%酸素
 滞底でのヘリウム吸収

ヘルメット内での酸素ロス2%を想定する。

したがって、吸入したヘリウム分圧は、 $P_{He} = (345 + 33) \times \{1 - (0.20 - 0.02)\} = 310fsw$

訳注) この計算は U.S.N.ダイビングマニュアル 1975 の Volume2 Mixed diving 船上供給方式減圧表のうち、潜水深度 345fsw 分圧換算 310fsw、滞底 10 分の項を再現試算している。

訳注) fsw は分圧値である。ATA 単位に慣れた読者の便を考慮して ATA 単位で計算すると、滞底圧は $345fsw \div 33 = 10.45$ 気圧(ゲージ圧)となり、 $(10.45 + 1.0) \times \{1 - (0.20 - 0.02)\} = 9.389ATA \approx 9.39ATA$ を得る。一方、原著の計算結果 310fsw を用いて換算すると $310fsw / 33 = 9.39ATA$ となる。

間違ったことに、この2%は当該組織における窒素分圧変動に関与すると信じられていた。

$$P_0 = 33 \times (1 - 0.20 - 0.02) = 27fsw$$

ガスの排泄と摂取の式は、 N_2 排泄 $P_{TN_2} = 27 + (0 - 27) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$
 He 摂取 $P_{THe} = 0 + (P_a - 0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$

もし、 N_2 と He の組織の半飽和時間が等しいと、時間 t における2つのガス分圧の和は、 $P_{TN_2} + P_{THe} = 27 + (P_a - 27) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$ で与えられる。

組織の初期窒素は、あたかもヘリウムであるかのように見なされていた。

それで、2組織に対して等しい飽和時間の想定がなされてきた。

運動の影響を考慮するために、計算上の滞底時間が2倍にされた。すなわち、本例にあつては滞底時間が20分に延ばされることになる。

訳注) Lesson24 参照

ガス交換式より、310fsw P_{He} 曝露20分後の種々の組織の不活性ガス分圧は次のようになる。

組織半飽和時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = P_T$
5	$27 + (310 - 27) \times (0.937) = 292$
10	$27 + (310 - 27) \times (0.750) = 239$
20	$27 + (310 - 27) \times (0.500) = 169$
30	$27 + (310 - 27) \times (0.370) = 132$
40	$27 + (310 - 27) \times (0.293) = 110$
50	$27 + (310 - 27) \times (0.242) = 95$
60	$27 + (310 - 27) \times (0.206) = 85$
70	$27 + (310 - 27) \times (0.180) = 78$

訳注) 組織のヘリウム半飽和時間評価の実験結果は1967年のBuhlmann報告に見られる。ベネット教科書2版の355~357ページ参照
 1937年では、ホールデンの組織半飽和時間の考え方を踏襲していた。

試算第1減圧停止深度の選択

これらの表において全ての組織は1.7:1の比率に支配されると思われていたので、試算第1停止深度は最も高い張力をもつ組織—5分組織により決定される。

$$P_{He} / P_B = 1.7 \text{ より } P_B = P_{He} / 1.7 = 292 / 1.7 = 172fsw$$

したがって、第1停止深度は $172 - 33 = 139fsw$ あるいは $140fsw$

第1減圧停止圧への浮上時間決定

これらの表では分圧で示されているので、ダイバーが降下できる最も深くそして表でとどまる深度を決定することが必要である。この深度は供給される混合ガスにおける PO_2 が 2.5ATA(76fsw)の管理値になるようにすべきである。注意) 2.5ATA は現在の米国海軍管理値より高い分圧である。

$$\text{最深深度を計算すると: } P_{He}(\text{ヘルメット}) = (D + 33) \times (F_{He} + 0.2) \quad (1)$$

$$\text{ここに, } F_{He} = P_{He}(\text{供給}) / (D + 33) = \{(D + 33) - 76\} / (D + 33) \quad (2)$$

$$\text{式(1)に式(2)を代入すると, } P_{He}(\text{ヘルメット}) = (D + 33) \times \{ \{(D + 33) - 76\} / (D + 33) + 0.2 \} \quad (3)$$

$$\text{上式を整理して, } P_{He}(\text{ヘルメット}) = D - 43 + 0.02D + 0.02 \times 33 = 1.02D - 42.3 \quad (4)$$

$$\text{これをDについて解くと, } D = (P_{He} + 42.3) / 1.02 \quad (5)$$

310 表について見れば、 $D = (310 + 42.3) / 1.02 = 345\text{fsw}$

訳注) 「310 表」の意味不明。原文は(For a 310table, therefore $D = (310 + 42.3) / 1.02 = 345\text{fsw}$)

要求される最大浮上は 345fsw から 140fsw である。

最大深度における混合ガス中の酸素%を計算すると、 $\text{FO}_2 = \text{PO}_2 / \text{PB} = 76 / (345 + 33) = 20.1\%$

この混合ガスに対する第 1 停止深度への浮上割合と時間は浮上表により決定できる。

深度(fsw)	割合(fsw/分)	時間
345 から 200 へ	÷ 75	= 1.93
200 から 150 へ	÷ 50	= 1.00
150 から 140 へ	÷ 40	= 0.25
合計		3.18 分

これらの表の科学的取り組みにも拘らず、浮上時間は滞底深度と第 1 停止深度との中の途中段階におけるように 5 分に丸められた。また、浮上表が指示するように浮上割合は変動するより一定に収めた。

各分圧表 10 分刻み計画で浮上時間は計算され、さらにその表以内のより長い曝露にも応用された。より深い第 1 停止深度に対して、より長い減圧計画が要求されるので、このことはより緩い浮上割合を備える効果をもった。

