

③ 計算例：深度 50m、潜水停留時間 30 分

表 2-2 は計算例である。「潜水学」記載の表を報告者が改変した。①～④は報告者による注

表 2-2 減圧要領の計算例：呼吸ガスは空気（窒素 80%）とする。

深 度	平均 静水 圧	吸 気ガ ス分 圧	潜 水 停 留 時 間	7分組織					Sc= 2.56
				初 期 張 力	圧 力 傾 度	指 数 係 数	張 力 変 化	終 期 張 力	
	H	P	t分	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	P-p ₀	p	pc
50m	6	4.8	30	0.8	4.0	0.949	3.796	4.596	
50~9	4	3.2	3	4.596	-1.396	0.257	0.360	4.236	
9	1.9	1.52	1	4.236	-2.716	0.094	0.255	3.981	4.096
6	1.6	1.28	14	3.981	-2.701	0.750	2.025	1.956	3.328
3	1.3	1.04	38	1.956	-0.916	0.977	0.893	1.063	2.56
H P t				30分組織					Sc= 1.84
	H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	P-p ₀	p	
50m	6	4.8	30	0.8	4.0	0.5	2.0	2.800	
50~9	4	3.2	3	2.800	+0.400	0.067	0.026	2.826	
9	1.9	1.52	1	2.826	-1.306	0.023	0.030	2.796	2.944
6	1.6	1.28	14	2.796	-1.516	0.276	0.418	2.378	2.392
3	1.3	1.04	38	2.378	-1.338	0.584	0.781	1.597	1.84
H P t				60分組織					Sc= 1.6
	H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	P-p ₀	p	
50m	6	4.8	30	0.8	4.0	0.293	1.172	1.972	
50~9	4	3.2	3	1.972	+1.228	0.034	0.042	2.014	
9	1.9	1.52	1	2.014	-0.494	0.011	0.005	2.009	2.56
6	1.6	1.28	14	2.009	-0.729	0.149	0.108	1.901	1.98
3	1.3	1.04	38	1.901	-0.861	0.355	0.306	1.595	1.6
H P t				120分組織					Sc= 1.6
	H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	P-p ₀	p	
50m	6	4.8	30	0.8	4.0	0.159	0.636	1.436	
50~9	4	3.2	3	1.436	+1.764	0.018	0.032	1.468	
9	1.9	1.52	1	1.468	-0.052	0.006	0.001	1.469	2.56
6	1.6	1.28	14	1.469	-0.189	0.078	0.014	1.455	1.98
3	1.3	1.04	38	1.455	-0.415	0.197	0.082	1.373	1.6

注①1-e^{-kt}の数値

tと拡散灌流時間を用いてt/Tを計算すると1-e^{-kt}の数値値が得られる表が教科書に載っている。

例：30/7=4.29より、この数値に該当する1-e^{-kt}=0.949を得る。

②終期張力

例 0.8+4.0×0.949=4.596
例 4.596-1.396×0.257=4.237

③減圧停止圧：絶対気圧

7分組織：4.596/2.56=1.79

30分〃：2.8/1.84=1.53

60〃：1.972/1.6=1.23

120〃：1.436/1.6=0.9<1.0

最大圧で減圧停止=1.79

上記のゲージ圧換算は0.79

したがって0.9気圧を選択

④減圧停止時間

次の減圧停止圧0.6気圧

(絶対圧1.6気圧)での窒

素分圧はpc=Sc×環境圧

7分組織 2.56×1.6

=4.096>3.981

30〃 1.84×1.6=2.944

60〃 1.6×1.6=2.56

120〃 1.6×1.6=2.56

したがって0.9気圧で1分

停止となる。

「潜水学」64ページより転載（転載要請未済）した $1 - e^{-kt}$ の値

3) 計算例の注①で、 $t/T = 30/7 = 4.29$ より、下表の左がわで4.2に着目し、次に「小数点2桁目」の数字「9」を抽出すると、 $1 - e^{-kt} = 0.949$ の数値が見出せる。点線と矢印を参照。

t (潜水停留時間) T (拡散灌漑時間)	小数点2桁目									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	-	.007	.014	.021	.027	.034	.041	.047	.054	.061
0.1	.067	.073	.081	.086	.092	.099	.105	.111	.117	.123
0.2	.129	.136	.141	.147	.153	.159	.165	.171	.176	.182
0.3	.188	.193	.199	.204	.210	.215	.221	.226	.232	.237
0.4	.242	.247	.253	.258	.263	.268	.273	.278	.283	.288
0.5	.293	.298	.303	.307	.312	.317	.322	.326	.331	.336
0.6	.340	.345	.349	.354	.358	.363	.367	.372	.376	.380
0.7	.384	.389	.393	.397	.401	.405	.410	.414	.418	.422
0.8	.426	.430	.434	.438	.441	.445	.449	.453	.457	.460
0.9	.464	.468	.472	.475	.479	.482	.486	.490	.493	.496
1.0	.500	.503	.507	.510	.514	.517	.520	.524	.527	.530
1.1	.533	.537	.540	.543	.546	.549	.553	.556	.559	.562
1.2	.565	.568	.571	.574	.577	.580	.583	.585	.588	.591
1.3	.594	.597	.600	.602	.605	.608	.610	.613	.616	.618
1.4	.621	.624	.626	.629	.632	.634	.637	.639	.642	.644
1.5	.646	.649	.651	.654	.656	.659	.661	.663	.666	.668
1.6	.670	.672	.675	.677	.679	.681	.684	.686	.688	.690
1.7	.692	.694	.697	.699	.701	.703	.705	.707	.709	.711
1.8	.713	.715	.717	.719	.721	.723	.725	.726	.728	.730
1.9	.732	.734	.736	.738	.739	.741	.743	.745	.747	.748
2.0	.750	.752	.754	.755	.757	.759	.760	.762	.764	.765
2.1	.767	.768	.770	.772	.773	.775	.776	.778	.779	.781
2.2	.782	.784	.785	.787	.788	.790	.791	.793	.794	.796
2.3	.797	.798	.800	.801	.803	.804	.805	.807	.808	.809
2.4	.811	.812	.813	.815	.816	.817	.818	.820	.821	.822
2.5	.823	.824	.826	.827	.828	.829	.830	.832	.833	.834
2.6	.835	.836	.837	.839	.840	.841	.842	.843	.844	.845
2.7	.846	.847	.848	.849	.850	.851	.852	.853	.854	.855
2.8	.856	.857	.858	.859	.860	.861	.862	.863	.864	.865
2.9	.866	.867	.868	.869	.870	.871	.872	.872	.873	.874
3.0	.875	.876	.877	.878	.878	.879	.880	.881	.882	.883
3.1	.883	.884	.885	.886	.887	.887	.888	.889	.890	.890
3.2	.891	.892	.893	.893	.894	.895	.896	.896	.897	.898
3.3	.899	.899	.900	.901	.901	.902	.903	.903	.904	.905
3.4	.905	.906	.907	.907	.908	.909	.909	.910	.910	.911
3.5	.912	.912	.913	.913	.914	.915	.915	.916	.916	.917
3.6	.918	.918	.919	.919	.920	.920	.921	.921	.922	.923
3.7	.923	.924	.924	.925	.925	.926	.926	.927	.927	.928
3.8	.928	.929	.929	.930	.930	.931	.931	.932	.932	.933
3.9	.933	.934	.934	.934	.935	.935	.936	.936	.937	.937
4.0	.938	.938	.938	.939	.939	.940	.940	.941	.941	.941
4.1	.942	.942	.943	.943	.943	.944	.944	.944	.945	.945
4.2	.946	.946	.946	.947	.947	.947	.948	.948	.949	.949
4.3	.949	.950	.950	.950	.951	.951	.951	.952	.952	.952
4.4	.953	.953	.953	.954	.954	.954	.955	.955	.955	.956
4.5	.956	.956	.957	.957	.957	.957	.958	.958	.958	.959
4.6	.959	.959	.959	.960	.960	.960	.961	.961	.961	.961
4.7	.962	.962	.962	.962	.963	.963	.963	.963	.964	.964
4.8	.964	.964	.965	.965	.965	.965	.966	.966	.966	.966
4.9	.967	.967	.967	.967	.967	.968	.968	.968	.968	.969
5.0	.969	.969	.969	.969	.970	.970	.970	.970	.970	.971
5.1	.971	.971	.971	.971	.972	.972	.972	.972	.972	.973
5.2	.973	.973	.973	.973	.974	.974	.974	.974	.974	.974
5.3	.975	.975	.975	.975	.975	.976	.976	.976	.976	.976
5.4	.976	.977	.977	.977	.977	.977	.977	.977	.978	.978
5.5	.978	.978	.978	.978	.979	.979	.979	.979	.979	.979
5.6	.979	.980	.980	.980	.980	.980	.980	.980	.981	.981
5.7	.981	.981	.981	.981	.981	.981	.982	.982	.982	.982
5.8	.982	.982	.982	.982	.983	.983	.983	.983	.983	.983
5.9	.983	.983	.984	.984	.984	.984	.984	.984	.984	.984

この数表は $1 - e^{-kt}$ の値に対応する $\frac{t}{T}$ 関数を示す

試算対象箇所

2-2-3 半飽和時間、許容過飽和比及び減圧要領設定に係る初期の米国の考え方

$Sc=R=PN_2/P_B$ と PN_2 で定義された許容過飽和比（窒素分圧と減圧停止圧の比）の設定要領が U.S.Navy,1981、Diving Medical Officer（以降、「潜水教範」と略称）、18章に紹介されている。

本報文は、その一部翻訳と解説追補である。潜水教範で記述されている圧力単位は水圧を潜水深度換算 fsw（feet of sea water：33fsw=1.0 気圧≒0.1MPa）で表示している。絶対気圧表示は fswa（添え字 a は atmosphere absolute の a である。）としているが、ATA（アータと読む）や atm の単位と同じ意味である。

(1) U.S.N.,1981、Diving Medical Officer

Heller、Mager や Von Schrotter は、「人体は相対的に均一な構造で、血液に近似した窒素の溶解度をもつ。」と考えた(1900年)。体重 70kg(容積 70,000 ミリットル)が心臓よりの送り出し 5,000 ミリットル/分で環流されるとすれば、9.7 分の半飽和時間が推測される。

$$T_{1/2}=0.693/\{\dot{Q} \times (\alpha_B/\alpha_T)\}=0.693/\{(5,000/70,000) \times (1.0)\}=9.7 \text{ 分}$$

