

平成16～18年度厚生労働科学研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業  
公募課題番号：H16-労働-一般-009

# 高気圧作業に伴う標準減圧表の安全性評価 のための疫学的調査に関する研究

平成18年度 総括・分担研究報告書

平成19年3月（中間報告）

主任研究者	眞野喜洋（東京医科歯科大学大学院 教授）
分担研究者	山見信夫（東京医科歯科大学大学院 助教授）
	芝山正治（駒沢女子大学人文学部 教授）

# 目 次

第1章 研究の要旨・目的	1
第2章 新しい減圧表の試算	5
1. 基本方針など	5
1-1 基本方針	5
1-2 用語の定義と使用単位	6
1-3 減圧表作成の範囲と作成方針	9
1-4 減圧表作成方法	11
2. 各種減圧表の試算	20
2-1 空気減圧表	20
2-2 ヘリオックス減圧表	41
2-3 ナイトロックス減圧表	57
2-4 船上（空気）減圧表	60
2-5 各種減圧表試算の総括と分析	72
3. 繰返し潜水表	75
3-1. 繰返し潜水表の提案：～0.08MPa以下の管理要領（潜水深度8m以浅）	75
3-2. 基準減圧表における繰返し潜水表の提案根拠	82
第3章 酸素中毒	
1. 高気圧酸素 US Navy Table6における生体内の酸化・抗酸化力の変化	103
2. 食事制限下の高気圧酸素曝露における血漿遊離アミノ酸の変化	104
3. 高気圧酸素曝露によって発生する活性酸素に対する CoEnzyme Q10の抑制作用についての検討	105
4. FREE RADICALS AND ANTIOXIDANT POTENTIAL IN SCUBA DIVER	106
5. 高気圧酸素における血漿遊離アミノ酸の検討	113
6. INDEXES OF OXIDATIVE STRESS DURING HBO TREATMENT	118
第4章 潜水プロフィール調査結果	119
北海道G地区の流氷潜水者	121
公的機関H地区の海洋潜水者	126
海洋潜水I地区の潜水者	132
海洋潜水J地区の潜水者	136

# 第1章 研究の要旨・目的

高気圧作業に伴う標準減圧表の安全性評価のための疫学的調査に関する研究

労働安全衛生総合 研究事業

主任研究者 眞野喜洋 (東京医科歯科大学大学院 教授)

分担研究者 山見信夫 (東京医科歯科大学大学院 助教授)

芝山正治 (駒沢女子大学人文学部 教授)

## 研究要旨

高気圧下作業(潜水および潜函、圧気シールド)に伴う減圧症予防手段として厚生労働省(当時の労働省)は昭和36年に高気圧傷害防止規則を制定し標準減圧表を公表した。以来40年近く経過した後、医学や生理学を始め、減圧アルゴリズムなどの技術革新が生じ、減圧理論についても大幅に進歩している。この間、諸外国ではより安全な減圧表が数多く開発されているが、我が国における現行の標準減圧表は旧態然として科学的な改善や評価がなされていない現状である。

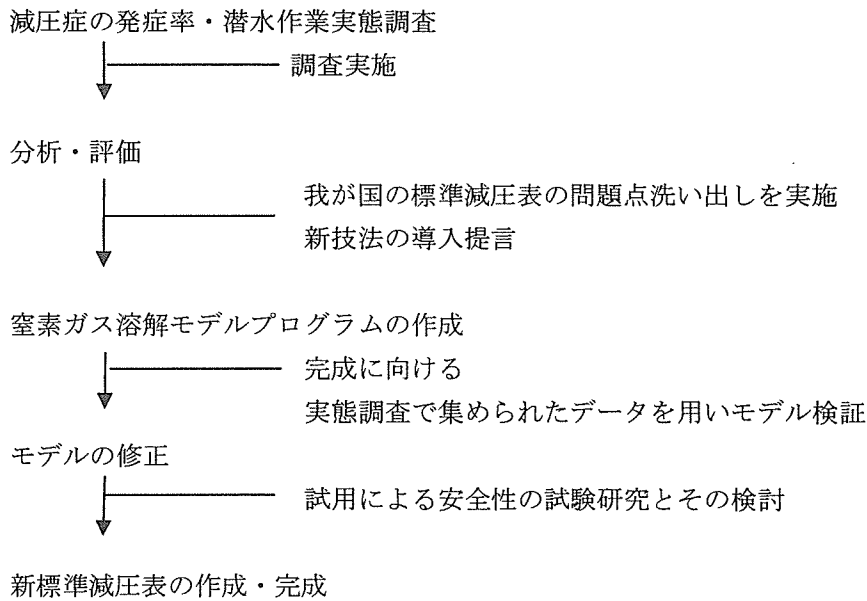
そこで潜水および圧気土木の労働作業現場で、表面に現れにくい減圧症発症の実態を疫学的に調査し、現行の標準減圧表の抱えている問題点や矛盾点を明らかにし、将来的には、諸外国と同様に減圧表改正の必要性について論じられる場合の基礎研究資料として減圧表の改訂ポイントをはっきりさせることが本研究の概要である。

本研究はこれらの問題を解決する上で必要な課題について検討、検証し、現行の減圧表に係わる法規制についても、さらに安全性を高める必須条件を提言したい。

そのための本研究の展開方法として、以下の手順で研究する。

- 1) 減圧症発症要因の分析と発症率の比較
- 2) 潜水および圧気土木作業現場の実態調査
- 3) 日本と欧米先進国で使用している標準的減圧表の比較を行い、これに基づく、我が国の減圧表における問題点の洗い出し
- 4) 高圧則の標準減圧表別表第1、2(圧気・潜水業務用)の評価と問題点の洗い出し
- 5) 酸素減圧の有用性検討
- 6) 窒素ガス溶解モデルプログラム作成(減圧症発症率検証)
- 7) 高分圧酸素と活性酸素との関係(作業及び酸素減圧に伴う生体への影響)
- 8) 減圧表の作成

高気圧作業安全衛生規則およびそれに係わる労働安全衛生法ならびに労働安全衛生規則の改訂の為の基礎資料を策定するために次の通り実施した。



## 研究の目的

平成16年に当研究室が関わった高気圧業務の中で、潜水で2件の死亡事例を経験した。一昨年  
の3件の死亡事例と併せて5件の死亡事例をこの2年間で遭遇し、少なく共この中の3件は現行の  
法整備が不備だったことに起因した事例と言え、全容はまだ明らかではないが、早急に規則改正  
の必要がある。その最大の理由は法で定めた減圧表の不備が根幹にあるといえる。

現行の標準減圧表は、どのような減圧理論に基づく数式によっているかが全く不明で減圧表作  
成の意図があいまいであり、厚生労働省として、減圧表作成モデルの基本的な理論式をも把握し  
ていないという不可思議な減圧表であることが、近年明らかにされた。

