

圧時間がより短縮できたと考えられる。

症例 9 加○長○郎 52歳 2.5kg/cm² の潜函作業後、急速に減圧し、下半身麻痺を発生、経験的な再圧治療を行つたが、回復せず入院、整形外科的手術を受けたが、下半身の麻痺症状は固定し、導尿および浣腸を行っているので膀胱炎を併発し、また拳大の褥創が発生した。3カ月後、著者等は再圧治療を行い、2.8kg/cm² 10時間程で両足指の屈伸運動、右足関節の屈伸運動可能となり、知覚もやや回復する。15時間後より自発的に排尿するようになる。28時間後より第4欄に準じて減圧する(最終段階に酸素吸入)。総治療時間 65時間、この間、葡萄糖、ビタミンの注射、アグロマイシン投与、褥創の処置、浣腸等を行う。陳旧例のため完全な回復は望めなかつたが、自発的排尿が可能となり、知覚、運動も若干回復したことは、いわゆる overnight soakによつて、回復するまで再圧治療を行うべきであるとの確信が得られた。

症例 10 小○芳○ 36歳 0.8kg/cm² の潜函作業後、減圧中冷却感のため、咳の発作がおこつた。0.3kg/cm² 程度のとき、急に肺がしぼられるような感じと共に、激しい胸痛、呼吸困難がおこり、血痰を喀出した。出函後 0.8kg/cm² への再圧治療を行い、楽になつたので徐々に減圧したが、再び以前の症状がおこつた。近所の病院にての診察の結果、自然気胸がわかり、著者に連絡があつたので、減圧時の肺の破裂による自然気胸と診断し、併せて外傷性空気栓塞症のおそれがあるので、再圧治療を行つた。治療前には左肺が完全に虚脱状態となり、心臓は大きく右に移動し、右全肺野にわたり乾性囉音が著明に聴取された。2.5kg/cm² の再圧で胸痛、呼吸困難が軽減したので、12時間滞在せしめた後第4欄に従つて減圧したが、減圧により、左肩胛下部に激しい胸痛を発生し、苦悶状態となつた。これは左胸腔内に貯溜した空気が

減圧により膨脹し、心臓ならびに右肺を圧迫したためで、このまま放置すれば死の危険すらあるので、0.9kg/cm² にて 800cc、0.7kg/cm² にて 1700cc、0.25kg/cm² で、2000cc、何れも胸腔穿刺により脱気を行つた。その結果症状は軽減し減圧できるよつた。再圧治療時間は 55時間、その後入院して一般療法を続け、経過はきわめて良好であつた(写真 8 参照)。

XI. むすび

高気圧作業が盛になるにつれて、潜函病の発生も多くなつてきた。しかし、従来はややもすれば現場に於て経験一本槍の不完全な再圧治療が行われ、後遺症が屢々見られる結果となつた。勿論、潜函病発生の防止にしくはないが、万一発生した場合、前記の如き早期の、しかも医学的根拠にたつた完全な再圧治療法が望まれる。

なお、一部の資料蒐集にあたり白石基礎、大豊建設、清水建設、鹿島建設の協力を得たことを付記する

参考文献

- 1) U.S. Navy, Bureau of Ships: Diving manual, Washington D.C., U.S. Gov., Print. Office, 1943.
- 2) Hoff, E. C. et al.: A bibliographical sourcebook of compressed air, diving and submarine medicine, U.S. NRRD, Project X-427, Bureau of Medicine and Surgery Navy Dept. Washington D.C., Feb. 1948.
- 3) Fulton, J. H. et al.: Decompression Sickness, W. B. Saunders Comp., 1951.
- 4) Davis, R. H.: Deep diving and submarine operations 6th ed. Siebe Gorman Co., Ltd. 1955.
- 5) Marine Nationale (G.E.R.S.): La plongée B. Arthaud, Paris, 1955.
- 6) Bureau of Naval Personnel: Submarine medicine practice, U.S. Gov., Print. Office, 1956.
- 7) 梨本一郎: 高気圧の障害, 医学のあゆみ, 24巻 2~3号, 1957

(2) 工事事例に見る減圧症発症状況

表 2-19 は、安全衛生規則の減圧要領にしたがって実施したニューマチックケーソン工事の作業気圧区分とその範囲の減圧症発症状況を示したデータである (圧力単位: lb=psi)。

表 2-19 海門橋工事 (1958 年・日本道路公団・那珂湊)

ib ケーソン	0~19			20~24			25~29			30~34			35~39			40~44			45~49			50~54			計				
	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%	稼働人員	発症件数	%		
P ₁	235	0	0	105	1	1.0	34	1	2.9	46	9	20.0	23	1	4.3	完	了	完	了	完	了	完	了	完	了	443	12	2.7	
P ₂	268	0	0	56	1	1.8	23	1	4.3	21	2	9.5	34	3	8.8	21	4	19.0	完	了	完	了	完	了	完	了	423	11	2.6
P ₃	227	0	0	128	0	0	32	1	3.1	122	5	4.1	72	10	13.9	138	22	15.9	86	23	26.7	61	23	37.7	866	84	9.7		
P ₄	321	0	0	200	0	0	43	1	2.3	22	3	13.6	81	4	4.9	139	17	12.2	91	4	4.4	完	了	完	了	897	29	3.2	
P ₅	446	0	0	完	了		完	了		完	了		完	了		完	了		完	了		完	了		完	了	446	0	0
合計	1497	0	0	489	2	0.4	132	4	3.0	211	19	9.0	210	18	8.6	298	43	14.4	177	27	15.3	61	23	37.7	3075	136	4.4		

出典：海門橋架設工事について、高橋 信策、土木学会誌、Vol.45-3、15 ページ、1960 年

飯吉精一 (出典：基礎とずい道の掘削、64 ページ・技報堂・1964 年) は、作業気圧(lbs 表示であるが、同じ意味の psi 表示で統一)区分と総作業員数 (カッコ書き) のうち罹患者%を、25~30psi で 33%(54 名)、30~35psi で 26%(93 名)、35~40psi で 35%(57 名)、40~45psi で 47%(161 名) のように報告 (1959 年施工) している。作業室内が 20℃前後、高湿の、当時の掘削作業は、スコップや「つるはし」による人力掘削であった。掘削作業員は海水パンツのみを作業衣とし、ケーソン中央部掘削を終えると、刃口直下を掘削 (刃口浚い) してケーソンを沈下させて 1 シフトの作業終了にしていた。沈下量から掘削土量換算ができるので、それが 1 シフトの出来高すなわち賃金支払い対象となっていた。減圧症発症予防として 1.0psi/分以下の減圧要領が指導されていた。これを用いると、圧力 0.3MPa クラス滞在 60 分を想定した場合、総減圧時間は $3.0 \times 14.7 \div 44.1 \text{psi}$ より 45 分となる。また、マンロック未設置のためマテリアルロック内での減圧速度は、減圧によるロック内空気の断熱膨張で霧が立ち込める程度 (エアロック内空容積 5.4m³) を目安としていた。この状況をロック内で観察しながら打音信号で圧力制御をエアロック外の圧力制御員 (ロックテンダー) に伝えていた。しかしながら、減圧症発症は抑制されなかったことを佐藤良策氏 (元・日本圧気技術協会事務局長) 提供資料は教えてくれた。一部の工事において 40psi で滞在時間超過や漸降式減圧 30 分が行われたりしていた。