ここに \dot{Q} ：組織の血液流量（血液ミリットル/組織ミリットル/分）

α_B ：血液への窒素溶解（窒素ミリットル/血液ミリットル/ATA）

α_T ：組織の窒素分圧変動率

α_B/α_T ：血液/組織間の不活性ガス溶解比

かれらは、ガス交換がこの割合で進むと、20分/大気圧の減圧が安全に行えることを提案した。この減圧は 5~6ATA の短時間潜水には適切であるとを証明したが、長い潜水では適切でなかった。

1908年に、Boycott、Damant や Haldene は、トンネル作業員の減圧症発生は曝露時間 5 時間までは増加するが、それを超えると一定にとどまることに気づいた。それに加えてかれらの実験用山羊のデータは 3 時間を超える曝露であっても増加を示さなかった。このより早い飽和時間は、「山羊は人体の約 3/5 の大きさであった。」という、かれらの観察により説明された。このようにして、かれらは「人体は一区画ではなく、数区画に区分して考えるべきである。」と推論した。可能な変換割合の範囲を含むために 5、10、20、40 及び 75 分の半飽和時間が選択された。かれらの計算によれば、75 分組織はおよそ 95%飽和に約 5 時間を要することになった。

実験的に Haldane は 2ATA で完全に飽和した後に 1ATA まで無症状で人間は減圧できるということを観察した。しかし人間が 1Ata までの減圧前に 2.5ATA で飽和されると、減圧症を引き出した。山羊は次に示す飽和曝露と減圧段階を安全に行えた。

2ATA⇒1ATA

4ATA⇒2ATA

6ATA⇒3ATA

それで、人間も山羊も共に 2：1 の圧力降下すなわち PN_2/P_B の比 1.58/1 を少なくとも 3ATA まで許容するというように思われた。これらのデータを基に、これらの作業従事者達は PN_2/P_B の比がどの組織区画においても決して 1.58/1 を超えないように減圧手順を設計することを提案した。便宜を考慮して減圧停止は 10fsw 刻みの増加割合とした。

例：200fsw/30 分潜水で、半飽和時間 20 分**訳注（ホールデン式は前掲の記号使用）

$$P_{tis}=P_0+(P_a-P_0)\{1-e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} \quad , \quad P_a=\{(200+33)/33\} \times 0.79=5.58\text{ATA}, P_0=0.79\text{ATA}$$

$$\text{ボトム滞在の窒素分圧を計算すると、} P_{tis}=P_0+(P_a-P_0)\{1-e^{-(0.693 \cdot t/T)}\}$$

$$=0.79+(5.58-0.79)\{1-e^{-(0.693 \times 30/20)}\}=0.79+4.79 \times (1-e^{-1.04})=3.89\text{ATA}$$

第1減圧停止圧を計算すると、 $PN_2/P_B = 1.58/1$ すなわち $P_B = PN_2/1.58$ より $3.89/1.58 = 2.46ATA = 48fsw$

訳注) 2.46ATA はゲージ圧 1.46 気圧 $= 1.46 \times 33fsw/気圧 \approx 48.18fsw \approx 48fsw$
40fsw への上昇前の第1停止時間を決める：(訳注：減圧停止は 10fsw 刻みより 50fsw 停止。)

40fsw における $P_B = (40+33)/33 = 2.21ATA$ 、しかも PN_2/P_B は $1.58/1$ を超えることはできない。それで、48fsw を離れる前の P_{tis} は $1.58 \times 2.21 = 3.50$ 以下でなければならない。それ故に、 P_{tis} は浮上前に 3.89 から 3.50ATA まで減少させねばならない。ガス交換式を用いると、48fsw における P_a は $0.79 \times 2.46 = 1.94ATA$

したがって、 $3.50 = 3.89 + (1.94 - 3.89) \times \{1 - e^{-(0.693 \times t/20)}\}$

$(3.5 - 3.89)/(1.94 - 3.89) = \{1 - e^{-(0.693 \times t/20)}\}$ 、 $0.2 - 1 = -e^{-(0.693 \times t/20)}$ 、

$\ln 0.8 = -0.2231 = -(0.693 \times t/20)$ したがって $t = 0.2231/(0.693/20) \approx 6.4$ 分

それゆえに第1停止は 48fsw で 6.4 分である。次の停止における時間設定のために、これらの計算が繰り返される。実際の計算にあつては、全ての区画の半飽和時間は 20 分組織ではない。

(2) 許容過飽和比・ $Sc=R=PN_2/P_B$ と PN_2 の一般的な関係：

出典・U.S.Navy, 1981、Diving Medical Officer、18-13~18-15 ページ

Yarborough 減圧表改訂に、Des Grages、Dwyer や Workman (1956) は追加の 609 例の実働潜水中の不活性ガスの吸収・排泄を半飽和時間 5,10,20,40,80 及び 120 分を用いて分析した。次に示す分析が安全比率を引き出すために使われた。与えられる減圧停止圧・環境圧 P_B は一定である。若し、組織の PN_2 が縦軸に、過飽和比 PN_2/P_B が横軸にプロットされると、 P_B しかもゼロという縦軸交点をもつ勾配が得られる。すなわち $PN_2 = (PN_2/P_B) \times P_B$ 。この線は与えられた停止圧に対して PN_2 と PN_2/P_B の可能な全ての組合せを表わしている。図 2-3 は減圧停止圧が水面、10fsw と 20fsw の関係を示している。半飽和時間ごとに別々のグラフがつけられ指数関数的に変化するガス交換モデルから計算された窒素分圧が 609 潜水例全てにおける停止圧到達時に対してプロットされた。それから、減圧症に関連した窒素分圧から安全な窒素分圧を分離した各組織半飽和時間ごとの曲線をつくることのできた。図 2-4 は安全サイドの窒素分圧と安全でない窒素分圧を示す曲線で、曲線左側の潜水が安全で、右側が減圧症に関係する。

各組織の許容過飽和比は減圧停止深度の滑らかな関数処理で減少した。具体的な数値を表 2-3 に示す。表をつくるために、種々の組織の窒素張力が計算された。次に、座標軸に適切な図を描き、許容比が決定された。必要とされる減圧停止深度は、窒素分圧を比で割って計算された。あるいは図をざっと見ることで計算された。図 2-4 の PN_2 を横軸にすると、許容比と組織の窒素分圧との間の関係がさらにあきらかになる。それは、負の指数関数あるいは累乗であり、図 2-5 はそれを示している。

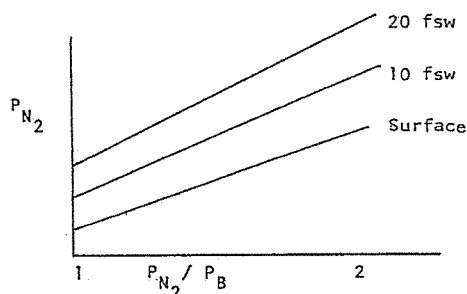


図 2-3 - 組織の窒素分圧と過飽和比の関係

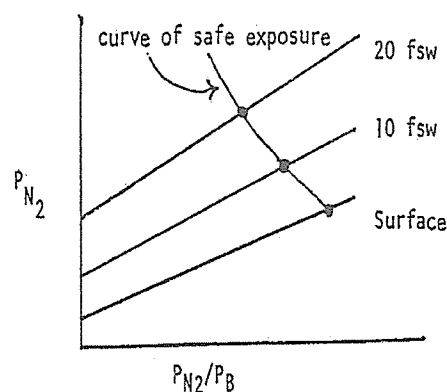


図 2-4 窒素分圧の安全範囲

次に示す経験式が許容比と PN₂ の間の最もよい関係を水面以外の状態で説明すると言うことが見出された。

$$r = s / [(PN_2/0.79) / 33 - r/0.79 + 1.25]^{0.1}$$

ここに、r : 当該深度の許容比 (PN₂/P_B)

s : 水面の許容比

PN₂ : 組織の窒素分圧

水面の許容比を正確に説明するために分母の 1.25 は、1.0 まで低減される。

DesGranges、Dwyer や Workman(1956)により発展させられたこれらの考えに基づく表が 1956 年に USN で採用され、今日 (訳注: 1981 年) も使われている。

これらの表による減圧症発生率は 1971~1978 年の期間に Berghage や Durman(1980)により研究された。これらの期間の 16,120 例の減圧を必要とした潜水が海軍から報告された。202 件の減圧症が全体の発症率 1.25% をうみだした。可能な 295 深度/時間の減圧表のうち 43 表のみが 100 件以上の潜水であった。これらの減圧表によれば、全体の発症率は 1.1% であった。いくつかの減圧表 (例えば、100fsw/60 分) では発症率が 4.8% もの高率であった。

表 2-3 許容過飽和比 (Des Granges, 1956)

組織の半飽和時間	停止深度		
	水面	40fsw	70fsw
5	3.16	2.67	2.55
10	2.69	2.29	2.21
20	2.21	1.93	1.86
40	1.90	1.55	1.52
80	1.58	1.41	1.38
120	1.53	1.38	1.36

許容過飽和比は半飽和時間と深度に応じて

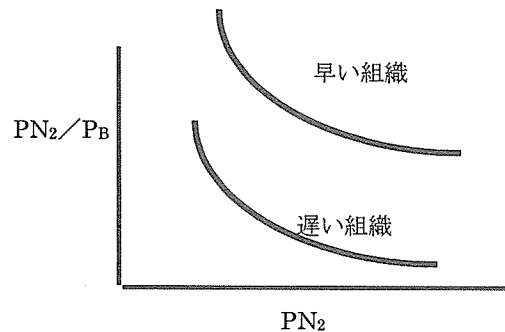


図 2-5 許容比と組織の窒素分圧との関係

2-2-4 高圧則減圧表作成で用いた組織数と半飽和時間及び各国の許容過飽和比対比

2-2-1 で紹介した『わかりやすい潜函病予防法の解説・梨本一郎』では、人体組織を 6 区分して半飽和時間を 5、10、20、40、75、120 分に想定している。

