減圧症発症予防のためのアプローチ：気泡計測法による 減圧表（ブラックプール表）の評価

Approach to the Prevention of the Onset of Decompression Sickness :
Evaluation of a decompression schedule (Blackpool table)
by the bubble counting technique

東京医科歯科大学医学部公衆衛生学教室

眞 野 喜 洋

Yoshihiro Mano

Department of Public Health, School of Medicine, Tokyo Medical & Dental University, Tokyo

The Blackpool table was used in Hong Kong subway construction work where we did medical consultation on how to prevent decompression sickness. Between 1975 and 1984 there were 260 bends patients out of 28,554 workers who were exposed to pressures of between 1.2 and 2.8 kg/cm², and the incidence of decompression sickness (bends) was 0.91%. This percentage of bends is considered quite acceptable.

The Blackpool table has been recognized as one of the safest decompression schedules experimentally but it became clear that its schedule for the prevention of decompression sickness could be improved upon through observation and evaluation by a bubble counting technique using an agarose gel model.

The Model One table, which was developed by us, was applied to the Blackpool table to decrease the incidence of bends. These two decompression schedules were checked by a bubble counting technique. The special feature of the Model One table is that it utilizes the initial decompression ratio between the bottom pressure and the first stop of decompression; i.e., the slow decompression ratio of 0.1 kg/cm²/min, in contrast with the Blackpool table.

The extension of the total decompression time is less in Model One than in the Blackpool schedule, however, the number of bubbles formed in the agarose gel model decreased significantly and the incidence of bends was also decreased by nearly one half.

This demonstrates that the initial decompression ratio is another key for decreasing the incidence of bends.

Key words : Decompression schedule, Bends, Agarose gel, Blackpool table, Bubble
減圧表, 減圧症 (ベンズ), アガロース・ゲル, ブラックプール表, 気泡

緒 言

香港の地下鉄工事に伴う高気圧環境下作業(圧気作業)は、1975年11月より開始されて1984年にはその主たる圧気作業は終了し、現在は既設の北東部に第2期工事が計画されている。我々はこの圧気作業の安全衛生面に対し1979年より関与しているが、その間28,554名の延作業員数に対し260名(0.91%)の減圧症患者の発症をみた。

減圧症発症を予防する試みとして、当教室で改良開発した生体の気泡形成現象のモデルとしてアガロース・ゲル・サンプルを用いて現地における圧気作業に応用し、その後、研究室において同様のゲル・サンプルで再現実験を繰り返した。その結果、香港で用いられた減圧表は日本の労働省で定められた減圧表よりも安全率が高いといわれているものの、まだ改良する必要のあること、更に減圧症の発症を抑止する方策のあることを知り得た。

この気泡計測法による減圧症予防対策は日本の圧気作業にも応用でき、将来の圧気作業上、有用な減圧症予防対策となり得ると考えられ、その解析結果を整理することとした。

方 法

香港地下鉄405F 工区工事作業場において、総調査対象者の中より6,120人の延作業員に対し、当教室で研究開発し決められた作製方法¹⁻⁴⁾によって同時に精製されたアガロース・ゲル・サンプルを携行させ、作業終了後回収すると共に、単位当たり(0.31 g, 0.3 ml)の平均気泡数と S.D. を求めた。作業員は1回当たり6個のサンプルを携行した (Fig. 1)。

Fig. 1 Photo of agarose gel sample. The size of each sample is 10×10×3 mm.

