

圧気土木作業における減圧症の発症率

芝 山 正 治

Research on the Incidence of Decompression Sickness in Compressed Air Work

Masaharu SHIBAYAMA

1. 圧気土木作業とは

高気圧下の圧気土木作業とは、地下構造物を造る場合に地下掘削をすると地下水が湧き出てくる。この地下水を作業環境から排除する上で、作業空間へ圧縮空気を送り、空気圧力自体の山留め作業によって湧水を抑え、作業をしやすくするための工法である¹⁾。ちょうどコップを逆さまにして、その中に空気を入れ、水を排除して、ヒトが中に入り作業をすると考えて頂けれ

ばよい。これをニューマチックケーソン工法とされている（潜函工法とも言われている）²⁾。利用される作業は、橋脚やビル工事の基礎、地下鉄工事や上下水道などのトンネル作業を開始するための立て坑（縦穴）の垂直掘削する作業がある（図1）。例えば身近にある場所として、東京のお台場にあるレインボーブリッジ³⁾や横浜のベイブリッジの橋脚工事、東京湾のアクアラインの海ホテルおよびトンネル工事に伴う立

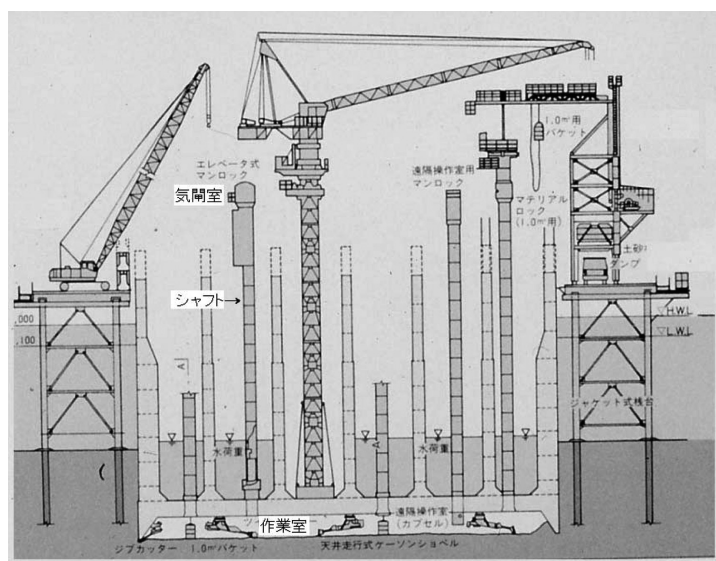


図1 ニューマチックケーソン作業の略図

作業員は気間室に入り、作業室内と同じ圧力に加圧する。下のハッチを開け、シャフトへ入り螺旋階段（または直梯子）にて下に降る。作業室内に入り目的の作業（点検修理・組み立て解体など）を行う。作業終了後はシャフトで気間室まで上がり、気間室内で減圧を行う。

て坑工事でも本工法が使われた。

水を排出するための最大圧力が0.39MPa（40mに相当する圧力）を限度として施行されているが、工事に必要な空間が比較的少ない、周辺地盤や地下水への影響が少ないなどの特徴を持つため、今後、都市部での大深度地下空間開発のニーズに対応できる工法として注目され²⁾、0.49MPa（50m）を超える作業が出て来おり、その場合の作業方式は空気による別表第1や2ではなく、ヘリオックス（ヘリウムと酸素混合ガス）やトライミックス（ヘリウム・窒素・酸素混合ガス）を用い、安全性を高めた方法となっている⁴⁾。

2. 高気圧作業安全衛生規則

圧気土木作業は、労働安全衛生法施行令第6条1項において「潜函工法により、大気圧を超える作業室またはシャフトの内部において行う

作業」とされ、図2に示す高さ約3mほどの密閉された作業室およびシャフト内で行う作業である。また、具体的な細則として高気圧作業安全衛生規則（以下、高圧則）に準じての作業が決められている⁵⁾。

