

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

高気圧作業に伴う標準減圧表の安全性評価 のための疫学的調査に関する研究

平成16～18年度 総合研究報告書

平成19年3月

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

3年間の補助研究授業が終わって

本調査研究は平成16年4月にスタートして3年間の枠内で検討されてきた。この間、関係する潜水ならびに圧気作業に係わる全ての企業ならびに関係する作業者の各位が一致して全面協力して下さり、所期の予定されていた調査内容に関し、ほぼフル回答を得られたばかりか、実験にも率先して協力いただいたことをまず感謝致したい。その結果、調査目的はほぼ達成でき、資料の收拾も満足できる内容であったといえる。

当初目的の現、高圧則で定められている水深90m (0.88 MPa)、最大在底時間40分までをカバーできる減圧表の策定も試み、一応その理論式に基づく減圧表も完成をみた。この表は現行の標準減圧表である別表第2と比較すると第1減圧停止水深レベルは有意に深く、また減圧停止時間ならびに総減圧時間も現行の標準減圧表より遙かに長く、現行の別表第2には重大な問題が内在されている可能性を示唆するものであったが、今回の我々が試作した水深90m (0.88MPa) までの減圧表に関しても欧米で信頼性の高い減圧表と比較するとまだ十分に安全性は充足されているとは言い難い事が示唆された。それはフランスの減圧表が示唆しているように「水深60m、45分間の条件を超える短時間(不飽和)潜水は避けるべきであろう」との考え方とも合致している。したがってこの条件を超える潜水が要求される商業用の潜水を行う場合には飽和潜水技法によるべきであり、短時間潜水に伴う減圧表を提示すること事態が安全な高気圧(潜水)作業の考え方に矛盾することになるのかも知れない。現行の標準減圧表が発表された昭和36年においては減圧表に対する検証がまだ十分になされておらず、安全性に対する十分な検証がなされないままに標準減圧表が先行してしまったと言えるのかも知れない。

本研究は作業効率や経済効率の立場からではなく、作業者に対してどれだけ安全な業務を保証出来るかとの立場から減圧表を勘案するものであるから、国際基準からみた安全性評価のできる水深60m(0.6 MPa)、最大45分までの減圧表を提示すべきか、あるいはその減圧表を導く基本的な考え方のみを提示すべき、実際の減圧表は企業サイドで総意工夫して独自の減圧表を策定して企業責任で安全な潜水(圧気)作業を行なってもらい、つまり減圧症管理もその他の業務管理と同様に自己責任とすべきではなからうか。欧米では減圧表を含めた潜水管理については各企業管理に任せて行われているために互いに切磋琢磨することで少なくとも現行の日本の状況よりも遙かに進歩的で安全な潜水システムが確立している。日本もそのような環境の構築が必要な時代に来ているのではなからうか。

平成19年(2007)3月1日

東京医科歯科大学大学院 教授

主任研究者 眞野 喜洋

目 次

第1章 研究の要旨・目的	1
第2章 高圧則減圧表に係わる疫学的調査	5
1. 総説：本邦減圧表のあるべき姿・圧気潜函工法における問題点について	5
2. 高気圧作業安全衛生規則・減圧表の数値計算	11
2-1 本節の要約	11
2-2 高圧則減圧表作成根拠の推測（根拠を巡る話題）	12
2-3 高圧則別表第1の再現例と減圧表作成要領	25
2-4 高圧則別表第2の再現例	32
2-5 高圧則別表第3の意味と数値計算	34
3. 圧力0.1MPa以下の高気圧作業管理要領設定の必要性	36
3-1 まえがき	36
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)	36
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	37
3-4 想定する潜降速度、滞底時間と浮上速度	37
3-5 減圧停止不要潜水（1日1回、連日潜水）の窒素分圧範囲	38
4. ヘリウム混合ガス	40
4-1 ヘリウム混合ガス呼吸利用のニューマチックケーソン工事を取り巻く現状の認識	40
4-2 ニューマチックケーソン工事における本邦ヘリウム混合ガス呼吸の実際	42
第3章 新しい減圧表の試算	45
1. 基本方針など	45
1-1 基本方針	45
1-2 用語の定義と使用単位	46
1-3 減圧表作成の範囲と作成方針	49
1-4 減圧表作成方法	51
2. 各種減圧表の試算	60
2-1 空気減圧表	60
2-2 ヘリオックス減圧表	81
2-3 ナイトロックス減圧表	97