(3) 酸素減圧の実験施工

酸素減圧の効果は Bert により提唱(1878 年)された。ニューマチックケーソン工事における酸素減圧は梨本一郎先生の指導のもとに 1959 年に試行された。作業気圧 2.0~2.3kgf/cm²(30~34psi)の段階で、1 日 2 交替作業、総作業時間は 3.5~6 時間において実施された。試験は酸素減圧適用と非適用の 2 グループに区分した。非適用グループは安全衛生規則にしたがった減圧要領であった。酸素減圧時間は非適用グループの 1/2~2/3 に相当した。例えば、高圧下時間 3~4 時間の場合、酸素減圧の減圧停止と時間は 0.7kg/cm²で 10 分、0.4kg/cm²で 25 分、総減圧時間 39 分となった。表 2-20 は試験結果である。この試験の途中で作業員の不注意からマンロック内で火災を発生させて重大災害を発生させてしまった。火災発生の直接要因は喫煙用着火で、それを吸入酸素の排出がマンロック内になっていたことが助長した。火傷 2 名。以降、酸素減圧は 1995 年まで省みられなかった。

表 2-20 酸素減圧の試験施工

グループ	ベンズ 発症数	発症率 %	減圧回数
酸素減圧	1	1.4	70 回
安衛則	8	53.3	15 回

出典：Decompression of compressed air workers in civil engineering. Proceedings of an International Working Party held at the Ciba Foundation, London, in Oct., 1965. 梨本一郎, pp217-227, Edited by R. I. McCallum M.D.(London), ORIEL PRESS LIMITED
同じ数値が「潜函病と治療」梨本一郎・日本医学会雑誌 Vol.56, Vol.56, No.9(昭和 41, 11 月 1038 ページ)に記載されている。

2-4 高気圧障害防止規則施行（1961年）と高気圧作業安全衛生規則施行

2-4-1 高気圧障害防止規則（1961年）と高気圧作業安全衛生規則（1972年）

労働省(現・厚生労働省)は労働省令・高気圧障害防止規則(旧・高圧則と略称)を昭和36年(1961年)に制定施行し、その中で減圧停止を階段方式で行う減圧表・別表第-1、別表第-2及び別表第-3を公表した。その後、これらの減圧表は高気圧作業安全衛生規則(1972年)に引き継がれ、2000年に圧力単位表記等をSI単位系に移行して現在も使われている(「高圧則」と略称)。旧・高圧則施行の翌年1962年に出版された梨本先生の著書「わかりやすい潜函病予防法の解説」(工学出版、1962年9月、東京都)が旧・高圧則・減圧表作成根拠を示唆している。そこでは、ホルデン式とその解や減圧比範囲の解説、人体組織の6区分、窒素の最長半飽和時間120分で減圧の考え方を紹介していた。なお、この書籍では酸素減圧の効果も紹介していた。

2-4-2 高気圧作業状況の変化と減圧症発症データ

ニューマチックケーソン作業室内での掘削作業は1925年の永代橋工事以来1960年代まで人力に依存していた。掘削作業に機械が使用

されたのも1960年代であったが、ブルドーザの能力などから主流にはならず、人力掘削が主流で、労働賃金も掘削土量当り単価で契約していた。図2-11は1965年の工事における減圧症発症状況データである。掘削面積1500m²クラスの超大型ケーソン掘削に電動ブルドーザ6台を用いたが、大部分は人力掘削であった。作業圧力0.2MPa(2.0kgf/cm²)を超えると発症率(罹病率)2.5~4.0%を記録している。機械掘削により、掘削作業が高気圧作業から解放された変遷経過紹介は省略する。

現在は作業室内に掘削機械(ケーソンショベル)を設置し、その運転を地上に設置した運転室から遠隔操作する方式になり、掘削作業員を高気圧作業から解放する方式が主流になっている。その結果、掘削作業は作業気圧、高気圧環境滞在時間すなわち掘削時間や減圧時間の制約もなく地上と同じ掘削時間を確保できるようになった。図2-12は3基のケーソン掘削を17台のケーソンショベルで行い、それらを遠隔操作している状況である。しかしながら、掘削機械や遠隔操作に必要な不可欠な作業室内の照明装置などの維持管理や修理を行う作業員の高気圧作業が残された。かれらに対して、日常点検作業で短時間の高圧下滞在、修理作業では比較的長時間の高圧下滞在が要求される。

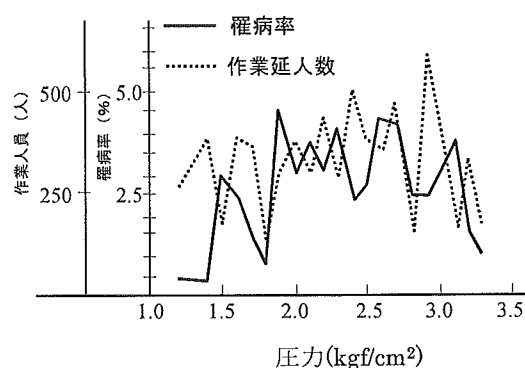


図2-11 減圧症発症データ1965年
出典：肥後春生 他・大型ケーソンによる地下工場、土木学会年次講演会講演集 1967、135-4 ページ(グラフをコピー)

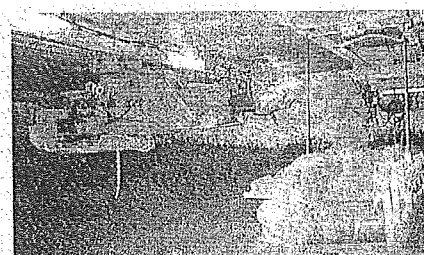
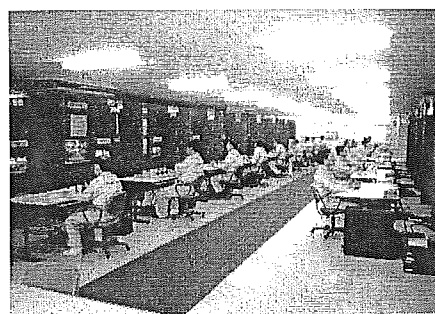


図2-12 掘削機械の遠隔操作状

圧力慣れのない修理担当技術者が突然高圧下滞在をする機会が多くなり、また体質やその日の体調によっては減圧症発症の要因を抱え込むことになる。減圧症発症が減少しない理由の一つとも言える。

1970年代には梨本先生、眞野らにより調査が行われた。表 2-21 は 1980 年から現在までの減圧症発症データの一部である。

表 2-21 減圧症発症データ (1980 年代～1994 と 2003 年)

圧力 MPa(≒fsw)	1980～1985			1986～1990			2003、○作業所のデータ		
	総人員	DCS 発症数	DCS %	総人員	DCS 発症数	DCS %	総人員	DCS 発症数	DCS %
～0.10(33)	10,208	0		2,675	0		6,373	0	0
～0.12(40)	2,032	2		657	0		1,154	0	0
～0.14(46)	2,768	2		741	0	計	1,226	1	0.08
～0.16(53)	2,152	5	0.16	1,341	1	0.13	1,259	1	0.08
～0.18(60)	1,714	4	(15/9, 649)	1,355	1	(7/5, 310)	1,313	1	0.08
～0.20(66)	983	2		1,216	5		644	2	0.31
							計(5/5596)		0.09
～0.22(73)	743	9		2,947	12		700	0	0
～0.24(79)	489	16		2,348	12	計	335	2	0.60
～0.26(86)	665	9	1.37	2,023	21	0.83	1,307	15	1.15
～0.28(92)	1,287	11	(49/3, 586)	4,326	13	(195/23, 470)	1,641	13	0.79
～0.30(99)	402	4		11,826	137		計 (30/3983)		0.75
～0.32(106)	212	9		287	6		注：酸素減圧採用せず。 遠隔操作掘削は 0.18MPa から開始した。		
～0.34(112)	57	0		16	1	計			
～0.36(119)	25	0	3.06	36	2	2.86			
～0.38(125)	0	0	(9/294)	11	0	(11/384)			
～0.40(132)	0	0		34	2				
0.41～(～135)	0	0		77	1	1.30(1/77)			
Total	23,737	73	0.31	31,916	214	0.67	15,952	35	0.22
P>0.10(33)	13,529	73	0.54	29,241	214	0.73	9,579	35	0.37