そこで、現在最も妥当と思われる減圧理論に照らして、この標準減圧表を評価することが研究  
の目的である。

今まで特に圧気土木作業で減圧症が多発していた理由を単に作業労働者が減圧表を遵守しな  
いからとの一言で片づけられてきた経緯は労働安全衛生法に基づいた高気圧作業安全衛生規則  
によって標準減圧表別表1および2が公表された直後であるならまだしも公布後40年も経過し、  
圧気工事施工者側の安全に対する認識が徹底されている今日、一方的な判断に依ると言えなくも  
ない。この際基本に戻って、詳細な疫学調査を行い厚生労働省で公布している現行の標準減圧表  
の見直しをすることが必要不可欠であり、現行標準減圧表を科学的に分析し減圧症発症予防の立  
場で正しく評価することが、今後の高圧環境下で従事するダイバーや圧気土木作業者の減圧症罹  
患率の大幅な減少ならびに死亡事故の予防ができると共に骨髄損傷などの後遺障害認定者  
や、標準減圧表施行当時は全く考慮されていなかったが、現在数百人以上は存在すると思われ  
る慢性減圧症としての無菌性骨壊死発症率の著しい改善を計ることが可能であると期待できる。

これによって、少なく共、重症減圧症の予防、骨壊死の予防ならびに急性減圧症による死亡を  
避けなければならない。従来から標準減圧表の改正が叫ばれていたが、それが実行されずに平成  
15年、4月、5月、9月ならびに平成16年9月、10月と立て続けに高気圧業務による、5件の

死亡事故が発症してしまった。これらの事故を予防するために、早急な対策が望まれる。

## 第2章 新しい減圧表の試算

### 1. 基本方針など

#### 1-1. 基本方針

本章では、以下に示す理由によりホールデン理論に基づいた減圧表を作成する。減圧表の様式は「階段方式」減圧の採用、すなわち高圧則・減圧表が採用している一定の減圧停止圧に一定時間とどまって体内に蓄積した不活性ガス排泄を行ってから、次の減圧停止圧に移行する方式を採用し、減圧制御は、公開されている M 値を活用する。

最後に、作成された減圧表に対して欧米諸国の減圧に関する留意点をも追補することで、本邦減圧表の「あるべき姿」を提言する。

本章で作成する減圧表は数例の紹介にとどめ、一部の減圧要領について函数電卓使用によって計算した計算書例を添付することにする。作成に必要な知見は平成 17 年度報告書に網羅されているので、本実施計画書におけるそれらの紹介は省略する。

#### \*\*\*ホールデン理論採用の理由

- ① 高気圧作業安全衛生規則の別表一第一及び別表一第二（以降、高圧則・減圧表と略称）はホールデン理論を採用していると推測される（明確に解説した報告書がないので「推測と表現」）。しかしながら、ホールデン理論の微分方程式とその解に、人体組織の半飽和時間 120 分を適用することで、高圧則減圧表の「体内ガス係数」が再現試算でき、推測はおおむね正しいともいえる。この減圧表を用いた減圧症発症データが多数存在するので、新たな考え方の評価に利用できる。
- ② APEC（アジア太平洋経済協力）加盟国の米国やカナダの潜水における減圧表はホールデン理論を基にしており、それを適用した実務潜水は減圧症発症が少ないという高い評価を受けている。米国・国務省・大気環境局（略称・NOAA）の減圧表は市販されており、米国・ハミルトンリサーチ社の減圧プログラム DCAP を用いて作成され、米国をはじめとする潜水関係民間研究者の間で広範囲に利用されている。  
DCAP の詳細は公開されていないが、ホールデン理論が適用されている。これに類似した方法で減圧表を考えることは、APEC 加盟国間での将来の潜水技術相互承認においても相手国に日本の減圧要領が容認される要素を含む。
- ③ 旧労働省（現・厚生労働省）は平成 4 年度から 6 年度にかけて、「混合ガス利用における圧気潜函工法健康障害防止に関する調査研究」を建設業労働災害防止協会（略称：建災防）に委託した。建災防は、有識者で構成した調査研究員会を編成して調査研究を実施した。そこでまとめられた報告書は、酸素やヘリウムの管理値を勧告している。これらの記述内容を、「(仮称) 建災防ガイドライン」と呼ぶことにする。同・報告書は、減圧アルゴリズム解説を除いて前述の減圧プログラム「DCAP」を用いた試算減圧表例（実験減圧未済）の記載と理論構成の概要のみを紹介している。しかしながら、具体的な数値計算試算を本業務において行うことは、幅広く活用されている DCAP の考え方を一端を窺うことができ、それが減圧表作成の留意点を示唆してくれる。
- ④ 試算減圧表の評価  
作成したヘリオックス減圧表はホールデン理論を適用しているため、同じ理論で減圧表を開発し、成果を実現場検証した実績のある海外の有識者に評価を依頼する必要がある。

## 1-2. 用語の定義と使用単位

### 1-2-1 定義する理由

高気圧作業の労働安全衛生管理は、労働安全衛生法（略称「安衛法」）、労働安全衛生法施行令（略称「安衛令」）、労働安全衛生規則（略称「安衛則」）、高気圧作業安全衛生規則（略称「高圧則」）、酸素欠乏症等防止規則（略称「酸欠即」）等を適用して実施され、そこで用いられている用語や単位が使われる。一方では、法令用語などが常用漢字にない用語のため、高気圧作業を伴う土木工事などの事業主体（国や地方自治体など）は、各種作業や装置の名称等に法令と同じ「意味をもつ」が別の名称をつけた用語を使っている。さらには海外の情勢、例えば EC 諸国では、高気圧作業を伴う英国の土木工事にドイツ連邦の施工業者が参入する場合、ドイツ連邦の高気圧管理要領を英国で適用可能にする「相互承認」が実現している。将来は、APEC 諸国間でもこのような高気圧作業関連の相互承認協議が進み、相手国での本邦減圧表使用などの実現が予想される。それで、本邦特有の高気圧作業関連用語を整理するとともに、以上の状況を認識して最初に用語の英語表示、記号、単位の統一などを試みた。