2-4 船上(空気)減圧表	101
2-5 各種減圧表試算の総括と分析	113
3. 繰返し潜水表	116
第4章 酸素中毒	
1. スキューバダイビングにおける活性酸素種および抗酸化力の変化	145
2. 高気圧酸素による活性酸素種および抗酸化力の変化	146
3. 酸化ストレス(高気圧酸素)によって影響を受ける抗酸化物質の検討	147
4. 高気圧酸素 US Navy Table6 における生体内の酸化・抗酸化力の変化	148
5. 食事制限下の高気圧酸素曝露における血漿遊離アミノ酸の変化	149
6. 高気圧酸素曝露によって発生する活性酸素に対する CoEnzyme Q10 の抑制作用についての検討	150
7. FREE RADICALS AND ANTIOXIDANT POTENTIAL IN SCUBA DIVER	151
8. 高気圧酸素における血漿遊離アミノ酸の検討	158
9. INDEXES OF OXIDATIVE STRESS DURING HBO TREATMENT	163
第5章 潜水の実態調査	
1. 潜水プロフィール調査	165
1. 北海道A地区の漁業潜水	167
2. 伊豆諸島B地区の追い込み潜水	174
3. 伊豆諸島C地区の追い込み潜水	181
4. 伊豆諸島D地区の草業潜水	188
5. 沖縄E地区の追い込み潜水	195
6. 伊豆半島F地区のガイド潜水	202
7. 北海道(G地区)の流水潜水	209
8. 公的機関(H地区)の海洋潜水	213
9. 海洋作業(I地区)の潜水	219
10. 海洋作業(J地区)の潜水	223
2. 潜水後の高所移動と標高 伊豆半島を中心とした危険山岳地帯	227
学会発表・雑誌投稿	232

第1章 研究の要旨・目的

高気圧作業に伴う標準減圧表の安全性評価のための疫学的調査に関する研究

平成 16～18 年度の最終年度報告

労働安全衛生総合 研究事業

主任研究者 眞野喜洋 (東京医科歯科大学大学院 教授)

分担研究者 山見信夫 (東京医科歯科大学大学院 助教授)

芝山正治 (駒沢女子大学人文学部 教授)

研究要旨

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

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

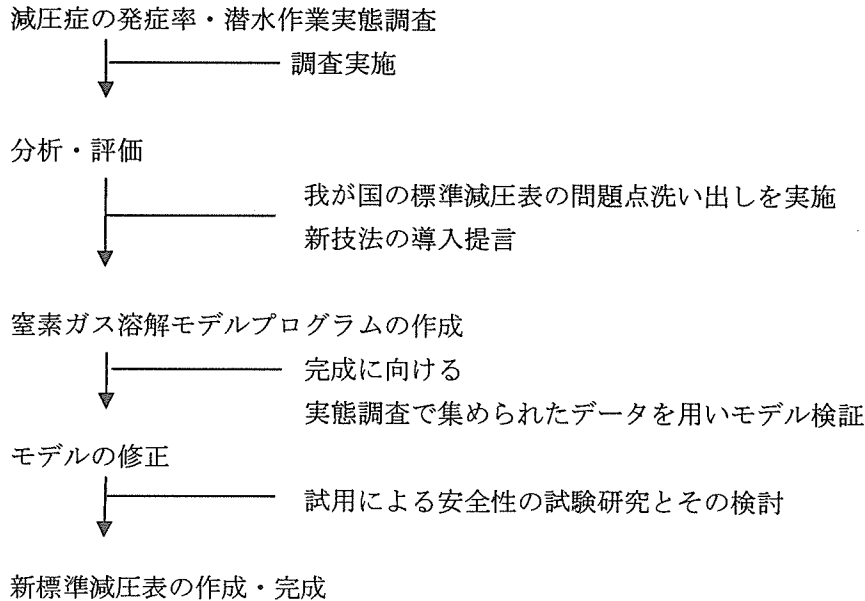
本研究はこれらの問題を解決する上で必要な課題について検討、検証し、現行の減圧表に係わる法規制についても、さらに安全性を高める必須条件を提言したい。

そのための本研究の展開方法として、以下の手順で研究する。

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

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

調査結果



研究の目的

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

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

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

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

これによって、少なく共、重症減圧症の予防、骨壊死の予防ならびに急性減圧症による死亡を避けなければならない。従来から標準減圧表の改正が叫ばれていたが、それが実行されずに平成15年、4月、5月、9月ならびに平成16年9月、10月と立て続けに高気圧業務による、5件の死亡事故が発症してしまった。これらの事故を予防するために、早急な対策が望まれる。

