

3-3 高圧則別表第1の再現例と減圧表作成要領

3-3-1 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増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。

3-3-2 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 3-6 は再現対象を含む高压則別表第1の一部である。

表

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)	第2回の 高压下の 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	180
	30分をこえ 60分以下				10	15	1.8	60	30	170
	60分をこえ 90分以下				17	30	2.0	90	30	150
	90分をこえ 120分以下			9	25	35	2.1	120	45	120
	120分をこえ 150分以下			15	35	45	2.1	150	45	85
2.8 以下	150分をこえ 180分以下			21	40	60	2.2	150	45	55
	180分をこえ 210分以下			21	40	60	2.2	150	45	30
	15分以下					2	1.3	30	30	195
	15分をこえ 30分以下					5	1.5	30	30	180
2.8 を こえ	30分をこえ 45分以下				3	15	1.7	60	45	165
	45分をこえ 60分以下				13	20	1.9	60	45	150
	60分をこえ 75分以下				18	30	2.0	90	45	135
	75分をこえ 90分以下			4	20	40	2.0	90	45	120
	90分をこえ 105分以下			11	25	40	2.1	120	45	105
3.0 以下	105分をこえ 120分以下			13	30	45	2.1	120	45	90
	120分をこえ 135分以下			15	35	45	2.2	150	60	75
	135分をこえ 150分以下			18	35	50	2.2	150	60	60
	150分をこえ 165分以下			23	35	55	2.2	150	60	45
	165分をこえ 180分以下			20	40	60	2.2	150	60	30
	180分をこえ 195分以下			24	40	65	2.2	150	60	15
	195分をこえ 210分以下			26	40	75	2.2	150	60	0

3-3-3 減圧表別表第1の再現と減圧表作成要領：減圧比率と米国海軍のM値も解説

(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 3-7 は 3-3-1 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 3-7 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

(4) 体内ガス圧係数

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(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(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

(5) 窒素分圧変化のグラフ

図 3-6 は表 3-7 の窒素分圧をグラフ表示した図である。

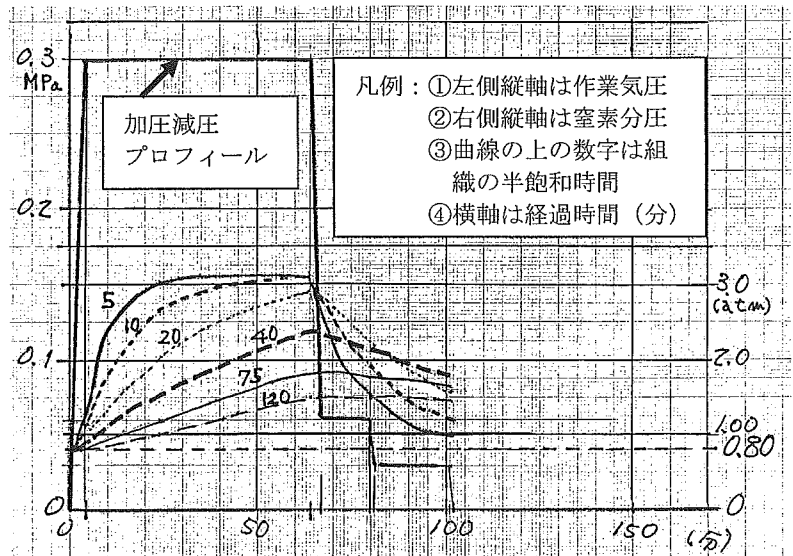


図 3-6 窒素分圧変化のグラフ

(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 3-7 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 3-8 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 0.08MPa \div 0.8kg/cm² 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 3-8 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 = 1.6kg/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 3-8 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 3-9 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・ $R = pN_2/PB$	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の考え方は不明である。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不可欠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。

③10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 $1.75 \times (1+0.3) = 2.275\text{atm}$ 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、