入坑作業員に対するその減圧方法は英国のブラックプール表 (BP 表) が使用されており、また英国の労基法に基づいて個人用の入坑記録用紙が配布され、高気圧環境への加圧、減圧について専従の管理者が個人別入坑記録、減圧記録を取り、厳格に高気圧作業管理がなされた⁵⁾。

データは毎日の作業終了毎に個人票の写しを取り、アガロース・ゲルの気泡数と共に後日の再現実験用として保存された。

研究室では記録票に基づき、標準減圧表である英国のブラックプール表 (BP 表)⁶⁾、並びに実録された個人記録票の再現実験を室温 (25.5±1.5°C) にて同一のバッチから作製されたアガロース・ゲルを用いて行い、それぞれ6個のモデルの単位当たり平均気泡数±S.D.を求めた。

また、実作業が進行されている期間中の試みとして高気圧作業圧力 (Bottom pressure) から第1段減圧停止圧力 (first stop) までの減圧速度をかつて本学で検討された減圧表 (Model 1)^{2,3,7)} に準じて緩やかに減圧させることで減圧症予防対策をより強化したので、これについても同一方法の再現実験を繰り返した。

Model 1 は本来の減圧表である BP 表を使用するが、作業圧力から第1減圧停止圧力まで減圧する際に、3.0 kg/cm² (4.0ATA: atmospheres absolute) までの減圧は通常通り減圧し、3.0 kg/cm² の減圧点より第1減圧停止圧力までは0.1 kg/cm² 当たり1分間を要する方法で行われるものであり、香港における減圧時には第1減圧停止圧力までの初期減圧時間 (t_1 分) に10~15分を要して減圧された。

個人票の中には数値が読み取れないデータが含まれていたため、判読不能なものに対しては生データのままで、再現実験の対象から除外した。気泡の計測については誤差を生じさせないために、2人の研究者が一致する値をもって実測値とした。

結 果

入坑者に対しては四肢関節部のレントゲン撮影を含む検診、圧気テスト等の厳しいチェックが行われ、作業期間中に3回、減圧症になった者はその時点で業務から除外された。

調査時の作業圧力は1.2 kg/cm² から最大2.8 kg/cm² までであったが、ほとんどの作業は1.8~2.2 kg/cm² に集中していた (Table 1)。

すなわち、合計の延作業回数28,554回に対して、1.8~2.2 kg/cm² までの作業回数は25,870回となり、作業の90.6%はこの圧力範囲内に集中していた。

人種別の作業入坑回数比率は日本人：中国人：韓国人：英国人≒3：6：10：1であった。主たる作業は韓国人と中国人が行うことになっていたため、日本人は監督指導の立場であり、実作業はあまり伴わないはずであるが、言語上の問題もあって実際には自ら模範を示しながら積極的に作業を行ったので、労働量は最も大きかった。英国人は実作業には就かなかったため、減圧症の発症も少なかった。作業量 (労働量) の要因は減圧症の発症率に関与し、従来から減圧症の罹患者は労働内容に対応して重作業ほど罹患しやすいとされている。本調査結果も、発症率は日本人=1.41%>韓国人=0.95%>中国人=0.72%>英国人=0.40%の順で同じ傾向を示していた。これは作業量によるもので、人種差に基づくものと

Table 1 Bends incidence according to working pressur. upper number ; number of bends cases, lower number ; number of workers.

Working pressure (Bottom pressure) (kg/cm ²)	Different nationality Bends incidence								Total incidence	
	Japanese		Chinese		Korean		English			
	Number of wokers	Incidence	Number of wokers	Incidence	Number of wokers	Incidence	Number of wokers	Incidence	Number of wokers	Incidence
1.2< ≤1.4	1 84	% 1.19	— 146	% 0	— 156	% 0	— 27	% 0	(1) 413	% 0.24
1.4< ≤1.6	2 99	2.02	7 271	2.58	2 461	0.43	2 98	2.05	(13) 929	1.40
1.6< ≤1.8	5 228	2.19	8 477	1.68	11 478	2.30	— 70	0	(24) 1253	1.92
1.8< ≤2.0	13 1480	0.88	8 3245	0.25	31 5496	0.56	1 699	0.14	(53) 10920	0.49
2.0< ≤2.2	39 2367	1.65	31 4467	0.69	81 7023	1.15	5 1093	0.46	(156) 14950	1.04
2.2< ≤2.4	— 11	0	8 28	28.57	5 45	11.11	— 2	0	(13) 86	15.12
2.4< ≤2.6			— 2	0			—		2	0
2.6< ≤2.8			— 1	0	—		—		1	0
Different racial total Bends incidence	(60) 4269	1.41	(62) 8637	0.72	(130) 13659	0.95	(8) 1989	0.40	(260) 28554	0.91