第2章 高压則減圧表に係わる疫学的調査

1. 総説：本邦減圧表のあるべき姿・圧気潜函工法における問題点について

圧気潜函工法は国土の狭い地震国という我が国の特殊な地勢にマッチした土木工法として、今日では橋梁基礎、地下貯水ポンプ場、トンネル立坑、等のコンクリート躯体を沈下させて構築する幅広い地下構造物(図1-1)工事に欠かせない作業職種と言え、土木工学上からみて安全、確実でかつ安価な技法であるが故に近年ではその工事内容の難度が高く、より高い圧力下の作業をカバーする傾向にある。この結果、安衛法に基づく高気圧障害防止規則で定める圧気土木作業後の減圧は標準減圧表(別表1)に定められた方式で減圧されるがその許容最大作業圧力は0.4 MPa未達であるにもかかわらず、現実での要求される作業圧力は0.6 MPaに近づこうとしているし、将来計画が検討されている作業圧力は更に高くなるとも言われている。

このような高気圧作業に対しては現行法規では十分に対応できない場合が生じることも想定されるが、そのような場合には厚生労働省は大臣審査の特例による特別管理体制によって高気圧作業の安全を維持できるように対策が取られている¹⁾。

このような現状にあって、現在考えられる圧気土木作業に係わる代表的な問題点を列記すると

- 1) 作業後の安全な減圧表が規定されていない。
- 2) 空気による減圧管理はリスクが大き過ぎて使え

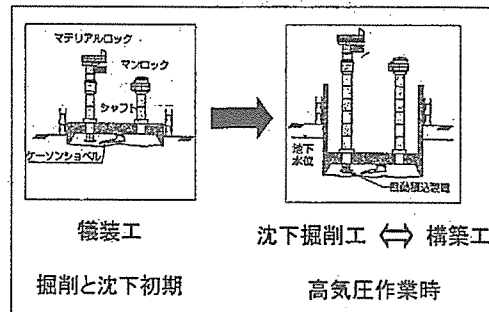


図1-1 潜函施工状況図

ない。

- 3) 酸素減圧を行うことが標準化されていない。
- 4) Heliox または Trimix gas 等の混合ガス利用が規定されていない。
- 5) 昇降用エレベーター利用等の安全管理対策が標準装備化されていない。
- 6) 健康診断項目等が改正されておらず、十分とはいえない。
- 7) 衛生管理に係わる作業員への一次予防対策等の配慮が欠落している。
- 8) 現場における問題の多い空気による救急再圧員制度をいまだに容認している。
- 9) その他

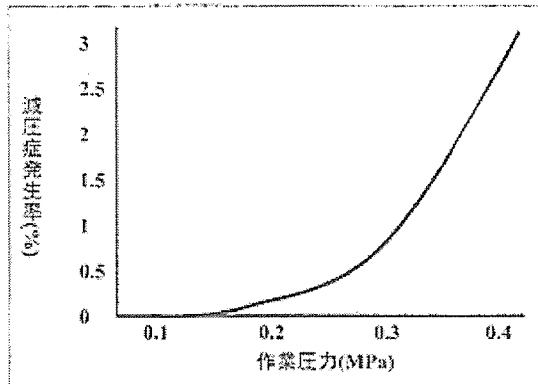


図1-2 作業圧力別減圧症発症率

以上の内容について現在改善進行中のことも含めてその対応策はどのようにあるべきかについて考え方の一例を簡述したい。

(1) 作業後の安全な減圧表が規定されていない

我が国の圧気土木用の標準減圧表は〈別表1〉として公表されているが作業気圧が0.1～0.4 MPaまでしかなく、「その圧力を超えた場合には潜水用の〈別表2〉を使用するように」という誤った指導が一部でなされているとも聞く。圧気潜函工法での減圧表が存在しない0.4 MPa以上の場合には標準減圧表を国が用意しなければならないかという否であろう。そもそも現行の如くに「厚労省がわざわざ標準減圧表を定めてこれに従いなさい。その上で健康問題が生じた場合には国が労災で保証いたします。」などという親切すぎることをしている国は日本以外に存在しない。そもそも、安全な減圧表は企業が自助努力でそれを造り、安全を売り物にして仕事を取るべきで国は減圧症を含む事故や災害を引き起こしたならばそれを論じ、安全作業を営めるように指導するのが責任であろう。減圧表を国が用意する必要は全くないし、自由競争の原則に余り口出しすべきではない。しかし、今までの行き掛りから減圧表を含む行政指導をせざるを得ないのであれば実用性の伴う作業圧力まで示すべきであろう。潜水の場合には水深90 mまで表示していることを考えると圧気土木でも0.9 MPa位までをカバーしなければなら