半飽和時間の短い組織：水っぽい組織の代表は血液・半飽和時間 5~20 分

半飽和時間の長い組織：脂肪分に富む脊髄の白質や骨髄・半飽和時間 120 分

「減圧比率 = 体内窒素分圧 / 外圧 ≤ α で定義し、α = 1.75~2.0 位である。」としている。

諸外国は半飽和時間が短いと減圧比率を大きく設定し、外圧が高いと低く設定している。

参考：米国、フランス、日本 (高圧則) における組織の半飽和時間と許容過飽和比を比較すると表 2-4 のようになる。許容過飽和比値の定義や数値も変動している。

表 2-4 米仏日の組織数、半飽和時間(H.T.)と許容過飽和比

国名	組織、半飽和時間と許容過飽和比 (PN ₂ /P _B)						
米 国 注・1)	H.T. 5分	10	20	40	80	120	
	水面	3.16	2.69	2.21	1.90	1.58	1.53
	40ft 停	2.67	2.29	1.93	1.55	1.41	1.38
	70ft 停	2.55	2.21	1.86	1.52	1.38	1.36
フランス	H.T. 7分			30	60	120	
	2.56			1.84	1.6	1.6	
日 本 注・2)	H.T. 5分	10	20	40	75	120	
	正確には不明: 1.75~2.0 (組織区分で指定なし)						

注・1) 1956 Des Granges の提案値で、減圧停止圧及び停止時間に応じて許容過飽和比を設定している。: U.S.Navy, 1981, Diving Medical Officer 18-14 ページの表-5 より抜粋。
注・2) 一律の値か組織毎に設定しているのか不明。
注・3) 滞在可能な環境圧は P_B = PN₂ / Sc で求める。

Sc = R = PN₂ / P_B、注・3)、

PN₂ : 組織の窒素分圧

P_B : 減圧停止環境圧

2-2-5 減圧比率 (3-2-1 で既出) の考え方

2-2-1 で『減圧比率 $R = PN_2/P_B \leq \alpha$ が減圧症発生防止の条件で、 α は安全比率といわれ、1.75～2 位』という表現があった。この値について若干補足する。

減圧比率は減圧の程度を示す指標である。減圧程度を表わす指標・許容比として、環境の絶対圧力比をいう場合と、組織内不活性分圧と減圧後の環境絶対圧力の比(許容過飽和比)をいう場合がある。本節では以降、許容過飽和比率の用語で統一して記述する。

米国海軍潜水教範 (Diving medical officer、1981) の Lesson18・18-11 ページは上記の R を許容過飽和比率 (Allowable Supersaturation Ratios) と定義し Yarborough 提案の数値 (半飽和時間 40 分及び 75 分組織の数値) として 1.38—1.58 を記述している。空気中の窒素濃度を約 79% とすれば比率の下限値 1.38 は絶対圧力 1.75 気圧の窒素分圧に相当 ($1.75 \times 0.79 \approx 1.38 \text{atm}$) し、同様に比率の上限値 1.58 は 2 絶対気圧の窒素分圧 $2.0 \times 0.79 \approx 1.58 \text{atm}$ に相当する。このようにしてみると、上記『 』内記述の「 α は安全比率といわれ、1.75～2 位である。」は絶対圧力比を示していると推測できる。R 値のこと。

追補：安全比 $\alpha = 1.75 \sim 2$ の追補説明として上記の米国海軍潜水教範 18-11 ページの記述を抽出して進めることにする。なお、記号の混乱を避ける意味で、原文記載の許容過飽和比を用いることにする。許容過飽和比 $= PN_2/P_B$

「凡そ 3000 例の潜水について Hawkins、Shilling や Hansen (1935) 及び Yarborough (1937) により行われた窒素の吸収や排泄の数学的分析は、許容過飽和比 PN_2/P_B が潜水深さや時間と同様に組織の半飽和時間の関数であるようだということを明らかにした。これらの研究成果が次に示す表である。半飽和時間が早い組織は高い比率

表 2-5 各種許容過飽和比

半飽和時間	Hawkins 等	Yarborough
5 分	4.35	—
10	3.56	—
20	2.21	1.94—2.21
40	1.58	1.38—1.58
75	1.42—1.58	1.38—1.58

を許容しているようであり、そしてそれは C&R 減圧表²⁾の深い停止を削除できることををも許容しているようである。実際、Yarborough は 5 分及び 10 分組織は考慮しなくてもよいと信じていた。長く深い潜水に対して、比率の組合せの低い部分が安全な減圧に効果的である。低い比率は 185ft(水深 56m)以深の全ての潜水で使用された。半飽和時間 20 分、40 分、75 分及び表 2-5 に基づく減圧表は Yarborough により計算され、これらは 1937 年に海軍で刊行された。Yarborough 減圧表の比率は実施を伴った潜水に基づいているため、

Hawkins、Shilling や Hansen の計算より若干小さい。その後数年間の海軍ダイバーの減圧症発症率は 1.1% であった。Yarborough 減圧表の見なおしは潜水規模 (深度、滞在時間、重作業) の拡大により減圧症発症率の高率化から行われ、5 分と 10 分組織の PN_2/P_B 考慮、半飽和時間 120 分と PN_2/P_B を小さくすることが導入された (1950 年代)。120 分組織では $PN_2/P_B = 1.58 \approx 1.6$ としている。」 米国減圧表を \rightarrow 換算したフランスも同様に扱っている。フランス減圧表を参考にした高圧則減圧表は 120 分組織も考慮している。ただしその PN_2/P_B 設定は不明である。

注) C&R 減圧表: ホールデン理論 (比率 1.58/1) に基づく米海軍最初の減圧表 (1915: French & Stillson)。200～300fsw 潜水では酸素減圧を用いた。306fsw から沈没潜水艦 F-4 を回収した。The Bureau of Construction and Repair tables (海軍建造修繕局減圧表) の略称。

2-2-6 減圧要領に関する米仏日の年表等：左記下線の順序は「減圧表作成の参考順」

これまでに記述してきた減圧表関連事項を年表形式で整理すると次のようになる。

- ① 1908：ホールデン理論の報告書
- ② 1915：ホールデン理論を用いて米国最初の減圧表 (C&R 減圧表) が作成された。
- ③ 1937：その改訂結果が Yarborough 減圧表となった。半飽和時間 75 分まで考慮
日本の高気圧作業関連の法施行・内務省令 土木建築場安全及衛生規則に追加減圧要領は漸降方式で、最短所要時間を指定
- ④ 1947：労働省令・労働安全衛生規則で高気圧作業実施要領が少し改訂したものの、減圧表はない。
- ⑤ 1948：フランス海軍は Yarborough 減圧表を \rightarrow 換算した。

- ⑥1949：フランス語圏潜水教科書「潜水」刊行：ホールデン理論や減圧表作成要領等解説含む。
- ⑦1956：米国海軍はYarborough減圧表改訂作業に120分組織の追加等を行い、米国標準空気減圧表（Des Granges：190fsw・60分まで、Workman：より深い潜水・例外曝露）を作成した。
最初のM値は潜水データを整理して作成した実験式ドワイヤー10乗式を基にして得られた。M値は10fsw（3m）毎に設定した減圧停止圧に滞在できる最大の窒素分圧値のことである。
- ⑧1961：高圧則減圧表公開：*米国海軍標準空気減圧表の組織数と半飽和時間を考慮
- ⑨1962：「わかりやすい潜函病予防法の解説」刊行：梨本本（なしもとほん）と略称
- ⑩1977：「潜水学」第8版刊行（訳者・関邦博の邦訳版刊行は1981）：120分組織考慮
- ⑪1991：梨本先生回顧録（高圧則減圧表作成はフランスの「潜水」を参考にしたと記述）

2-2-7 結論

高圧則減圧表はフランス海軍の潜水用減圧表を参考にして作成された。フランス海軍の潜水用減圧表は米国海軍（略称：U.S.N.）の潜水用減圧表で用いていた圧力単位 fsw をメートル単位に換算して作成された。それで、高圧則減圧表は米国海軍潜水用減圧表作成の考え方を踏襲していると推測する。両海軍の考え方を整理して、高圧則減圧表が作成された考え方をまとめると、以下のようになり、これらを本節 2-2 の結論とする。

- ①高圧則減圧表はゲージ圧 $4.0\text{kg}/\text{cm}^2$ を適用最高圧力としていた。
- ②計算式は Haldane 式を用いた。 $pN_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-k \cdot t}) + p_0N_2$
- ③具体的な数値計算は以下に示す仮定を用いて行った。
 - *呼吸ガスは空気を対象として作成したが、空気の窒素成分は 80% を想定すること。
 - *圧力をもった高圧空気を呼吸すると空気成分の窒素が体内組織に蓄積すること。
 - *体内組織を 6 組織に区分してそれぞれに固有の半飽和時間をもたせて窒素の体内蓄積程度を評価すること。
 - * 6 組織の半飽和時間は 5、10、20、40、75、120 分を想定すること。
 - *フランス海軍と同じ吸収係数 k を用いること。 k の定義は $k = \ln 2 / T$ である。
 \ln は自然対数で $\ln 2 \approx 0.693$ 、 T = 人体組織の半飽和時間である。
 フランス海軍は、 k の値を数表にしていた。すなわち、 k の小数第 1 位までの値を表の左欄に置き、表の最上欄に k の小数第 2 位の値を置いて k の値を小数第 3 位まで求めていた。一方、米国海軍は $(1 - e^{-k \cdot t})$ の値を数表にしていた。すなわち数表構成を次のようにしていた。
 $(1 - e^{-k \cdot t}) = 1 - e^{-(\ln 2 / T) \cdot t} = 1 - e^{-(0.693 / T) \cdot t}$ なので、
 数表の左欄に 1 分刻みで経過時間 t を置き、表の最上欄に組織の半飽和時間を置いて、表の中に計算値 $1 - e^{-(0.693 / T) \cdot t}$ を配置した。なお、初期に想定した半飽和時間は 75 分までであったが、1956 年代には 75 分を 80 分に繰り上げ、120 分を追加していた。それを用いて作成した減圧表が現在まで踏襲されている。
 - *ゲージ圧 $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下の高気圧作業における減圧停止は設けないこと。
 - * 減圧に際しては Haldane の 1 : 2 の定律を基準に採用し、
 - * 減圧比率は $R = pN_2 / P_B \leq \alpha$ で定義し、安全比率 α の範囲は 1.75 ~ 2 位に設定すること。 pN_2 は体内組織の窒素分圧、 P_B は減圧停止圧（絶対気圧）
 - *減圧停止圧は $0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 刻みとすること。
 - *減圧終了時の体内窒素分圧は「体内ガス圧係数 = 2.2」以下に抑えること。
 体内ガス圧係数 = $pN_2 / p_0N_2 = \text{減圧直後の体内窒素分圧} / \text{大気圧で飽和した体内窒素分圧}$
 $p_0N_2 = 0.8$

