

3-5 減圧停止不要潜水（1日1回、連日潜水）の窒素分圧範囲

潜水規模：34と64fsw(空気絶対気圧)・0.28と9.43msw(ゲージ圧)

1日1回、連日の減圧停止不要潜水は空気の絶対気圧D=34~64fsw(ゲージ深度1~31fsw)で実施される。この場合の120分組織の窒素分圧は、深度に0.79を乗じた $34 \times 0.79 \sim 64 \times 0.79 = 26.86 \sim 50.56$ fswの範囲にある。図3-1は潜水規模：34と64fswに限定して窒素分圧の増減状態と潜水プロフィールを示した図である。作図に用いた計算経過は次ページの表3-1に示した。この図は4-2で設定した条件すなわち1日1回の潜水時間12時間(720分)で、水面浮上後12時間の水面待機を行って窒素分圧が26.4fsw前後に収まり、翌日の減圧停止不要潜水に着手できることを示している。

注) 大気圧における組織の窒素分圧 $33 \times 0.79 \doteq 26.07$ fswと26.4fswとの差は計算誤差である。もし、翌日の潜水に不安を感じれば、潜水時間を若干短縮すればよい。

図の右端のアルファベット指標は「第3章3. 繰り返し潜水表」に用いる。ここでは、このようなDの位置にアルファベット指標が存在するという認識しておかれない。図3-1は、さらに以下のように要約される事項を教えてくれる。

- ①点線曲線より小さい窒素分圧範囲で減圧停止不要潜水が可能である。
- ②実潜水の深度D(絶対気圧換算)が $D \geq 64$ (fsw)であってもDと滞底時間の組み合わせにより、窒素分圧が①の範囲にあれば、減圧停止不要潜水が可能である。ただし、翌日の潜水に係る制約には留意しなければならない。

例：Dg=100fswすなわちD=133(fsw)の場合、滞底時間20分で窒素分圧は

$$\begin{aligned} P_{tis} &= P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}}) \\ &= 26.07 + \{ D \times 0.79 - 26.07 \} \times (1 - e^{-0.693 \times 20 / 120}) \\ &= 34.69 \text{fsw、絶対気圧換算で } 34.69 / 0.79 \doteq 43.9 \text{fsw、} \end{aligned}$$

P_{tis}は図4-1の*印部分

また、43.9fswが指標Fグループに該当することだけ覚えておかれない。

- ③浮上後に大気圧で休息いわゆる水面待機中に減少する120分組織の窒素分圧変動は一定の割合で減少する。図3-1の*印窒素分圧(空気絶対気圧43.9fsw：窒素分圧換算34.69fsw)で水面に浮上すると、図の右向き矢印が示す**印(窒素分圧は43.9fsw)から窒素分圧は減少する。その時間は図から $1440 - 880 \doteq 560$ 分と読み取れ、計算では $t = 565$ 分となる。

$$\begin{aligned} t &= \ln \{ 1 - (P_{tis} - P_0) / (P_a - P_0) \} \times T_{1/2} / (-0.693) \\ &= \ln \{ 1 - (34.69 - 26.4) / (26.07 - 26.4) \} \times 120 / (-0.693) = 565 \text{分} \end{aligned}$$

表 3-1 図 3-1 作図用の計算：瞬間的な潜降と浮上で計算

- (1) 64fsw 最長時間滞底時と浮上後の窒素分圧(PN₂)経時変化計算式
- 1) 最長時間 (720 分) 滞底時の PN₂ 計算式

$$Ptis = P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 \times t / T_{1/2}}) = 33 \times 0.79 + (D \times 0.79 - 33 \times 0.79) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$

$$= 26.07 + (64 \times 0.79 - 26.07) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120}) = 26.07 + 24.49 \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$
 - 2) 浮上直後から 720 分経過までの PN₂ 経時変化計算式

$$Ptis = P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 \times t / T_{1/2}}) = 50.17 + (33 \times 0.79 - 50.17) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$

$$= 50.17 - 24.10 \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$
- (2) 34fsw 最長時間滞底時と浮上後の窒素分圧(PN₂)経時変化計算式
- 1) 最長時間 (720 分) 滞底時の PN₂ 計算式

$$Ptis = P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 \times t / T_{1/2}}) = 33 \times 0.79 + (D \times 0.79 - 33 \times 0.79) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$