試算第 1 減圧停止深度の検証：Check of the Trial First Stop

移動中のヘリウム分圧平均値は滞底深度 PHe と深度 140fsw の分圧から計算される。

滞底深度 PHe=310fsw

減圧中、減圧表計算は混合ガス中における最小酸素 16%に基づいている。それで深度

140fsw では、 $\text{PHe} = (140 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\} = 149\text{fsw}$

このようにして平均 PHe は、 $\text{PHe} = (310 + 149) / 2 = 230\text{fsw}$ となる。

しかしながら、これは間違いである。16%への移行はまさに浮上前に影響され、それは深度 325fsw における PHe を与え、移動中の平均 PHe237fsw を与える。

140fsw への 5 分浮上に対するすべての組織分圧を再計算すると、

組織半飽和 時間	$\text{P}_0 + (\text{P}_a - \text{P}_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = \text{P}_T$
5	$292 + (230 - 292) \times (0.500) = 261$
10	$239 + (230 - 239) \times (0.293) = 236$
20	$169 + (230 - 169) \times (0.158) = 179$
30	$132 + (230 - 132) \times (0.108) = 143$
40	$110 + (230 - 110) \times (0.083) = 120$
50	$95 + (230 - 95) \times (0.066) = 104$
60	$85 + (230 - 85) \times (0.055) = 93$
70	$78 + (230 - 78) \times (0.048) = 85$

訳注) 前節「試算第 1 停止深度の選択」の上にある計算表では 78 となっているので、原著の 75 は誤植である。計算結果の $\text{P}_T = 85$ は正しい。

140fsw に到達すると、5 分組織はまだ最も高いガス張力をもっており、これを対象に制御を続行する。今や、この組織は $D = 261 / 1.7 - 33 = 120.53\text{fsw}$ へ浮上可能である。したがって、120fsw へ安全に到達できそうである。120fsw へ浮上中の平均 PHe は $[310 + (120 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\}] / 2 = 221\text{fsw}$ 滞底深度から 120fsw への 5 分浮上に対する組織分圧を再計算すると、

組織半飽和 時間	$\text{P}_0 + (\text{P}_a - \text{P}_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = \text{P}_T$
5	$292 + (221 - 292) \times (0.500) = 256$
10	$239 + (221 - 239) \times (0.293) = 234$
20	$169 + (221 - 169) \times (0.158) = 177$
30	$132 + (221 - 132) \times (0.108) = 142$
40	$110 + (221 - 110) \times (0.083) = 119$
50	$95 + (221 - 95) \times (0.066) = 103$
60	$85 + (221 - 85) \times (0.055) = 92$
70	$78 + (221 - 78) \times (0.048) = 85$

5 分組織は 110fsw へ浮上できず、それで 120fsw が第 1 停止深度となる。

訳注) 追補：浮上可能な深度は $D = 256 / 1.7 - 33 = 117.59\text{fsw}$ と計算される。

ここまで述べたように、さらなる時間が要求されない限り第1停止は常に7分である。「半飽和時間の早い組織からヘリウムを初期排泄させ」るために、この時間は設けられた。

訳注) 滞底時間によっては、減圧開始時に飽和に達している組織もある。不飽和の組織では減圧直後でも若干の分圧上昇傾向を示すのが、ホールデン式である。この考え方はトライミックス減圧でも採用できる。

$$120\text{fsw の } P_a = (120 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\} = 132\text{fsw}$$

7分曝露を計算すると、

組織半飽和時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = P_T$	
5	$256 + (132 - 256) \times (0.621)$	= 179
10	$234 + (132 - 234) \times (0.384)$	= 195
20	$177 + (132 - 177) \times (0.215)$	= 167
30	$142 + (132 - 142) \times (0.149)$	= 141
40	$119 + (132 - 119) \times (0.114)$	= 120
50	$103 + (132 - 103) \times (0.092)$	= 106
60	$92 + (132 - 92) \times (0.078)$	= 95
70	$85 + (132 - 85) \times (0.066)$	= 88

次の減圧停止深度の決定

制御対象は10分組織である。D = 195 / 1.7 - 33 = 82fsw より次の停止深度は90fswである。

90fsw 減圧停止時間の決定

80fswまで浮上するために減らさなければならない10分組織のガス分圧値を計算すると、

$$80\text{fsw における許容 } P_{He} = 1.7 \times (80 + 33) = 192\text{fsw}$$

したがって、この組織は195 - 192 = 3fsw減らさなければならない。

90fswにおけるPaは(90 + 33) × {1 - (0.16 - 0.02)} = 106fswに等しく

ガス交換式を用いて、 $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}} = 1 - e^{-0.693/10}$

$$(192 - 195) / (106 - 195) = (-3) / (-89) = 0.034 \text{ を与える } t \approx 0.5 \text{ 分}$$

訳注) 原文に下線部はなく「= <1分」の表現である。下記計算を行って下線部のように訳した。

$$1 - e^{-0.693 \times 0.5 / 10} = 0.034$$

90fswにおける停止時間は1分である。したがって、ヘリウム-酸素潜水で浮上停止深度間の浮上時間は次の停止時間に含まれ、90分停止の全時間が120fswから90fswへの移動に使われ、余分な時間が90fsw停止に追加されて2分を停止時間とする。この追加時間は計算では考慮していない。

90fsw・1分停止での組織の分圧を計算すると、

組織半飽和時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = P_T$	
10	$195 + (106 - 195) \times (0.384)$	= 189
20	$167 + (106 - 167) \times (0.215)$	= 165
30	$141 + (106 - 141) \times (0.149)$	= 140
40	$120 + (106 - 120) \times (0.114)$	= 120
50	$106 + (106 - 106) \times (0.092)$	= 106
60	$95 + (106 - 95) \times (0.078)$	= 95
70	$85 + (106 - 88) \times (0.066)$	= 88