ヒトが高気圧環境に入り作業を行うと様々な障害に罹患する。それを高気圧障害と呼んでいる。高気圧障害の中には歯のスクイーズのような軽症のものから動脈ガス塞栓症や減圧症などの死につながる障害まであり、それらを予防する手段として、動脈ガス塞栓症に対しては減圧（潜水では浮上）時の速度を毎分0.08MPa（水深換算で8m）以下とするよう決められ（高圧則第18条減圧の速度）、減圧症予防のためには減圧表を用い、高圧下の時間（高圧則第15条）として作業圧力と作業時間から減圧時に減圧停止をするように細かく決められ、1日に許される高圧作業回数も決められている（別表第1お

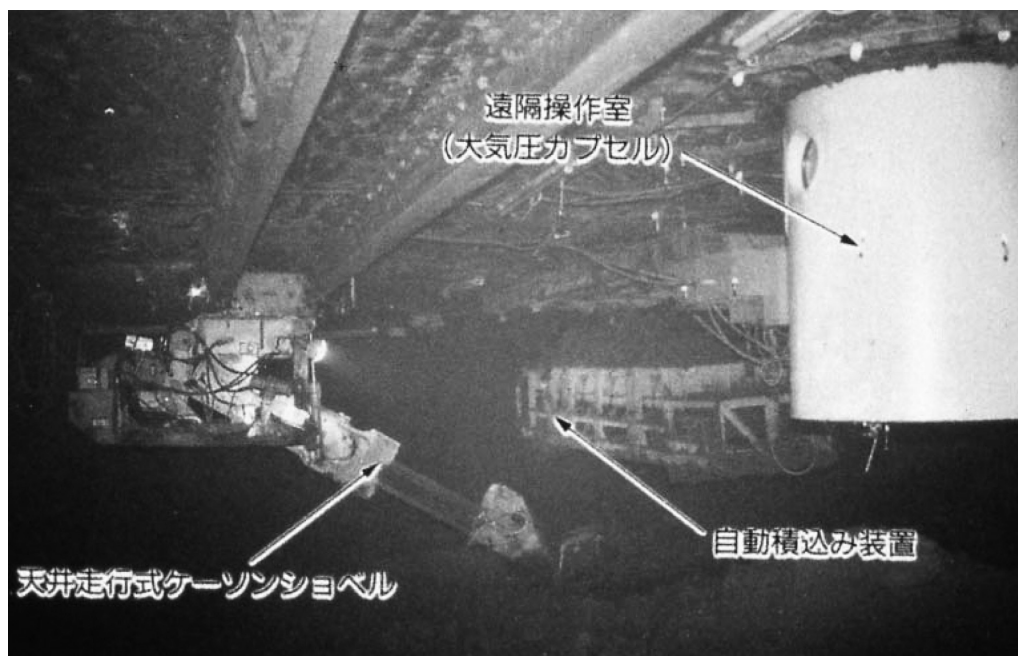


図2 作業室内の風景

近年のニューマチックケーソン作業は、作業室内での掘削作業は無人作業でショベルやベルトを遠隔操作している。

ヒトが作業室内に入るのは修理・点検・撤去などの時である。

よび別表第3)。減圧表の別表第1は1日に2回までの作業で、0.1MPa（水深換算10m）を超え0.39MPa（水深40m）以下の作業圧力で用い、繰り返し作業を行う場合は別表3の修正時間算出図を用いる（表1、図3）。別表第1の減圧表は1日に2回までの作業とされ、1日に3回以上の作業では別表第2の潜水用⁶⁾を用いるよう決められている。