$$= 26.07 + (34 \times 0.79 - 26.07) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120}) = 26.07 + 0.79 \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$
 - 2) 浮上直後から 720 分経過までの PN₂ 経時変化計算式

$$Ptis = P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 \times t / T_{1/2}}) = 26.85 + (33 \times 0.79 - 26.85) \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$

$$= 26.85 - 0.78 \times (1 - e^{-0.693 \times t / 120})$$

総時間 Σ t	時間 t	時間函数	上限 64fsw での PN ₂		下限 34fsw での PN ₂		任意選択 51fsw での PN ₂	
			Ptis	D 換算	Ptis	D 換算	Ptis	D 換算
0	0		26.07	33 fsw	26.07	33 fsw	26.07	33fsw
10	10	0.056(0.053)	27.44	34.73	26.11	33.05	26.87	34.01
20	20	0.109(0.108)	28.74	36.38	26.16	33.11	27.62	34.96
30	30	0.159(0.158)	29.96	37.92	26.20	33.16	28.33	35.86
40	40	0.206(0.206)	31.11	39.38	26.23	33.20	29.00	36.71
50	50	0.251(0.250)	32.22	40.78	26.27	33.25	29.64	37.52
60	60	0.293(0.293)	33.25	42.09	26.30	33.29	30.24	38.28
100	100	0.439(0.439)	36.82	46.61	26.42	33.44	32.31	40.90
120	120	0.500(0.500)	38.32	48.51	26.47	33.51	33.18	42.00
150	150	0.579(0.580)	40.25	50.95	26.53	33.58	34.30	43.42
200	200	0.685	42.85	54.24	26.61	33.68	35.81	45.33
300	300	0.823	46.23	58.52	26.72	33.82	37.77	47.81
400	400	0.901	48.14	60.94	26.78	33.90	38.88	49.22
500	500	0.944	49.19	62.27	26.82	33.95	39.49	49.99
600	600	0.969	49.80	63.04	26.84	33.97	39.85	50.44
720	720	0.984	50.17	63.51	26.85	33.99	40.06	50.71
721	1	0.004	50.07	63.38 ≒63.4	26.85	33.99	40.00	50.63
723	3	0.017	49.76	63.0	26.84	33.97	39.82	50.41
724	4	0.022	49.64	62.84	26.83	33.96	39.75	50.32
725	5	0.028	49.50	62.66	26.83	33.96	39.67	50.22
726	6	0.034	49.35	62.47	26.82	33.95	39.58	50.10
728	8	0.045	49.09	62.14	26.81	33.94	39.43	49.91
730	10	0.053	48.89	62.14	26.81	33.94	39.32	49.77
780	60	0.293	43.11	54.57	26.62	33.70	35.96	45.52
810	90	0.405	40.41	51.15	26.53	33.58	34.39	43.53
840	120	0.500	38.12	48.25	26.46	33.49	33.07	41.86
870	150	0.580	36.19	45.81	26.40	33.42	31.95	40.44
920	200	0.685	33.66	42.61	26.32	33.32	30.48	38.58
1020	300	0.823	30.34	38.41	26.21	33.18	28.55	36.14
1120	400	0.901	28.46	36.03	26.15	33.10	27.46	34.76
1220	500	0.944	27.42	34.71	26.11	33.05	26.85	33.99
1320	600	0.961	27.01	34.19	26.10	33.04	26.62	33.70
1440	720	0.984	26.46	33.49	26.08	33.01	26.29	33.28

注) 時間函数(1 - e^{-0.693 × t / 120})は函数電卓計算結果と U.S.N.潜水教範の時間函数表(カッコ書き)による。

Ptis は函数電卓で計算し、小数 4 桁目を四捨五入した。

4. ヘリウム混合ガス

4-1 ヘリウム混合ガス呼吸利用のニューマチックケーソン工事を取り巻く現状の認識

4-1-1 厚生労働省の動向要約

(1) 仮称・建災防ガイドライン初版

㈱白石が平成2年に東京電力(株)・豊洲立坑工事(白石・大豊JV)に際して行った安衛法第88条に係る建設工事計画届に添付した施工計画書において、ゲージ圧0.29Mpa(3.0kgf/cm²)以上の高気圧作業ではヘリウム混合ガス呼吸を利用して実施することを予告した。労働省(当時、現・厚生労働省)は未知の分野の大規模建設工事審査及び指導に当たり、潜水分野における有識者の見解を求め、梨本一郎・埼玉医科大学教授(当時、平成14年5月4日逝去・享年74歳)を審査委員長とする労働省内審査委員会は、審査結果として、若干の指導事項(異常事態の即時報告と工事完了事後報告を要請)を通知してきたので、施工着手可能となった。しかしながら、この工種は工程面から実施できず、立坑工事は大規模な地盤改良などの補助工法を用いて実施された。