2-3 高圧則別表第1の再現例と減圧表作成要領

2-3-1 計算式：Haldane 理論

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

ここに、 P_{tis} : 組織の窒素分圧。添え字 tis は英語の $tissue$ ・組織に由来する。

P_0 : 加圧前の不活性ガスの分圧。加圧前の滞在環境が大気圧の場合、
0.79atm (空気中の窒素分圧) あるいは 0.8atm である。

P_a : 滞在環境 (圧気内) の圧力 (p 気圧) に応じた圧気の窒素分圧
[$(1+p) \times 0.79$]atm

参考：計算式の誘導に際して、人体が高圧下に暴露された場合、血液が肺毛細血管を通る短時間内で、その圧力に応じて血液に溶解できる窒素が全て溶解してしまうと仮定している。窒素が多く溶解している血液は末端の組織に移動し、組織内の窒素の溶解度が增大すなわち窒素分圧増大となると考えている。酸素は体内で消費されて蓄積することはない。消費後は炭酸ガスとなるが、これも換気が十分な場合 (通常状態)、体外に排泄される。

t : 滞在時間 (分)

e : 自然対数の底、 $e = 2.71828$

T : 組織の半飽和時間 (分)

組織には気体が圧力、温度に応じて溶解する。溶解して飽和する時間は長時間を要するので、溶解や排泄程度を表現するのに、組織ガス分圧が飽和状態の値の 1/2 となる時間すなわち半飽和時間 T を用いることにしている。 T が短い組織は肝臓など血液の豊富な臓器で、長い組織は血流の少ない脂肪である。なお、組織と血液の間に拡散による支障がなく、血液内の気体が速やかに組織に移行すると見なしている。

ホールデン教授は人体を 5 つの半飽和時間 (5,10,20,40,75 分) をもつ組織で構成されると仮定した。高気圧作業安全衛生規則 (略称：高圧則) の減圧表では、さらに 120 分の組織を追加している。

2-3-2 計算例として抽出する減圧表別表第1 (1961 高压則：圧力単位は kg/cm²)

表 2-6 は再現対象を含む高压則別表第1 の一部である。

表 2-6 高压則別表第1 の一部

別表第1

圧力 (kg/cm ²)	高压下の時間	減圧(分)					体内ガス 圧係数	業務間ガス 圧減少 時間 (分)	業務終了 後ガス圧 減少時間 (分)
		1.5kg/cm ²	1.2kg/cm ²	0.9kg/cm ²	0.6kg/cm ²	0.3kg/cm ²			
2.6 を こえ	30分以下					2	1.5	30	30
	30分をこえ 60分以下				10	15	1.8	60	30
	60分をこえ 90分以下								45
	90分をこえ 120分以下								45
	120分をこえ 150分以下								45
2.8 以下	150分をこえ 180分以下			15	35	55	2.2	150	45
	180分をこえ 210分以下			16	35	55	2.2	150	45
				21	40	60	2.2	150	45
									45
									45
2.8 を こえ	15分以下					2	1.3	30	30
	15分をこえ 30分以下					5	1.5	30	30
	30分をこえ 45分以下				3	15	1.7	60	45
	45分をこえ 60分以下				13	20	1.9	60	45
	60分をこえ 75分以下				18	30	2.0	90	45
3.0 以下	75分をこえ 90分以下			4	20	40	2.0	90	45
	90分をこえ 105分以下			11	25	40	2.1	120	45
	105分をこえ 120分以下			13	30	45	2.1	120	45
	120分をこえ 135分以下			15	35	45	2.2	150	60
	135分をこえ 150分以下			18	35	50	2.2	150	60
	150分をこえ 165分以下			23	35	55	2.2	150	60
	165分をこえ 180分以下			20	40	60	2.2	150	60
	180分をこえ 195分以下			24	40	65	2.2	150	60
	195分をこえ 210分以下			26	40	75	2.2	150	60

(1) 施工条件：加減圧速度は 0.08MPa/分の定速加圧とする。

(2) 計算条件

①初期分圧は 0.79atm とする。

注) 梨本先生は 0.8atm で計算したらしいが、空気の酸素成分 21%(酸欠即との整合確保面から)を基準として窒素成分 79%とした。0.8とする場合は、計算結果に (0.8/0.79) を乗ずればよい。これは窒素分圧 P_{tis} の計算式右辺において第 1 項と第 2 項それぞれに空気の窒素成分 0.79 が乗じられているためである。

②組織は 6 区画とし、それぞれの半飽和時間は 5、10、20、40、75、120 分とする。

③保圧 0.3MPa (=3.0kg/cm²)、保圧時間 60 分 (高压則は加圧開始からを高压下の時間としているが、ここでは多目の時間にしてある。それでも体内ガス圧係数は安全側にある。)

(3) 窒素分圧 (PN₂) 計算例

表 2-7 は 2-3-1 の計算式を用いて 6 区分した組織の窒素分圧を計算結果である

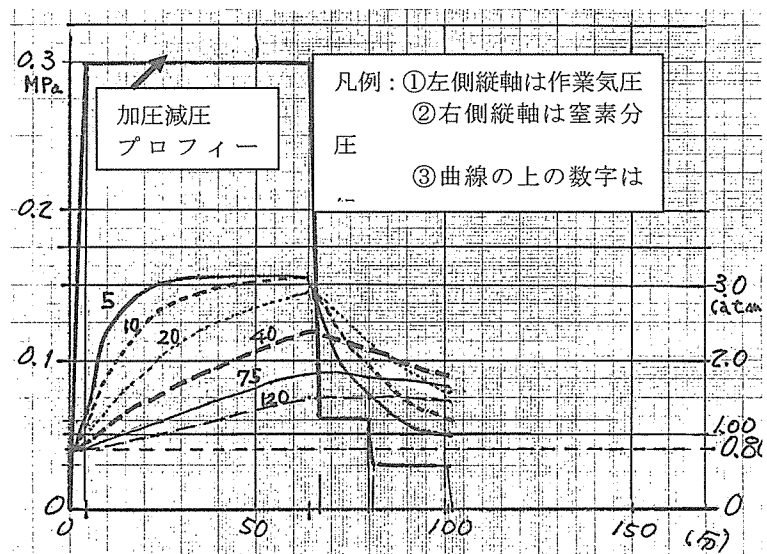
表 2-7 窒素分圧計算 (加圧～保圧～減圧及び減圧停止を経て大気圧帰還まで)

圧力 (Mpa)	区間平均 圧力	時間 (分)	組織の半飽和時間(分)					
			5	10	20	40	75	120
0	—	—	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
0~0.08	0.04	1	0.831	0.811	0.801	0.795	0.793	0.792
0.08~0.16	0.12	1	0.948	0.873	0.833	0.811	0.802	0.797
0.16~0.24	0.20	1	1.132	0.973	0.885	0.838	0.816	0.806
0.24~0.30	0.27	1	1.364	1.104	0.954	0.874	0.835	0.818
0.30	0.30	20	3.048	2.646	2.057	1.543	1.227	1.073
0.30	0.30	20	3.153	3.031	2.608	2.017	1.553	1.301
0.30	0.30	20	3.160	3.128	2.884	2.352	1.824	1.504
0.30~0.22	0.26	1	3.119	3.109	2.883	2.360	1.833	1.512
0.22~0.14	0.18	1	3.002	3.049	2.860	2.357	1.836	1.516
0.14~0.06	0.10	1	2.818	2.951	2.816	2.344	1.834	1.516
0.06	0.06	13	1.520	1.949	2.253	2.126	1.769	1.498
0.06~0.03	0.045	1	1.472	1.895	2.215	2.109	1.763	1.496
0.03	0.03	20	1.055	1.244	1.621	1.792	1.639	1.445
0.03~0	0.015	1	1.036*	1.222*	1.597*	1.777*	1.632*	1.442*
体内ガス圧係数	—	—	1.311	1.547	2.022	2.249	2.066	1.825

体内ガス圧係数の定義は、(大気圧帰還時の窒素分圧/大気の窒素分圧)である。「わかりやすい潜函病予防法の解説：梨本一郎 著・工学出版株 1962」37 ページでは、「・・・なお、体内ガス圧係数は前述の如く、安全のため吸収および排泄のおそい組織、すなわち主として半飽和時間 120 分の組織により計算されている。・・・」と記述している。高圧則減圧表は体内ガス圧係数の最大値を 2.2 以下に抑えているが、これは 120 分組織の窒素分圧を $2.2 \times 0.80 = 1.76(\text{atm})$ 以下に抑えていれば減圧症が発症しないという考え方である。半飽和時間が 120 分より短い他の組織の窒素分圧は必ず $1.76(\text{atm})$ より大きい、それでも安全と考えている。表 3-3-3-2 の 120 分組織*印に着目すると体内ガス圧係数は $1.442 / 0.79 \div 1.825 \div 1.83$ となる。高圧則は大気の窒素分圧を $0.8(\text{atm})$ としているので、120 分組織の減圧終了時窒素分圧は $\{1.442 \times (0.80 / 0.79)\} \div 1.460(\text{atm})$ となり、体内ガス圧係数は $1.460 \times 0.80 \div 1.83$ となり、同じ結果を得る。高圧則減圧表の体内ガス圧係数は、1.83 を繰り上げて 1.9 としたと推測する。体内ガス圧係数を繰り上げることは、減圧終了時の体内窒素分圧を大きめに評価することを意味し、次の高気圧作業の滞在時間を短く評価すなわち安全側に評価することを意味している。妥当な措置である。

(5) 窒素分圧変化のグラフ

図 2-6 は表 2-7 の窒素分圧をグラフ表示した図である。



(6) 減圧比率 $R = pN_2 / PB$ 、減圧停止圧の設定と減圧表作成要領

表 2-7 窒素分圧計算から第 1 減圧停止圧 0.06MPa 到達時の減圧比率 $R = pN_2 / PB$ は表 2-8 の値となる。最大値は 10 分組織で 1.84 である。 0.06MPa で減圧停止せずに毎分 $0.08\text{MPa} \div 0.8\text{kg/cm}^2$ で減圧していくと、次の減圧停止圧 0.03MPa には

$(0.06 - 0.03) / 0.08 \div 0.4$ 分で到達する。この時間内では、窒素分圧の変動が小さいので、 0.03MPa 到達時の窒素分圧を 0.06MPa 到達時とほぼ同じと仮定すれば、10 分組織の減圧比率 R は、 $R = 2.951 / 1.3 = 2.27$ となり、許容値 2.0 を超えてしまう。したがって、第 1 減圧停止圧は 0.06MPa となる。