表1 別表第1の減圧表

圧力 (MPa)	高圧下の時間	減圧(分)			体内ガス圧係数	業務間ガス圧減少時間 (分)	業務終了後ガス圧減少時間 (分)	第2回の高圧下の時間 (分)
		0.09MPa	0.06MPa	0.03MPa				
0.10を超え 0.12以下	30分以下			1	1.2	30	30	335
	30分を超え60分以下			1	1.4	30	30	305
	60分を超え90分以下			1	1.5	30	30	285
	90分を超え120分以下			1	1.6	30	30	265
	120分を超え150分以下			2	1.7	60	30	270
	150分を超え180分以下			3	1.8	60	30	250
	180分を超え210分以下			4	1.9	60	30	230
	210分を超え240分以下			5	1.9	60	30	230
	240分を超え270分以下			5	2	150	45	135
	270分を超え300分以下			6	2	150	45	105
0.12を超え 0.14以下	300分を超え330分以下			6	2	150	45	75
	330分を超え360分以下			7	2.1	150	45	45
	30分以下			1	1.3	30	30	295
	30分を超え60分以下			1	1.5	30	30	270
	60分を超え90分以下			1	1.6	30	30	255
	90分を超え120分以下			3	1.7	60	30	255
	120分を超え150分以下			5	1.8	60	30	240
	150分を超え180分以下			6	1.9	60	30	215
	180分を超え210分以下			8	2	60	30	210
	210分を超え240分以下			10	2	60	30	210
0.14を超え 0.16以下	240分を超え270分以下			10	2.1	150	45	130
	270分を超え300分以下			10	2.1	150	45	100
	300分を超え330分以下			12	2.2	150	45	70
	30分以下			1	1.3	30	30	270
	30分を超え60分以下			1	1.5	30	30	250
	60分を超え90分以下			3	1.7	60	30	235
	90分を超え120分以下			5	1.8	60	30	225
	120分を超え150分以下			7	1.9	60	30	210
	150分を超え180分以下			9	2	60	30	200
	180分を超え210分以下			11	2.1	90	45	210
0.16以下	210分を超え240分以下			15	2.2	150	45	135

0.10MPaは1kgf/cm²（水深10m）

左列から 圧力：最大作業圧力、高圧下の時間：作業時間（加圧を開始してから減圧を開始するまで、減圧時間は含まれない）、減圧（分）：減圧時に停止する圧力と時間（この圧力では0.03MPaの圧力での停止時間を示している）、体内ガス圧係数：体内に溶解している窒素ガス圧係数（1が大気圧の値）、業務間ガス圧減少時間：1日に2回の作業を行う場合の最低休憩時間、業務終了後ガス圧減少時間：1日の作業が終了した後の激しい作業を禁止する時間、第2回の高圧下の時間：1日に2回の作業を行う場合の最大作業時間

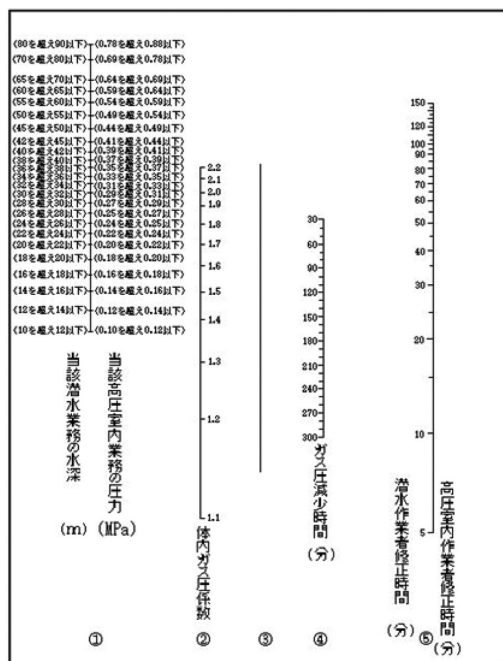


図3 別表第3の繰り返し作業に伴う修正時間算出図
繰り返し作業を行う場合の次回（2回目か、3回目）の実作業時間に本図で計算された時間を加える。
②ガス圧減少時間：前回の減圧終了後の体内ガス圧係数。④ガス圧減少時間：休憩した時間。①当該高圧室内業務の圧力：次回の作業圧力。③は②と④を結び③で交差した点と①の値を結びそのまま延長して⑤に達する。⑤高圧室内作業者修正時間：③を経由した線との交点が次回の実作業にプラスする時間。
例えば、実作業時間が60分で修正時間が40分であるなら合計して100分として減圧表を引く。