1990 年までのデータ出典：高圧環境と健康・眞野喜洋、〈財〉労働科学研究所出版部、1994 年

2-4-3 酸素減圧の普及：1995 年以降

空気減圧での減圧症の発症件数が減少しないことから酸素減圧採用が普及してきた。この減圧要領は高圧則に規定されていないものの、労働大臣審査^{注)}での当局の指導でもある。しかし、法規制外のため、実施費用などが発注機関の工事計画積算に反映される機会は少ない。酸素減圧実施は減圧症発症軽減に意欲的な施工者自主管理に依存しており、経済的負担増となっているのが実情である。

注) 労働大臣審査：労働安全衛生法・第 88 条で建設業の事業において、仕事の内容が重大な労働災害を生ずるおそれがある場合に労働大臣がその計画を審査し、指導する制度で、高気圧作業では圧力 0.3MPa を超える場合が、それに該当する。審査は、当局担当者と専門分野の有識者が行い、その結果を受けて指導事項が文書で通知される。

図 2-13 はマンロック内での酸素減圧状況である。マンロックの室内は圧力をもった高圧空気で満たされているので、酸素減圧実施は専用呼吸マスクを用いて行う。マスクから供給される酸素の圧力は室内圧力より若干高めにマスクのレギュレーターで設定されて、室内空気を吸入しないようになっている。酸素吸入はマンロック室内圧力が 0.12MPa 以下となった段階から実施することが多く、吸入酸素の分圧は 1.2atm 以下に抑えることになり、酸素中毒予防ができる。また、肺機能回復のために 25 分酸素吸入と 5 分間のエアブレイクの交互連続吸入で大気圧へ帰還す



酸素減圧状況

図 2-13 酸素減圧状況

る。なお、呼気は室外へ直接排気している。マンロック室内排気は減圧停止圧増大や酸素濃度増大を伴うため、それを防止するためである。

図 2-14 は酸素減圧の効果を窒素分圧の低下状況から定量的に見た図で、ホールデン式の解を 120 分組織で計算した結果である。計算要領解説は 3 節を参照されたい。図の点線表示は空気呼吸の窒素分圧変動状況で減圧終了時に窒素分圧 1.631atm、体内ガス係数換算で約 2.1 となり、高圧側の減圧表別表第 1 に記載されている値となる。一方、減圧時の実線表示は酸素減圧実施時における 120 分組織の窒素分圧低下状況で、減圧終了時には窒素分圧が空気呼吸減圧よりさらに低下して一層安全な領域にあることを示している。このことは理論的に減圧時間短縮可能すなわち 1 回の高圧下滞在時間を長く設定できることを示唆しているが、労働大臣審査における指導は減圧時間短縮を容認していない。

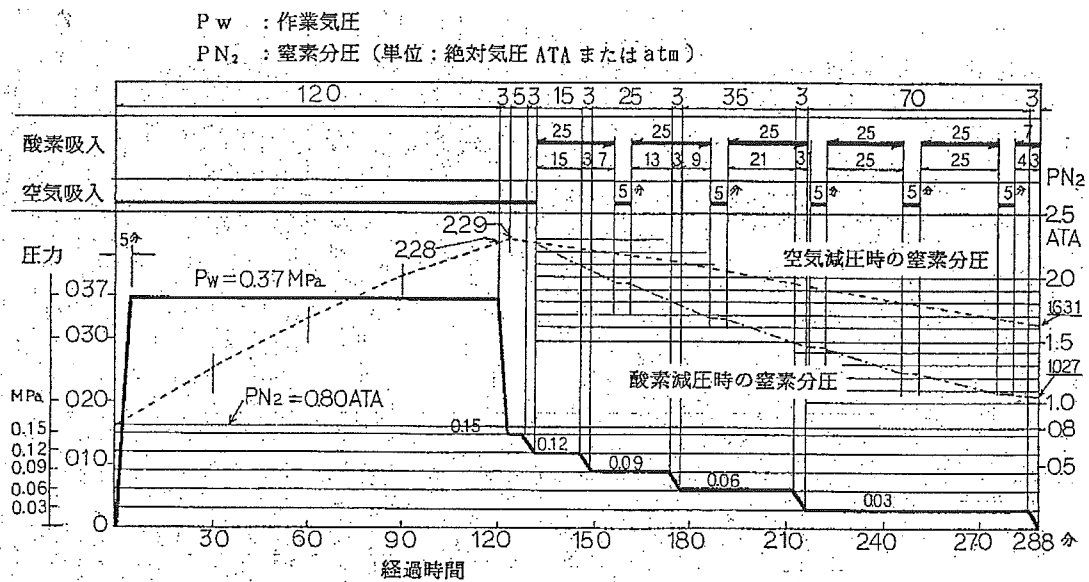


図 2-14 酸素減圧の効果

2-4-4 ヘリウム混合ガス利用の高気圧作業

ニューマチックケーソンの用途としてより深い位置への地下構造物建設が要求されるようになり、このことは、作業気圧がさらに高い環境での高気圧作業を要求することになった。高圧側減圧表適用圧力は現在、最高 0.4MPa までであるが、それを超える作業気圧での高気圧作業のニーズがでてきた。このような作業気圧で、空気呼吸を行うと「窒素酔い」すなわち窒素の麻酔作用により飲酒状態と同様の判断力低下や瞬発力の欠如状態となり、複雑繊細な遠隔操作掘削機械の修理に作業員が携わることになり、災害発生要因を秘めての作業となるため好ましくない。なお、この窒素酔いは、高い圧力をもった空気いわゆる窒素分圧が高い気体を吸入すると生じ(吸入 5~6 分で生じる人もいる)、圧力を低めると解消し、後遺症もない。

ヘリウム混合ガスは呼吸ガス成分のうち、酸素濃度を生命維持に必要なだけ保ち、窒素成分を少なくあるいは殆ど含まない濃度にした呼吸ガスで、窒素酔いの恐れがない気体成分に調整されている。窒素の体内溶解蓄積程度も少ないので、減圧症発症の予防効果があり深い潜水でも使われている。労働大臣の審査における指導でニューマチックケーソン工事におけるヘリウム混合ガス呼吸利用が実施できるようになり、窒素酔いのない高気圧作業への道が開かれた。地上から遠隔操作される掘削機械などの点検修理をする技術員は高圧空気呼吸の代わりに、ヘリウム混合ガスを呼吸しながら作業する。掘削機械の地上遠隔操用に視界を確保するために、作業室内は高圧空気環境にしている。眞野や芝山が指導した技術者はゲージ圧力 0.6 や 0.7MPa の高圧空気呼吸