労働省は、これを契機として平成4年度(1992年度)から3ヶ年計画で「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」を建設業災害防止協会(略称:建災防)に委託した。調査研究は潜水におけるヘリウム混合ガス呼吸の知見を取り込んで進められ、その最終報告書は平成7年3月に報告された。報告書は混合ガス呼吸利用ニューマチックケーソン工事の圧力、ガス分圧の管理値、加減圧要領(最長高圧下滞考値90分)や作業に必要な装置などの仕様を紹介している。この調査委員会にはニューマチックケーソン工事にヘリウム混合ガス呼吸を導入する研究を進めていたゼネコン[㈱白石や㈱大本組ら]が参画したので、報告書はシステム例として両社の設備等を社名抜きで紹介している。法規制はないものの、労働省はこれをガイドラインとして建設工事計画届の審査や指導の参考にしていると推測される。そこで、これらの報告書を「仮称・建災防ガイドライン初版」と呼ぶことにする。

(2) 仮称・建災防ガイドライン改訂版

「仮称・建災防ガイドライン初版」がまとまった段階以降、平成12年度までのヘリウム混合ガス呼吸を適用したニューマチックケーソン工事実績は5件(合計7基の潜函)を数えた。施工担当者が厚生労働省等に提出した工事記録を基に、厚生労働省(旧・労働省)は再び建設業災害防止協会に調査研究を委託した。建災防は平成13年3月に「特殊な圧気潜函工事に係る健康障害防止基準に関する調査研究報告書」をまとめた。そこで、この報告書を「仮称・建災防ガイドライン改訂版」と呼ぶことにする。

注)今回は調査研究タイトルの中に「基準」の用語が盛りこまれた。

4-1-2 厚生労働省が現時点で指導している事項の要約

:「仮称・建災防ガイドライン改訂版」要約

(1) 高気圧作業の呼吸方法と圧力:建災防の適用範囲に注意(下線部)

高圧則・別表第2は高圧空気呼吸で高気圧作業を行った場合も適用できると指定する減圧表であるが、窒素酔いや酸素中毒への罹患予防方法に言及していない。建災防の「高気圧作業安全衛生の手引き―作業主任者講習テキスト―」では言及している。これに対して、「仮称・建災防ガイドライン改訂版」は、作業員の健康に配慮した施工方針として、圧力0.3~0.7MPaで行う高

気圧作業においてヘリウム混合ガス呼吸を適用することになっている。

1) 混合ガス呼吸で行う高気圧作業の労働時間等

- ①作業内容は短時間で作業が可能なものとする。
- ②作業人員は、混合ガス管制員、混合ガス設備整備員、潜函工等圧気潜函作業者の安全を確保するうえで十分な人員を配置すること。
- ③潜函工は一人当たり、1日1回の高気圧作業とすること。
- ④高圧下の滞在時間及び減圧時間の合計は、8時間を超えない範囲で設定するものとする。高圧下滞在90分は参考値として扱っている。

注) 拡大文字部に留意されたい。

2) 混合ガス

- ①混合ガスの種類はトライミックスまたはヘリオックスとする。

トライミックス (Trimix) : ヘリウム・窒素・酸素3種混合ガス

ヘリオックス (Heliox) : ヘリウム・酸素2種混合ガス

- ②混合ガスの分圧範囲

作業中の任意環境圧力において、混合ガスは以下に示す条件を全て満たす混合比でなければならない。

酸素分圧 : 0.16ATA 以上 1.6ATA 以下

相対密度 : 5 ~ 6 以下

窒素分圧 : 4ATA 以下

注) 分圧表示は原文のまま。建災防は分圧表示として絶対気圧表示 ATA (アータと読む) を用いている。当社のヘリウムマニュアルでは SI 単位表示 atm としている。ゲージ圧 0.4MPa で窒素酔いがでると想定。