### 1-2-2 本業務で用いる高気圧作業関連特殊用語の定義の例

- ① ニューマチックケーソン(英・pneumatic caisson)：高圧則（法令）でいう「潜函」のこと。漢字の「函」が常用漢字に指定されていないため、一般の公文書などではニューマチックケーソンが用いられている。
- ② 潜鐘(diving bell または traveling caisson)：法律用語。移動式のニューマチックケーソン作業室のこと。水底工事でニューマチックケーソンと同様の作業室を作業用台船で吊って水底に降ろし、作業室内に圧縮空気を送り、高気圧作業を行う。往時の岸壁建設の掘削や石積みなどに用いられた。岸壁上面が水面まで到達すると、潜鐘を次の施工位置に移動させて同様の作業を継続して長い岸壁をつくる。作業室底面以深の掘削も少なく、沈設固定することはない。作業室直上はコンクリート製の天井とバラスタンの水槽で構成され、水槽に水を入れて水底沈設状態を保ち、圧縮空気をを用いて水槽から水を吐出させて浮上させる。軽くなった作業室は台船で吊って容易に移動できる。
- ③ エアロック(air lock)：法令用語の「気閘室」のこと。掘削土砂を運ぶ材料ロックとしてマテリアルロックともいう。「閘」の漢字も常用漢字にない。通常のマテリアルロックには、作業員の減圧状況を観察できる「のぞき窓」は設けられていない。  
圧力の異なる環境を連絡するために2重扉を設けた気密室。
- ④ マンロック (man lock)：作業員の加減圧専用エアロックで「のぞき窓」を装着。
- ⑤ 高圧下用呼吸器 (emergency respirator for compressed air working)：呼吸ガスとしてナイトロックスを成分とし、高気圧作業の非常時に使用することを目的として製作された呼吸器。最高使用圧力 0.4MPa、ボンベへの充填ガス要領から使用可能時間約 30 分クラスが設定されている。メーカーの製品名称・登録商標である。
- ⑥ ヘリオックス (heliox)：ヘリウム・酸素を成分とする呼吸ガスのこと。
- ⑦ トライミックス(trimix)：ヘリウム・窒素・酸素を成分とする呼吸ガスのこと。
- ⑧ ヘリウム混合ガス：ヘリオックスとトライミックスの総称。
- ⑨ 酸素減圧 (oxygen decompression) とエアブレイク (air break)：減圧時に体内に残留している不活性ガス排泄を促進させるために酸素毒性が人体に影響を与えない範囲で

100%酸素を吸入させる減圧要領のこと。一般に、減圧停止圧 0.12MPa から吸入を開始する。長時間の酸素吸入は肺活量に影響を与えるので、25 分の後に 5 分間空気を呼吸させ、影響を抑える。これらを交互に行いながら所定の減圧を終える。途中で挿入する空気呼吸のことをエアブレイクという。

- ⑩ 繰返し潜水表：高圧則は圧力 0.1MPa（水深 10 msw 相当圧力）以下の潜水、あるいは高気圧作業において、減圧停止不要の管理要領を明記している。しかしながら、この規模の高圧空気呼吸により、体内溶存窒素の蓄積すなわち窒素分圧が増大していくので、高気圧環境暴露が長時間あるいは異なる圧力区分での暴露、しかも複数回の暴露と減圧に対しては減圧症発症の可能性を秘めており、管理基準が要求される。既にその基準が減圧停止不要潜水管理用「繰返し潜水表・例：No-decompression dive table, U.S.Navy dive table 3」等として設定、運用の指導が行われている米国やカナダの潜水の考え方を踏襲して当・調査研究が提案する日本版・繰返し潜水表をいう。
- ⑪ (仮称) 建災防ガイドライン (temporary name・Mixture gas guideline by Contractor's disaster prevention association guide line あるいは A proposal of a guideline for mixture gas by CDPA)：旧労働省（現・厚生労働省）は平成 4 年度から 6 年度にかけて、「混合ガス利用における圧気潜函工法の健康障害防止に関する調査研究」を建設業労働災害防止協会（略称：建災防）に委託した。建災防は、有識者で構成した調査研究員会を編成して調査研究を実施した。そこでまとめられた報告書は、酸素やヘリウムの管理値を勧告している。これらの記述内容を、「(仮称) 建災防ガイドライン」と呼ぶことにする。同・報告書は米国・ハミルトン社の減圧プログラム「DCAP」を用いた試算減圧表例（実験減圧未済）の記載と理論構成の概要のみを紹介しているものの、減圧アルゴリズムは紹介していない。すなわち減圧表作成の考え方が「ブラックボックス化」している。本業務では、DCAP とは別に独自に考案した考え方を基に、減圧表を作成し、その考え方を解説する。
- ⑫ ボトムガス：高気圧作業で呼吸する空気または混合ガスの総称
- ⑬ ボトムタイム：高圧下の時間のことで、加圧開始から減圧開始までの時間をいう。
- ⑭ 標準作業時間 510 分：作業員の一日の作業パターンを以下のように考える。午前 8 時から朝礼、作業準備を行い、8 時 30 分から高気圧作業を開始する。その後休憩 60 分間をはさんで、1 日の作業を完了し、現場を退場するのは午後 5 時である。よって午前 8 時 30 分から午後 5 時までを標準作業時間 510 分と定義し(休憩を除くと 450 分)。この時間に一日の高気圧作業を完了するのを標準とする。
- ⑮ M 値：次の減圧停止圧へ移行できる体内溶存不活性ガス分圧のこと。
- ⑯ 酸素耐性単位 OTU・Oxygen Tolerance unit あるいは oxygen toxicity unit：酸素毒性を評価する単位としては、肺酸素中毒酸素暴露単位 UPTD (the Unit Pulmonary Toxicity Dose) が有名であるが、UPTD の考え方が提起された後に、酸素中毒を避けるのではなく、潜水における数回、3 日以上あるいは長時間の酸素暴露管理を対象に UPTD と同じ計算式を用いて人体の酸素耐性を評価する考え方すなわち指標が導入された。そこで管理する酸素暴露量を OTU と呼んでいる。本邦では UPTD の用語の使用が一般的であるが、Dr. Hamilton らの参考書（ベネット&エリオット 5 版）の 10.2 Decompression practice は区分して使用している。

$$OTU = t \times \{(PO_2 - 0.5) / 0.5\}^{0.83}$$

計算式としてはほぼ同じである。ただし  $PO_2 \leq 0.5 \text{atm}$  では酸素暴露の影響無し (OTU



を計算しないことと解釈)とする点が UPTD との違いである。その分圧範囲の酸素暴露の影響規模は、明確な症状が発症しない程度で、酸素中毒で障害を被った肺組織であっても回復するといわれている。指数 0.83 は肺活量減少実験データに最も近似している値として決定された。今回の報告ではこの OTU を酸素毒性を図る指標とする。

- ⑰ スプリットシフト：split shift・交替勤務のこと。通常の高気圧作業は高気圧環境における掘削機械などの直接操作を意味し、スプリットシフトは1日の所定労働時間内で休憩を挟んで行う通常の高気圧作業をいう。その場合の休憩時間は、本書では120分を標準とする。
- ⑱ 機械等メンテナンス及び修理：通常の高気圧作業と異なり、掘削機械等のメンテナンスや不測の事態で掘削機械等が故障した場合にそれらの修理に従事する作業をいう。

### 1-2-3 使用単位

圧力：MPa または kPa・ゲージ圧、msw(meter of seawater)・ $0.1\text{MPa} \doteq 10.0\text{ msw}$   
様々な標記があるが、本書では潜水でもよく使われる msw を標準とする。

分圧：atm 絶対気圧。 $1.0\text{atm} = 1013\text{hPa} = 1.0\text{ata} = 1.0\text{ATA} \doteq 10\text{ msw} \doteq 33\text{ fsw}$  ともいう。ゲージ圧1気圧 $\doteq 0.1\text{MPa} \doteq 10\text{ msw} \doteq$ 絶対圧力20 msw