とヘリウム混合ガス呼吸の相異を体験している。その体験に際して得られたデータの分析結果は別に報告するが、空気呼吸とヘリウム混合ガス呼吸との相違を示した。また、現場において0.3MPaクラスの高圧空気環境で掘削機械の修理を行ってきた作業員が、空気呼吸とヘリウム混合ガス呼吸との相異を次のように述べている。『空気呼吸の場合は、ボーットした感じで修理し、減圧後の疲れがひどかったことを覚えている。ヘリウム混合ガス呼吸のときは呼吸が楽で、どこをどのように直せばよいという修理要領がすぐに頭に浮かび、作業がはかどった。減圧後の疲れは残らなかった。』1995年の名古屋港における名港西大橋基礎建設工事で(株)白石らにより、最初の混合ガス呼吸の試みが成功裡に終わった。眞野や芝山らが呼吸と減圧を指導した。それ以降、14基のケーソンが減圧症もなく混合ガス呼吸の支援を受けて沈められた(2005年12月時点)。

混合ガス呼吸はニューマチックケーソン作業の圧力が約0.3MPaあるいは0.4MPa以上で実施されており、減圧時には酸素減圧を併用している。図2-15はヘリウム混合ガス呼吸高気圧作業における掘削機械メンテナンスと圧力管制状況である。

なお、旧・労働省は平成4年度から3カ年に亘って建設業災害防止協会(建災防と略称)に「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」を委託した。その報告書は技術基準として大臣審査で活用されている。また、厚生労働省は施工実績調査を建災防に委託した。建災防は平成12年度に「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。

図2-16は、大阪市の淀川横断水道トンネル立坑の一般図である。大阪市や関西電力(株)の事業計画に対し、河川管理者(国土交通省)は共同溝方式と図のようなシールドトンネルの埋設深さ30m以上を要望したので、地表面下63.5mまで沈設するケーソンの計画となり、地下深部の掘削機械修理などに際してヘリウム混合ガス呼吸が使用された。このケーソン沈設は、当初最高作業気圧0.60MPaクラスが予想されたが、0.54MPaに収まって2002年に終了した。90分滞在と217分の減圧であった。ヘリウム混合ガスとしてトライミックス(ヘリウム・窒素・酸素の3種混合ガス)を選択し、総作業員は657名であった。減圧症発症は皆無であった。

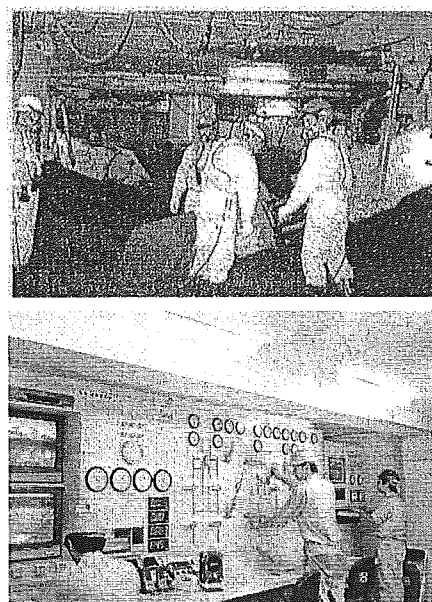


図2-15 ヘリウム混合ガス利用状況
高気圧作業と圧力管制

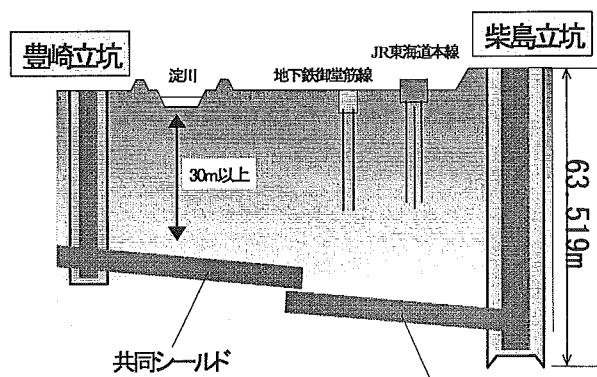


図2-16 作業気圧0.54MPaの立坑工事

3. 高気圧作業安全衛生規則・減圧表の数値計算

3-1 本節の要約

本節は以下に示す「項」で構成している。

- 3-1 本節の要約
- 3-2 高圧則減圧表作成根拠の推測（根拠を巡る話題）
- 3-3 高圧則減圧表別表第1の再現例と減圧表作成要領
- 3-4 高圧則減圧表別表第2の再現例
- 3-5 高圧則減圧表別表第3の意味と数値計算

本節の内容を要約すると以下のようなになる

昭和36年（1961年）に公開された高圧則・減圧表作成手順を詳らかにした報文は見当たらない。梨本先生の著書「わかりやすい潜函病予防法の解説：工学出版・昭和37年」では、計算式を紹介して窒素分圧の計算要領等や減圧比を解説しているものの、減圧停止圧や減圧停止時間の設定として必要不可欠な計算式中の $(1 - e^{-kt})$ あるいは「吸収係数・k」の計算要領を具体的に解説していない。

梨本先生の回顧録は、高圧則・減圧表作成にフランス海軍の資料を参考にしたことを記述している。これらの情報を基にして収集した書籍「潜水学」（これは邦訳タイトル・関邦博 訳、原著はフランス海軍・海中研究グループが執筆）から、フランス海軍・空気減圧表は米国海軍・空気減圧表の水圧単位のフィートをメートル単位に換算して作成されたことが判明した。その過程でktの意味がわかり、高圧則減圧表数値の再現は計算式としてHaldane理論を適用して可能であることがわかった。研究担当者は、本章でその経過を報告している。

同理論の詳細な解説は別の報文に譲り、本節では計算式と数値計算要領のみを紹介している。高圧則減圧表作成で用いた具体的な係数・半飽和時間設定は、人体の6区画区分と6区画にそれぞれ5、10、20、40、75、120分のもたせたことを紹介している。この区画数はフランス海軍の5区画数に米国海軍と同様に半飽和時間120分・1区画を追加したものであった。減圧過程における減圧停止圧から次の減圧停止圧への移行は、0.3kg/cm²刻みに減圧停止圧を設定し、各組織の窒素分圧と停止圧（絶対気圧）の比率が一定値以下に収まってから行うと言う方法にしていた。この比率は1.75～2.0以下に設定しているが、組織別にどのように採択したのかは不明である。

大気窒素成分は80%と仮定し、大気圧で飽和している体内窒素分圧は0.8(atm)としている。以上の情報を基にして、高圧則減圧表別表第1と第2に記載されている減圧要領にしたがって計算した体内ガス圧係数値は記載された値にほぼ一致し、再現できたと判断している。

注) 体内ガス圧係数値：減圧終了時の体内窒素分圧と大気圧で飽和している体内窒素分圧との比率
また、減圧停止時間は体内ガス圧係数再現結果と「減圧比率」を用いて再現できたものの、再現は減圧比率の範囲「1.75～2.0くらい以下」の中から任意に選択した結果であり、減圧比率設定要領があいまいのまま残された。それを解決する参考資料として、第2編で紹介するワークマンM値を簡単に解説した。高圧則減圧表とM値との関係を別の章で検討することにした。標準減圧表におけるM値利用の予告でもある。