注) 5分組織はもはや制御対象でない。それで省略

80fsw 減圧停止時間の決定

今度は、10分組織の制御である。70fswへ浮上するために10分組織の分圧を減らさなければならない。

$$P_{He} = 1.7 \times (70 + 33) = 175\text{fsw}$$

80fswでのPa = (80 + 33) × {1 - (0.16 - 0.02)} = 97fsw

ガス交換式を用いて、 $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}} = 1 - e^{-0.693/10}$

$$(175 - 189) / (97 - 189) = (-14) / (-92) = 0.152 \text{ を与える } t \approx 3 \text{ 分}$$

80fsw における 3分
停止の組織分圧計算は

訳注) 原文に下線部はなく、下記計算を行って下線部のように訳した。
 $t = 2.38$ 分を用いると $1 - e^{-0.693 \times 2.38 / 10} = 0.152$ となる。

組織半飽和		
時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$	$= P_T$
10	$189 + (97 - 189) \times (0.187)$	<u>$= 172$</u>
20	$165 + (97 - 165) \times (0.098)$	$= 158$
30	$140 + (97 - 140) \times (0.066)$	$= 137$
40	$120 + (97 - 120) \times (0.050)$	$= 119$
50	$106 + (97 - 106) \times (0.040)$	$= 106$
60	$95 + (97 - 95) \times (0.034)$	$= 95$
70	$85 + (97 - 88) \times (0.029)$	$= 88$

70fsw 減圧停止時間の決定

まだ 10 分組織を制御する。60fsw まで浮上するために 10 分組織分圧は次の値まで不飽和にしなければならない。PHe = $1.7 \times (60 + 33) = 158$ fsw

70fsw での $P_a = (70 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\} = 89$ fsw

ガス交換式を用いて、 $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}} = 1 - e^{-0.693t/10}$

$(158 - 172) / (89 - 172) = (-14) / (-83) = 0.169$ を与える $t \approx 3$ 分

訳注) 原文に下線部はなく、下記計算を行って下線部のように訳した。
 $t = 2.38$ 分を用いると $1 - e^{-0.693 \times 2.68 / 10} = 0.169$ となる。

70fsw における 3分
停止の組織分圧計算は

組織半飽和		
時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$	$= P_T$
10	$172 + (89 - 172) \times (0.187)$	$= 156$
20	$158 + (89 - 158) \times (0.098)$	$= 151$
30	$137 + (89 - 137) \times (0.066)$	$= 134$
40	$119 + (89 - 119) \times (0.050)$	$= 117$
50	$106 + (89 - 106) \times (0.040)$	$= 105$
60	$95 + (89 - 95) \times (0.034)$	$= 95$
70	$85 + (89 - 88) \times (0.029)$	$= 88$

60fsw 減圧停止時間の決定

10 分組織と 20 分組織の分圧は接近しており、どちらを制御するかよくわからない。50fsw へ浮上するために必要な PHe は、PHe = $1.7 \times (50 + 33) = 141$ fsw

60fsw での $P_a = (60 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\} = 80$ fsw

ガス交換式を用いて、

10 分組織 : $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}} = 1 - e^{-0.693t/10}$

$(141 - 156) / (80 - 156) = (-15) / (-76) = 0.197$ を与える $t \approx 4$ 分

訳注) 原文に下線部はなく、下記計算を行って下線部のように訳した。
 $t = 3.17$ 分を用いると $1 - e^{-0.693 \times 3.17 / 10} = 0.197$ となる。

20 分組織 : $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}} = 1 - e^{-0.693t/20}$

$(141 - 151) / (80 - 151) = (-10.0) / (-71.0) = 0.141$ を与える $t \approx 5$ 分

訳注) 原文に下線部はなく、下記計算を行って下線部のように訳した。
 $t = 4.4$ 分を用いると $1 - e^{-0.693 \times 4.4 / 10} = 0.141$ となる。

今度は 20 分組織の制御である。したがって、10 分組織は除かれる。

60fsw における 5 分停止の組織分圧計算は

組織半飽和		
時間	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}})$	$= P_T$
20	$151 + (80 - 151) \times (0.158)$	$= 140$
30	$134 + (80 - 134) \times (0.108)$	$= 128$
40	$117 + (80 - 117) \times (0.083)$	$= 114$
50	$105 + (80 - 105) \times (0.066)$	$= 103$
60	$95 + (80 - 95) \times (0.055)$	$= 94$
70	$85 + (80 - 88) \times (0.048)$	$= 88$

50fsw 停止

50fsw において、ダイバーは 100%酸素吸入に移る。この停止は最小 10 分である。最初の 3 分はガス交換に費やされる。計算上、3 分間は 84%ヘリウム、16%酸素呼吸とみなされる。減圧停止の次の 7 分間にダイバーは酸素吸入するが、さらなる安全要因として酸素には 20%ヘリウムを含むことにする。

この停止における最初の 3 分は

$$P_a = (50 + 33) \times \{1 - (0.16 - 0.02)\}$$

$$= 71\text{fsw}$$

3 分曝露に対する組織分圧を計算すると、右の表で示される。

時間	組織半飽和	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = P_T$
20	140 + (71 - 140) × (0.098)	= 133
30	128 + (71 - 128) × (0.066)	= 124
40	114 + (71 - 114) × (0.050)	= 112
50	103 + (71 - 103) × (0.040)	= 102
60	94 + (71 - 94) × (0.034)	= 93
70	85 + (71 - 85) × (0.029)	= 88

この停止における次の 7 分は

$$P_a = (50 + 33) \times \{0.2\} = 17\text{fsw}$$

7 分曝露に対する組織分圧を計算すると、右下の表で示される。

時間	組織半飽和	$P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}) = P_T$
20	133 + (17 - 133) × (0.215)	= 108
30	124 + (17 - 124) × (0.149)	= 108
40	112 + (17 - 112) × (0.114)	= 101
50	102 + (17 - 102) × (0.092)	= 94
60	93 + (17 - 93) × (0.078)	= 87
70	88 + (17 - 88) × (0.066)	= 83