3. 減圧症（DCS）および動脈ガス塞栓症（AGE）の治療と高圧則

DCS（Decompression Sickness）や AGE（Arterial Gas Embolism）の治療方法は高気圧酸素治療が絶対適応とされる。高気圧酸素治療装置には第Ⅰ種の一人用と第Ⅱ種の多人数用があり、DCSやAGEの治療では第Ⅱ種の多人数用を使うよう日本高気圧環境・潜水医学会の安全基準で決められている。第Ⅱ種装置設置は、病院で設置されており、その施設数は51装置、その中でDCSやAGEの治療が可能な施設は

20施設程度だと思われる⁷⁾。

圧気作業は、都心で行う地下鉄や橋脚の工事もあるが、ダム湖での橋脚工事や道路の基礎工事など山奥で行う工事まである。こうした状況から DCS や AGE の発生のために高圧則第42条の設置⁵⁾で、「圧力0.1MPa 以上の圧気下における高圧室業務または水深10m 以上の場所における潜水業務を行うときは、高圧室内作業員または潜水作業員について救急処置を行うため必要な再圧室を設置し、または利用できるように処置を講じなければならない」と定めている。これは作業現場に再圧室を設置しなければならないということになる。同第11条に特別の教育という項目がある。1項第5号に「再圧室を操作する業務」がある。いわゆる現場に設置された再圧室を操作するための特別教育である。約2日間で教育を受け再圧室の操作員となる。但し、再圧室の操作は可能であるが、DCS や AGE などの患者を再圧室に収容して操作を行うことは医師法に抵触するため医師の指示で行うこととなる。

従って、高気圧作業では DCS や AGE などの高気圧障害が発生し、早期に治療するために現場では再圧室が設置されていることになる。DCS の発症により、治療に急を要する場合は産業医や専門医に連絡し、現場の再圧室で治療を行い、完治した場合、病院へ治療に訪れないこともある。しかし、近年は現場での再圧治療後は病院での診察を受けていることが多い。

4. 減圧症発症率調査の目的

圧気土木作業における DCS 発症率を調べる目的である。本作業における DCS 発症は、ほとんどが現場の再圧室ですまされ、病院への受診がなく、実数の調査が大変難しい。DCS の発症率を調べるためには、作業現場での調査依頼が必要であることから作業現場の責任者に調

査を依頼して DCS 発症率を調べた。

5. 調査方法および期間

圧気土木作業現場の責任者に、作業内容、作業形態、作業圧力、減圧方法、作業人数および DCS 発症件数などの調査票を渡し、作業終了後に記載してもらう方法で調査を行った。対象は、別表第1および2（別表第3を含む）の空気減圧表を用いた作業所とした。

期間は、1980年より2008年までの29年間である。

表2 別表第1の空気減圧による作業員人数と DCS (1980～2009.10. 68作業所)

作業圧力		延べ作業員人数	減圧症発症人数	発症率
MPa	Kgf/cm ²			
0.08 < ≤0.10	≤ 1.0	30,337	0	0.10 < ≤0.20 44/40,110 0.110%
0.10 < ≤0.12	≤ 1.2	7,655	2	
0.12 < ≤0.14	≤ 1.4	8,888	7	
0.14 < ≤0.16	≤ 1.6	9,363	14	
0.16 < ≤0.18	≤ 1.8	7,821	12	
0.18 < ≤0.20	≤ 2.0	6,383	9	0.20 < ≤0.29 353/35,301 1.000%
0.20 < ≤0.22	≤ 2.2	4,567	25	
0.22 < ≤0.24	≤ 2.4	3,864	43	
0.24 < ≤0.25	≤ 2.6	6,229	72	
0.25 < ≤0.27	≤ 2.8	8,136	64	
0.27 < ≤0.29	≤ 3.0	12,505	149	0.29 < ≤0.39 24/998 2.405%
0.29 < ≤0.31	≤ 3.2	603	18	
0.31 < ≤0.33	≤ 3.4	158	1	
0.33 < ≤0.35	≤ 3.6	132	2	
0.35 < ≤0.37	≤ 3.8	71	1	
0.37 < ≤0.39	≤ 4.0	34	2	0.39 < ≤0.41 1/77 1.299%
0.39 < ≤0.41	≤ 4.2	77	1	
合計		106,823	422	0.395%
0.10 < ≤0.41 MPa の合計		76,486	422	0.552%