- ③ 機械設備等その他 : 記載省略

設備等の図面は罫白石方式と罫大本組方式が社名抜きで紹介されている。

4-2 ニューマチックケーソン工事における本邦ヘリウム混合ガス呼吸の実際

4-2-1 ヘリウム混合ガスの選択

ニューマチックケーソン作業室内、エアロックやシャフト内は高圧空気で満たされており、作業員は呼吸マスク経由でヘリウム混合ガスを呼吸する。ヘリウム混合ガスにはトライミックス（ヘリウム・窒素・酸素 3 種混合ガス）とヘリオックス（ヘリウム・酸素 2 種混合ガス）があるが、本邦のニューマチックケーソンでは前者が使われており、後者の利用はまだない。その選択理由に、次の説がある。

- ①『高圧下滞在でヘリオックスを呼吸していて、減圧に際して急に空気呼吸に変更すると、吐き気やめまいを体験する例が多く、それらを予防するために呼吸ガスに窒素を含んだトライミックスを選択する。』
- ②ヘリウム混合ガス潜水においては、潜水深度範囲 30～300m や長期間にわたる飽和潜水あるいは短時間潜水の両方に対処できる潜水支援船を常備している。この船舶は潜水対象深度に必要なガス、ヘリウム混合ガス製造が可能な装置、作業員居住室（高圧タンク、水中エレベーターなど）を搭載し、混合担当技術者や潜水管制担当技術者などが常駐している。一方、ニューマチックケーソン工事では工事の作業気圧水深換算 30m クラスから最高作業気圧 90m クラスまでの一時的なヘリウム混合ガス供給設備が必要なのであって、呼吸ガスのみに潜水支援船規模の装置や技術者を現場ごとに搬入搬出することは過大投資となる。呼吸ガスは混合精度品質が良好な工場混合がコスト面とガス管理の両面から有利である。
- ②呼吸ガスの体外排泄時間がヘリオックスより長くなっても高圧下時間が短いので、週 40 時間労働に十分対処できる。

「仮称・建災防ガイドライン初版」報告書Ⅱ（平成 5 年度）は、米国ハミルトンリサーチ社の減圧プログラム DCAP を用いた試算減圧表を記載している。この試算減圧表も、

『ここに掲載した試算減圧表は実用試験評価を行ったものではなく、その運用性、安全性の評価を必要とするので、そのままの使用を禁ずる。』と断っている。

また、実務で使用しているゼネコン保有のトライミックス減圧表は企業ノウハウとして公開されていない。米国の NOAA がトライミックス減圧表を整備していることが NOAA ダイビングマニュアルで紹介されているものの、減圧表そのものは記載されていない。

米国海軍は公開していない。

本邦の潜水におけるヘリオックス減圧表は、これも潜水担当業務を行う会社が企業ノウハウとして公開していない。米国海軍は公開している。

4-2-2 ニューマチックケーソン工事初適用のトライミックス呼吸における疫学的調査

土木学会第51回年次学術講演会（平成8年9月）

VI-4 ヘリウム混合ガスを併用した大深度ケーソン工法

日本道路公団・名古屋建設局 正会員 佐久間 智
鴻池組 名古屋支店 土木部 加藤孝臣 福本修三
白石 名古屋支店 土木部 岩田 哲夫
白石 技術本部 開発部担当部長 正会員 石井 通夫

1. はじめに

圧気ケーソン工法は、関東大震災以後日本に於いて本格的に採用されはじめ、以来機械化されたニューマチックマチックケーソン工法として発展してきた。支持層が直接確認でき、また躯体を地上で構築することから、品質の高い確実な工法と言える。反面、高気圧下の作業となるため、高気圧障害発症の可能性が高く、圧気工法最大の欠点と言われてきた。

21世紀を目前とした現在、地下空間の有効利用や、施工規模の拡大に伴い、大規模・大深度の地下構造物の施工技術が望まれ、しかも安全で機械化による省人化や作業環境に優しい工法の開発が望まれている。本報告は、これまで四十数件の施工実績がある無人ケーソン工法を更に発展させ、深海潜水技術分野で使用されている混合ガスを、大深度ケーソンに適用し、高気圧障害を予防する目的で開発した、まったく新しい大深度ニューマチックケーソン工法について述べたものである。