らないのではなからうか。中途半端は良くなく、全く用意しないか、するなら十分にカバーすべきであろう。

その場合の整合性を取るためには圧気土木では0.3 MPa以上の作業圧力が行政指導されていて大臣審査対象となっていることより、0.3 MPaを超えた段階から利用できるより安全な減圧表を提示しなければならない。つまり、ある一定レベルの安全な作業を保証できる根拠は現行法規則とマッチしていなければならないし、従来の安全についての概念も踏襲していなければならないまい。これらを満たす検討項目が以下の2～5の項目となる。

(2) 空気による減圧管理はリスクが大き過ぎて使えない

潜水の場合における水深90 mまで表示されている標準減圧表〈別表2〉は危険すぎて安全作業を目指す作業ダイバーなら誰一人利用しない。一定の理論と数式によって導かれる減圧表は作業負荷圧力が高くなるほど、かつ作業時間が長くなるほど減圧症発症頻度は高くなる。つまり、体内に窒素ガスの蓄積が増し、空気による圧気作業では一般的には図1に示すように0.3 MPa前後くらいから急激に減圧症発症率がアップする²⁾。これは現在のあらゆる減圧表に共通している問題であり、同一数式理論に依って導かれた減圧表における宿命とも言える。つまり、減圧症の発症率は指数関数的に圧力に応じて増大するので0.2 MPa程度までは緩いカーブで減圧症が発症するがそれを超えて0.3 MPa前後からは急激に増えてゆくと考えることが常識である。

これを防ぐためには酸素による窒素ガスの洗い出しが必要であり、最優先で考えられる減圧症予防対策と言える。

(3) 酸素減圧を行うことが標準化されていない

欧米では当たり前のように圧気作業に於ける酸素吸入による減圧管理が標準適応であり、ECでは空気による減圧を禁止することで減圧症予防効果が絶大な効力を発揮している(図1-3)。つまり空気減圧は20世紀の遺

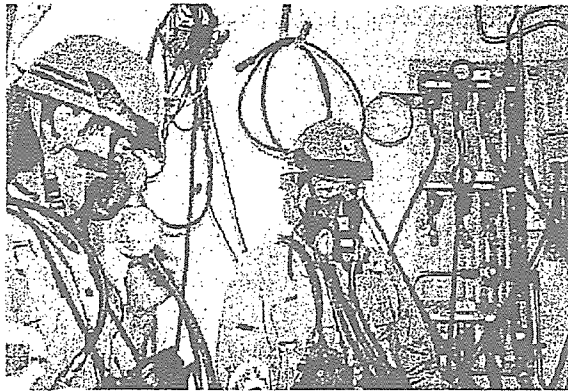


図1-3 酸素減圧(酸素吸入)

物であり先進諸国において空気減圧を行っているのは日本だけであると言っても過言ではない。日本では何故空気減圧に拘るのであろうか。「日本人は喫煙習慣が強く酸素の利用は火災発生の危険がある。」「酸素は薬物であって一般人が酸素吸入することは薬事法違反である。」これらが何と誤解に満ちた、説得力の無い響きであるかは自明であろう。日本人はそれほど無知蒙昧な人種なのだろうか？ 我が国において40年以上前に和歌山県における或る圧気ケーソン作業場で酸素減圧中にマンロック内で喫煙し呼気ガスに引火した結果、火災により6名が死亡する災害が発生した³⁾。これによって世界中の減圧中に於ける酸素吸入が禁止されてしまい、欧米人から学会に行く度に我々が張本人の日本人であったが故に散々非難を浴びてずいぶん肩身の狭い思いをした。しかし、火災の危険は人為的に十分予防できることであり、酸素の有効性、“酸素窓効果”^{4,5)} なくして減圧症予防を確実にできない事実に立脚して1980年代から欧米の圧気土木でも潜水と同様に酸素減圧に踏み切るようになり、今日では酸素減圧なくして圧気土木は語れないと言う時代に至っている。火災問題を心配しなければ酸素減圧できないような企業は高気圧作業を行う資格がない。

(4) Heliox または Trimix gas 等の混合ガス利用が規定されていない

空気吸入による圧気土木作業では0.3 MPa 前後から窒素酔い現象が生じるリスクがあると共に 0.7 MPa 前

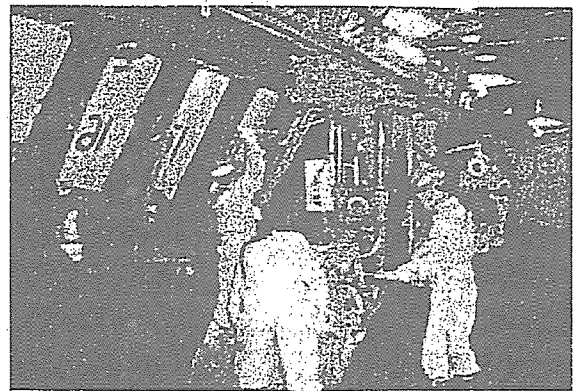


図1-4 Trimix作業中のケーソン内部(呼吸ラインをつけて作業している)