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

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

④20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 3-10 を得る。

表 3-10 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、

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

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

残りを表計算で示すと表 3-11 のようになる。

表 3-11 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 尺 (ゲージ圧で 1 気圧相当) を 33feet で換算しているので水深 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、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 3-12 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)

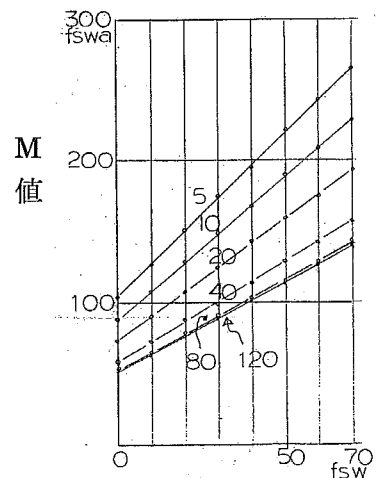
s : 水面許容比 (絶対圧表示、水面到着時の許容比)

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 3-12 は空気潜水の窒素に関する M 値表 1 で、図 3-7 は表 3-12 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 3-12 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。



減圧 (あるいは浮上) 停止深度

図 3-7 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 3-13 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。

現在の M 値と高圧則減圧表との比較は別の章に譲る。

表 3-13 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

3-4 高圧則別表第2の再現例

今回は、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。

3-4-1 高圧則別表第2の一部

表3-14は再現対象を含む高圧則別表第2の一部である。

表3-14 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 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)	一日につ いての高 圧下の時 間(分)				
			浮上(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								
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
6.5 以下	65 以下	12分をこえ 21分以下									23	1.8	90	45	65			
		21分をこえ 30分以下				2	24	28	35	45	1.9					90	45	
		30分をこえ 45分以下			6	20	24	28	35	56	73					1.9	150	60
		45分をこえ 65分以下	4	16	18	20	26	53	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									25					1.7	90	45
		18分をこえ 27分以下				4	24	28	35	45	55					1.9	90	45
7.0 以下	70 以下	27分をこえ 40分以下									95	1.8	150	60	60			
		40分をこえ 60分以下	8	16	17	20	27	52	95	105	1.8					150	60	
		5分以下									16					1.5	60	30
7.0を こえ	70を こえ	5分をこえ 10分以下									8	1.6	60	30				
		10分をこえ 15分以下									28					1.7	90	45
		15分をこえ 22分以下					7	24	28	37	51					1.8	90	45
		22分をこえ 35分以下			18	20	24	30	65	100	105					1.8	150	60
8.0 以下	80 以下	35分をこえ 50分以下	12	16	18	20	28	52	95	105	1.8	150	60					
		5分以下									20	1.5	60	30				
8.0を こえ	80を こえ	5分をこえ 10分以下									35	1.7	90	45				
		10分をこえ 15分以下						14	28	35	1.8					90	45	
9.0 以下	90 以下	15分をこえ 20分以下									51	1.9	90	45	40			
		20分をこえ 30分以下		6	18	20	24	28	44	51	100					1.8	150	60
		30分をこえ 40分以下	12	16	18	20	24	49	90	105	1.8					150	60	
		5分以下									20					1.5	60	30

再現対象

3-4-2 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3-3-3-4は加圧時と保圧時の窒素分圧計算である。

表3-15 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。

3-4-3 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。

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

P_{tis} : 減圧停止圧下に t 時間滞在した後の組織の窒素分圧

P_a : 滞在環境の窒素分圧

P_0 : 減圧開始時の窒素分圧

t : 滞在時間=減圧中の時間(平均)や別表一2の減圧停止時間等

T : 組織の半飽和時間(別表一1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

- a. 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。
- b. 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: $(0.09+0.06)/2=0.075$ MPa