6. 研究結果

調査作業所数は68であった。使われた減圧表は0.39MPa 以内および1日に2回以内の作業で別表第1および3である。0.39MPa を超えた作業圧力または1日に3回以上の作業回数の場合は別表第2の減圧表を用いていた。

結果を表2に示す。延べ作業員人数は106,823人であり、0.10MPa 以下の作業員人数が30,337人である。0.10MPa を超えて0.10MPa 毎の作業員人数

と減圧症発症率は0.10MPaを超え0.20MPa (2.0kgf/cm²) 以下で0.110% (44/40,110人)、0.20MPaを超え0.29MPa (3.0kgf/cm²) 以下で1.000% (353/35,301人)、0.29MPaを超え0.39MPa (4.0kgf/cm²) 以下で2.405% (24/998人)、0.39MPaを超え0.41MPa (4.2kgf/cm²) 以下で1.299% (1/77人)であり、0.10MPaを超え0.41MPa以下の合計で0.552%であった。0.10MPa以下ではDCSの発症はなかった。

減圧症の延べ人数は422人であり、全て0.10MPaを超えてからの発症である。

7. 考察

圧気工法の利用は1250年頃、ヨーロッパで水中作業に釣鐘式潜水機を用いた記録に始まるが、我が国における主たる利用はニューマチックケーソンによる橋脚基礎工事であるといえ、土木構造物の基礎の中で橋脚基礎としてオープンケーソンが採用された¹⁾。日本の橋脚工事の歴史を辿ると仁徳天皇の時代にすでに大掛かりな河川工事が施工され、これに伴って橋梁が架設されている。このように古くから橋梁の基礎工法が検討されてきた日本の地理的国情は今日の圧気工法の普及と技術的工場を強く要求し、生活に直結した土木構造物の建設と圧気工法との結びつきを大とした¹⁾。

一方、圧気工法に従事する作業員は常に減圧症罹患の危険を負っている。減圧症の原因追及はかなり古くからなされており、1670年にRobert Boyleがその仮説をたて、その後1878年にPaul Bertがその仮説を実験的に証明し、減圧症の病因は空気塞栓症であると発表した⁸⁾。その後、減圧症に関わる個人的素因や間接的な病因としての血液濃縮や凝固、血小板減少などの循環障害の関与が論じられ、事実、重症減圧症ではDIC (Disseminated Intravascular Clotting) と同様の凝固症候群症状を呈する^{9~12)}。しかし、

DICが生じるにしても、その原因としては血中に形成された微小気泡の周囲に血小板や白血球が集合消費されて、二次的に起こる現象、すなわち血小板の役割はacquired storage pool diseaseと類似した疾患と考えることが可能で、R. Boyleの仮説が間違っていないことに変わりはない^{11,12)}。

従って、減圧症を予防する上で必須の条件は高気圧環境からの復帰減圧が過度に速すぎないように減圧制御を行うことである^{4,13~15)}。

気泡形成は生じても常に減圧症が発生するのではなく、その症状には一定の条件が設定されており、減圧症の発症を100%予防するためには作業効率を度外視した長時間減圧 (飽和減圧など) の方法もある。しかし、一般の圧気作業においては厚生労働省で定めた標準減圧表 (別表第1、2、3)^{5,6)}を遵守することを義務づけ、標準減圧表に完全に従ったとしても1%前後の減圧症発症は許される範囲とされている^{16,17)}。D.N. Walderは実際の圧気土木作業においては約2%前後の減圧症発症はやむを得ないとしているが、我が国における過去の減圧症発症率はそれよりもかなり高い値として報告されてきた¹⁸⁾。