高圧則減圧表・別表第3に記載されている高圧室内作業修正時間の考え方を整理して、その時間算定式を求めた。算定式適用による数値計算結果と別表第3ノモグラム適用結果に若干の誤差（5分程度）が出た。誤差の要因は、数値の丸め方や図の印刷誤差に起因すると推測する。別表第3はノモグラムへの線引きを伴うことから、修正時間抽出に個人差やプリント誤差がでてくる。「1日当たりの繰り返し高気圧作業」を行うには時間管理が数値表で示される方が好ましい。数値表提案の予告でもある。

3-2 高圧則減圧表作成根拠の推測（根拠を巡る話題）

高圧則減圧表がどのような理論及び計算式適用における係数選択経過を辿ったかを紹介した文献はあまり見当たらない。ここでは、それらを示唆する文献を簡単に紹介するが、説明に用いられている減圧理論（Haldane 理論で仮定した事項等）や、そこから誘導された計算式（Haldane 式）の詳細な解説は、別の機会に譲る。

3-2-1 高圧則減圧表作成根拠を示唆する文献等の要約

要約に用いた文献名称：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㈱・昭和 37 年 9 月）

この書籍の「序」は、労働省 労働基準局の加藤光徳・労働衛生課長の執筆になるもので、以下の事項を紹介している。

- ①昭和 36 年 高気圧障害防止規則が単独省令として制定されて、高気圧障害についての予防措置が具体的に、関係労働者の保護が一段として進展した。
- ②規則制定は、その規則の趣旨と内容を労使に理解させることによって、はじめて、規則の実効をあげ得るものとする。
- ③本書の著者、東京医科歯科大学 講師 医学博士 梨本一郎氏は、高気圧医学における基礎ならびに臨床に多くの研究と経験を積まれており斯界の第一人者として私の常に尊敬している方である。また、「高気圧障害防止規則」の作成にあたっては、多大のご援助を頂き規則制定の運びとなったものである。

このことから、梨本一郎先生の知見が参考にされたことと推測し、その意味で、先生執筆の書籍には高圧則減圧表作製根拠を示唆する事項が含まれていると推測する。

以下の記述（***印以降）は、表記文献の『第 2 章 減圧症予防の原理：6～21 頁』を報告者が要約した。記述における計算式の番号（カッコ付き）は原文中の式番号である。紙面の都合で式の誘導経過解説は省略した。

なお、『第 1 章 高気圧と人体』は、高気圧作業で人体が受ける圧力を簡単に解説し、高気圧障害一覧表を示して、この書籍がその予防のための加減圧要領や高気圧業務時間表の使い方を解説していることを紹介している。圧力単位として、 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ を 1 気圧と同様に取り扱っていることを断っている。

1) 高圧環境下にある人体組織の窒素分圧を表わす式の紹介：Haldane 式

高い圧力をもった高圧空気に暴露された人体組織は圧力に応じて空気成分の窒素を吸収し、その程度は定量的に以下に示す式で表わされる。

$$pN_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-kt}) + p_0N_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し p_0N_2 は最初の体内の窒素ガス分圧、 pN_2 は体内の窒素ガス分圧、 PN_2 は外気の窒素ガス分圧、 t は時間、 k は吸収係数

高圧環境での作業は pN_2 をなるべく小さく、あるいは時間 t を短くするように設定する。

報告者による注) 原文では断りが無いが、この式は Haldane 式そのものである。

2) 減圧方法の規制

高い圧力の外気を長時間吸入すると、 pN_2 が高くなる。この状態から急速に減圧すれば、 pN_2 と新たな外気圧力との差が大きくなり、 pN_2 は過飽和状態となり体内組織に気泡発生の危険が生じる。上で述べた pN_2 と新たな外気圧力との差が大きくならないように外気圧力を調節して気泡発生を抑えるのが適切な減圧である。圧力が高くてもごく短時間あるいは $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 以内の高気圧暴露以外は適切な減圧要領にしたがわなければならない。

減圧するとき、体内ガス圧降下は次式で表わされる。

$$pN_2 = (p_0N_2 - PN_2)(1 - e^{-kt}) + PN_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し pN_2 は体内の窒素ガス分圧
 PN_2 は外気の窒素ガス分圧
 p_0N_2 は減圧前の体内の窒素ガス分圧

この式は、時間経過あるいは体内窒素分圧と外気の窒素分圧差が大きい程、体内の窒素ガス分圧が低下することが分かる。以下、『 』内は原文引用箇所である。

『また、一方、外圧 P_B と体内に溶解している窒素の分圧（この場合では pN_2 ）の比がある一定の限度をこえると気泡を発生し、減圧症を起すということが、多くの研究により知られている。すなわち、減圧比率は $R = pN_2 / P_B \leq \alpha$ (3) 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 位である。

——中略——

なお、この際酸素吸入をすれば $CN_2 = 0$ であるから

$$pN_2 = p_0N_2 e^{-k \cdot t} \dots\dots\dots (6)$$

と外圧の如何に拘わらず、体内の窒素ガス分圧は急速に減少していくので減圧症予防上有利である。』

報告者による注) CN_2 : 窒素濃度。中略箇所、空気の窒素濃度 CN_2 を用いて $PN_2 \approx CN_2 \cdot P_B$ と表わしている。

階段減圧法は、最初に安全な減圧比率まで外圧を低下させ、低下させた外圧に一定時間滞在して体内窒素分圧を低下させ、次いでその体内窒素分圧を新たな基準にして再び安全な減圧比率限界まで外圧を低下させていき、最後には大気圧に到達する方法である。

加減圧速度は毎分 0.8 kg/cm^2 以内ときめられている。

3) 体内ガス圧係数と修正時間：繰り返し作業における体内溶存窒素ガスの考慮

高気圧作業を終えて減圧し、大気圧に戻っても体内にはある程度の溶存窒素ガスが残っている。この分圧と大気中の窒素分圧の比率が高圧則の「体内ガス圧係数」である。

大気圧に待機していると、この窒素分圧は低下するが、それでも残っている。次の高気圧環境に滞在するときは残った窒素分圧の影響も考慮して滞在時間と減圧要領を設定しなければならない。次の高気圧環境に滞在開始するときの窒素分圧は、その圧力で予め滞在していたと仮定する時間を用いて計算される窒素分圧である。この仮定する時間が、高圧則の「修正時間」である。式で表わすと (12 式) のようになる。図 3-1 は修正時間を模式的に示した図である。

注) 理解し易いように高圧下滞在を 0.1 MPa 以下で減圧停止不要すなわち瞬間的減圧で 1 回目の作業を終えた状態をモデル化している。

$$(G_0 - 1) e^{-k \cdot t_1} = (P_B - 1) (1 - e^{-k \cdot t_2}) \dots\dots\dots (12)$$

P_B : 次の高気圧環境の圧力 (絶対圧)
 P_B : 次の高気圧環境の圧力 (絶対圧)
 t_1 : 各高気圧環境滞在中に大気圧に待機する時間
 t_2 : 次の高気圧環境滞在中に、予め滞在していたと仮定する時間
 G_0 : 体内ガス圧係数。最初の減圧終了後の体内窒素分圧と大気中の窒素分圧の比率。
 $G_0 = pN_2 / 0.8$