②計算

圧力区分 (MPa)	平均圧力 (気圧)	絶対圧力 (ATA)	P_0 (ATA)	P_a (ATA)	滞在時間 (分)	P_{tis} (ATA)	備考
0.88~0.80	8.4	9.4	2.110	$9.4 \times 0.8 = 7.52$	1	2.141	
0.80~0.72	7.6	8.6	2.141	$8.6 \times 0.8 = 6.88$	1	2.168	
0.72~0.64	6.8	7.8	2.168	$7.8 \times 0.8 = 6.24$	1	2.191	
0.64~0.56	6.0	7.0	2.191	$7.0 \times 0.8 = 5.60$	1	2.211	
0.56~0.48	5.2	6.2	2.211	$6.2 \times 0.8 = 4.96$	1	2.227	
0.48~0.40	4.4	5.4	2.227	$5.4 \times 0.8 = 4.32$	1	2.239	
0.40~0.32	3.6	4.6	2.239	$4.6 \times 0.8 = 3.68$	1	2.247	
0.32~0.24	2.8	3.8	2.247	$3.8 \times 0.8 = 3.04$	1	2.251	
0.24	2.4	3.4	2.251	$3.4 \times 0.8 = 2.72$	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	$3.25 \times 0.8 = 2.60$	0.4	2.283	
0.21	2.1	3.1	2.283	$3.10 \times 0.8 = 2.48$	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	$2.90 \times 0.8 = 2.32$	0.4	2.300	
0.18	1.8	2.8	2.300	$2.80 \times 0.8 = 2.24$	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	$2.65 \times 0.8 = 2.12$	0.4	2.293	
0.15	1.5	2.5	2.293	$2.50 \times 0.8 = 2.00$	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	$2.35 \times 0.8 = 1.88$	0.4	2.260	
0.12	1.2	2.2	2.260	$2.20 \times 0.8 = 1.76$	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	$2.05 \times 0.8 = 1.64$	0.4	2.194	
0.09	0.9	1.9	2.194	$1.90 \times 0.8 = 1.52$	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	$1.75 \times 0.8 = 1.4$	0.4	2.027	
0.06	0.6	1.6	2.027	$1.60 \times 0.8 = 1.28$	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	$1.45 \times 0.8 = 1.16$	0.4	1.723	
0.03	0.3	1.3	1.723	$1.30 \times 0.8 = 1.04$	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	$1.15 \times 0.8 = 0.92$	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。

3.5 高圧則別表第3の意味と数値計算

3-5-1 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

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

3-5-2 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($0.18\text{MPa} = 1.8\text{kg/cm}^2$)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

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

3-2-1の4)紹介の式でも同じ結果を得る。

3-5-3 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3-8と図3-9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