表 2-8 第 1 減圧停止圧到達時の減圧比率 $R = pN_2 / PB$ の実績

組織の半飽和時間	5	10	20	40	75	120
第 1 減圧停止圧到達時の窒素分圧 $= pN_2$	2.818	2.951	2.816	2.344	1.834	1.516
第 1 停止圧 0.06MPa : 絶対気圧 $PB = 1.6\text{kg/cm}^2$	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
減圧比率 $\cdot R = pN_2 / PB$	1.76	1.84	1.76	1.47	1.15	0.95

梨本先生の解説：『 $pN_2 / PB < \alpha$ 、 α は安全比率といわれ、1.75~2 位である。』

表 2-8 の計算では、 0.06MPa 到達時にこの範囲に収まっている。

第 2 減圧停止圧 0.3MPa では表 3-9 の値となり、減圧比率最大値は 20 分組織で 1.70 となっている。この組織の窒素分圧で大気圧に 0.4 分で戻ると減圧比率は $R = 2.215 / 1.0 = 2.22$ となり、

大気圧には戻れないので 0.03MPa が第 2 減圧停止圧となる。大気圧に戻るためには 0.03MPa に滞在する間に減圧比率が 2.0 以下になればよい。

表 2-9 第 2 減圧停止圧到達時の減圧比率 $R = pN_2 / PB$ の実績

組織の半飽和時間	5	10	20	40	75	120
第 2 減圧停止圧到達時の窒素分圧 $= pN_2$	1.472	1.895	2.215	2.109	1.763	1.496
第 2 停止圧 0.03MPa : 絶対気圧 $PB=1.3\text{kg/cm}^2$	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
減圧比率 $\cdot R = pN_2 / PB$	1.13	1.46	1.70	1.62	1.36	1.15

以上の手順で減圧表が作成可能となる。なお、組織の半飽和時間によって R をどのように設定するかは不明である。米国の潜水教範では研究者の説が解説されている。

(7) 減圧停止時間の計算要領推測

減圧停止時間は「先の減圧停止圧」に滞在して低下した窒素分圧が、次の減圧停止圧に移行しても安全な窒素分圧になるための滞在時間である。安全な窒素分圧は減圧比率が与えてくれる。しかしながら、高圧則減圧表作成要領を解説した「わかりやすい潜函病予防法の解説」は減圧比率を 1.75~2.0 くらいであるという説明で終わっており、組織固有の数値が存在することなどの減圧停止時間評価に必要な情報が欠落していた。そこで、組織ごとの減圧比を仮定して、減圧停止時間評価を試みた結果、再現はできた。

1) (6) 計算例の第 1 減圧停止時間の計算要領推測経過

① 計算式

窒素分圧計算式は、 $P_T = P_0 + (P_a - P_0)(1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}})$ を用いる。

上式を変形して $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}}$

さらに変形して $(P_T - P_0) / (P_a - P_0) - 1 = -e^{-0.693 t / T_{1/2}}$

書き直して $1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0) = e^{-0.693 t / T_{1/2}}$

両辺の自然対数をとると、 $\ln\{1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0)\} = -0.693 t / T_{1/2}$

さらに書き直して $t = \ln\{1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0)\} \times T_{1/2} / -0.693$

② 初期値： P_0 を減圧停止圧 0.06MPa 到達時の窒素分圧と想定する。

③ 10 分組織：表 3-8 より第 1 減圧停止圧 0.06MPa 到達時の 10 分組織の窒素分圧は $P_0 = 2.951$ である。10 分組織の減圧比率を 1.75 と仮定すれば、減圧比率の定義：(窒素分圧 / 呼吸ガスの絶対圧) から窒素分圧は $1.75 \times (1 + 0.3) = 2.275 \text{atn}$ 以下となった場合に、次の減圧停止圧 0.03MPa に移行可能になる。移行可能な最大窒素分圧である。この値が P_T である。呼吸ガスは圧力 0.06MPa の空気なので窒素分圧は $(1 + 0.6) \times 0.79 \div 1.264 (\text{atm})$ である。これらを上記①の t 算定式に代入すると、

$$t = \ln\{1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0)\} \times T_{1/2} / -0.693$$

$$= \ln\{1 - (2.275 - 2.951) / (1.264 - 2.951)\} \times 10 / -0.693 = 7.4 \text{ 分}$$

④ 20 分組織：表 3-8 より第 1 減圧停止圧 0.06MPa 到達時の 20 分組織の窒素分圧は $P_0 = 2.816$ である。20 分組織の減圧比率を 1.75 に仮定すれば、

$$t = \ln\{1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0)\} \times T_{1/2} / -0.693$$

$$= \ln\{1 - (2.275 - 2.816) / (1.264 - 2.816)\} \times 20 / -0.693 = 12.4 \text{ 分}$$

同じ手順を辿って表 2-10 を得る。

表 2-10 第 1 減圧停止圧での停止時間推測

組織の半飽和時間：T1/2	5	10	20	40	75	120
第 1 減圧停止圧到達時の窒素分圧 =P0=表 3-3-3-2 の pN ₂	2.818	2.951	2.816	2.344	1.834	1.516
第 1 停止圧 0.06MPa：絶対気圧 PB=1.6kg/cm ²	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
第 1 停止圧での呼吸ガス窒素分圧 Pa= PB×0.79	1.264	1.264	1.264	1.264	1.264	1.264
組織固有の安全係数 α (減圧比 R = pN ₂ /PB ≤ α) この値が最も安全側と仮定して選択した。	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
第 2 停止圧 0.03MPa の絶対気圧表示	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
0.03MPa に移行可能な最大窒素分圧 P _T P _T = (1 + 0.3) × α	2.275	2.275	2.275	2.275	2.275	2.275
t の計算結果	3.1 分	7.4 分	12.4 分	3.8 分	—	—
減圧停止時間の設定 (上記の t の最大値)			13 分			

75 分組織と 120 分組織は α < 1.75 となるので、計算対象から外した。特に 120 分組織の P0 はゲージ圧 0.1 MPa で長時間滞在・急速減圧しても安全な窒素分圧 1.56(atm)以下に収まっている。

なお、高圧則減圧表は第 1 減圧停止時間 13 分を設定している。α = 1.75 で数値が再現された。

2) 『(6)計算例』の第 2 減圧停止時間の計算要領推測経過

1) と同様にして表 3-9 の第 2 減圧停止圧に到達した窒素分圧を用いて、第 2 減圧停止圧 0.03MPa の停止時間を求めると、40 分組織の安全係数 α = 1.8 を仮定して、

$$t = \ln\{1 - (P_T - P_0) / (P_a - P_0)\} \times T1/2 / -0.693$$

$$= \ln\{1 - (1.8 - 2.109) / (1.027 - 2.109)\} \times 40 / -0.693 = 19.4 \text{ 分}$$

残りを表計算で示すと表 2-11 のようになる。

表 2-11 第 2 減圧停止圧での停止時間推測

組織の半飽和時間：T1/2	5	10	20	40	75	120
第 2 減圧停止圧到達時の窒素分圧 =P0=表 3-3-3-3 の pN ₂	1.472	1.895	2.215	2.109	1.763	1.496
第 1 停止圧 0.03MPa：絶対気圧 PB=1.3kg/cm ²	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
第 1 停止圧での呼吸ガス窒素分圧 Pa= PB×0.79	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027
組織固有の安全係数 α (減圧比 R = pN ₂ /PB ≤ α) この値が最も安全側と仮定して選択した。	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.75
次の停止圧=大気圧の絶対気圧表示	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
大気圧に移行可能な最大窒素分圧 P _T P _T = (1 + 0) × α	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.75
t の計算結果	—	—	8.9 分	19.4 分	—	—
減圧停止時間の設定 (上記の t の最大値)				20 分		

75 分組織で α = 1.8 を選択すれば減圧停止時間不要である。α = 1.75 では窒素分圧 1.763 を 1.75atm まで低下させなければならない。停止時間は 1.9 分と計算される。5 分、10 分と 120 分組織の P0 は減圧停止不要高気圧作業範囲 (ゲージ圧 0.1MPa で長時間滞在・急速減圧しても安全な窒素分圧 1.56(atm)以下に収まっているので、計算対象から除外した。

米国は半飽和時間が短いと減圧比率を大きく設定し、外圧が高いと低く設定しており、それらは半飽和時間と減圧停止深度別に区分している。「わかりやすい潜函病予防法の解説」はそれらを解説していない。しかしながら、高圧則減圧表は第 2 減圧停止時間 20 分を設定している。α = 1.8 で数値が再現されたと推測するが、全ての減圧表にこのような手順を踏んだのかは不明である。減圧比率を組織半飽和時間に応じて変動させた米国の考え方を次節で紹介する。

米国の潜水関係の教科書では、呼吸ガスの窒素成分と滞底水深から体内窒素分圧が容易に換算されるので、分圧も水深表示 (フィートあるいはメートル) に設定しているのが通例である。減

圧比率から、次の減圧停止圧に移行あるいは浮上可能な最大窒素分圧が計算されるが、米国海軍の減圧表作成の解説書では、その最大窒素分圧を半飽和時間と減圧停止潜水深度で表わしている。最大窒素分圧は「最大」という意味で英語の maximum value の頭文字をとって M 値と言われている。なお、「窒素分圧/環境圧」で減圧を管理する方法は現在も踏襲されている。

(8) 米国海軍の M 値

1) まえがき

米国海軍の潜水における単位は feet を基準にしており、水深 10 fsw (ゲージ圧で 1 気圧相当) を 33feet で換算しているため水深 33feet のゲージ圧力を 33fsw (feet of seawater) と表記している。絶対気圧表示は絶対気圧表示 absolute の a を用いた添え字を加えて fswa として、例えば大気圧を 33fswa ($\approx 1.0\text{atm} \approx 0.1\text{MPa}$) のように表わすことにしている。M 値の単位は fswa である。

2) 米国海軍・標準空気減圧表計算の M 値 (M 値表 1 : ドワイヤー 10 乗式による M 値)

表 2-12 は米国海軍・標準空気減圧表の再現可能 (別途報告参照) な M 値 (単位: fswa) で、この値の算出には大気中の窒素分圧を 26.07fsw ($\approx 33 \times 0.79$) としている。ホールデン式を用いて作成した米国海軍減圧表の見なおしが続くうちに、1950 年代半ばに数学者のドワイヤー少佐 (当時) もその担当者となり、減圧時の不活性ガス分圧計算における組織の半飽和時間の見直し、組織数追加 (120 分組織も考慮) や許容比への配慮などを検討した。さらに、減圧データを整理して次に示す 10 乗式 (*印参照) を導いた。同海軍は、この式を用いて各減圧停止圧 (ゲージ深度: fsw) で減圧症に罹患せずに安全に滞在できる許容窒素分圧 [単位は fswa、分圧最大値 (Maximum partial pressure または Maximal permissible tissue tensions) の頭文字 M を用いて「M 値」と略称。] を求め (M 値表 1 として公開)、次いで研究を米国海軍標準空気減圧表作成にまで発展させた。