後くらいから酸素毒性のリスクが生じると考えて良い。酸素毒性については安静状態か、激しい労作業中か、あるいは湿式か乾式か等々で差があるがこれらの要因も減圧症発症予防と共に考慮されなければならない。また、呼吸生理学的にも高分圧空気の呼吸に伴う機械的抵抗は暴露圧力に比例して非常に大きくなるので空気による高気圧作業はリスクが大き過ぎて使えない。これらをカバーできる解決策が、Heliox または Trimix gas 等の混合ガス利用であろう^{2,4)}。潜水においては更に水素 gas も実用に利用されており、仏では既に水深 500 m での利用を可能にしているし、米国 Duke 大学のグループは 685 m までの高気圧暴露実験に成功している。圧気土木への利用は我が国が先陣を走っており、既に大阪の淀川河口にて 0.56 MPa の Trimix gas による圧気土木作業が1名の減圧症患者も出さずに成功しており、現在までに作業圧力は 0.36 ~ 0.56 MPa までの間で既に20カ所以上の作業場にてこれら混合ガス利用によるケーソン作業が完了している(図 1-4 及び図 1-5)。

第1項、2項で触れたように空気による圧気作業の上限は従来の規定を生かすと 0.4 MPa となるのかも知れないが、0.4 MPa は高すぎるように思われる。もし、規制を設けるのであれば 0.35 ± 0.05 MPa とし、0.3 MPa を超える場合には混合ガス利用が望ましく、0.35 MPa 以上を標準装備とし、止むを得ない場合には 0.4 MPa まで許容すると言うような幅を持たした方が現実

作業圧力 (m相当圧)	患者数	肩	腕	腰	左膝	右膝	他
17 ≤ 圧力 < 20	17	1	0	1	11	6	0
20 ≤ 圧力 < 22	74	7	2	1	22	45	フォース3 マニュアル型1
22 ≤ 圧力 < 24	38	4	5	1	25	19	フォース3
24 ≤ 圧力 < 26	51	2	0	1	35	28	0
26 ≤ 圧力 < 29	26	1	0	0	13	18	0
計	206 (人)	15 (件)	7 (件)	4 (件)	106 (件)	116 (件)	7
発症率(%)		6.05	2.28	1.61	42.74 89.5	46.78	

表1-4 ベンズ発症部位

的かも知れない。

(5) 昇降用エレベーター利用等の安全管理対策が標準装備化されていない

圧気土木作業では地上の開口部と切り端と呼ばれるケーソン底部との間は、一般的には螺旋階段で繋がれており、直径1.2mの螺旋階段を昇降する。上部開口部は通常地表面より数メートル以上上空にあり、また地下のケーソン底部は作業気圧による理論深度より2～3m以上は深いので0.3MPaの作業が行われる場合にはケーソン底部から地上に出るまで約40m位は螺旋階段を登らなければならない。圧気土木作業における減圧症の中90%以上はbendsと呼ばれる関節筋肉痛であり、複数箇所に同時多発することも多いが螺旋階段が長くなると、そのうちの90%は膝関節に集中してしまう(表14)⁴⁾。これは圧気土木の実労働作業が原因というのではなく減圧直前の螺旋階段を登ることによる労作負担と言っても良い。この減圧症発症予防の立場から0.3MPaを超えるような圧気作業においてはこの図5で示されるヘリウム混合ガスシステムに限らず、原則的に昇降用エレベーターを設置してその利用によって下肢への負担を取るべきであろう。

(6) 健康診断項目等が改正されておらず、十分とはいえない

高気圧作業安全衛生規則の第38条(健康診断)にて圧気業務についている場合には6ヵ月毎に特殊検診と呼ばれる項目の健康診断を受け、かつ更に医師

が必要と認めた場合の追加診断項目を規定している。

しかし、従来の規則に基づく標準的健康診断はそれが発見された時には既に手遅れと思われる慢性減圧症も含まれており、チェック方法を根本から見直す必要がある。

(7) 衛生管理に係わる作業員への一次予防対策等の配慮が欠落している

我が国の健康に係わる法規制は安全面を重視し、衛生管理面まではまだ十分に配慮されるには至っていないのが現状であろう。20世紀末頃からようやく日本人の働く人々の健康促進運動と相まって「健康日本21」が叫ばれ、「長寿は美德」の考え方から次第に健康寿命「DALE計画」⁹⁾を追求するよう移ってきたが圧気作業を含む我が国の建設業で働く人々への健康への配慮はまだ不十分でそこまでは到達していないといえる。圧気作業期間中の職業起因性疾患の予防だけではなく、数ヶ月に及ぶ長い作業期間中において作業員が高いQOLを維持できるための工夫が必要ではなからうか。つまり、生活習慣の改善を含む総合的な衛生対策を行うと共に日常生活面へ介入し、より良い生活習慣を守りながら過ごせることで職業起因性疾患の発生を減ずることが可能なことは周知の事実であり⁷⁾、そのような行政面での配慮も重要ではなからうか。建設業ではこのことが全産業の中でも最も遅れており、特に圧気土木業種はその谷間に位置していると危惧される。