梨本と眞野 (1973年)¹⁹⁾は厚生労働省 (旧労働省) 標準減圧表別表第1に基づく減圧症発症率は0.54% (22例/4,042人) であると報告しているが、実作業における減圧症の発症率は眞野ら²¹⁾によれば、1.42% (15例/1,056人) から3.3% (42例/1,267人)、梨本ら²²⁾は6.4%、森田ら²³⁾によれば4.5%、眞野と芝山ら (1987年)¹³⁾によると0.10MPaを超え0.35MPa以下の作業において減圧症発症率は0.54%と研究者により幅が大きい。いずれにしても実際の圧気作業においては必ずしも厚生労働省で定めた標準減圧表 (別表第1、2、3) を遵守しても減圧症の発症が認められることになる。

減圧表は厚生労働省の標準減圧表だけではな

く世界中には数多くの減圧表が存在する。減圧表が異なれば当然その発症率も異なり、米国ワシントン表を用いた場合には発症率は0.66%と報告されているが、P.D. Griffiths²⁴⁾によれば英国の減圧症発症率は1.5～2.0%とされる。また、日本のニューマチックケーソンにおける圧気作業の形態は別表第1によれば1日に2回の繰り返し作業を行う、いわゆる split 方式で、米国ワシントン表や英国ブラックポール表のように1日1回の圧気作業と異なる。減圧の回数が多いのでそれだけ減圧症に罹患する危険性も大であるといえ、現在のより安全性の高い減圧表を使用するという考え方に逆行しているといえるかもしれない。すなわち、我が国の圧気工法では好ましからざる減圧表を用いているために、減圧症を予防する上ではより強力な安全衛生管理が強いられなければならない。

本調査研究により別表第1または第2の0.1MPaを超えた圧力の減圧表を用いた作業で減圧症発症率が0.552%であった。これらの作業において減圧表厳守の有無については確認できていないが、減圧症予防のために、作業圧力を実際の圧力より1段上の圧力としている記載があり、実作業が0.18から0.20MPaの場合には0.20から0.22MPaに該当する減圧表を使用するという方法、または作業圧力は同一で実作業時間を1段階厳しくとる方法としていた。減圧表の使い方は、原則的には最低レベルの基準であり、決められた基準以上で行っても何の問題もない。本調査では全ての作業所については調べられなかったが、減圧症予防のための工夫が行われていた。しかし、減圧症発症率は作業圧力が高まるとともに発症率も高まっている。0.10から0.20MPaの作業延べ人数が40,110人に対しDCSは44例と0.110%に対し、0.20から0.29MPaの作業延べ人数が35,301人に対しDCSは353例、

発症率が1.000%と9倍高くなっている。また、0.29MPaを超え0.39MPa以下で0.20MPa以下と比較して発症率が2.4倍の2.405%となり、圧力が高まるとともにDCSの発症率が高まっている。この現象は減圧表作成の考え方が同じ理論で行えば高い圧力においては発症率が高まることを意味している^{4,13)}。いわゆる減圧表作成の理論式は一本化すべきではなく圧力に応じて理論式（安全率）を変えなければならないことを現している。

今まで報告された別表第1を用いた作業の減圧症発症率は0.5～6.4%^{13,15,19,21～23)}と言われているが、本調査研究により0.5%であり、尚かつ作業圧力の高まりとともに発症率も高まることが確認できた。

8. まとめ

全国規模での圧気土木作業における空気減圧表である厚生労働省の別表第1および2を使った作業において減圧症の発症率について調査し、以下に結果を得た。

- 1) 30年間で延べ10万人の圧気作業員に対して調査を行った。
- 2) 減圧症の発症率は0.10MPaでは認められず、圧力の上昇とともに高まり、0.20MPa以下で0.110%、0.29MPa以下で1.000%、0.39MPa以下で2.405%と圧力の高まりとともに発症率も高くなった。
- 3) 減圧表作成のための理論は圧力毎に考える必要がある。