は考えられなかった。

罹患部位は作業内容から下肢に負担が掛かるために膝、腰、足関節が多く、肩等の上肢は少なかった。上肢の発症は全体の6%で、残りは下肢であった。また、II型の呼吸循環障害 (chokes) や中枢神経系 (CNS) 障害は1例も発症せず、全例がI型の limb bends であった。

左対右の発症比率は、両側に発症した事例をそれぞれに加えると167:167の同数となり、左右差はなかった (Table 2)。Table 2の合計数が281となっているのは、全体の減圧症発症は260例であったが、同時に2箇所異なる部位に発症する事例があったためである。但し、左右の膝が同時に発症した事例等は Table 2でB (Bothの略、左右同時発生) の欄にまとめたので、実際の発症部位は334箇所であったといえる。

減圧症の潜伏時間は従来からの報告と異なり、減圧終

了2時間以内に発症した事例は13.4%でしかなく、6時間以上経過してから発症した事例が47.0%も占めていた (Table 3)。

アガロス・ゲル・サンプルを用いた気泡計測法による調査並びにBP表の評価は、作業圧が1.8~2.3 kg/cm²における入坑作業員、延6,120人を対象とした。その間に42例の減圧症の発症をみ、発症率は0.69%であった。作業時間別でみると4時間以内の発症例はなく、すべて4時間以上で8時間前後に集中していた。

実作業に基づく形成気泡の計測結果は、調査研究開始前に現地で使用されている減圧表に基づいて事前に行われた予備実験で得られているBP減圧スケジュール表の形成気泡数ラインの範囲内に大部分が収まっていた。このことから実作業における減圧管理は厳格になされていたことが気泡計測法にても証明された。

Table 2 Site of limb bends. R: right side, L: left side, B: both sides.

Nationality	Knee			Hip			Shoulder			Ankle			Others			Total	%
	R	L	B	R	L	B	R	L	B	R	L	B	R	L	B		
Japanese	21	27	8	2	1	—	1	2	2	2	2	3	1 hand	—	—	72	25.6
Chinese	21	21	14	—	4	1	1	3	2	—	—	—	—	1 femur	—	68	24.2
Korean	54	40	21	—	7	—	2	—	3	3	1	1	—	1 foot	—	133	47.3
English	4	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 femur	1 leg	—	8	2.9
Total	100	90	43	2	12	1	4	5	6	5	3	4	2	3	0	281	
	233			15			16			12			5				
%	82.9			5.3			5.7			4.3			1.8				100.0

Table 3 Relation between bends and onset time after decompression. Time of the period of incubation.

Hours	Number of bends patients				Total	%
	Japanese	Chinese	Korean	English		
0 <= 2	9	9	17	—	35	13.4
2 <= 4	10	9	36	1	56	21.5
4 <= 6	14	9	22	2	47	18.1
6 <= 8	13	11	22	3	49	18.9
8 <= 10	8	2	14	2	26	10.0
10 <= 12	3	7	5	—	15	5.8
12 <= 14	2	3	4	—	9	3.4
14 <= 16	1	10	4	—	15	5.8
16 <= 18	—	1	1	—	2	0.8
18 <	—	3	3	—	6	2.3
Total	60	64	128	8	260	
%	23.1	24.6	49.2	3.1		100.0

また、個人票に記されている減圧スケジュール記録を
みても同様の指摘ができた。

香港側の要望もあり、減圧スケジュールの改善に初期
減圧速度を緩やかにする改良（Model 1 に準じた減圧速
度）を加えた結果、改善前は発症率が0.72%だったもの
が0.46%に減じた（ $p < 0.02$ ）（Table 4）。