40fsw に浮上するために、全ての組織の PHe は $1.7 \times (40 + 33) = 124\text{fsw}$ より小さくしなければならない。全ての組織分圧が小さいので、50fsw において 10 分以上長い時間は要求されない。

40fsw 減圧停止時間の決定

ダイバーは 40fsw から水面にでる。したがって、組織全てのヘリウム分圧は、

$$P_{He} = 1.7 \times (0 + 33) = 56\text{fsw}$$

より小さいか等しくなければならない。40fsw で酸素 (ヘリウム 20%含有を仮定) 吸入中の Pa は、 $P_a = (40 + 33) \times 0.2 = 15\text{fsw}$ ガス交換式を用いると

組織半飽和時間	$(P_T - P_0) / (P_a - P_0)$	$= 1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}$	必要停止時間
20	$(56 - 108) / (15 - 108) = 52.0 / 93.0 = 0.559$	t=23.6 で $1 - e^{-0.693 \times 23.6 / 20} = 0.559$	24 分
30	$(56 - 108) / (15 - 108) = 52.0 / 93.0 = 0.559$	t=35.4 で $1 - e^{-0.693 \times 35.4 / 30} = 0.559$	35 分
40	$(56 - 101) / (15 - 101) = 45.0 / 86.0 = 0.523$	t=42.7 で $1 - e^{-0.693 \times 42.7 / 40} = 0.523$	43 分
50	$(56 - 94) / (15 - 94) = 38.0 / 79.0 = 0.481$	t=47.3 で $1 - e^{-0.693 \times 47.3 / 50} = 0.481$	47 分
60	$(56 - 87) / (15 - 87) = 31.0 / 72.0 = 0.431$	t=48.8 で $1 - e^{-0.693 \times 48.8 / 60} = 0.431$	49 分
70	$(56 - 83) / (15 - 83) = 27.0 / 68.0 = 0.397$	t=51.1 で $1 - e^{-0.693 \times 51.1 / 70} = 0.397$	52 分

70 分組織が減圧停止時間を制御し、したがって最終停止時間は 52 分を要す。

訳注) 「t=23.6 で $1 - e^{-0.693 \times 23.6 / 20} = 0.559$ 」の項は原文にない。読者の試算の参考とするために挿入した。

最終減圧

表一 2 は 345/10 のヘリウム-酸素潜水の減圧停止圧と減圧停止時間を示している。滞底深度と第 1 停止圧間の時間は 5 分

表一 2 減圧停止圧と停止時間

減圧停止圧 (fsw)	減圧停止時間 (分)
120	7
90	2
80	3
70	3
60	5
50	10
40	52

訳注) 浮上所要時間のこと。
 $(345 - 120) / 5 \text{分} = 45\text{fsw} / \text{分} = 13.6\text{m} / \text{分}$
 表一 2 は 1975 年版減圧表の該当箇所一致する。次ページ参照のこと。

参考文献 : Molumphy, G.G. Computation of helium-oxygen decompression tables. U.S. Navy Experimental Diving Unit Report 7-50, 1950

6-3-2 再現試算対象減圧表の部分抜粋コピー：1975年版のヘリオックス減圧表の一部抜粋：

出典：1981年9月潜水教範 Lesson50-11 頁

1975年版ダイビングマニュアルIIの14-28頁と同じ表である。

HELIUM-OXYGEN SURFACE SUPPLIED DECOMPRESSION TABLE

再現箇所

PARTIAL PRESSURE	BOTTOM TIME (MIN.)	TIME TO FIRST STOP (MIN.)	Decompression Stops (Feet)													TOTAL ASCENT TIME (MIN.)			
			180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60		50	40	
310	10					0	0	0	7	0	0	2	3	3	5	10	52	87	
	20					0	0	7	0	0	4	5	6	6	11	10	82	139	
	30					0	7	0	0	5	5	7	8	9	14	12	96	168	
	40					0	7	0	3	5	8	8	11	13	18	15	99	192	
	50					0	7	3	6	7	10	12	16	22	23	16	99	228	
	60					7	0	6	9	11	12	16	19	23	23	16	99	246	
	80					7	1	9	10	14	17	19	20	23	23	16	99	263	
	100	5				7	4	11	12	14	17	19	20	23	23	16	99	270	
	120					7	5	12	15	16	17	19	20	23	23	16	99	277	
	140					7	8	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	282	
	160					7	10	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	284	
	180					7	12	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	286	
	200					8	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	288	
220					9	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	289		
240																		289	
320	10					0	0	0	7	0	0	3	3	3	7	10	54	92	
	20					0	0	7	0	0	2	4	5	6	7	10	85	141	
	30					0	0	7	0	2	4	5	7	8	11	15	13	98	175
	40					0	7	0	1	4	6	7	8	12	15	19	16	99	199
	50					0	7	0	5	6	9	11	13	17	20	23	16	99	231
	60					0	7	3	7	9	11	13	17	20	23	23	16	99	253
	80					0	7	5	9	11	13	17	19	20	23	23	16	99	267
	100	5				0	7	7	12	13	16	17	19	20	23	23	16	99	277
	120					7	2	9	12	15	16	17	19	20	23	23	16	99	283
	140					7	3	11	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	286
	160					7	5	11	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	290
	180					7	6	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	293
	200					7	7	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	294
220					7	9	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	296	
240																		296	

6-3-3 U.S.N.ヘリオックス減圧表に対する有識者の公表見解：引用承諾要請未済

「潜水医学入門」・大修館書店 1995・140～141 で、著者・池田知純氏（執筆当時・防衛庁・防衛医科大学校 教授、現埼玉医科大学 衛生学講座 教授）は U.S.N.ヘリオックス減圧表について次のように記述している。以下、原文のまま紹介する。