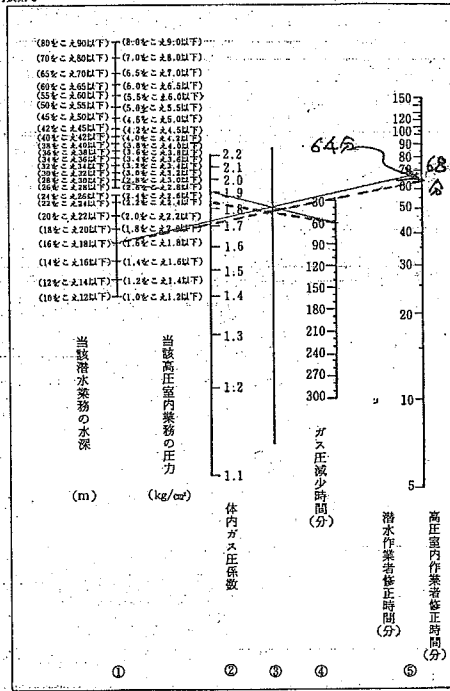


図 3-8 修正時間—イ

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

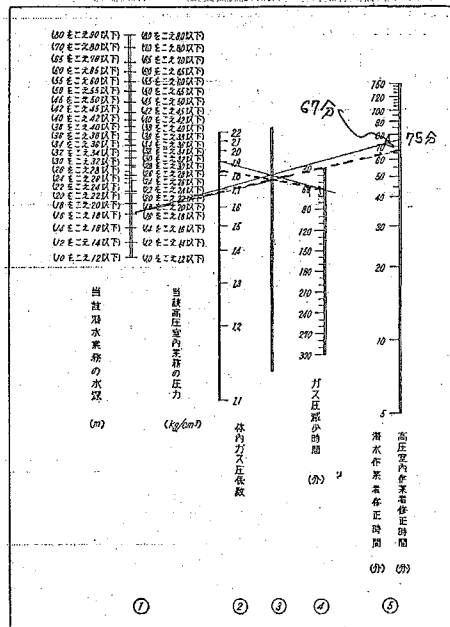


図 3-9 修正時間—ロ

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

4. 圧力 0.1MPa 以下の高気圧作業管理要領設定の必要性

4-1 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、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

4-2 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、

$$t = \ln\{1 - 0.984\} \times 120 / (-0.693) = 716.0 \approx 720 \text{ (分)}.$$

潜水深度に関係なく 720 分は一定である。

図 4-1（次ページ参照：図作成数値計算は節末の表 4-1 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 $P_0 = 33.07 \times 0.79 = 26.07(\text{fsw})$ 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。

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

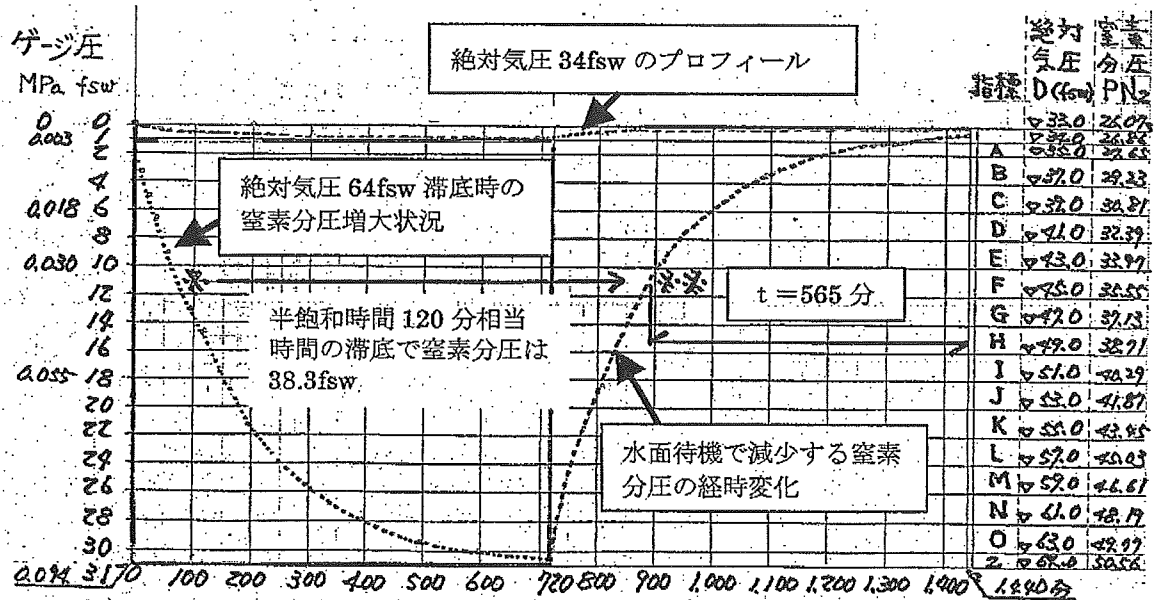


図 4-1 潜水規模（絶対気圧 34 と 64fsw）プロフィールと窒素分圧の増減状態

4-3 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(fsw)滞在気圧（単位は絶対気圧）と減圧滞在気圧との比率 $D/Pa=2$ 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 $Pa=33.07fsw$ ）なので $D=2 \times 33.07fsw=66.14fsw$ 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 $64 \times 0.79 \approx 50.56fsw$ (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、 $P_{tis} \approx 26.07 + (0.79D - 26.07) \times 0.984 = 50.17fsw$