3) ドワイヤー 10 乗式と初期のワークマン M 値

* ドワイヤー 10 乗式: $Q = 33\{(s/r)^{10} + r - 1\}$: 減圧データを整理して得た実験式

Q : 生体内の窒素の絶対圧力 (大気中の窒素を 100% と見なしている。)

許容比: 環境圧の比・深度が深くなると、同じ比の圧力変化で圧力そのものの変化は大きくなるので、許容比は小さくなるので、下記の r と s を考える。

r : 水中許容比 (絶対圧表示、水中での許容比)

s : 水面許容比 (絶対圧表示、水面到着時の許容比)

その後、ワークマンはこの M 値を簡単な 1 次式で表現することと、次の減圧停止深度 (10 フィート浅い位置) まで減圧症に罹患することなく浮上できる数値に修正することを提案した。以上が現在のワークマン-M 値作成経過で、この考え方によりヘリオックス潜水でのヘリウム M 値表も作成された。表 2-12 は空気潜水の窒素に関する M 値表 1 で、図 2-7 は表 2-12 をプロット (パラメーター: 組織の半飽和時間、縦軸: M 値、横軸: 減圧停止圧) した図である。一般的な傾向として、半飽和時間が短いと M 値を大きく設定し、外圧が低いと低く設定している。

表 2-12 M 値表 1

半減時間 (分)	減圧停止深度または停止圧 (フィート)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
5	104	126	150	174	195	220	242	263
10	88	107	128	148	167	189	208	228
20	72	90	106	124	141	158	174	192
40	58	72	87	99	113	128	141	156
80	52	65	78	90	103	115	128	142
120	51	64	76	88	101	114	126	140

注) 減圧停止深度 0 フィートの M 値 = 51fswa は水面において減圧症に罹患しない窒素分圧を示している。これを atm 換算すると、 $51\text{fswa} \approx (51/26.07) \times 0.79 \approx 2.0 \times 0.79 \approx 1.58\text{atm}$ となる。半減時間 120 分で作成した高圧別表第 1 はゲージ圧 0.1MPa の空気環境に長時間滞在しても減圧停止時間不要すなわち減圧停止せずに大気圧に帰還しても減圧症に罹患しないとしているが、その場合の窒素分圧は 1.58atm である。

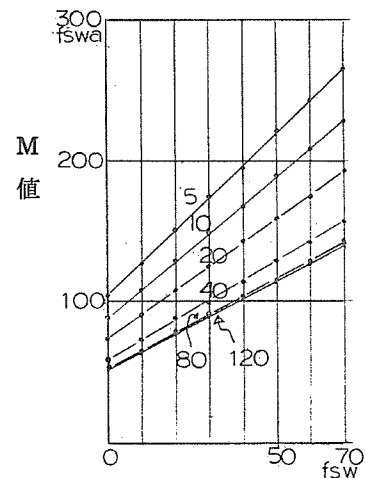


図 2-7 M 値表 1 の図化

4) 現在のワークマン M 値

現在使われているM値は $M=M_0+a \times D$ で表わしている。

M : 減圧停止深度において許容される不活性ガス分圧値で、減圧管理として、この値を超えることは許されない。したがって、M値表 1 が 0.0fsw のM値を提示しているのに対し現在のM値は最終減圧停止深度 10fsw \approx 3m までを公開（例：「潜水医学」169 ページ表 8.8 参照）している。分圧単位は、絶対圧力を水深相当に換算した fswa である。

fswa : feet of sea water absolute、

大気圧 = 1 絶対気圧 = 33fswa = 1013hPa \approx 1.0kgf/cm²

大気圧下の窒素分圧 \approx 33 \times 0.79 \approx 26.07fswa

M₀ : 海面レベルの不活性ガス許容値、

a : 米国海軍減圧実績を整理して得た係数

D : 減圧停止深度（減圧停止環境圧力）

Workman(1965)は減圧データへの取り組みを、モデル化されたそれぞれの組織区画に対する M 値で表現することで単純な線形式として簡略化した。

$$M_i = M_{0i} + a_i \times d$$

ここに M_{0i} と a_i は組織固有の水面張力と深度依存の変数で、d は次の減圧停止深度である。

表 2-13 は種々の組織区画に対するワークマンの M 値である。例えば、半飽和時間 20 分組織で 10 msw への安全浮上な臨界張力は窒素とヘリウムそれぞれで、36.8(=21.8+1.5 \times 10)

$$33.0(=20.0+1.3 \times 10)$$

となる。組織は不活性ガスヘリウムの過飽和張力値より窒素の過飽和張力値を高く許容していると仮定されていることに留意されたい。

表 2-13 窒素とヘリウムの M₀(atm)と a 値

半飽和 時間(分)	窒素		ヘリウム	
	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	15.4	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

出典：BENNETT & ELLIOTT's
The Physiology and Medicine of diving
：第 5 版（2003 年刊行）、
10 Decompression：減圧、440 ページ

2-4 高圧則別表第2の再現例

今度は、空気の成分を80%として計算することにする。ゲージ圧0.78を超え0.88MPa以下の高気圧作業（空気呼吸）において、高圧下の時間を40分とした場合、高圧則別表第2にしたがって減圧すると体内ガス圧係数が1.8となることを別表第2は教えてくれる。減圧終了時の体内ガス圧係数は（体内窒素分圧PN₂/大気圧下の大気の窒素分圧）=PN₂/0.8(ATA)で定義されているので、PN₂=1.8×0.8=1.44(ATA)となる。この数字は次節で再現する。

2-4-1 高圧則別表第2の一部

表2-14は再現対象を含む高圧則別表第2の一部である。

表2-14 高圧則別表第2の一部

別表第2

圧力 (kg/cm ²)	潜水深度 (m)	高圧下の時間	減圧(分)							体内ガス圧係数	業務間ガス圧減少時間(分)	業務終了後ガス圧減少時間(分)	一日にわたる高圧下の時間(分)	
			2.4kg/cm ²	2.1kg/cm ²	1.8kg/cm ²	1.5kg/cm ²	1.2kg/cm ²	0.9kg/cm ²	0.6kg/cm ²					0.3kg/cm ²
			浮上(分)											
			24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m				
6.0をこえ	60をこえ	5分以下									5	1.3	60	30
		5分をこえ 12分以下									32	1.5	60	30
		12分をこえ 21分以下									36	1.8	90	45
6.5以下	65以下	21分をこえ 30分以下			6	2	24	28	35	23	45	1.9	90	45
		30分をこえ 45分以下			6	20	24	28	56	56	73	1.9	150	60
		45分をこえ 65分以下	4	16	18	20	26	53	92	92	73	1.9	150	60
6.5をこえ	65をこえ	5分以下									10	1.4	60	30
		5分をこえ 11分以下									34	1.5	60	30
		11分をこえ 18分以下									36	1.7	90	45
7.0以下	70以下	18分をこえ 27分以下			12	4	24	28	35	25	45	1.9	90	45
		27分をこえ 40分以下			12	20	24	28	65	65	95	1.8	150	60
		40分をこえ 60分以下	8	16	27	20	27	52	95	95	105	1.8	150	60
7.0をこえ	70をこえ	5分以下									16	1.5	60	30
		5分をこえ 10分以下									35	1.6	60	30
		10分をこえ 15分以下									28	1.7	90	45
8.0以下	80以下	15分をこえ 22分以下			18	7	24	28	37	51	51	1.8	90	45
		22分をこえ 35分以下			18	20	24	30	65	100	100	1.8	150	60
		35分をこえ 50分以下	12	16	18	20	28	52	95	95	105	1.8	150	60
8.0をこえ	80をこえ	5分以下									30	1.5	60	30
		5分をこえ 10分以下									35	1.7	90	45
		10分をこえ 15分以下									28	1.8	90	45
9.0以下	90以下	15分をこえ 20分以下			18	13	24	28	44	51	51	1.9	90	45
		20分をこえ 30分以下		6	18	20	24	29	65	100	100	1.8	150	60
		30分をこえ 40分以下	12	16	18	20	24	49	90	90	105	1.8	150	60

再現対象

2-4-2 加圧時及び高圧下滞在時の窒素分圧

加圧時の窒素分圧計算： 表2-15は加圧時と保圧時の窒素分圧計算である。

表2-15 加圧時と保圧時の窒素分圧計算

圧力区分 (MPa)	平均圧力 (気圧)	絶対気圧 (ATA)	P0 (ATA)	Pa (ATA)	滞在時間 (分)	Ptis (ATA)
0.00~0.08	0.4	1.4	0.800	1.4×0.8=1.12	1	0.802
0.08~0.16	1.2	2.2	0.802	2.2×0.8=1.76	1	0.808
0.16~0.24	2.0	3.0	0.808	3.0×0.8=2.40	1	0.817
0.24~0.32	2.8	3.8	0.817	3.8×0.8=3.04	1	0.830
0.32~0.40	3.6	4.6	0.830	4.6×0.8=3.68	1	0.847
0.40~0.48	4.4	5.4	0.847	5.4×0.8=4.32	1	0.867
0.48~0.56	5.2	6.2	0.867	6.2×0.8=4.96	1	0.891
0.56~0.64	6.0	7.0	0.891	7.0×0.8=5.60	1	0.919
0.64~0.72	6.8	7.8	0.919	7.8×0.8=6.24	1	0.950
0.72~0.80	7.6	8.6	0.950	8.6×0.8=6.88	1	0.985
0.80~0.88	8.4	9.4	0.985	9.4×0.8=7.52	1	1.024
0.88	8.8	9.8	1.024	9.8×0.8=7.84	29	2.110

加圧時間を無視して瞬間的加圧すなわち滞在気圧0.88MPaに瞬間的に到達、滞在時間40分と仮定して計算すると、窒素分圧は $P_{tis} = 0.80 + [(1+8.8) \times 0.80 - 0.80] \times \{1 - e^{-(0.693 \times 40 / 120)}\} = 2.252(ATA)$ となり、上記の計算値2.110より過大な数値となる。このことは、圧力が高くなると、より厳密な計算（加圧時間も考慮）が好ましいといえる。