参考文献

- 1) 岩松幸雄、平川修士、工藤真之介ほか(1978) ケーソン基礎の設計と考え方、p.1-15. 鹿島出版会、東京
- 2) 小田章治(1993) 最近の国内外におけるニューマチックケーソン工法の動向. 基礎

- 工、106-110
- 3) 小松信夫 (1990) 建設進む首都高速12号線. 土木学会誌、5月号 : 8-11
 - 4) 石井通夫 (2005) 日本の土木工事における高気圧作業と減圧要領の変遷. 日高压医誌、40 : 25-35
 - 5) 厚生労働省労働基準安全衛生部監修 (2004) : 高気圧作業安全衛生の手引き、第4章関係法令、p.153-198. 建設業労働災害防止協会、東京
 - 6) 中央労働災害防止協会 (2008) 潜水士テキスト、第4章関係法令、p.295-353. 中央労働災害防止協会、東京
 - 7) 高気圧酸素治療安全協会 (2009) 安全協会ニュース、高気圧酸素治療装置マップ. 高気圧酸素治療安全協会 33 : 13-61
 - 8) Bert P. (1978) Barometric pressure. Undersea Medical Society, 852-895
 - 9) Philp RB, Schacham P, Gowdey CW (1971) Involvement of platelets and microthrombi in experimental decompression sickness : similarities with disseminated intravascular coagulation. *Aerosp Med*, 494-502
 - 10) 玉谷青史、笹本浩 (1975) 減圧症の病因としての血小板凝集説. 呼吸と循環 23 : 388-395
 - 11) Kuroiwa K (1984) The functional and biochemical changes in experimental decompression sickness of rabbits. *Bull Tokyo Med Dent Univ* 31 : 73-84
 - 12) Hallenbeck JM, Anderson JC (1982) Pathogenesis of the decompression disorders. In : Bennet PB, Elliott DH. *Physiology and Medicine of Diving*. Tindal & Cox, London 435-460
 - 13) 眞野喜洋、芝山正治、松井征男 (1987) 圧気土木作業における減圧症発症率に関する研究 最近5年間の発症率推移. *産業医学* 29 : 271-278
 - 14) 眞野喜洋 (1980) 減圧と減圧症. *海洋科学*、12 : 11-18
 - 15) 眞野喜洋、梨本一郎 (1973) 高压作業者の実態調査 (その2). *日高压医誌* 8 : 104-107
 - 16) 建設業労働災害防止協会編 (1981) 圧気作業に関する環境調査結果、p.1-12. 建災防、東京
 - 17) Walder DH (1975) The prevention of decompression sickness. In : Bennet PB, Elliott DH. *The physiology and medicine of diving and compressed air work*. pp456-470. Williams & Wilkins Co, Baltimore
 - 18) Mano Y, D' Arrigo JS (1978) Relationship between CO₂ levels and decompression sickness : implications for disease prevention. *Avia Space Environ Med* 49 : 349-355
 - 19) 梨本一郎、眞野喜洋 (1973) 減圧症予防に対する現行減圧表の効果. *日高压医誌* 8 : 108-111
 - 20) 浦山博、杉本侃 (1986) 高気圧酸素治療の歴史. *最新医学*、41 : 209-215
 - 21) Mano Y (1973) Incidence of decompression sickness. In : *Proceeding of the second joint meeting of U.S.-Japan diving physiology and technology panel*. 29-32
 - 22) 梨本一郎、後藤興四之、佐藤良作 (1975) 高気圧作業に伴う減圧症の発生について. *日高压医誌*、10 : 39-41
 - 23) 森田明紀、後藤興四之、梨本一郎ほか (1976) 高気圧作業に伴う減圧症の発生について (第2報). *日高压医誌* 1 : 29-30

- 24) Griffiths PD (1975) Decompression sickness in compressed air workers. In : Bennet PB, Elliott DH. The physiology and medicine of diving and compressed air workers. p.451-463 . Williams & Wilkins Co, Baltimore