現在、日本道路公団で進めている、伊勢湾岸道路の名港西大橋II期線のP3橋脚基礎工事に、この新工法を採用したので、その基礎概要と施工結果について報告する。

2. 基礎概要

工 事 名 伊勢湾岸道路 名港西大橋（下部工）東工事
工事場所 愛知県名古屋市港区金城埠頭地先
工 期 平成5年11月10日～平成8年8月25日
工事内容

- P3主塔部・ニューマチックケーソン基礎
（基礎平面寸法：25×40m、掘削深さ27.5m）
- P4端橋脚部・場所打杭基礎

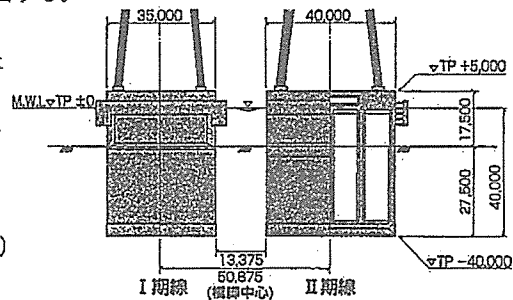


図-1 基礎の離隔状況

P3主塔橋脚基礎は海面下40m（計画最大作業気圧4kgf/cm²）に設置する大深度で、かつ大規模なフローティングニューマチックケーソン基礎である。この基礎の外壁と既に供用しているI期線の同規模基礎外壁面との離隔距離が13.4m（既設基礎底面寸法の1/3に相当）で、II期線基礎施工がI期線基礎に与える影響を考慮した近接施工であると言う点が、この工事の特色でもある。

当初は、I期線と同じ地下水位低下工法で作業気圧低下を図り、かつII期線への影響防止の遮水壁（薬液注入）構築の施工方法を計画した。透水係数評価のボーリング数が少なかったことから再検討した結果、提案された大深度ニューマチックケーソン工法を採用した。その決定要因は次のものであった。なお、基礎それぞれの動態観測は計画にいられた。

- ①地下水位低下（-10m）により既設基礎下部の洪積粘性土層の圧密沈下誘発が懸念され、かつその防止策が要求する遮水壁透水低減効果（現地盤の1/1000）確保は施工可能限界に近い。
- ②現場搬入装置を工場で組み立てて実施したシステムの機能試験、作業員訓練等の一連のシステム全体デモンストレーションが提案工法の成功性を保証した。
- ③工期短縮が必要となったが、補助工法（地下水位低下・遮水壁）削除により短縮が可能と判断した。

3. 大深度ニューマチックケーソン工法

無人ケーソン工法 + ヘリウム混合ガスシステム = 大深度ニューマチックケーソン工法

無人ケーソン工法とは、高気圧下の掘削作業を、大気圧カプセル（この中は大気圧で、作業室内が目視でき、テレビモニターや操作機器を装備）、もしくは地上の操作室から遠隔操作により無人掘削作業を行なう工法である。

しかし現況では、作業室内の設備機器のメンテナンスや設備撤去等の作業で、作業員が高気圧下で作業せざるを得ない場合がある。

従来 3 kgf/cm^2 を越えた高気圧環境下で圧縮空気を呼吸すると、高気圧障害（減圧症・窒素酔い・酸素中毒等）が発生する可能性が非常に高くなり、労働安全衛生法に於いても規制や減圧の指導が行われている。

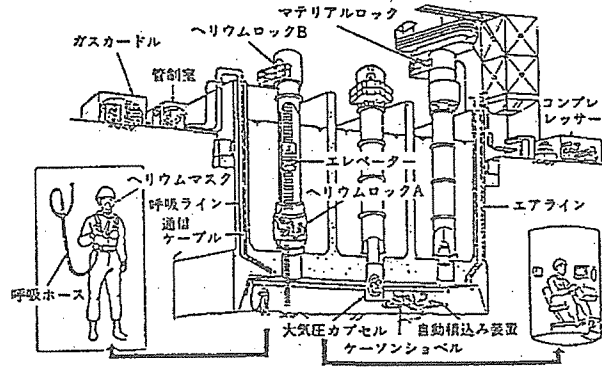


図-2 大深度ニューマチックケーソン 概要図

一方深海潜水の分野では、ヘリウム混合ガスを呼吸してこれらの障害を予防する技術が実施されており、水深300m程度まで実用化されている。この深海潜水技術をケーソン工法に摘要開発したのが、ヘリウム混合ガスシステムである。