(8) 現場における問題の多い空気による救急再圧員制度をいまだに容認している

海外における圧気工法では減圧を行う場合には酸素減圧設備を標準化し、より安全な減圧管理を行うことが以前から推奨されているし、万一、減圧症が発生した場合の再圧治療表からは、〈表1, 2, 3〉が既に廃棄されており、空気再圧治療は原則的に禁止されている。〈表4〉については患者が酸素中毒を発症させてしまった場合の例外的利用法として残されているが基本的にはもはや酸素再圧法のみを利用すべきであって空気に

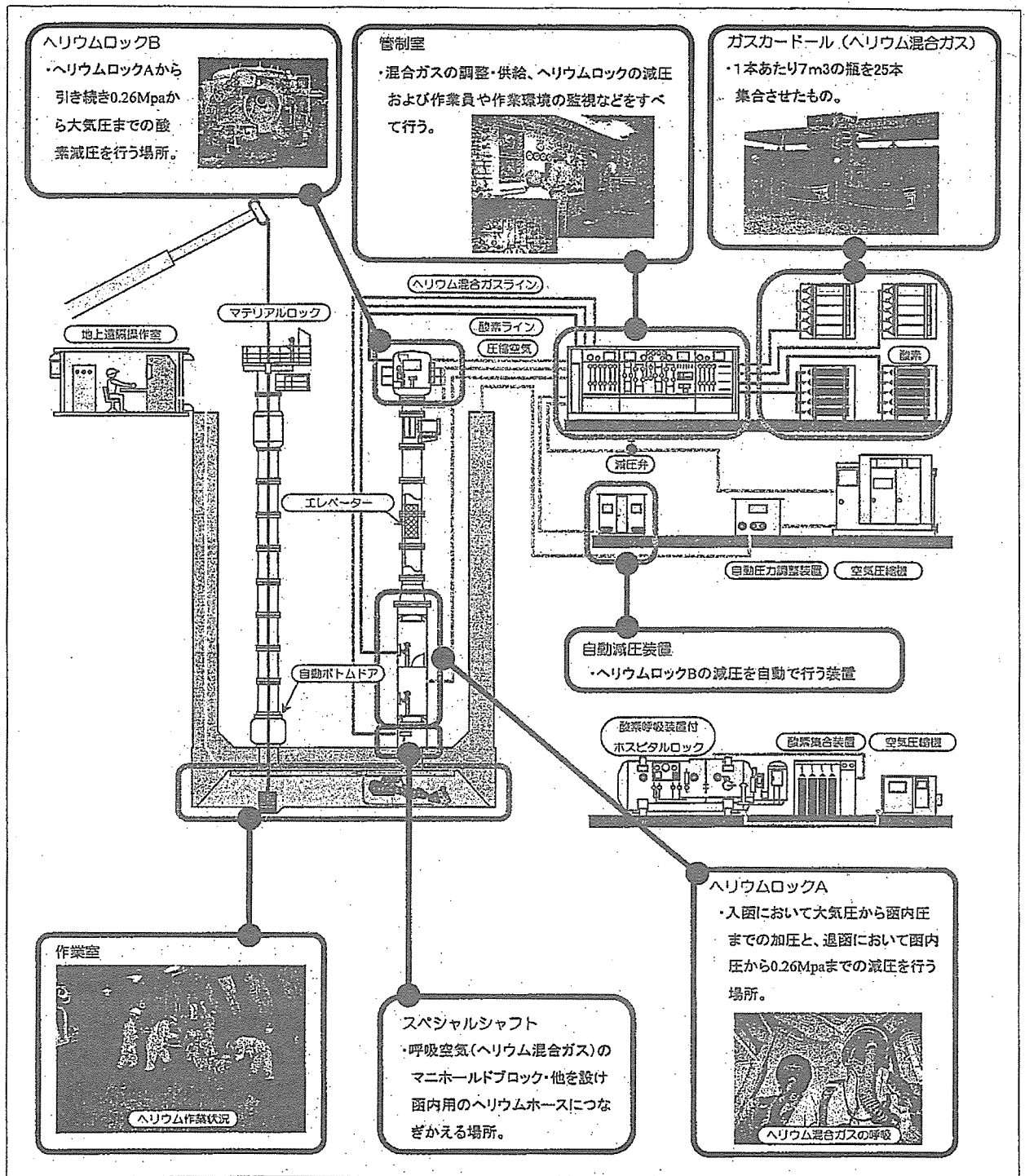


図1-5ヘリウム混合ガスシステム

よる救急再圧制度は廃止すべきであろう⁵⁾。

我が国内で圧気作業が行われる場合には全国的に再圧治療を行える第2種装置を有する病院が52カ所に点在しているので作業開始する前に作業場から交通事情を考えて少なくとも数時間以内で再圧治療を行える病院と連絡を取っておくべきである。そして現場では原則的に減圧症治療を行わない。病院へ酸素吸入(10ℓ/min以上)させながら救急車等にて搬送する。従って第2種装置を有する病院では減圧症患者を忌み嫌わずに積極的に受け入れるべきで当学会所属医師としては率先して治療に当たるべきであろう。意識のある患者の場合の病状発症からHBOまでの golden time は5時間以内であるので相当の遠距離からでも搬送出来る。勿論航空機使用や標高400m以上の高所移動時には第1種の移動用タンクで搬送すべきであり、出来たら酸素(すぐ用意出来なければ空気でも)で1.3ATAへ与圧しながら再圧治療のラインに5時間以内にのせることであろう。酸素再圧〈表6〉或いはその延長表使用開始が検査等で遅れてはならないので再圧を優先する。その場合には神経学的検査等を再圧室内で行うべきであろう。大事なことは圧気作業場の再圧室で空気による救急再圧をスタートさせないことであり、病院での再圧治療を確保出来ず、かつ現場においても医師立ち会いの上で〈表6〉を行う手段が見つからない場合の最悪事態の選択として空気による救急再圧を位置づけるべきである。

参考文献

- 1) 厚生労働省：労働安全衛生規則，第89条の2，安衛法便覧，2004
- 2) 眞野喜洋：圧気作業下での潜函病とその対策，基礎工，30-37,1992
- 3) I. Nashimoto：Decompression of compressed air workers in civil engineering, In, Proceeding of an international working party held at the Ciba Foundation, 217-218, London,1965
- 4) 眞野喜洋(編著)：潜水医学，147-157, 194-199. 朝倉書店，1992

- 5) 眞野喜洋，山見信夫，芝山正治：高気圧作業に伴う標準減圧表の安全性評価のための疫学的調査に関する研究，厚生労働科学研究費：公募課題H-16-労働-9, 2005
- 6) 眞野喜洋：健康の概念，スタンダード公衆衛生学(眞野喜洋，編)1-3, 文光堂，2002
- 7) Rie Tomonoh：Health guidance intervention for fisherman divers - Measuring the effect on lifestyle and health status. (潜水漁業者に対する保健指導方法に関する研究)，平成16年度東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究科博士(前期)課程学位論文集，17, 1-7. 2005

注) HBO: Hyperbaric Oxygen Therapy
高気圧酸素酸素治療の略。