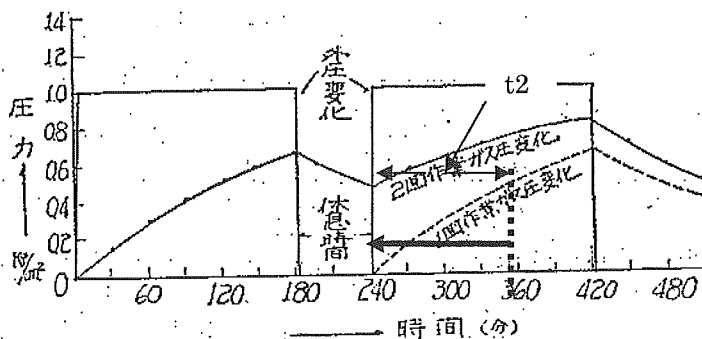


図 3-1 高圧下の繰り返し作業と窒素分圧変化の一例
 出典：わかりやすい潜函病予防法の解説・梨本一郎・15 ページ・工学出版、昭和 37 年に加筆

報告者による図の追補説明
 ガス圧を示す縦座標軸が右側に図示されたものとして図を読むこと。←や→、及び t_2 と点線は報告者が追加した。

4) 修正時間算定式の誘導 : 報告者注) 体内ガス圧係数と修正時間の関係・

本項は3)の(12)式を誘導し、修正時間を直接求める式を示している。(1)式を再掲すると、大気圧から瞬間的加圧で高圧下での窒素分圧 pN_2 は

$$pN_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-kt}) + p_0N_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し p_0N_2 は最初の体内の窒素ガス分圧、 pN_2 は体内の窒素ガス分圧
 PN_2 は外気の窒素ガス分圧、 t は時間、 k は吸収係数

最初に、減圧停止や停止時間を終えて大気圧まで帰還した状態を想定し、このときの体内窒素分圧を p_0N_2 とする。大気中に t_1 (分) 滞在すると体内窒素分圧は $pt_1 N_2$ となる。(1)式を適用すると $pN_2 = pt_1 N_2$ なので、 $pt_1 N_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-kt_1}) + p_0N_2$

で示される。大気に滞在しているので $PN_2 = 0.8 \times 1.0$ である。上の式を書き直すと、

$$pt_1 N_2 = (0.8 - p_0N_2)(1 - e^{-kt_1}) + p_0N_2 \quad (A)$$

次に、初めて圧力 P_B (絶対圧) の高気圧環境に滞在する場合を想定し、計算の簡略化のために加圧時間による体内窒素分圧の増加を無視して最初から最高圧力下に滞在していると仮定する。実際の場合より体内窒素分圧を過大に評価することになるが、この値を用いて管理することは安全側の収まりを示唆するので、この仮定を設けた。圧力 P_B のもとで t_2 (分) 滞在して体内窒素分圧が $pt_1 N_2$ になったと考えると、再び(1)式を用いるが、今度は $p_0N_2 = 0.8$ である。

$$pt_1 N_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-kt_2}) + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-kt_2}) + 0.8 \quad (B)$$

$$(A) = (B) \text{とおくと、} (0.8 - p_0N_2)(1 - e^{-kt_1}) + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-kt_2}) + 0.8$$

上式を e^{-kt_1} 及び e^{-kt_2} の項で整理すると、

$$(0.8 - p_0N_2) - (0.8 - p_0N_2)e^{-kt_1} + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-kt_2}) + 0.8$$

さらに整理して、 $0.8 - (0.8 - p_0N_2)e^{-kt_1} = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-kt_2}) + 0.8$

$$\text{もう一度整理すると} - (0.8 - p_0N_2)e^{-kt_1} = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-kt_2}) \quad (C)$$

(C) 式の両辺を 0.8 で割って整理すると、

$$(p_0N_2 / 0.8 - 1)e^{-kt_1} = \{P_B - 1\}(1 - e^{-kt_2})$$

1 回目の減圧を終えて大気圧に戻ったときの窒素分圧を用いて評価する体内ガス圧係数 G_0 は、その定義により $G_0 = p_0N_2 / 0.8$ で表わされるので、

$$(G_0 - 1)e^{-kt_1} = \{P_B - 1\}(1 - e^{-kt_2})$$

の関係が得られる。

最後に、について整理すると、 $\{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-kt_1} = 1 - e^{-kt_2}$

より $e^{-kt_2} = 1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-kt_1}$ の関係が得られる。

両辺に自然対数を用いると、

$$-kt_2 = \ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-kt_1}]$$

書き直して $t_2 = -\ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-kt_1}] / k$

計算例：体内ガス圧係数 1.9 で第 1 回目減圧を終え、60 分の大気圧で休憩した後、第

2 回目の作業気圧 0.18MPa ($\approx 1.8\text{kg/cm}^2$) を行う場合の修正時間 t_2 を求める。

$G_0 = 1.9$ 、 $t_1 = 60$ 、 $k = \ln 2 / T = 0.693 / T$ 、組織の半飽和時間 $T = 120$ とする。

第 2 回目の作業気圧における呼吸ガスの圧力 (絶対圧) $P_B = 2.8$ 、

以上の値を t_2 式に代入すると、

$$t_2 = -\ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-kt_1}] / k \\ = -\ln[1 - \{(1.9 - 1) / (2.8 - 1)\}e^{-\{0.693/120\} \times 60}] / (0.693/120) \\ = 0.4363 / (0.693/120) = 75.5 \text{ 分}$$

この数値は、3-5-2 の(2)で高圧則減圧表別表第 3 を再現した例に一致する。

5) 高気圧作業時間表作成に必要な係数：人体組織の半飽和時間

代表的な水っぽい組織は血液で、半飽和時間が5～20分である。血液では加圧したとき比較的短時間で体内の窒素ガス分圧が外圧のそれに近づく。外圧のそれと等しくなった状態が飽和である。飽和状態から減圧してもとに戻る（加圧前の大気圧環境にある人体組織の窒素分圧）場合も同様に5～20分を要す。この場合は体内窒素の排泄である。人体組織は血液以外の種々の臓器、筋肉、脂肪や骨などで構成されており、高気圧環境にあるそれぞれが溶解・排泄に要する固有の時間すなわち飽和時間をもつと仮定している。飽和には理論的に無限の時間を要するので、溶解または排泄の速度を比較するのに飽和の半分に達する時間で表わすことにしている。飽和の程度を $1 - e^{-k \cdot t}$ で表わすときこの値が0.5（すなわち $e^{-k \cdot t} = 1/2$ ）のときの t がそれである。以降『 』内は原文を引用した。

『 多くの研究の結果、人体の組織を半飽和時間（または半減期） $t = 5, 10, 20, 40, 70, 120$ （分）に分けて考えれば差し支えないことが分かったので、圧力および滞在時間に応じ、それぞれの組織の窒素ガス圧を計算し、これを基礎にして、いずれの組織もが常に安全な減圧比率以内におさまるよう、階段式減圧の停止すべき圧と、そこに滞在する時間がきめられ、表にまとめられている（高気圧障害防止規則 別表第1、別表第2）。 』

図3-2は半減期 τ で示す体内組織の窒素分圧変化状況を示しているが、計算に必要な吸収係数 k の設定要領解説を何故か省略している。報告者注) $k = 0.693 / \tau$ のこと。