今回使用した混合ガスは、酸素・窒素・ヘリウム（不活性ガス）の3種類を、人工的に配合したもので、最大水深40m相当の作業気圧を対象に、高気圧障害を予防できる酸素・窒素の量を決定し、残りをヘリウムガスで満たした構成とした。

このシステムは、作業室内は従来と同様に圧縮空気で満たし（環境空気）、高気圧下の作業員に対してのみ、呼吸マスクを介して、この混合ガスを供給し呼吸させるシステムである。一連の操作は、作業員の負担を軽減するため、混合ガスの供給、ヘリウムロックの加減圧、作業員の監視や指示通話等を、すべて地上の管制室から行う。

当工事では、掘削日当たり1回のメンテナンス作業を実施した。 3 kgf/cm^2 以上での高気圧下の時間は、最大120分で4名のメンバー編成とし、内1名を作業指揮者とした。減圧は次の3段階とした。

- ① $4 \sim 3\text{ kgf/cm}^2$ →ヘリウム混合ガス呼吸をしながら減圧を行う。
- ② $3 \sim 1.2\text{ kgf/cm}^2$ →高圧空気呼吸をしながら減圧を行う。
- ③ 1.2 kgf/cm^2 以下 →酸素と高圧空気呼吸を交互に行いながら減圧を行う。

3. おわりに

結果的には、ヘリウム混合ガスを使用することにより、 3 kgf/cm^2 を越えた延べ524名の作業員に対し、1名の高気圧障害も発症せず終了した。

新工法で施工したP3の大規模・大深度ケーソン工事も、施工トラブルもなく、精度良く、安全に、工期を短縮して終了した。

しかし現時点では、一部の作業で高気圧下に暴露せざるを得ない状況もあり、完全な無人化施工には至っていない。この点については、今後さらなる技術開発で、21世紀を目指した工法を期待したい。

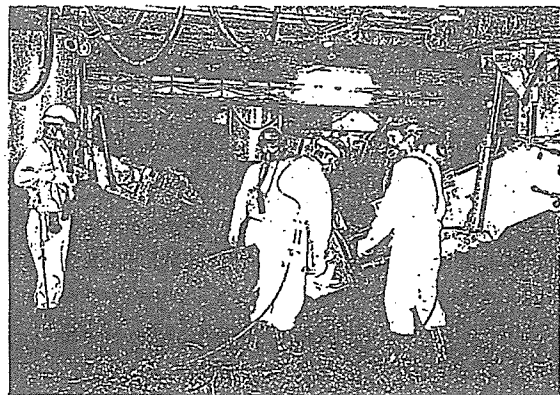


写真-1 ヘリウム混合ガス・メンテナンス状況

第3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、成果を實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トタンクの水槽で構成され、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 エアーロック(**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ーロックで「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20msw

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%O₂、20%N₂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(PN₂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%O₂、68%N₂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0.3～10.0msw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8.0mswとしたことは、この圧力滞在中で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「RNTT：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と考えるからである。

(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、温度の影響を無視する。
- 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・Part
= 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)

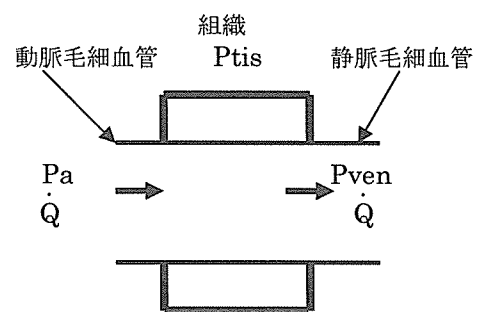


図 3-1 毛細血管と組織のモデル化

$e = 2.71828$: 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 : α_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 : α_{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、 $d C_{tis} / dt = d (P_{tis} \cdot \alpha_{tis}) / dt = \alpha_{tis} \cdot d P_{tis} / dt$ となる。

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

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

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

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 $d P_{tis} / dt = K \cdot (P_a - P_{tis})$

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

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

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

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

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

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

$t = 0$ で、 $P_{tis} = P_a - C \cdot e^0 = P_a - C = P_0$ とおく。右側の等式を整理すると $C = P_a - P_0$ 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応じて低下していく。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15.8msw(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。

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

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

P_a : 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

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

t : 減圧停止時間

P_0 : 前圧力区間の体内 N_2 分圧

P_a : 外気の N_2 分圧

P_t : 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 3-4 を用いる。

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

表3-2 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」, 5th 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3-3 M値式に従って計算したN₂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