高分圧酸素を用いる治療法で、
減圧症治療の再圧治療も高気
圧酸素治療の範疇に入る。

2. 高気圧作業安全衛生規則・減圧表の数値計算

2-1 本節の要約

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 $(1 - e^{-k \cdot t})$ 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。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/cm^2 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。

大気中の窒素成分は 80%と仮定し、大気圧で飽和している体内窒素分圧は $0.8(\text{atm})$ 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 3 章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。

2-2 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、「第3章 1-4 減圧表作成方法」で述べる。

2-2-1 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（現厚生労働省）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なり、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考えられる。
- 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ていき、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）原文では断りがないが、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。圧力が高くては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 $PN_2 = CN_2 \cdot P_B$ 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 0.8kg/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 2-1 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 0.1MPa 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。
 $G_0 = pN_2 / 0.8$

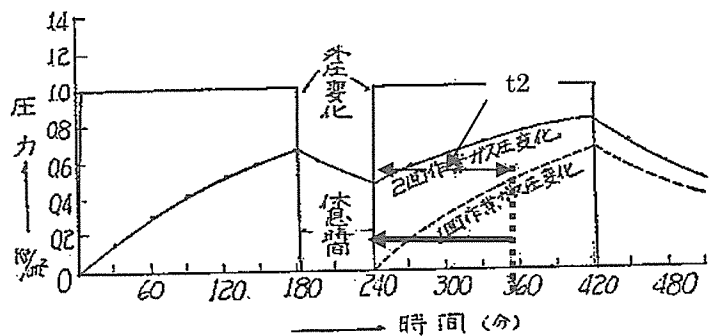


図 2-1 高圧下の繰り返し作業と窒素分圧変化の一例
 出典：わかりやすい潜函病予防法の解説・梨本一郎・15 ページ・工学出版、昭和 37 年に加筆

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

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

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、 $Pt_1N_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-k \cdot t_1}) + p_0N_2$