### 1-3. 高気圧作業用減圧表作成の範囲と作成方針

#### 1-3-1 高気圧作業の概要

高圧則の別表第一や第二は1日当たり複数回の高気圧作業従事を容認している(いわゆるスプリットシフト: split shift・交代勤務)。しかし、欧州における高気圧作業関連法令では労働者の健康管理面から、このような勤務体制を容認していない。日本の将来の減圧表が国際的な評価を得るためにも、通常の掘削作業ではスプリットシフトを容認しない、すなわち1日1回当たり高気圧作業従事の管理要領を示すことにし、それらを意識した減圧表を作成する。高気圧作業実施の圧力適用範囲は最高圧力0.88MPa(90msw)までとし、その中間の呼吸ガス適用等は表1-1に従うこととする。なお、「機械等メンテナンス及び修理」で、技術者や作業員が短時間(120分程度以下/回)の1日2回の高圧下滞在を行うことは、圧力20msw程度以下で容認する。

表 3-1 高気圧作業圧力区分

最高作業圧力区分	高圧下の呼吸ガス	作業シフト	その他
30msw	空気	機械等メンテナンス及び修理における1日2回の高圧下滞在は容認(20msw以下で短時間)。潜水は繰り返し潜水表で複数回実施が可能とする。	
30~35	空気 or ヘリウム混合ガス	1回/日限定	酸素減圧
35~40	ヘリウム混合ガス推奨 helioxは80%He trimixは施工者選択可	1回/日限定	作業員昇降エレベーター設置義務
40~50 50~70 70~90	heliox80%標準適用 heliox85% 同上 heliox88% 同上 trimix 使用施工者選択可	1回/日限定	

#### 1-3-2 空気減圧表

空気呼吸による高気圧作業を行い、減圧中は減圧停止圧0.12MPa(12msw)から酸素吸入25分とエアブレイク5分を交互に連続して行うことで、体内残留窒素の排泄を促進させる。なお、酸素吸入時の窒素分圧低下計算における吸気ガス組成は80%O<sub>2</sub>、20%N<sub>2</sub>を想定する。これは酸素吸入用マスクの特性が特定できないことによる。なお、減圧中の酸素吸入は標準とするので、酸素吸入が不可能になる不測の事態を想定して、空気呼吸のみで減圧完了まで行なう場合の減圧表も試算する。

高圧則では業務終了後ガス圧減少時間で減少させる体内不活性ガス分圧(PN<sub>2</sub>のこと)の規模を規定していたが、本検討では、少なくとも翌日の高圧下滞在開始(加圧開始)までに0.8ATA=8mswとなって、連日の高圧下滞在あるいは潜水を可能にするような作業気圧、高圧下の時間の組合せを求める。

1日2回作業の場合は、次の加圧開始まで120分間待機することを原則として1日2回作業の可能性を検討する。

### 1-3-3 ヘリオックス減圧表

減圧開始初期は高圧下滞在時と同じ成分の呼吸ガスを呼吸し、圧力0.3MPa(3msw)まで降下した段階で、減圧室内の環境ガス（高圧空気）呼吸に切り替えて、最初の減圧停止圧まで降下して減圧低時間を過ごす、減圧を継続して減圧停止圧0.12MPa(12msw)に到達した段階で酸素吸入とエアブレイクを交互に行う。現場実証試験は行わないので、安全側にヘリオックス減圧表が作成されるようにPHe計算要領を独自に工夫する。例えば、実滞底時間の計算上割り増し考慮やボトムガスから空気吸入への移行時のガス成分仮定などである。

なお、空気減圧の場合と同様に、酸素吸入が不可能な場合や、本来ヘリオックス呼吸していなければならぬ段階でヘリオックス吸入が不可能になった場合を想定した減圧表の試算も行う。すなわち、以下のような場合を考える。

- ・ヘリオックス減圧表A：正常条件での減圧表
- ・ヘリオックス減圧表B：ヘリオックス吸入は不可だが、酸素吸入は可の場合
- ・ヘリオックス減圧表C：ヘリオックス吸入も酸素吸入も不可の場合

### 1-3-4 ナイトロックス減圧表

32%O<sub>2</sub>、68%N<sub>2</sub>のナイトロックスを適用した減圧表を作成する。計算は2つの方法で可能である。一つは等価空気潜水深度で空気減圧表を換算する方法で、他方はM値を用いて直接計算する方法である。本調査研究で空気減圧表が作成されるので、前者によるナイトロックス使用時の減圧は換算要領紹介にとどめる。酸素成分は、ナイトロックスの適用最高圧力を0.4MPa(40msw)としたとき、吸入する酸素分圧が1.6 ATA以下に設定するために選定した。なお、高気圧作業におけるナイトロックス使用は高圧下呼吸器使用時に限定されるので、2次災害予防の面からナイトロックス減圧表は適用せず、空気減圧表使用に限定する。高圧則における現在の適用要領に従う。

### 1-3-5 船上減圧表（空気減圧表）

船上減圧とは、潜水作業において、水中での減圧が荒天により正確な減圧停止深度を保つことが困難な場合や長時間の減圧を水中で過すことの様々なリスクを回避するために、米国海軍などで使われる減圧方法である。具体的には、水深12mまでの減圧停止を行った後、一気に水面まで浮上してできる限り早く船上のチャンバーに入り、12mswまで空気加圧してから酸素吸入して一定時間を過し、その後大気圧まで減圧するというものである。現行の高圧則では認められていない。また、高気圧作業では行わない。

### 1-3-6 繰返し潜水表

米国海軍の繰返し潜水表は深度 0.3～10.0 msw の潜水を対象として、120分組織に蓄積する窒素の飽和度約 98.4%を飽和と見做して計算していることがわかった。日本版・繰返し潜水表は、米国海軍の考え方を踏襲するが、U.S.N.潜水表の数値再現不可の箇所を除いた深度範囲 0.5～8.0msw、深度刻み 0.5msw で考えることにする。なお、上限を 8.0 msw としたことは、この圧力滞在本邦高気圧作業において減圧症発症事例があったことと、骨壊死発症が報告されていることから注意を喚起する目的で設定した。繰返し潜水表は「繰返し潜水作業管理表」と「残留窒素時間表」で構成するが、前者を「RDT：Repetitive dive table」、後者を「RNNT：Residual Nitrogen Timetable」と略称することにする。

## 1-4. 減圧表作成方法

### 1-4-1 計算理論紹介（不活性ガス分圧計算）

高圧則別表第一に示される体内ガス圧係数は、ホールデン式に人体組織の半飽和時間 120 分を用いて再現試算できることがわかっている。一方、(仮称) 建災防ガイドラインの試算減圧表は米国・ハミルトン社の減圧プログラム DCAP を用いたことと、その構成はホールデン式を用いていることが報告されている。そこで、本業務の計算理論もホールデン理論を踏襲することにし、高圧則が採用したと推測される人体組織の窒素に対する半飽和時間最長 120 分よりも長い半飽和時間で作成することにする。これは、減圧症発症予防のために、より長い半飽和時間を想定することで、人体組織内の残留窒素分圧の挙動を把握し、それを減圧要領に反映させることができるからである。