2-4-3 減圧過程における窒素分圧変動

(1) 計算式

減圧時の人体反応は、加圧や一定圧力下滞在時と同じ連続した可逆的事象として捉えることができ、窒素分圧は次に示す計算式を用いて計算できる。

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

Ptis : 減圧停止圧下に t 時間滞在した後の組織の窒素分圧

Pa : 滞在環境の窒素分圧

P0 : 減圧開始時の窒素分圧

t : 滞在時間=減圧中の時間(平均)や別表-2の減圧停止時間等

T : 組織の半飽和時間(別表-1は T=120分としているので、ここでも同一値とする。)

(2) 減圧過程における窒素分圧変動

① 計算条件

- 第1減圧停止までの減圧速度は0.08MPa/分(高圧則第18条0.08MPa/分以下)とした。
- 次の減圧停止圧力までの減圧量0.03MPaを0.4分(減圧速度換算:約0.075MPa/分)で減圧し、減圧中の圧力値は減圧停止圧力間の算術平均値を用いた。例:(0.09+0.06)/2=0.075MPa

② 計算

圧力区分 (MPa)	平均圧力 (気圧)	絶対圧力 (ATA)	P0 (ATA)	Pa (ATA)	滞在時間 (分)	Ptis (ATA)	備 考
0.88~0.80	8.4	9.4	2.110	9.4×0.8=7.52	1	2.141	
0.80~0.72	7.6	8.6	2.141	8.6×0.8=6.88	1	2.168	
0.72~0.64	6.8	7.8	2.168	7.8×0.8=6.24	1	2.191	
0.64~0.56	6.0	7.0	2.191	7.0×0.8=5.60	1	2.211	
0.56~0.48	5.2	6.2	2.211	6.2×0.8=4.96	1	2.227	
0.48~0.40	4.4	5.4	2.227	5.4×0.8=4.32	1	2.239	
0.40~0.32	3.6	4.6	2.239	4.6×0.8=3.68	1	2.247	
0.32~0.24	2.8	3.8	2.247	3.8×0.8=3.04	1	2.251	
0.24	2.4	3.4	2.251	3.4×0.8=2.72	5	2.264	減圧停止 12分
0.24	2.4	3.4	2.251	2.72	12	2.282	
0.24~0.21	2.25	3.25	2.282	3.25×0.8=2.60	0.4	2.283	
0.21	2.1	3.1	2.283	3.10×0.8=2.48	5	2.289	減圧停止 16分
0.21	2.1	3.1	2.283	2.48	16	2.300	
0.21~0.18	1.95	2.95	2.300	2.90×0.8=2.32	0.4	2.300	
0.18	1.8	2.8	2.300	2.80×0.8=2.24	5	2.298	減圧停止 18分
0.18	1.8	2.8	2.300	2.24	18	2.294	
0.18~0.15	1.65	2.65	2.294	2.65×0.8=2.12	0.4	2.293	
0.15	1.5	2.5	2.293	2.50×0.8=2.00	10	2.277	減圧停止 20分
0.15	1.5	2.5	2.293	2.00	20	2.261	
0.15~0.12	1.35	2.35	2.261	2.35×0.8=1.88	0.4	2.260	
0.12	1.2	2.2	2.260	2.20×0.8=1.76	10	2.232	減圧停止 24分
0.12	1.2	2.2	2.260	1.76	24	2.195	
0.12~0.09	1.05	2.05	2.195	2.05×0.8=1.64	0.4	2.194	
0.09	0.9	1.9	2.194	1.90×0.8=1.52	20	2.120	減圧停止 49分
0.09	0.9	1.9	2.120	1.52	49	2.028	
0.09~0.06	0.75	1.75	2.028	1.75×0.8=1.4	0.4	2.027	
0.06	0.6	1.6	2.027	1.60×0.8=1.28	60	1.808	減圧停止 90分
0.06	0.6	1.6	2.027	1.28	90	1.724	
0.06~0.03	0.45	1.45	1.724	1.45×0.8=1.16	0.4	1.723	
0.03	0.3	1.3	1.723	1.30×0.8=1.04	60	1.523	減圧停止 105分
0.03	0.3	1.3	1.723	1.04	105	1.412	
0.03~0.00	0.15	1.15	1.412	1.15×0.8=0.92	0.4	1.411	

(3) 減圧終了時の体内ガス圧係数

減圧終了時の体内ガス圧係数は $1.411/0.8=1.764 \approx 1.8$ となり、別表第2に一致する。

2-5 高圧則別表第3の意味と数値計算

2-5-1 ガス圧減少時間と体内ガス圧減少

減圧を終えて大気圧に帰還したときの体内ガス係数が基本になる。『3-3 高圧則別表第1の再現』で計算された体内ガス圧係数 1.825 を例に挙げて、論を進めることにする。

最初にこの係数を窒素分圧 P_0 に換算する。 $P_0 = 0.8 \times 1.825 = 1.46(\text{atm})$

別表第3のガス圧減少時間 t_i は、大気圧帰還から次の高気圧作業に着手するまでの時間である。 t_i の t は時間 time を表わし、 i は interval 休止期間を表わす。時間 t_i の間に大気[窒素分圧 $P_a = 0.80(\text{atm})$]を呼吸しているので、 P_0 と P_a との分圧差により P_0 は減少する。減少後の窒素分圧 P_{tis} は3-4の計算式： $P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\}$ で、 $t = t_i$ と置いて計算される。別表第3は $T = 120$ 分にしている。

例：体内ガス圧係数 1.825 で、 $t_i = 60$ 分を想定すると、60分後の P_{tis} は

$$P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) \{1 - e^{-(0.693 \cdot t/T)}\} = 1.46 + (0.80 - 1.46) \{1 - e^{-(0.693 \times 60/120)}\} \\ = 1.46 - 0.66 \times \{1 - 0.7072\} = 1.267(\text{atm})$$

2-5-2 高圧室内作業修正時間

(1) 数値計算の体内ガス圧係数を用いた場合

ガス圧減少時間 60 分を経て、次の高気圧作業($0.18\text{MPa} \approx 1.8\text{kg/cm}^2$)に向かうとき、体内窒素分圧 $P_{tis} = 1.267(\text{atm})$ から加圧することになる。大気の窒素分圧と同じ $0.80(\text{atm})$ から P_{tis} に到達するまでの時間を t と置くと、 t の時間だけ高気圧環境($P_a = 2.8 \times 0.80 = 2.24\text{atm}$)に予め滞在したことになり、その分だけ次の高気圧作業時間を短縮しなければならない。 P_{tis} がわかっているので、 P_{tis} 計算式を変形して t を求める(計算式誘導は第2編で紹介する)ことができる。

$t = \ln\{1 - (P_{tis} - P_0)/(P_a - P_0)\} \times T / (-0.693)$ である。数値を代入すると $t = \ln\{1 - (1.267 - 0.80)/(2.24 - 0.80)\} \times 120 / (-0.693) = 67.9$ 分

この t が数値計算の体内ガス圧係数を用いた場合の高圧室内作業修正時間である。

しかしながら、このような計算は実務では行わないので、別表第3に示される体内ガス係数軸数値の中間値をプロットして高圧室内作業修正時間を求めることもしない。

(2) 別表第1の体内ガス圧係数を用いた場合

別表第1は(1)と同じ減圧を終えたときの体内ガス圧係数を数値計算結果繰上げによって 1.9 と設定している。この値を用いて(1)と同様に高圧室内作業修正時間を求めると以下のようなになる。体内ガス圧係数 1.9 は窒素分圧 $1.9 \times 0.8 = 1.52\text{atm}$ を教えてくれるので、高圧室内作業修正時間 t は次のように計算される。

$$60 \text{ 分後の } P_{tis} \text{ は } P_{tis} = 1.52 + (0.80 - 1.52) \{1 - e^{-(0.693 \times 60/120)}\} \\ = 1.52 - 0.72 \times \{1 - 0.7072\} = 1.309(\text{atm})$$

したがって高圧室内作業修正時間 t は

$$t = \ln\{1 - (1.309 - 0.80)/(2.24 - 0.80)\} \times 120 / (-0.693) = 75.5 \text{ 分}$$

2-2-1 の 4) 紹介の式でも同じ結果を得る。

2-5-3 別表第3から求めた高圧室内作業修正時間

別表第3を紹介した2種類の書籍から高圧室内作業修正時間を求める(それぞれから求められる修正時間を修正時間イとロに区分)と図 2-8 と図 2-9 のようになり、印刷の精度からくと推測される修正時間の誤差が生じた。体内ガス圧係数 1.9 は計算値の繰上げなので、修正時間の読み取り誤差の吸収にも寄与していると考えられる。大気圧帰還から次の高気圧作業に着手するまでのガス圧減少時間を一律に 60 分などと設定して、修正時間を表に整理する方法が管理し易い。

別表第 3

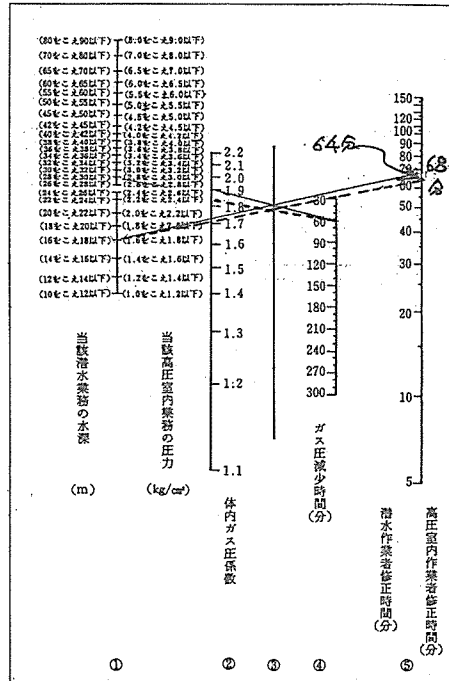


図 2-8 修正時間—イ

別表第 3 の出典：安全衛生法要覧・平成 11 年版・中央労働災害防止協会

別表第 3

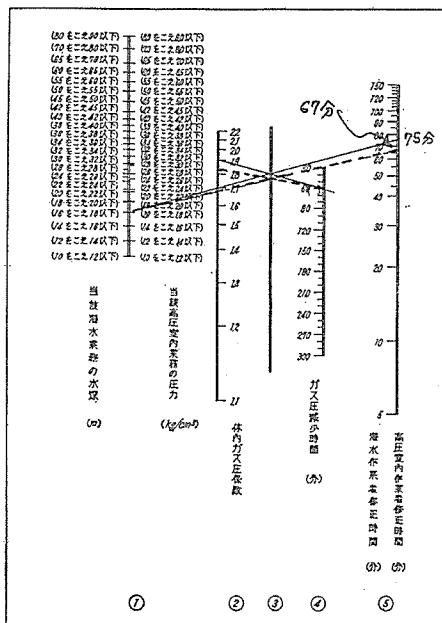


図 2-9 修正時間—ロ

別表第 3 の出典：ケーソン工法と設計・細川彌重・昭和 37 年・山海堂

3. 圧力 0.1MPa 以下の高気圧作業管理要領設定の必要性

3-1 まえがき

高圧則は作業気圧 0.1MPa 以下の高圧下滞在に対して減圧停止時間を要求していない。この範囲では高圧下滞在時間や繰り返し高圧下滞在回数に対する制約も設定していない。