『●ヘリウム酸素潜水減圧表

ヘリウム酸素潜水を行うための減圧表も用意されています。ヘリウム酸素潜水は通常ヘルメツ

ト潜水で行われます。ですから、この減圧表はヘルメツト潜水を対象としてその潜水法に合うように作成されています。具体的には減圧途中における純酸素を用いたヘリウムの洗い出しなどが当てはまります。この減圧表の作成は古く、1939年に原案が作成され、1950年に現用の形に改定されました。ですから、減圧計算に当ってはその根拠となる許容過飽和の指標として、いままで述べてきた減圧表では「許容分圧」を用いているのに対し、この減圧表では古い「許容比」を用いています。また、多少の改訂はなされている模様ですが、その許容比も全組織、全深度において、およそ 1.7 に固定して計算されています。このことは、組織および深度に応じてきめ細かく許容分圧を決めている空気潜水用の標準減圧表とは、大きく異なっています。つまり、ヘリウム酸素潜水減圧表はかなり古い概念によって作成されているといえます。

そのためかどうか、この減圧表の計算に当ってはすさまじい人為的な修正が施されています。そのもっとも極端な例としては、海底の作業量が大きいという理由で滞底時間を実際の倍にして計算していることが挙げられます。これでは、減圧計算も何もないではないか、といわれそうですが、たしかに計算も何もないのでしょうか。これは、私の想像ですが、おそらく実際の滞底のままにして計算して潜ったところ、非常に高率に減圧症が発症したので、滞底時間を倍にして計算し直したのではないのでしょうか。

このようにしてつくられた米海軍ヘリウム潜水減圧表ですが、報告によればこの減圧表の罹患率は 1%以下であるとされております。ただし、この報告は米海軍安全センターに自動的に集められた記録に基づくものですから、信頼性に多少の留保が付きます。といいますのは、潜水の指揮官は安全性の見地から実際には一段と慎重な減圧スケジュールを取っている可能性があるからです。ともあれ、ヘリウム酸素を用いる潜水では、減圧表の信頼性の意味からも、より細心の注意が必要であるといえます。』

6-3-4 参考：1939年に米国海軍・ヘリオックス減圧表を刊行した
米国海軍・太平洋艦隊・潜水艦部隊 モンセン司令官

Momsen

1/4 ページ



Google / *-1-1" Momsen C.B., Diving, Helium Oxygen

Commander, Submarine Force, U.S. Pacific Fleet



RADM C.
B. Momsen
1951-1953



Charles Bowers Momsen was born in Flushing, Long Island, New York, on 21 June 1896, son of Hart and Susie (Bowers) Momsen. Nicknamed "The Swede," Momsen was in reality of Danish descent. He attended public schools in Washington, DC and St. Paul, Minnesota, before his appointment in 1916 to the US Naval Academy, Annapolis, Maryland, from the Fourth District of Minnesota. As a midshipman he played football and baseball, and during the summer of 1918, served in USS Kansas (Battleship No.21) on Atlantic escort duty during World War I. He was graduated and commissioned ensign on 7 June 1919.

海軍兵学校卒業後 海軍少尉に任じられた

He remained in Annapolis under instruction until September, when he joined USS Oklahoma (Battleship No.37), operating with Division Seven, Battleship Squadron Three, Atlantic Fleet. Detached in June 1921, he reported to the Newport News (Virginia) Shipbuilding Company where USS Maryland (Battleship No.46) was fitting out. He served aboard that battleship from her commissioning on 21 July 1921 until September 1921. Following submarine training at the Naval Submarine Base, New London, Connecticut, he reported in January 1922 as Executive Officer of the submarine USS O-13 (SS-74), based at Coco Solo in the Panama Canal Zone. From June 1923 to June 1927 he successfully commanded the submarines O-15 (SS-76), R-24 (SS-101) and S-1 (SS-105).

He then served a tour of duty at the Design Division of the Bureau of Construction and Repair, Navy Department, Washington, DC. Detached in June 1929, he was ordered to the Submarine Safety Test Unit, aboard USS S-4 (SS-109), a floating laboratory. During this period, which ended in September 1932, he was engaged in the design of a submarine escape breathing apparatus, later known as the "Momsen Lung." For this development, he was awarded the Distinguished Service Medal, with citation which states in part:

"During the early stages of its (the Lung's) design and development (he)...courageously, repeatedly and voluntarily risked his life in conducting experiments of a nature such that there was little or no information available as to their probable results. In the later tests of the device, when escapes were made from USS S-4 submerged to depths as much as 206 feet, he was not only the first person to venture the escape but also the leading and guiding spirit in all subsequent ones..."

Between September 1932 and March 1934 he was assigned to the Submarine Base, Pearl Harbor, and for ten months thereafter he had sea duty as Engineering Officer of USS Oglala (CM-4).

Detached from that minelayer in January 1935, he reported the following month as Executive Officer of submarine tender USS Canopus (AS-9), a unit of Submarine Squadron Five. In February 1936 he was transferred to the light cruiser USS Augusta (CL-31) for services first as Engineer Officer, and later, as First Lieutenant and Damage Control Officer.

In August 1937 he reported as Officer in Charge of Experimental Diving at the Navy Yard, Washington, D.C. While there, he helped develop a new set of decompression tables and supported proposals for the use of a helium and oxygen air mixture in deep diving operations. He also assisted in the successful salvage and rescue of crew members from the submarine Squalus after she sank in approximately two hundred and forty feet of water off the Isle of Shoals in May 1939. For especially creditable and outstanding performance of duty during this operation, he was commended by the President of the United States and the Secretary of the Navy.