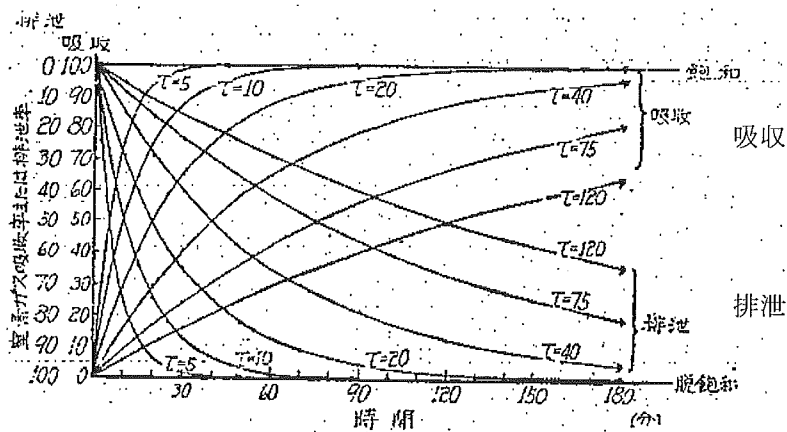


図3-2 各組織の窒素ガス吸収または排泄の時間的変化 τ は半減期（分）

出典：わかりやすい潜函病予防法の解説・梨本一郎・15 ページ・工学出版、昭和37年に報告者が曲線位置付近に吸収と排泄の文字を追加した。

3-2-2 高圧則減圧表とフランス海軍の減圧表

(1) 緒言

本節は高圧則減圧表とフランス共和国・海軍の空気減圧表の関連を紹介している。

労働省（現・厚生労働省）は労働省令・高気圧障害防止規則を昭和36年（1961年）に制定施行し、その中で別表-1及び別表-2に示される減圧表を初めて発表した。これらは旧単位からSI単位に単位換算を行ったのみで表の名称や内容的に大きな変更もなく現在の高気圧作業安全衛生規則（以降、「高圧則・減圧表」と略称）に引き継がれている。

1955年前後から潜函病の研究と治療に取り組んでいた梨本一郎先生（当時・東京医科歯科大学講師、後に埼玉医科大学教授・同名誉教授、平成14年5月4日逝去）がこの高圧則・減圧表

作成への支援を行ったことを、前章で紹介した。しかしながら、支援に至る先生の努力は良く知られていない。本節では、その面の一端をも紹介する。

有識者に配布（1991年7月）された梨本先生の回顧録^{報告者注}の一部（20ページ：「高圧則の誕生」）は、一連の高圧則減圧表作成経過やその作成にフランス海軍の減圧表を参考にしたことを記述している。そのことが本節タイトル（表記参照）の由来である。

本節では、最初に、回顧録原文のまま以下の【 】内に抜粋し、次にフランス海軍の減圧表作成要領を紹介して、高圧則・減圧表作成の考え方を探っている。

報告者注）「バブルとの闘い——わが潜水医学・高気圧医学の歩み——

：梨本一郎・1991年7月非売品」

(2) 梨本先生の回顧録：「高圧則の誕生」

【 前略・・・私は入手した貴重な外国の文献資料を提供するとともに、減圧症をはじめとする高気圧障害の予防や治療についての提案をおこなった。特に減圧スケジュールの作成については全面的に委任された。当時参考となる具体的な資料といえばフランス海軍と米国海軍の減圧表ぐらいしかなかった。

フランス海軍研究グループによる成書「潜水(La plongee)^{報告者注}」は減圧の原理が比較的くわしく述べられており、またくりかえし潜水の場合の減圧計算も合理的と思われた。さらにクスター（J.Y.Cousteau）らをはじめとするフランス海軍派の活発な潜水活動の実績を買って、それを利用することにした。

潜水用についてはそれですんだが、高気圧作業用のものはない。そこで潜水の減圧表作成の原理にもとづいて減圧スケジュールを計算した。作業圧力を1.0kg/cm²Gから4.0kg/cm²Gまでに設定、作業時間は2.8kg/cm²Gまで30分毎、それを超えたときは15分毎に設定し、一々安全な減圧スケジュールを計算によって求めた。

・・・中略・・・

業務間ガス圧減少時間（作業間の休憩時間）や業務終了後ガス圧減少（原文の「減圧」を報告者が「減少」に修正）時間は体内ガス圧係数により私の判断で決定した。

私はまた減圧時間の修正を簡単に行うための計算図表（ノモグラム）も考案した。これらの減圧表や計算図表はいまでも高圧則減圧表別表第1、第2、第3として活かしている。しかしながら作られてからすでに30年余を過ぎてしまった。その間に潜水医学や高気圧医学、それらを応用した作業技術の進歩は目覚ましいものがある。今や水深50mを超える深い潜水では窒素酔いを防ぐためヘリウムを含む混合ガスの使用が常識であり、浅い潜水でも潜水の安全や効率化をねらって酸素濃度の高い酸素窒素混合ガスが実用化されつつある。また、空気使用の高気圧作業や潜水作業では減圧症ばかりでなく、高気圧性骨壊死がかなり以前より問題視されている。こうした現状を踏まえると、潜水作業や高気圧作業の安全衛生を念頭においた技術の発展のため関係諸法規の改正が焦眉の急といえるのではないだろうか。

なお、高圧則に関連して2つのコメントをつけ加えたい。高気圧障害という言葉は高気圧による健康障害という意味で私が名づけたが、これに相当する外国の言葉は見当たらない。また潜水と高気圧作業は両者とも高気圧環境に暴露されるので、高気圧障害ということでは括弧でくれるが、潜水の場合にはさらに多くの過酷な環境にさらされ、それを克服するための異なった種々の技術（呼吸ガスの確保、保温、通話、浮力、その他）が要求される。したがって、私は高気圧作業と潜水作業は別々の規則にした方がよいと思う。アメリカ、イギリスをはじめ諸外国では殆どそのようになっている。・・・『高圧則の誕生』完 【

報告者注）原文のまま。おそらくは下記紹介の(第8版)以前のテキストと推測するが定かではない。

La plongee et L'intervention sous la mer. ed Arthaud アルトー版・海中への潜水と調停
 著者：P. Berry / P.Gavarry / J.P.hubert / J.Le Chuiton / J.Parc/仏海軍海中研究グループ。
 初版刊行 1949 年。邦訳版・「潜水学」・関邦博訳は原本第 8 版（1977 刊行）を使用、発行所
 (株)マリン企画、昭和 57 年。序文で「アルトー氏が「潜水学」の 8 回目改訂を提案」の記述が
 ある。しかしながら、改訂された事項は潜水システムの増加や新たな潜水方法の解説で、潜
 水に対する考え方、見方、実践方法は全く変わっていないと記述されている。このことは、
 減圧表の作成要領も変わっていないと解釈できる。それで、高圧則減圧表作成要領が推測可
 能と判断する。

(3) 高圧則減圧表作成参考資料の探索

高圧則・減圧表作成手順を詳らかにした報文は見当たらない。前章紹介の梨本先生の著書[わ
 かりやすい潜函病予防法の解説：工学出版・昭和 37 年]では、計算式を紹介して窒素分圧の計算
 要領等や減圧比を解説しているものの、減圧停止圧や減圧停止時間の設定として必要不可欠な計
 算式中の $(1 - e^{-k \cdot t})$ あるいは「吸収係数・k」の計算要領を具体的に解説していない。