それを超えると 0.03MPa での減圧停止時間を要求する減圧表が高圧則別表第 1 の最初の欄に見出すことができる。なぜ、このようになるのか？という疑問への解答を説明する資料も見当たらない。掘削機械として電動バックホウが普及した 1980 年代のニューマチックケーソン工事の初期掘削（圧力 0.08MPa クラス、昼夜施工）で、砂層の掘削のため掘削がはかどることと、作業員不足のため「数人の作業員がダブリ掘削（例えば昼 7 時間、夜 4 時間作業）に従事」したことを後で聞いたという記録もある。また、高所における高気圧作業でも圧力 0.1MPa 以下で減圧停止が要求される場合が作業箇所の標高によっては発生する。例えば、標高 1200m クラスの大気圧を用いて 2:1 の Haldane 定律を適用すると、作業気圧 0.0877MPa 以上の作業気圧で減圧停止が必要となる。圧力 0.1MPa 以下の高気圧滞在であっても管理要領を設定すべきである。

本節では、1 日の労働時間の制約を無視して 1 日 24 時間で高気圧環境 0.1MPa に、どの程度滞在すれば翌日も同じ高圧下に滞在できるかを概観し、0.1MPa のような圧力滞在でも限界があることを最初に認識することにした。その認識が、高圧則の 0.1MPa 以下の管理に変更が要求されないにしても 0.1MPa 以下の高気圧作業管理の「あり方」を教えてくれる。

次に、1 日の労働時間を考慮した場合、滞在時間管理をどのように行うべきかも検討している。0.1 MPa を超える高気圧作業の減圧の考え方に 0.1MPa 以下の考え方を拡張することは、高気圧作業の減圧全体の考え方に整合性をもたせてくれる。

本節で提案した繰り返しグループ指標の考え方は NOAA や米国海軍の減圧停止不要潜水の考え方を基にしている。当該機関関係者が、作業気圧や窒素分圧を水深表記にしているので、かれらの表記を踏襲し、MPa 表記を省略した箇所もある。

注) NOAA : 通称「米国・海洋大気局」の略称、U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration

3-2 連日潜水可能な 1 日 1 回の最長潜水時間 : 12 時間(720 分)

1 日の労働時間等に対する法的な減圧停止不要潜水制約の検討は別に論議することにする。潜水に関与する人体組織の最長半飽和時間を 120 分、体力維持と空気供給が長時間持続すると想定すれば 120 分組織の窒素分圧がほぼ飽和 (98.4%で飽和と見做す : 見做し飽和度 = 0.984) する時間は、Haldane 式から約 12 時間 (720 分) と計算され、大気圧に帰還 (水中から水面に浮上して) した 120 分組織が飽和状態から潜水前の元の状態に戻る時間も 12 時間であることも同様に計算される。すなわち、連日潜水可能な 1 日当たりの 1 回当たり最長潜水時間が 12 時間であることを示唆してくれる。

注) 飽和度 98.4%となる時間 720 分の誘導 : Haldane 式 $P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0)(1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}})$ から飽和度は $(P_{tis} - P_0) / (P_a - P_0) = 1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}}$ で表わされる。
この式を変形して t を求めると、 $t = \ln\{1 - (P_{tis} - P_0) / (P_a - P_0)\} \times T_{1/2} / (-0.693)$ となる。
飽和度 0.984 と $T_{1/2} = 120$ を代入すると、
 $t = \ln\{1 - 0.984\} \times 120 / (-0.693) = 716.0 \approx 720$ (分)。
潜水深度に関係なく 720 分は一定である。

図 3-1 (次ページ参照 : 図作成数値計算は節末の表 3-1 参照) は 24 時間の潜水サイクル模式図の例である。図の詳細説明は、『4-5 減圧停止不要潜水 (1 日 1 回、連日潜水) の窒素分圧範囲』で述べる。潜水前の 120 分組織の窒素分圧 P_0 は $P_0 = 33.07 \times 0.79 = 26.07$ (fsw) なので潜水ゲージ深度 D_g と飽和窒素分圧 P_{tis} の関係は下式となる。潜水気圧 (絶対気圧) は $D = D_g + 33.03$ で表わす。

$$\begin{aligned} P_{tis} &= P_0 + (P_a - P_0) \times (1 - e^{-0.693 t / T_{1/2}}), P_a = (D_g + 33.07) \times 0.79, \text{大気圧は } 33.07 \text{ (fsw)}, \\ &= 26.07 + \{(D) \times 0.79 - 26.07\} \times (1 - e^{-0.693 \times 720 / 120}) = 26.07 + (0.79D - 26.07) \times 0.984 \\ &= 26.07 + (D_g \times 0.79) \times 0.984 \approx 26.07 + D_g \times 0.777 \end{aligned}$$

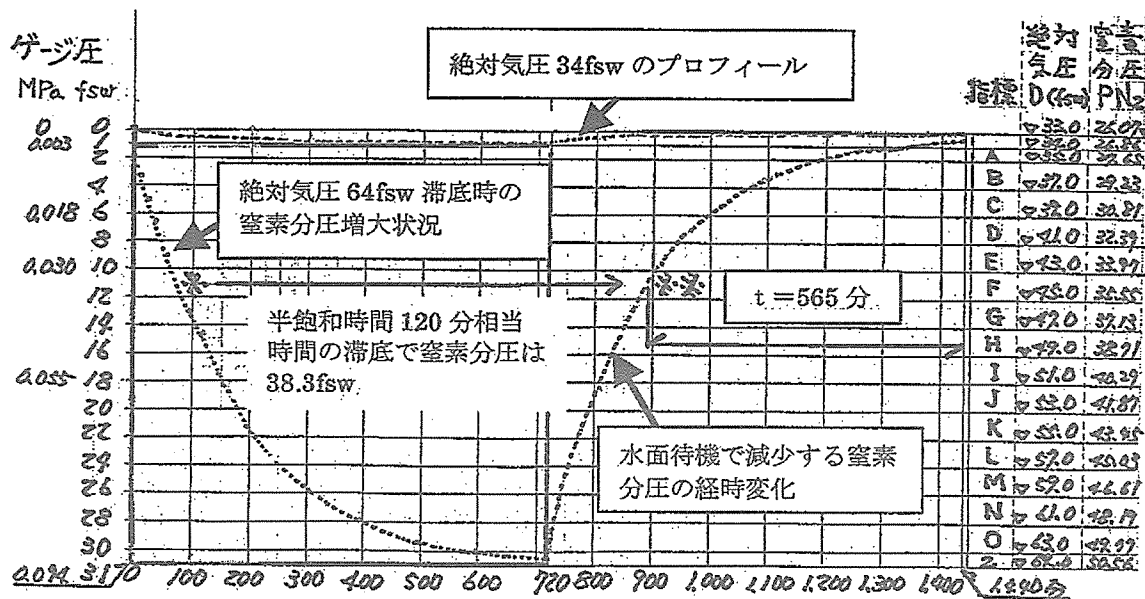


図 3-1 潜水規模（絶対気圧 34 と 64fsw）プロフィールと窒素分圧の増減状態

3-3 減圧停止不要潜水限界深度、限界潜水時間と浮上直前の窒素分圧範囲

Haldane の定律（2 : 1）の定律は潜水深度 $D(\text{fsw})$ 滞在気圧（単位は絶対気圧）と減圧滞在気圧との比率 $D/P_a=2$ で表わされ、この比率で潜水深度から浮上すると減圧症発症が僅少であると言われている。この定律を適用すると減圧停止不要潜水の限界水深 D は、浮上後（減圧）滞在気圧が水面気圧（大気圧 $P_a=33.07\text{fsw}$ ）なので $D=2 \times 33.07\text{fsw}=66.14\text{fsw}$ となる。潜水時の波高の影響などによる滞在気圧を過少に抑えて限界水深圧（単位は絶対気圧）を 64fsw と設定することにする。この水深圧で長時間の潜水を行うと人体組織は窒素で飽和して体内窒素分圧が $64 \times 0.79 \approx 50.56\text{fsw}$ （ 1.53atm ）となる。この窒素分圧値を超えない限り、潜水滞底時間の制限はないものの、この解説で考える潜水は、連日潜水と 1 日 1 回潜水の条件における最長潜水時間として 12 時間（720 分）を設定することにする。

注) P_{tis} を計算すると、 $P_{tis} \approx 26.07 + (0.79D - 26.07) \times 0.984 = 50.17\text{fsw}$

$D=64\text{fsw}$ でも厳密計算との誤差は小さい。: $50.17/50.56 \approx 0.992$

64fsw はゲージ水深圧 $64 - 33.07 = 30.93\text{fsw}$ ($= (30.93/33.07) \times 10.08 \approx 9.43\text{msw}$) に相当する。また、 50.56fsw は体内窒素分圧と環境圧との比率いわゆる許容比が $50.56/33.07 \approx 1.529 \approx 1.53$ であることを示す。最浅潜水深度規模は $D=34\text{fsw}$ ($D_g=34-33=1.0\text{fsw}$) とする。これは、水中立位のダイバー頭頂部が水面に出る程度あるいは、うつ伏せの水中姿勢で胸部がゲージ水深 $D_g=1\text{fsw}$ に存在する程度である。この場合も最長潜水時間 720 分を設定する。この場合の窒素分圧最小値は $D \times 0.79 = 34 \times 0.79 \approx 26.86\text{fsw}$ となる。

3-4 想定する潜降速度、滞底時間と浮上速度

標準減圧表検討において滞底時間あるいは水面浮上後の待機時間における窒素分圧の経時変化を計算するので、最初に潜降速度、滞底時間と浮上速度を設定として、計算の煩雑さを省くために潜降と浮上の所要時間は無視することにする。すなわち滞底圧まで瞬間的に到達し、潜水終了後は滞底圧から水面まで瞬間的に浮上するものと仮定する。