After assuming command of the cargo ship USS Sirius (AK-15) in September 1939 he remained there until October 1941 when he was detached for duty in the Fourteenth Naval District, Pearl Harbor, T. H. Momsen remained there in connection with war operations after the Japanese attack on 7 December 1941, and in July 1942 was designated as Assistant Chief of Staff and War Plans Officer, to the Commander Hawaiian Sea Frontier. In February 1943 he reported as Commander Submarine Squadron Two, and in November of the same year transferred in like capacity, to Submarine Squadron Four. For his special contributions to submarine warfare from February 1943 to June 1944, he was awarded the Navy Cross, the Legion of Merit, and a Gold Star in lieu of a second Legion of Merit, with Combat "V." The citations follow, in part:

Navy Cross: "For extraordinary heroism as Commander of a Coordinated Attack Group of Submarines operating in the enemy Japanese-controlled waters of the East China Sea. A master of submarine warfare, (he) evolved a doctrine of attack whereby submarines could be organized into an attack group capable of operating deep in enemy-controlled waters while maintaining full striking power...The submarines under his command sank five Japanese ships totaling over 38,000 tons and damaged eight ships totaling 63,000 tons..."

Legion of Merit: "For exceptionally meritorious conduct...as Commander Submarine Squadron Two...With unfailing patience and a careful analysis of the faulty performance of submarine torpedo exploders which resulted in an alarming number of duds occurring in attacks by submarines of this force, (he) personally supervised an investigation to determine the weaknesses of the exploder then in use and, correlating his own ideas with those submitted by others, succeeded in developing a vastly improved exploder which insured efficiency of our submarines in subsequent actions. During one experimental phase of the program when a war shot torpedo fired into a cliff failed to explode, he unhesitatingly, and at great risk of life, entered the water and assisted in the recovery of this live torpedo for further examination..."

Gold Star in lieu of Second Legion of Merit: "For...outstanding services...as Commander Submarine Squadron Two from February to November 1943, and as Commander Submarine Squadron Four from November 1943 to May 1944, with additional duty as Chief of Staff, Commander Training Command, Submarine Forces, United States Pacific Fleet, from November 1943 to April 1944...(He) was responsible in a large way for the success of Squadron Two and Four in completing many war patrols in enemy waters and in sinking many thousands of tons of hostile shipping..."

Between June and December 1944, he had duty in the Office of the Chief of Naval Operations, Navy Department, and when detached he assumed command of USS South Dakota (BB-57). Under his command, that battleship took part in operations against Japan, attacking enemy installations in the area of Tokyo. "For exceptionally meritorious conduct...as Commanding Officer of USS South Dakota...from December 1944 to August 1945..." he was awarded a Gold Star in lieu of the Third Legion of Merit, with Combat "V." The citation states that he "contributed in a large measure to the infliction of serious damage upon enemy forces and shore installations, and effectively directed his

ship in numerous air actions and several bombardments of enemy shore defenses including the first Naval bombardment of the Japanese main island of Honshu."

He also received a letter of commendation from the Commander Fifth Fleet, with authorization to wear the Commendation Ribbon and Combat "V," for outstanding service while in command of USS South Dakota during the support of the assault operations on Okinawa from 14 March to 14 May 1945.

When relieved of the command of South Dakota in July 1945, he was assigned to Headquarters, Commander in Chief, United States Fleet, at the Navy Department, Washington, DC, to prepare for the invasion of Japan, scheduled for April 1946. After the Japanese surrender on 2 September 1945, he was ordered to duty as Administrator, US Naval Shipping Control Authority for Japanese Merchant Marine, concerned with repatriation of Japanese civilian and military personnel. He was awarded the Distinguished Service Medal by the War Department, and cited as follows:

"(He) performed exceptionally meritorious and distinguished service in Japan from November 1945 to October 1946. He directed the shipping of the Japanese Civilian Merchant Marine in repatriating nearly six million people. He provided for the proficient training of Japanese crews, and resourcefully integrated United States and Japanese shipping into an effective organization which insured the safe and expeditious return of millions of displaced persons to their homes..."

司令官

On 15 October 1946, he became Commandant of the Naval Operating Base, Guam, Marianas Islands, continuing to serve as such until January 1947, when he joined the staff of Commander, Marianas Islands as Chief of Staff and Aide. After his return to the United States, he was a member of the General Board, Navy Department, from June 1947 to May 1948, and for three years thereafter served as Assistant Chief of Naval Operations for Undersea Warfare, Navy Department.

On 21 May 1951 he reported as Commander Submarine Force, Pacific Fleet, in which assignment he served for two years. On 2 June 1953 he was sent to Boston, Massachusetts to be Commandant of the First Naval District, with additional duty as Commander Naval Base, Boston, and Commander Naval Base, Portsmouth, New Hampshire. In April 1945 he was designated Commander Joint Task Force Seven, and continued to serve as such until relieved of all active duty pending his retirement, effective 1 September 1955.

In addition to the Navy Cross, the Distinguished Service Medal (Navy), the Distinguished Service Medal (Army), the Legion of Merit with two Gold Stars and Combat "V," and the Commendation Ribbon with Combat "V," Vice Admiral Momsen received the World War I Victory Medal, Escort Clasp; the American Defense Service Medal, Fleet Clasp; the Asiatic-Pacific Campaign Medal; the American Campaign Medal; the World War II Victory Medal; Navy Occupation Service Medal (Asia Clasp); National Defense Service Medal; and the Philippine Liberation Ribbon with one bronze star.

Vice Admiral Momsen was married on 18 December 1953, to Mrs. Anne I. Schmidt of St. Petersburg, Florida. He has two children by a former marriage, Commander Charles B. Momsen, Jr., USN (US Naval Academy Class of 1942); and Mrs. Evelyn Momsen Hailey.