#### (1) 復習：生理学面から見た酸素と不活性ガスに関する知見の要約

この章対象の読者は初めて生理学に接して本調査研究の減圧表作成業務支援（主に計算実施）に取り組む技術者で、計算過程において計算チェックを行うときの参考になるようなテキストとして整理しており、既に理解している読者は飛ばしてもかまわない。

\*\*\*\*\*

高圧下に暴露された生体は呼吸ガスに含まれる水蒸気、酸素と不活性ガスが生体組織内に溶解していく。ここでは以下の事項を念頭において論を進めることにする。

- ①水蒸気や微量な不活性ガスの影響は無視し、酸素と主な不活性ガスに着目する。
- ②溶解の程度は主に呼吸ガスの圧力、圧力滞在時間、温度に依存するが、温度の影響は無視する。
- ③酸素は不活性ガスと結びつかないので、それらの挙動は酸素を分離して考える。すなわち、酸素はそれ特有の性質を反映させて管理し、不活性ガスは人体各組織それぞれに溶解する分圧規模で管理する。

呼吸ガスの生体組織内溶解の最初は肺で行われ、酸素と不活性ガスは血液に溶解し、それらは心臓経由で動脈血管内血液により生体組織各部に動脈で運ばれる。組織各部において生体の生命維持に必要な酸素は生体組織内の新陳代謝で消費されて常に補充されている。酸素が消費されると炭酸ガスが発生し、それは血液に溶解したまま静脈で運ばれて肺（肺毛細血管が酸素と炭酸ガスの交換）を通じて呼気となって体外に排泄される。この循環は約 90 秒で行われる。

次に、酸素の挙動と分離して不活性ガスについて考えることにする。

呼吸ガス成分、呼吸ガス圧力と保圧時間に応じて、呼吸ガス中の不活性ガスが血液に溶解し、水分を保持した体内組織に到着する。血液への溶解程度は呼吸ガス成分、呼吸ガス圧力と保圧時間で間接的に代表させることができる。体内組織の圧力が血液の圧力より低いと血液の不活性ガスが体内組織内に溶解していくが、酸素のように新陳代謝で補われないので、圧力変化がないと不活性ガスが生体組織に蓄積していく蓄積程度は生体組織内の不活性ガス分圧であらわすことができる。ホールデンは、この状態において呼吸ガスが血液に速やかに溶解し、さらに血液内のガスが速やかに組織に移行すると仮定してホールデンの微分方程式を誘導した。圧力変化のない状態が長時間に及ぶと、呼吸ガス成分、呼吸ガス圧力と保圧時間に応じて不活性ガスが生体組織内へ溶解できる限界に到達する。これを飽和状態といっているが、到達時間が長いので、飽和の半分の時間・半飽和時間であらわすことにしている。その値は生体組織によって異なると想定しており、想定は特定の生体組織を指定せず、大雑把な区分にしている。また、その値は研究者によって異なる。

呼吸ガスの圧力が減圧により低下すると、それに応じて時間差はあるものの血液内の不活性ガス分圧も低下し、そのことが生体組織内に蓄積された不活性ガス分圧との間に圧力差を生じさせて不活性ガスの血液内排泄を惹起・促進させる。このような排泄規模は呼吸ガスの圧力変化に応じた不活性ガス分圧の変化量として計算できる。飽和の状態から比較的急激に呼吸ガスの圧力を低下させると、低下させた圧力で溶解できる規模の不活性ガス分圧より大きな値で残る生体組織がでてくる。このように残存不活性ガス分圧が呼吸ガスの不活性ガス分圧より大きい状態を過飽和といっている。過飽和の規模すなわち過飽和値は、両者の差で表される。不活性ガス分圧はガスの種別固有の値で計算され、単独で過飽和値を求めることができる。呼吸ガスの圧力を  $P = P_{pi} \cdot amb + PO_2$  で表す。 $P_{pi} \cdot amb$  は不活性ガス分圧で、 $PO_2$  は酸素分圧。このガスが血液に溶解して組織に接しており、ホールデンの仮定を用いて組織内の圧力は  $P_{tis} + P'O_2$  で表すことができる。ここに、 $P_{tis}$  はホールデンの微分方程式の解が与える組織内の不活性ガス分圧で、 $P'O_2$  は組織内の酸素分圧である。呼吸ガスが空気の場合、 $P_{amb}$  と  $P_{tis}$  は窒素分圧で、呼吸ガスがヘリオックスの場合、 $P_{pi} \cdot amb$  はヘリオックス、 $P_{tis}$  は窒素分圧とヘリウム分圧で構成される。呼吸ガスがトライミックスの場合、 $P_{pi} \cdot amb$  と  $P_{tis}$  が窒素分圧とヘリウム分圧で構成される。過飽和値は次の式で表示できる。過飽和値 =  $P_{tis} - P_{pi} \cdot amb$  酸素分圧や炭酸ガス分圧の影響は減圧症発症の主要因とはならないので無視することにする（厳密には「影響している」という人もおり、確定されていない。ここでは通説で考えることにした）。窒素分圧は保圧過程で減少していく。

改めて過飽和と気泡ができる関係を概観してみることにする。

- ① 呼吸ガスの不活性ガスが窒素のみで、組織の不活性ガス分圧が窒素の場合は、高気圧環境滞在後に減圧を終えて大気圧に帰還したときの過飽和値が 0.79 までは減圧症が発症しないことが知られている。
- ② 高気圧環境（圧力  $P_{amb}$ ）に、ある時間滞在して、1/2 の圧力まで急速に減圧しても減圧症に罹患しないことが知られている。

これらは窒素固有の特性で、減圧の制御に利用されている。ヘリオックスでもヘリウム固有の特性がわかっており、これらもヘリオックスの減圧に利用されている。

注) ホールデンの定律：2 絶対気圧の高圧空気の長時間滞在して組織が窒素で飽和に近くになって、大気圧に帰還しても減圧症に罹患する割合は極めて小さい。このときの不活性ガス過飽和規模は  $2 \times 0.79 - 0.79 = 0.79 \text{ atm}$  となる。これを窒素の過飽和管理値と設定できる。

ヘリウム固有の特性が存在することも知られている。したがって、トライミックスの減圧では窒素とヘリウム両者の特性に配慮することになる。

## (2) ホールデンによる減圧理論の微分方程式と解の誘導

この節は、以下に示す結論のみの理解に止めても実務に差し支えない。

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{ 1 - e^{-(0.693 \cdot t / T)} \}$$

ここに、

$P_{tis}$  :  $t$  時間滞在後の組織の不活性ガス分圧

$P_a$  : 動脈内の不活性ガス分圧  
 $P_{art}$  = 呼吸ガスの分圧  
 $P_{amb}(\text{atm})$

$P_0$  :  $t$  時間前の不活性ガスの分圧 (atm)

$t$  : 滞在時間 (分)

$T$  : 組織の半飽和時間 (分)