減圧症事例の中、初期減圧時間（ t_1 ）について検討し
た。無作為に抽出された減圧症例30例の初期減圧時間は
Fig. 2 および Table 5 に示されるように、 t_1 の平均は5.6
分であった。作業時間が6時間以上においてアガロ
ス・ゲルの平均気泡形成数 $\bar{x}$ が4以下で、気泡計測法の
評価において減圧症に対する low risk group に属する

減圧群の初期減圧時間について、任意に抽出された同数
の30例を Table 6 にまとめ、気泡数 $\bar{x}$ が8個以上の同計
測法評価では high risk group に属する事例30例を
Table 7 にまとめた。

Table 5, 6, 7 のそれぞれの作業圧力、作業時間、減
圧時間の合計には有意の差はなく、同一条件であったと
いえる。しかし、形成気泡数による区分けでみた場合の
初期減圧時間は Fig. 2 のようになり、low risk group で
ある気泡数平均4個以下の場合と減圧症発症事例とは
有意の差を生じた（ $p < 0.005$ ）。

Fig. 3 は減圧症発症事例#19のケースであり、この時の
作業圧力は2.1 kg/cm² で468分間作業のために滞在し、

Table 4 Comparison of bends incidence in BP table and applied Model 1.

Bottom time (hours)	BP table			Applied Model 1		
	Number of Bends cases	Number of workers	Incidence %	Number of Bends cases	Number of workers	Incidence %
0 < ≤ 4	0	2230	0	0	223	0
4 < ≤ 6	8	612	1.31	1	69	1.45
6 <	29	2313	1.25	2	366	0.55
Total	37	5158	0.72	3	658	0.46

	Bends cases (30 cases of Table 5)	High risk group $\bar{x} > 8$ (30 cases of Table 6)	Low risk group $\bar{x} < 4$ (30 cases of Table 7)
Mean $\bar{x}t_1$	5.55	6.36	9.05
S.D.	1.77	2.56	1.82

Fig. 2 Comparison of initial decompression times of high and low risk bends case groups.

	Number of bubbles $\bar{x}$ S.D.		Working pressure (kg/cm ²)	Bottom time (min)	Decompression time (min)	Total pressure exposure time (min)
Solid line: BP Table	9.5	1.64	2.1	468	147	615
Dotted line: applied Model 1	1.7	1.37	2.1	468	152	620

Fig. 3 Comparison between BP table and applied Model 1.

その後の減圧時間はBP表を遵守しており、147分であった。 t_1 は2.1 kg/cm²より0.9 kg/cm²まで7分間であったが、Model 1に従えば、 t_1 は12分となる。減圧合計時間は152分となり、5分間の延長であり、これは高気圧下滞在時間合計でみると僅か0.8%の拘束時間延長にすぎず、且つ気泡形成数の実測数 $\bar{x}=9.5$ であったものが、 t_1 を5分間延長した再現実験では1.7へ減少し、low risk groupに組み込めることになるので、Fig. 2からみて減圧症を予防できる確率は非常に高くなっていたであろうと考えられた。

Table 5の減圧症事例#28, 29, 30はModel 1に準じる減圧法の初期減圧時間を緩やかにするという改善指示後に発症した事例であったが、それぞれの t_1 は13ないし14分を取らなければならないものが6.5分、4分および7分しか取らず、Model 1を遵守していなかった。この3事例がModel 1に準じて減圧表を改善するように指示した後の発症事例のすべてであった。すなわち、改善方法が必ずしも確実に守られていなかったが、それでもなお発症率は半減していたことが知れた (Table 4)。

Table 5 Initial decompression time (t_1) of 30 Bends cases.