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、

$$Pt_1N_2 = (0.8 - p_0N_2)(1 - e^{-k \cdot t_1}) + p_0N_2 \quad \dots\dots\dots (A)$$

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、再び(1)式を用いるが、今度は $p_0N = 0.8$ である。

$$Pt_1N_2 = (PN_2 - p_0N_2)(1 - e^{-k \cdot t_2}) + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-k \cdot t_2}) + 0.8 \quad \dots\dots\dots (B)$$

$$(A) = (B) \text{ とおくと、} (0.8 - p_0N_2)(1 - e^{-k \cdot t_1}) + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-k \cdot t_2}) + 0.8$$

上式を $e^{-k \cdot t_1}$ 及び $e^{-k \cdot t_2}$ の項で整理すると、

$$(0.8 - p_0N_2) - (0.8 - p_0N_2)e^{-k \cdot t_1} + p_0N_2 \\ = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-k \cdot t_2}) + 0.8$$

さらに整理して、 $0.8 - (0.8 - p_0N_2)e^{-k \cdot t_1} = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-k \cdot t_2}) + 0.8$

$$\text{もう一度整理すると} - (0.8 - p_0N_2)e^{-k \cdot t_1} = \{P_B \times 0.8 - 0.8\}(1 - e^{-k \cdot t_2}) \quad \dots\dots\dots (C)$$

(C) 式の両辺を 0.8 で割って整理すると、

$$(p_0N_2 / 0.8 - 1)e^{-k \cdot t_1} = \{P_B - 1\}(1 - e^{-k \cdot t_2})$$

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、

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

の関係が得られる。

最後に、について整理すると、 $\{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-k \cdot t_1} = 1 - e^{-k \cdot t_2}$

より $e^{-k \cdot t_2} = 1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-k \cdot t_1}$ の関係が得られる。

両辺に自然対数を用いると、

$$-kt_2 = \ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-k \cdot t_1}]$$

書き直して $t_2 = -\ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-k \cdot t_1}] / k$

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、

$$t_2 = -\ln[1 - \{(G_0 - 1) / (P_B - 1)\}e^{-k \cdot t_1}] / k \\ = -\ln[1 - \{(1.9 - 1) / (2.8 - 1)\}e^{-\{0.693/120\} \times 60}] / (0.693/120) \\ = 0.4363 / (0.693/120) = 75.5 \text{ 分}$$

この数値は、2-5-2 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 $1 - e^{-kt}$ で表わすときこの値が 0.5（すなわち $e^{-kt} = 1/2$ ）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、いづ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2-2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。

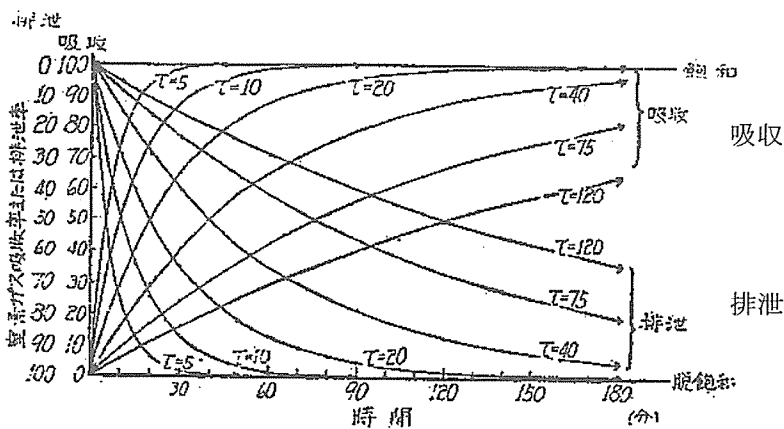


図 2-2 各組織の窒素ガス吸収または排泄の時間的变化 τ は半減期（分）
 出典：わかりやすい潜函病予防法の解説・梨本一郎・15 ページ・工学出版、昭和 37 年
 に報告者が曲線位置付近に吸収と排泄の文字を追加した。

2-2-2 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。さらにクストー(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として活きている。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 アルト一版・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
 ㈱マリン企画、昭和 57 年。序文で「アルト一氏が「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 $(1 - e^{-kt})$ 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。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 アルト一版・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) 『アルト一版・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。

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

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 2-1 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 2-1 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