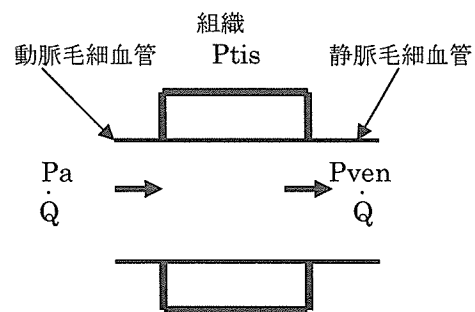


図 3-1 毛細血管と組織のモデル化

$e = 2.71828$  : 自然対数の底で、変数  $x$  の  
 マクローリン関数  $e^x = 1 + x + x^2/2! + x^3/3! + x^4/4! + \dots = \sum x^n / n!$  で  $x = 1$  として計算した数値

### 1) 微分方程式の誘導

動脈毛細血管、人体組織と静脈毛細血管の状況を図-1のようにモデル化し、血液中の不活性ガス分圧、組織の血流量及び血液と組織における不活性ガスの溶解度を、それぞれ次の記号で表記するものとする。

動脈内不活性ガス分圧 :  $P_{art} = P_{amb}$ 、添え字  $art$  は「動脈の」arterial、 $amb$  は「環境の」ambient から付けた。 $P_a$  は両者を総称し、呼吸ガスの不活性ガスと考える。

静脈内不活性ガス分圧 :  $P_{ven}$ 、添え字  $ven$  は「静脈の」venousの意味をもたせた。

組織内不活性ガス分圧 :  $P_{tis}$ 、添え字  $tis$  は細胞組織 tissue の意味をもたせた。

組織内血流量 :  $\dot{Q}$  (血液容積 ml/組織容積 ml/分)、速度を示すので傍点を付けた。

血液内での不活性ガス溶解度 :  $\alpha_B$  (不活性ガス容積 ml/血液容積 ml/atm)

組織内での不活性ガス溶解度 :  $\alpha_{tis}$

不活性ガスが組織内に取りこまれる速度は  $\dot{Q} \cdot P_a \cdot \alpha_B$  で表わされる。

不活性ガスが組織から離脱排出する速度は  $\dot{Q} \cdot P_{ven} \cdot \alpha_B$  で表わされる。

これらを用いると不活性ガスが組織内に蓄積していく速度は両者の差で表わされ、式で表わすと、 $(\dot{Q} \cdot P_a \cdot \alpha_B - \dot{Q} \cdot P_{ven} \cdot \alpha_B) = \dot{Q} \cdot \alpha_B (P_a - P_{ven})$  となる。

一方、組織内不活性ガス濃度を  $C_{tis}$  とすると、このガス濃度変動速度  $d C_{tis} / dt$  は  $d C_{tis} / dt = \dot{Q} \cdot \alpha_B (P_a - P_{ven})$  の関係式を得る。また、溶解度を用いると

$C_{tis} = P_{tis} \cdot \alpha_{tis}$  なので、 $d C_{tis} / dt = d (P_{tis} \cdot \alpha_{tis}) / dt = \dot{Q} \cdot \alpha_B (P_a - P_{ven})$

上式を書きなおすと  $d P_{tis} / dt = \dot{Q} \cdot (P_a - P_{ven}) \cdot \alpha_B / \alpha_{tis}$

ここで、 $K = \dot{Q} \cdot \alpha_B / \alpha_{tis}$  とおくと上式は

$d P_{tis} / dt = K \cdot (P_a - P_{ven})$  ..... ①ホールデン教授の式

組織と血液の間に拡散による障害がなく、血液内の不活性ガスが速やかに組織に移行すると仮定すると  $P_{ven} = P_{tis}$  と見なすことができ、①式は  $d P_{tis} / dt = K \cdot (P_a - P_{tis})$

となる。①式を書きなおして  $d P_{tis} / (P_a - P_{tis}) = K dt$  ..... ②

これがホールデンの微分方程式である。

### 2) 微分方程式の解

最初に②式の積分を考えると、

$$\int 1 / (P_a - P_{tis}) \cdot d P_{tis} = \int k \cdot dt + C_1 = K \cdot t + C_1 \quad C_1 \text{ は積分定数}$$

上式の左辺は積分公式 (例えば土木工学ハンドブック第4版・資料編 I-13、あるいは岩波数学公式集・復刻版) を用いて

$$-\log (P_a - P_{tis}) \text{ となるので、} -\log (P_a - P_{tis}) = K \cdot t + C_1$$

$$\text{上式を整理して } \log (P_a - P_{tis}) = - (K \cdot t + C_1)$$

$$\text{さらに上式を } e \text{ (自然対数の底) を用いて表わすと、} P_a - P_{tis} = e^{- (K \cdot t + C_1)}$$

$$\text{この式を整理して } P_{tis} = P_a - e^{- (K \cdot t + C_1)} = P_a - C \cdot e^{-K \cdot t} \text{、ここに } C \text{ は定数で } C = e^{-C_1}$$

定数  $C$  は次のようにして求める。まず、呼吸する前の環境圧滞在を考えると、

$$t = 0 \text{ で、} P_{tis} = P_a - C \cdot e^0 = P_a - C = P_0 \text{ とおく。右側の等式を整理すると } C = P_a - P_0 \text{ とな}$$

り、これを  $P_a - C \cdot e^0$  に代入すると

$$P_{tis} = P_a - (P_a - P_0) \cdot e^{-K \cdot t} = P_0 - P_0 + P_a - (P_a - P_0) \cdot e^{-K \cdot t} \\ = P_0 + (P_a - P_0) (1 - e^{-K \cdot t})$$

ここで、組織内の不活性分圧が半分になる時間すなわち

$P_{tis} - P_0 = 0.5 (P_a - P_0) e^{-K \cdot t}$  となる時間  $t$  を  $T$  (半減時間) とすると、

$P_{tis} - P_0 = (P_a - P_0) (1 - e^{-K \cdot T}) = 0.5 (P_a - P_0)$  が導かれる。

上式を整理すると  $1 - e^{-K \cdot T} = 0.5$  すなわち  $0.5 = e^{-K \cdot T}$  を得る。これを対数表示すると、 $K \cdot T = -\log_e 0.5 = 0.693$  となり、 $K = 0.693/T$  の関係を得る。

以上により、 $P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\}$  .....③

の式が誘導された。この式は、最初に設定した血液と不活性ガス蓄積の機序と、どの環境圧であっても組織固有で不変の不活性ガス半飽和時間が存在するという仮定の条件で、どの不活性ガスについても適用できる。 $P_{tis}$  の添え字  $tis$  を不活性ガスの分子記号に置き換えて、以降この式を窒素分圧計算式  $PN_2$  式あるいはヘリウム分圧計算式  $PHe$  と称することにする。

### (3) 減圧停止時間の計算

$P_0$  は環境圧滞在  $t = 0$  時刻の  $PHe$  なので、減圧停止圧到達時の不活性ガス分圧値  $P_0$  そのものである。停止圧滞在時間  $t$  分経過後のヘリウム分圧値  $PHe$  が  $PHe = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T_{1/2})}\}$  で表されることを前頁に紹介した。