Case number	Nationality	t_1 (min)	Δp (bottom pressure first stop)	Bottom pressure (kg/cm ²)	Bottom time (min)	Total decompression time (min)
1	J	4	$\begin{Bmatrix} 2.05 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.1	545	134
2	K	3	$\begin{Bmatrix} 2.10 \\ 0.95 \end{Bmatrix}$	2.1	445	140
3	K	5	$\begin{Bmatrix} 2.05 \\ 0.84 \end{Bmatrix}$	2.4	466	135
4	K	3	$\begin{Bmatrix} 1.71 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	1.9	395	115
5	J	5	$\begin{Bmatrix} 1.84 \\ 0.88 \end{Bmatrix}$	1.9	490	115
6	J	5	$\begin{Bmatrix} 2.07 \\ 0.87 \end{Bmatrix}$	2.1	425	137
7	K	5	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.98 \end{Bmatrix}$	2.2	480	138
8	E	7	$\begin{Bmatrix} 2.25 \\ 0.83 \end{Bmatrix}$	2.2	502	175
9	C	7	$\begin{Bmatrix} 2.25 \\ 0.83 \end{Bmatrix}$	2.2	495	170
10	C	2	$\begin{Bmatrix} 2.2 \\ 0.87 \end{Bmatrix}$	2.2	475	149
11	K	5	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.96 \end{Bmatrix}$	2.1	490	132
12	E	4	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.85 \end{Bmatrix}$	2.1	418	150
13	J	7	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.86 \end{Bmatrix}$	2.1	293	145
14	J	6	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.85 \end{Bmatrix}$	2.1	485	140
15	J	6	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.88 \end{Bmatrix}$	2.1	488	147
16	K	4	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.86 \end{Bmatrix}$	2.1	450	145
17	C	6	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.1	453	140
18	K	6	$\begin{Bmatrix} 2.2 \\ 0.86 \end{Bmatrix}$	2.1	345	175
19	J	7	$\begin{Bmatrix} 2.0 \\ 0.88 \end{Bmatrix}$	2.1	468	147
20	J	7	$\begin{Bmatrix} 2.06 \\ 0.86 \end{Bmatrix}$	2.1	477	140
21	J	7	$\begin{Bmatrix} 2.0 \\ 0.86 \end{Bmatrix}$	2.1	350	175
22	C	5	$\begin{Bmatrix} 2.08 \\ 0.88 \end{Bmatrix}$	2.1	320	135
23	K	7	$\begin{Bmatrix} 2.1 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.1 ~2.2	505	168
24	K	3	$\begin{Bmatrix} 2.26 \\ 0.91 \end{Bmatrix}$	2.3	375	165
25	K	4	$\begin{Bmatrix} 2.23 \\ 0.84 \end{Bmatrix}$	2.2 ~2.3	375	157
26	E	8	$\begin{Bmatrix} 2.2 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.2	482	143
27	E	7	$\begin{Bmatrix} 2.2 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.2	290	135
28	J	6.5	$\begin{Bmatrix} 2.3 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.2 ~2.3	490	176
29	K	4	$\begin{Bmatrix} 2.3 \\ 0.87 \end{Bmatrix}$	2.3	280	161
30	C	7	$\begin{Bmatrix} 2.08 \\ 0.9 \end{Bmatrix}$	2.3	495	176.5
Mean		5.55		2.14	434.9	148.6
S.D.		1.77		0.10	73.4	17.4

J: Japanese, K: Korean, E: English, C: Chinese.

Table 6 Initial decompression time (t_1) of 30 low risk group members. (formed number of bubbles <4 per sample).