On 1 September 1955 he was transferred to the Retired List of the US Navy, and was advanced to the rank of Vice Admiral on the basis of combat awards.

After retirement, he served as a consultant to several corporations including General Dynamics, Raytheon, and US Rubber.

Charles B. Momsen, aged 70, died of cancer on Thursday, 25 May 1967, at Bay Pine Veterans Hospital in St. Petersburg, Florida.

6-4 加減圧要領

6-4-1 1975年版の加減圧要領

U.S.N. Diving manual : Helium-oxygen surface supplied decompression tables 14..5 の翻訳

surface supplied diving : 船上他給気式潜水 (船上から呼吸ガスを供給して行う潜水)

単位換算 : 翻訳は原文表示 fsw のままとした。33fsw(feet sea water)≒ゲージ圧 0.1MPa

≒1.0kg/cm²≒2.0atm (絶対気圧)

分圧減圧表 (partial pressure decompression tables) ともいわれるヘリウム・酸素船上他給気式減圧表は、頭部を硬い装置で覆った (通称 : ヘルメット潜水) 循環方式や船上他給気開放方式あるいはデマンドタイプ (息の吸いこみ量に応じて給気可能な水中呼吸装置) 呼吸方式の深い潜水で用いられる。これらの減圧表は広範囲の酸素濃度に応じたヘリウム・酸素混合ガスを可能にする。

1) 酸素限界

訳注) 原文 : 14.5.1

供給ガス中の通常酸素最小濃度は 16%とする。これは低酸素症 (酸素欠乏症のこと) 進展なしに船上呼吸を可能にする最低レベルである。酸素最大許容濃度は酸素中毒の危険により抑制され、実行された潜水深度や滞在時間次第である。提供された混合ガスで体験が予想される酸素分圧や曝露時間は次の表に示す限界を超えてはならない。

種々の条件での酸素濃度計算には次の 3 式が役立つ。

14.1 式 : 酸素混合比指定での最大深さ

$$= \{ (\text{大気での限界酸素分圧}) \times 33 / \text{小数表示の酸素\%} \} - 33$$

14.2 式 : 深さ指定での最大酸素%

$$= \{ (\text{大気での限界酸素分圧}) \times 33 / (\text{深さ} + 33) \} \times 100$$

14.3 式 : 大気での効果的な酸素分圧

$$= (\text{深さ} + 33) \times (\text{小数表示の酸素\%}) / 33$$

酸素分圧許容限界

通常作業 特別作業

曝露時間	最大 酸素分圧	曝露時間	最大 酸素分圧
30 分	1.6atm	30 分	2.0atm
40 "	1.5 "	40 "	1.9 "
50 "	1.4 "	60 "	1.8 "
60 "	1.3 "	80 "	1.7 "
80 "	1.2 "	100 "	1.6 "
120 "	1.1 "	120 "	1.5 "
240 "	1.0 "	180 "	1.4 "
		240 "	1.3 "

2) 不活性ガス分圧 (訳注 : 原文・14.5.2)

実際の潜水深度の代わりに不活性ガス分圧を用いることは船上他給気方式空気減圧とヘリウム・酸素減圧方法における主な相違である。どの深さやどの滞在時間曝露からの減圧も人体による不活性ガス吸収に制約を受けるので、混合ガスの不活性成分分圧が減圧プロフィール (減圧様式) をつくる。この原理に基づき船上他給気方式ヘリウム・酸素潜水用の一連の減圧表が開発された。各表は潜水深度で呼吸する混合ガスの不活性ガス分圧 (fsw 表示) に対して減圧手順を提示する。

適切なヘリウム・酸素 (以降、He-O₂ と略称) 減圧表の選択は、He-O₂ 分圧表の使用あるいは直接計算のどちらでもよい 2 つの方法で行われる。直接計算は最も正確で、かつ最もよく使われる方法である。不活性ガス成分の分圧は (絶対深度 - 酸素分圧) に等しいので、どの酸素%の減

少しでも不活性ガス分圧を増大させる。混合ガス循環ヘルメット方式が使われるとき、混合ガス呼吸中での酸素含有量2%の減少は代謝による消費であり、計算式中に適切な補正係数が盛り込まれねばならない。この補正係数は He-O₂ 分圧表で絶対必要な係数である。もし、非循環方式装置例えば MK1 マスクが使われるとき、補正係数は採用しない。
補正手順は次のものである。

訳注：原文・14.5.2.1

He-O₂ 分圧表の使用

- A. 正確かまたはより次に大きな深度を用いて左端沿いに He-O₂ 分圧表に入る。
- B. 正確かまたはより次に小さな混合ガスの酸素%欄を選択する。
- C. 交点で、使われるべき正確かまたはより次に大きな分圧を読む。

He-O₂ 分圧表の正しい計算

訳注：原文・14.5.2.2

PP 説明の原文

PP=partial pressure in feet of all other gases except oxygen(table designation=partial pressure)

①計算式：PP= (D+33) × [1.00— (O₂—0.02)]

ここに、PP=酸素以外の他の全てのガス分圧 (単位：fsw)
減圧表では「分圧」表示

D=潜水深度 fsw

O₂=酸素%相当の小數

0.02=ヘルメット中での酸素損失 2% (発生するかもしれないロス値)

②例題

設問：深海潜水装置を用いて 290ft.、84%He、16%酸素で 12 分間潜水する場合の適切な減圧計画を決定せよ。

解答：1 a. He-O₂ 分圧表を使用する場合

D=290 と 16%酸素の欄を見ると PP=278 を得る。

この値は「減圧表の分圧欄読み方」で「より次に大きな分圧」に該当する。減圧表では「分圧：partial pressure」280 欄を適用する。

1 b. 計算

PP= (D+33) × [1.00— (O₂—0.02)] = (290+33) × [1.00— (0.16—0.02)]
= 323 × (1.00—0.14) = 277.8 ≒ 278 : 次頁の表の (D=290、16%O₂) 欄に該当
減圧表は、PP=280、[訳注：滞在時間 (BOTTOM TIME) =20 分欄を使用する。]