$P_0$  が  $t$  分経過で、半飽和時間  $T_{1/2}$  組織の  $M$  値まで低下したものと想定する。すなわち  $PHe = M$  であらわされ、この組織は  $M$  値が示す「次の減圧停止圧」に向かって減圧可能であると言える。 $PHe$  式に  $M$  値を代入して  $M = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T_{1/2})}\}$  とおくことにする。

$P_a$  は  $t$  分滞在の環境圧における呼吸ガスのヘリウム分圧である。

上の式を書き直して、 $(M - P_0)/(P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693 \cdot t/T_{1/2}}$

さらに書き直すと、 $(M - P_0)/(P_a - P_0) - 1 = -e^{-0.693 \cdot t/T_{1/2}}$

さらに書き直して、 $1 - (M - P_0)/(P_a - P_0) = e^{-0.693 \cdot t/T_{1/2}}$

両辺で自然対数をとると、 $\ln\{1 - (M - P_0)/(P_a - P_0)\} = -0.693 \cdot t/T_{1/2}$

書き直して、 $\ln\{1 - (M - P_0)/(P_a - P_0)\} \times T_{1/2} / -0.693 = t$

$t$  が減圧停止時間である。以降、この計算式を「 $t$  計算式」と呼称する。

#### 1-4-2 減圧管理方法として用いる $M$ 値

潜水分野において、階段減圧方式で減圧停止圧に滞在しているとき、体内に蓄積した不活性ガス分圧は滞在時間に依りて低下していく。この低下程度がある一定値になると、次の減圧停止圧に移行しても減圧症が発症しないことが、統計的にわかってきた。この不活性分圧値を「次の減圧停止圧に移行できる最大不活性ガス分圧値」という意味をもたせて、英語の  $M$  value (Maximum value) すなわち  $M$  値と名づけている。研究機関それぞれがかれらの潜水実績を基にして  $M$  値を提起し、減圧表がダイビングマニュアルとして公開されており、それを活用した結果として減圧症発症率などで効果を表示している。不活性ガス分圧値はホールデン式を用いて計算している。 $M$  値そのものが各研究機関から公開された例は少ない。公開例として、最初に  $M$  値の考え方を提案した Workman 博士の  $M$  値 (1965 年、窒素とヘリウム) が Benett & Elliott の「潜水生理学と医学」(第 5 版・2003 年: 440 ページ) に紹介されている。この表では、減圧停止圧と不活性ガス分圧を  $msw$  表示とし、人体組織を 9 組織に区分し、組織の半飽和時間は窒素とヘリウムを同じ値にしている。

一方、(仮称) 建災防ガイドライン平成5年度の報告書Ⅱ(22 ページ) で DCAP の半飽和時間が 11 組織数で、窒素は 5～670 分、ヘリウムは 5～240 分の範囲で設定していることを紹介している。各組織の半飽和時間は紹介されていない。このような状況なので、本調査研究は、Benett & Elliott の「潜水生理学と医学」(第 5 版・2003 年：440 ページ) に紹介されている M 値を適用することとする。

### 1-4-3 数値計算要領

#### (1) 函数電卓使用による数値計算例

本業務執行の減圧表作成における計算例は、計算アルゴリズム理解のために函数電卓使用によって行うことにする。

#### (2) マルチレベル潜水作業用不活性ガス経時変化計算プログラムの開発

平成 17 年度に作成した不活性ガス経時変化計算プログラムを改良して、1 日当たりの複数回潜水を対象とする不活性ガス経時変化計算プログラムを作成して潜水データを分析する。

#### (3) 半飽和時間の設定

本調査研究は Benett & Elliott の「潜水生理学と医学」(第 5 版・2003 年：440 ページ) に紹介されている M 値(窒素とヘリウム)を紹介しているが、その一部の 120 分以下の組織は M 値のそれらと同程度である。さらに M 値では 120 分を超える半飽和時間で減圧を制御している。このことは、M 値による減圧制御が高圧則より厳しい管理となることを示唆する。それが本業務で扱う減圧表作成に M 値を適用する理由である。M 値(9 組織に区分)の半飽和時間は、5,10,20,40,80,120,160,200,240 分で、高圧則・減圧表は、組織数 6、半飽和時間 5、10、20、40、75、120 分を用いているらしいことが、「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——医学博士。梨本一郎 著・工学出版(株)・昭和 37 年 9 月」19 ページから推測できる。平成 17 年度報告書の「酸素減圧」は、高圧則・減圧表の体内ガス圧係数が 120 分組織で試算再現できることを推測している。なお、120 分組織が水面に浮上可能な窒素分圧は M 値表で 15.8 msw(体内ガス圧係数換算 2.0)と指定されている。この点が高圧則減圧表(減圧終了時 1.8～2.2 と別表第 1 に明記)と異なり、M 値を用いた減圧表作成が高圧則減圧表より安全性向上に寄与することが予測できる。

注) SI 単位表記前の高圧則・減圧表は昭和 36 年(1961 年)に施行された。



#### 1-4-4 減圧制御要素

各減圧表の試算は、ここまでの本項で説明を行ってきたホールデン理論に基づく微分方程式の解から導かれる体内分圧とワークマンのM値との比較によって算出される。以下にそれらを総括する。

減圧における計算式は、主に次の2式を用いる。

$$PN_2 \text{式} : PN_2 = P_0 + (Pa - P_0) \{ 1 - e^{-(0.693 \cdot t / T_{1/2})} \}$$

$PN_2$  : 体内組織の窒素分圧

$P_0$  : 前圧力区間の体内 $N_2$ 分圧

$Pa$  : 外気の $N_2$ 分圧 (本試算では分圧値が区間で変化する場合は平均値をとった、正確には区間積分が必要。)

$T_{1/2}$  : 組織の半飽和時間

$$t \text{ 計算式} : t = \ln \{ 1 - (Pt - P_0) / (Pa - P_0) \} \times T_{1/2} / (-0.693)$$

$t$  : 減圧停止時間

$P_0$  : 前圧力区間の体内 $N_2$ 分圧

$Pa$  : 外気の $N_2$ 分圧

$Pt$  : 次圧力区間に移行できる最大体内 $N_2$ 分圧 (前頁ワークマンM値式より計算)

$T_{1/2}$  : 組織の半飽和時間

なおヘリオックス呼吸の場合は上記式  $N_2$  を  $He$  に置き換え、対象とする M 値表は表 2-4 を用いる。

下記の表 2-2 と 3-3, 3-4 に示すワークマンの M 値を用いる。

表2-2 ワークマンのM値の組織別係数 (msw)

Tissue half time (min.)	$N_2$		$He$	
	$M_0$	a	$M_0$	a
5	31.5	1.8	26.1	1.5
10	26.7	1.6	22.4	1.4
20	21.8	1.5	20.0	1.3
40	17.0	1.4	18.2	1.2
80	16.4	1.3	17.0	1.2
120	15.8	1.2	16.4	1.2
160	15.5	1.2	16.4	1.1
200	15.5	1.1	16.1	1.1
240	15.2	1.1	16.1	1.0

reference : Robert W Hamilton and E D Thalman : 10.1 Decompression , Practice, In :BENNETT & ELLIOTT'S 「PHYSIOLOGY AND MEDICINE OF DIVING」, 5<sup>th</sup> edition (2003)、© 2003, Elsevier Science Limited, pp440.