$D=64fsw$ 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 $64 - 33.07 = 30.93fsw (= (30.93/33.07) \times 10.08 \approx 9.43msw)$ 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 $D=34fsw$ ($Dg=34-33=1.0fsw$) 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 $Dg=1fsw$ 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 $D \times 0.79 = 34 \times 0.79 \approx 26.86fsw$ となる。

4-4 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。

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

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 $D=34\sim 64\text{fsw}$ (ゲージ深度 $1\sim 31\text{fsw}$) 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 $34\times 0.79\sim 64\times 0.79=26.86\sim 50.56\text{fsw}$ の範囲にある。図4-1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4-1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 $33\times 0.79\approx 26.07\text{fsw}$ 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平成18年度報告書で解説する「繰り返し潜水」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事実だけを認識しておきたい。図4-1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 $D\geq 64(\text{fsw})$ 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： $D_g=100\text{fsw}$ すなわち $D=133(\text{fsw})$ の場合、滞底時間20分で窒素分圧は

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

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を覚えておきたい。

- 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4-1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 $1440 - 880 \approx 560$ 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 4-1 図 4-1 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。

5. ヘリウム混合ガス

5-1 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

5-1-1 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。

5-1-2 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している減圧表であるが、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。建炎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(株)白石方式と(株)大本組方式が社名抜きで紹介されている。

5・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

5・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。
- ③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。

5-2-2 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生まれ、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、日本道路公団が進めている、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 愛知県名古屋市中港区金城埠頭地先
 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

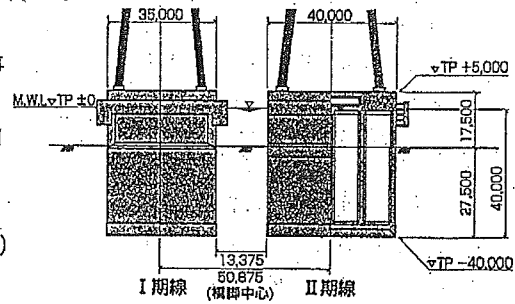


図-1 基礎の離隔状況

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ラ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。

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 300 m 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、最大水圧 40 m 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でも、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。

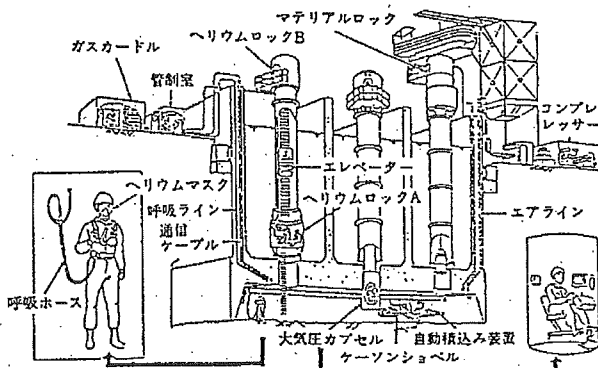


図-2 大深度ニューマチックケーソン 概要図

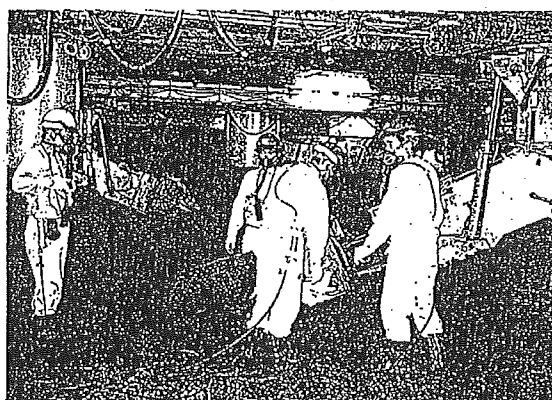


写真-1 ヘリウム混合ガス・メンテナンス状況