2. He-O₂ 減圧表の分圧 280 欄と 20 分滞在用いて当該潜水を指揮せよ。

原文記載の He-O₂ 分圧表を次ページに紹介し、その次のページに減圧表の例を紹介する。

訳注) この項は原文の翻訳ではなく、報告者の試算である。

応用：7.5k の計画・84%He、16%酸素で 75 分間の高気圧作業をする場合の適切な減圧計画を決定せよ。ただし、7.5k ≒ 7.5 × 33 = 247.5fsw とする。

計算：PP= (D+33) × [1.00— (O₂—0.02)] 注) マスク呼吸のため補正する。
= (247.5+33) × [1.00— (0.16—0.02)] = 241.3

減圧表適用欄：He-O₂ 減圧表の分圧欄は 240 と 250 がある。PP=241.3 より次に大きな減圧表の分圧欄は 250 である。分圧欄 250 の減圧表から、滞在時間 80 分の欄を抽出して減圧時間を決める。

原文記載の He-O₂ 分圧表

深度
feet

酸素 %

	15	16	17	19	21	23	25	30	35	40	45	50	55
40	64	63	63	61	60	58	57	*	*	*	*	*	*
50	73	72	71	69	68	66	64	60	56	*	*	*	*
60	81	80	80	78	76	74	72	67	63	58	54	*	*
70	90	89	88	86	84	82	80	75	70	64	59	54	*
80	99	98	97	94	92	90	88	82	76	71	65	59	54
90	108	106	105	103	100	98	95	89	83	77	71	64	
100	116	115	114	111	108	106	103	96	90	83	76		
110	125	123	122	119	116	113	111	103	96	89	82		
120	134	132	131	127	124	121	118	111	103	95			
130	142	141	139	136	133	129	126	118	110	102			
140	151	149	148	144	141	137	134	125	116				
150	160	158	156	152	149	145	141	132	123				
160	168	166	165	161	157	155	149	139					
170	177	175	173	169	165	161	157	147					
180	186	184	182	177	173	169	165	154					
190	195	192	190	186	181	177	172						
200	203	201	199	194	189	185	180						
210	212	209	207	202	197	192	188						
220	221	218	216	210	205	200	195						
230	229	227	224	219	214	203	203						
240	238	235	233	227	222	216							
250	247	244	241	235	230	224							
260	255	252	250	244	238								
270	264	261	258	252	246								
280	273	270	267	260	254								
290	282	278	275	269									
300	290	287	284	277									
310	299	295	292	285									
320	308	304	301										
330	316	313	309										
340	325	321	318										
350	334	330	326										
360	342	338											
370	351	347											
380	360	356											

注) *印: 無限圧停止 (減圧停止圧と時間の設定不要)

朱書き数字は大気での酸素分圧換算 1.6、30 分曝露限界を超えている。

1975年版ヘリオックス減圧表の例：表の左側は潜水深度ではなく、分圧である。

HELIUM-OXYGEN SURFACE SUPPLIED DECOMPRESSION TABLE

Lesson51 の試算例

PARTIAL PRESSURE	BOTTOM TIME (MIN.)	TIME TO FIRST STOP (MIN.)	Decompression Stops (Feet)												TOTAL TIME (MIN.)			
			180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70		60	50	40
310	10					0	0	0	7	0	0	2	3	3	5	10	52	
	20					0	0	7	0	0	4	5	6	6	11	10	84	
	30					0	7	0	0	5	5	7	8	9	14	12	96	
	40					0	7	0	3	5	8	8	11	13	18	15	96	
	60					0	7	3	6	7	10	12	18	22	23	16	99	
	80					7	0	6	9	11	12	16	19	23	23	16	99	
	100	5				7	1	9	10	14	17	19	20	23	23	16	99	
	120					7	4	11	12	14	17	19	20	23	23	16	99	
	140					7	5	12	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
	160					7	8	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
	180					7	10	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
	200					7	12	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
	220					8	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
	240					9	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99	
320	10					0	0	0	7	0	0	3	3	3	7	10	54	
	20					0	0	7	0	0	2	4	5	6	7	10	86	
	30					0	0	7	0	2	4	5	7	8	11	15	13	96
	40					0	7	0	1	4	6	7	8	12	15	19	16	96
	60					0	7	0	5	6	9	11	13	17	20	23	16	99
	80					0	7	3	7	9	11	13	17	20	23	23	16	99
	100	5				0	7	5	9	11	13	17	19	20	23	23	16	99
	120					0	7	7	12	13	16	17	19	20	23	23	16	99
	140					7	2	9	12	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	160					7	3	11	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	180					7	5	11	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	200					7	6	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	220					7	7	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	240					7	9	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
330	10					0	0	0	7	0	0	4	3	3	7	10	56	
	20					0	0	7	0	0	3	5	5	6	8	10	10	86
	30					0	7	0	0	4	4	6	7	9	11	17	13	96
	40					0	7	0	4	4	6	7	9	12	16	20	16	96
	60					7	0	2	6	8	9	11	14	17	23	23	16	99
	80					7	0	6	8	8	13	14	19	20	23	23	16	99
	100	5				7	2	7	10	13	16	17	19	20	23	23	16	99
	120					7	4	9	12	13	16	17	19	20	23	23	16	99
	140					7	6	11	13	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	160					7	8	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	180					7	10	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	200					7	12	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	220					9	12	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99
	240					10	12	13	14	15	16	17	19	20	23	23	16	99

U. S. NAVY DIVING MANUAL