梨本先生の回顧録は、高圧則・減圧表作成にフランス海軍の資料を参考にしたことを記述して
 いる。その資料の改訂版かどうか不明であるがフランス海軍研究グループが公刊したフランス語
 圏内使用の潜水教科書『La plongee et L'intervention sous la mer. ed Arthaud アルトー版・海中へ
 の潜水と調停』の邦訳版は「4.2 ホールデンの減圧表計算の方法」を紹介しており、その中で k
 $= \ln 2 / T$ を定義している（邦訳書の表記のまま）。 $\ln 2$ は自然対数で $\ln 2 = \ln 2 \approx 0.693$ 、
 T = 人体組織の半飽和時間である。この教科書の邦訳版のまえがきに相当する「訳者のことば」
 は、この計算方法が初版から変わっていないことを示唆している。また、本文（邦訳版 57 ペー
 ジ）において、次のような記述がある。「減圧に関する最初の理論（ホールデン理論と略称）が
 1907 年に提案されて世界中で利用され、英国海軍はホールデン減圧表を開発し、米国海軍もこ
 れを利用したが、1937 年にホールデン減圧表を修正した空気潜水減圧表を公表した。フランス
 海軍は、1948 年にこの減圧表の単位を \bar{m} 単位に換算し、深度 40m までの空気潜水減圧表を作成
 した。」以上の情報から報告者は、以下の事項を推測した。上記の「4.2 ホールデンの減圧表
 計算の方法」が高圧則減圧表作成の具体的な資料であることを示唆しており、組織数や半飽和時
 間の設定に米国海軍の考え方を導入していると推測した。

1) 『アルトー版・海中への潜水と調停』記載の減圧表作成要領要約

① ホールデン式：第 2 編記載の式で統一したので、「潜水学」記載の記号と異なる。

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

P_{tis} : 拡散灌流（半飽和）時間 T 分組織の窒素分圧（単位：fswa・水深換算で絶対圧表示）

P_0 : 初期値・加圧前 $P_0 = 0.8 \times 1.0 = 0.8$ (大気下空気の窒素分圧・絶対圧)

加減圧中は P_a の状態より前の状態にある窒素分圧を入力する。

P_a : 環境圧 P の窒素分圧 $= P$ (m) $\times 0.8$ 、 P は減圧停止深度（ゲージ深度 m）の圧力

t : D 滞在での経過時間（分）、 T : 組織の拡散灌流（半飽和）時間

k : $k = \ln 2 / T$

② 組織数、拡散灌流時間

拡散灌流係数 ($k = \ln 2 / T$) と臨
 界過飽和比を $Sc = P_{tis} / P$ で定義する。

表 3-1 に上記数値を示す。

環境圧 P が P_{tis} より小さくなると気
 泡の発生がない。組織に応じて Sc
 を設定すると任意の P_{tis} に対して一
 つの P すなわちその値以下に減圧でき

ない圧力が得られる。120 分組織の $Sc = 1.6$ はゲージ圧 1 気圧に滞在して窒素が体内組織に飽和したとき
 の窒素分圧値で、この圧力下に長時間滞在後、大気圧に帰還しても減圧症に罹患しないことから設定し
 た数値である。

表 3-1 減圧表計算で用いる係数：減圧速度 17m/分

拡散灌流時間 (半飽和時間)	$k = \ln 2 / T$	$Sc = p / P$ = 体内分圧 / 環境圧
7 分	0.1	2.56
30 分	0.0231	1.84
60 分	0.01155	1.6
120 分	0.00577	1.6

③ 計算例：深度 50m、潜水停留時間 30 分

表 3-2 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 3-2 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					終 期 張 力	次 お の け 減 る 圧 許 停 容 留 張 点 力 に
				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	
				30分組織					終 期 張 力	次 お の け 減 る 圧 許 停 容 留 張 点 力 に
H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	p-p ₀	p	pc		
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	
				60分組織					終 期 張 力	次 お の け 減 る 圧 許 停 容 留 張 点 力 に
H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	p-p ₀	p	pc		
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	
				120分組織					終 期 張 力	次 お の け 減 る 圧 許 停 容 留 張 点 力 に
H	P	t	p ₀	P-p ₀	1-e ^{-kt}	p-p ₀	p	pc		
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 (拡散混流時間)	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

試算対象
箇所

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

3-2-3 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が進むと、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こを証明したが、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。便宜を考えて減圧停止は 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)

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

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

$= 0.79 + (5.58 - 0.79) \{1 - e^{-(0.693 \times 30 / 20)}\} = 0.79 + 4.79 \times (1 - e^{-1.04}) = 3.89 \text{ATA}$
 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
 $3.89 / 1.58 = 2.46 \text{ATA} = 48 \text{fsw}$

訳注) 2.46ATA はゲージ圧 1.46 気圧 $= 1.46 \times 33 \text{fsw/気圧} = 48.18 \text{fsw} \approx 48 \text{fsw}$
 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 $P_B = (40 + 33) / 33 = 2.21 \text{ATA}$ 、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 $0.79 \times 2.46 = 1.94 \text{ATA}$

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.Nav,1981、Diving Medical Officer、18-13~18-15 ページ

Yarbrough 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 3-3 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 3-4 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 3-3 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 3-4 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 3-5 はそれを示している。

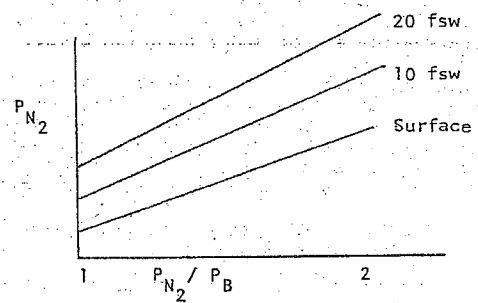


図 3-3 組織の窒素分圧と過飽和比の関係

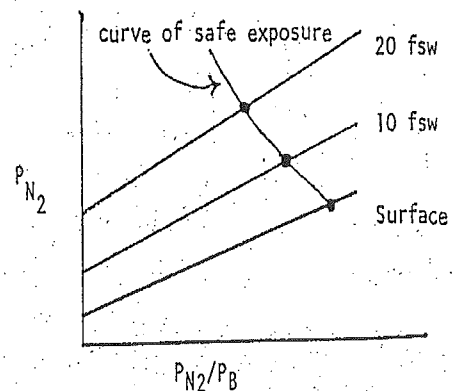


図 3-4 窒素分圧の安全範囲

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われている。

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

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 3-3 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減少する。

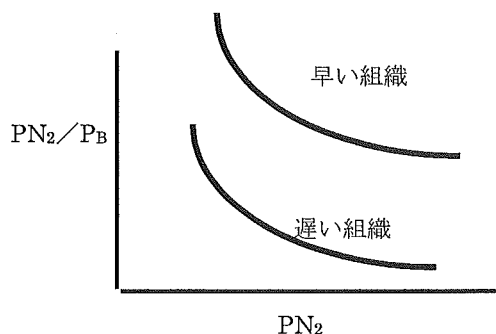


図 3-5 許容比と組織の窒素分圧との関係

3-2-4 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

3-2-1 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 3-4 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 3-4 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) 1956Des 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

3-2-5 減圧比率 (3-2-1 で既出) の考え方

3-2-1 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を許容しているようであり、そしてそれは C&R 減圧表^{注)}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 3-5 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、

表 3-5 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^{注)}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 3-5 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。

3-2-6 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）

3-2-7 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、これらを本章 3-2 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。 $pN_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-kt}) + p_0N_2$
- 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 $(1 - e^{-kt})$ 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。
 $(1 - e^{-kt}) = 1 - e^{-(\ln 2 / T)t} = 1 - e^{-(0.693 / T)t}$ 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 $1 - e^{-(0.693 / T)t}$ 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 $= pN_2 / p_0N_2 = \text{減圧直後の体内窒素分圧} / \text{大気圧で飽和した体内窒素分圧}$
 $p_0N_2 = 0.8$