M 値式

M 値：次の減圧停止圧  $d_j$  に移行できる最大ヘリウム分圧で、M 値以下になるまで圧力  $d(j+1)$  にとどまることが要求される。それが減圧停止時間となる。D の添え字  $j$  は原著にはなく、計算の便に配慮して報告者が付した。

M—values equation

$$M_{i,j} = M_{0,j} + a_{i,j} \times d_j$$

i : tissue half-time

$M_{0,j}$  : syurface M—value for j tissue in msw.

$a_{i,j}$  : dePth-dependence parameter

$d_j$  : the dePth of the next decompression stop (msw)

j : suffix for dePth

表2-3 M値式に従って計算したN<sub>2</sub>のワークマンのM値 (msw)

T1/2 i	the dePth of the next decompression stop (msw)																						
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	j=9	j=10	j=11	j=12	j=13	j=14	j=15	j=16	j=17	j=18	j=19	j=20	j=21	j=22	j=23
5	36.9	42.3	47.7	53.1	58.5	63.9	69.3	74.7	80.1	85.5	90.9	96.3	101.7	107.1	112.5	117.9	123.3	128.7	134.1	139.5	144.9	150.3	155.7
10	31.5	36.3	41.1	45.9	50.7	55.5	60.3	65.1	69.9	74.7	79.5	84.3	89.1	93.9	98.7	103.5	108.3	113.1	117.9	122.7	127.5	132.3	137.1
20	26.3	30.8	35.3	39.8	44.3	48.8	53.3	57.8	62.3	66.8	71.3	75.8	80.3	84.8	89.3	93.8	98.3	102.8	107.3	111.8	116.3	120.8	125.3
40	21.2	25.4	29.6	33.8	38.0	42.2	46.4	50.6	54.8	59.0	63.2	67.4	71.6	75.8	80.0	84.2	88.4	92.6	96.8	101.0	105.2	109.4	113.6
80	20.3	24.2	28.1	32.0	35.9	39.8	43.7	47.6	51.5	55.4	59.3	63.2	67.1	71.0	74.9	78.8	82.7	86.6	90.5	94.4	98.3	102.2	106.1
120	19.4	23.0	26.6	30.2	33.8	37.4	41.0	44.6	48.2	51.8	55.4	59.0	62.6	66.2	69.8	73.4	77.0	80.6	84.2	87.8	91.4	95.0	98.6
160	19.1	22.7	26.3	29.9	33.5	37.1	40.7	44.3	47.9	51.5	55.1	58.7	62.3	65.9	69.5	73.1	76.7	80.3	83.9	87.5	91.1	94.7	98.3
200	18.8	22.1	25.4	28.7	32.0	35.3	38.6	41.9	45.2	48.5	51.8	55.1	58.4	61.7	65.0	68.3	71.6	74.9	78.2	81.5	84.8	88.1	91.4
240	18.5	21.8	25.1	28.4	31.7	35.0	38.3	41.6	44.9	48.2	51.5	54.8	58.1	61.4	64.7	68.0	71.3	74.6	77.9	81.2	84.5	87.8	91.1

表2-4 M値式に従って計算したHeのワークマンのM値 (msw)

		the dePth of the next decompression stop (msw)																						
T1/2	i	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	j=9	j=10	j=11	j=12	j=13	j=14	j=15	j=16	j=17	j=18	j=19	j=20	j=21	j=22	j=23
		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69
		0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69
5		30.6	35.1	39.6	44.1	48.6	53.1	57.6	62.1	66.6	71.1	75.6	80.1	84.6	89.1	93.6	98.1	102.6	107.1	111.6	116.1	120.6	125.1	129.6
10		26.6	30.8	35.0	39.2	43.4	47.6	51.8	56.0	60.2	64.4	68.6	72.8	77.0	81.2	85.4	89.6	93.8	98.0	102.2	106.4	110.6	114.8	119.0
20		23.9	27.8	31.7	35.6	39.5	43.4	47.3	51.2	55.1	59.0	62.9	66.8	70.7	74.6	78.5	82.4	86.3	90.2	94.1	98.0	101.9	105.8	109.7
40		21.8	25.4	29.0	32.6	36.2	39.8	43.4	47.0	50.6	54.2	57.8	61.4	65.0	68.6	72.2	75.8	79.4	83.0	86.6	90.2	93.8	97.4	101.0
80		20.6	24.2	27.6	31.4	35.0	38.6	42.2	45.8	49.4	53.0	56.6	60.2	63.8	67.4	71.0	74.6	78.2	81.8	85.4	89.0	92.6	96.2	99.8
120		20.0	23.6	27.2	30.8	34.4	38.0	41.6	45.2	48.8	52.4	56.0	59.6	63.2	66.8	70.4	74.0	77.6	81.2	84.8	88.4	92.0	95.6	99.2
160		19.7	23.0	26.3	29.6	32.9	36.2	39.5	42.8	46.1	49.4	52.7	56.0	59.3	62.6	65.9	69.2	72.5	75.8	79.1	82.4	85.7	89.0	92.3
200		19.4	22.7	26.0	29.3	32.6	35.9	39.2	42.5	45.6	49.1	52.4	55.7	59.0	62.3	65.6	68.9	72.2	75.5	78.6	82.1	85.4	88.7	92.0
240		19.1	22.1	25.1	28.1	31.1	34.1	37.1	40.1	43.1	46.1	49.1	52.1	55.1	58.1	61.1	64.1	67.1	70.1	73.1	76.1	79.1	82.1	85.1

### 1-4-5 高圧則と新減圧表の考え方の相違

本業務で作成した減圧表を新減圧表と称することにする。現行の高圧則の減圧表と新減圧表の考え方を対比したものが表 2-5 である。

表 2-5 高圧則と新減圧表の考え方の相違

		高圧則	新減圧表
計算理論		Haldane の微分方程式とその解	同左
半飽和組織の数と種類		組織数 6, 最長 120 分	組織数 9, 最長 240 分
数 値 計 算	1) 適用範囲	$0 < P \leq 0.4 \text{Mpa}$ $P \leq 0.88 \text{MPa}$ (潜水作業)	$0 < P \leq 0.4 \text{Mpa}$
	2) 加圧・減圧速度	0.08MPa/分	同左
	3) 圧力刻み	0.03MPa	同左
減 圧 制 御	圧気と潜水の区分	別表 1, 別表 2 に区分け	圧気・潜水同一減圧表
	1) 減圧停止圧力	減圧比 (=窒素分圧/環境圧力) $\approx 2.0 \sim 1.75$	Workman の M 値
	2) 酸素吸入 (10m 超えて)	考えていない	0.12MPa から開始 25 分酸素吸入、5 分 AirBreak の繰返し 減圧終了後も行う場合あり
	3) 最終減圧停止	0.03MPa	0.06MPa
4) 残存窒素分圧	減圧終了時 120 分組織で 1.76atm 以下	翌日 7 時 30 分 240 分組織で 0.80atm 以下	