Num- ber	Number of bubbles $\bar{x}$ S.D.		t_1 (min)	Δp bottom pressure first stop	Bottom pressure (kg/cm ²)	Bottom time (min)	Total decompression time (min)
1	2.5	1.22	11	{2.1 0.9	2.1	445	155
2	2.33	1.75	8	{2.08 0.87	2.1	495	140
3	1.67	1.75	10	{2.11 0.90	2.1	509	171
4	1.5	1.22	8.5	{2.10 0.88	2.1	487	143
5	2.17	1.72	8	{2.09 0.89	2.1	483	142
6	0	0	6	{2.10 0.91	2.1	502	140
7	2.50	1.05	8.5	{2.14 0.87	2.1	475	148
8	1.50	1.38	11	{2.20 0.90	2.1	487	165
9	1.67	1.37	11	{2.20 0.90	2.1	497	165
10	1.83	1.33	5	{2.16 0.86	2.1	496	160
11	2.61	1.21	8.5	{2.16 0.87	2.1	497	168
12	0	0	10.5	{2.09 0.90	2.1	467	146
13	0	0	9.5	{1.18 0.90	2.1	365	145
14	2.67	2.16	9.5	{2.10 0.85	2.1	485	150
15	1.67	1.37	9.5	{2.10 0.85	2.1	485	150
16	3.33	1.86	10	{2.00 0.85	2.1	465	150
17	2.5	1.38	5.5	{1.95 0.87	2.1	645	180
18	2.67	1.51		?	2.3	373	175
19	2.83	0.75	7	{2.10 0.88	2.1	470	150
20	2.50	1.22	8.5	{2.07 0.86	2.1	505	155
21	2.67	1.75	6.5	{2.28 0.88	2.1	523	162
22	1.67	1.63	6.5	{2.28 0.88	2.1	501	162
23	2.17	0.75	8.5	{2.20 0.88	2.3	510	170
24	2.67	1.37	9.5	{2.18 0.88	2.2	501	184
25	2.33	1.21	9.0	{1.90 0.90	2.2	500	150
26	0.33	0.52	7.5	{2.0 0.80	2.1 ~2.2	365	150
27	0	0	7.5	{2.0 0.80	2.0 ~2.2	520	150
28	1.33	2.33	4.5	{2.26 0.86	2.3	487	157
29	2.83	1.33	8	{2.31 0.86	2.3	465	170
30	2.33	1.63		?	2.3	495	175
Mean			9.05		2.14	483.3	157.6
S.D.			1.82		0.07	51.1	12.3

J : Japanese, K : Korean, E : English, C : Chinese.

Table 7 Initial decompression time (t_1) of 30 high risk group members. (formed number of bubbles >8 per sample).

Number	Number of bubbles $\bar{x}$ S.D.		t_1 (min)	Δp {bottom pressure first stop	Bottom pressure (kg/cm ²)	Bottom time (min)	Total decompression time (min)
1	12.0	2.6	8.5	{2.13 0.89	2.1	470	145
2	8.3	2.52	8.5	{2.13 0.89	2.1	455	145
3	10.6	2.30	8.5	{2.13 0.89	2.1	393	145
4	10.2	2.95	4	{2.1 0.83	2.1	503	140
5	11.5	5.92	4	{2.1 0.83	2.1	455	140
6	17.8	5.72	6	{2.12 0.86	2.1	488	142
7	14.5	6.44	3.5	{2.15 0.90	2.1	490	140
8	9.7	3.61	7.0	{2.10 0.87	2.1	475	145
9	8.7	3.08	6.3	{2.10 0.86	2.1	485	142
10	11.3	4.97	4.0	{2.12 0.85	2.1	490	145
11	9.7	1.37	3.5	{2.05 0.82	2.1	495	140
12	10.2	1.17	8.0	{2.10 0.90	2.1	497	148
13	8.3	3.20	7.5	{2.11 0.87	2.1	483	142
14	10.3	3.93	11.0	{2.17 0.86	2.1	500	150
15	8.0	2.45	4.5	{2.10 0.90	2.1	390	150
16	8.0	4.56	6	{2.15 0.84	2.1	485	150
17	9.5	1.64	6	{2.14 0.85	2.1	502	150
18	33.7	4.03	4	{2.2 0.87	2.2	365	165
19	12.8	2.86	8	{2.20 0.90	2.2	497	140
20	11.3	2.89	14.0	{2.20 0.83	2.2	507	145
21	9.17	4.40	7.5	{2.05 0.96	2.2	495	140
22	11.67	2.08	5.5	{2.20 0.90	2.2	490	150
23	9.00	1.73	7.5	{2.22 0.90	2.2	482	140
24	8.67	1.53	5.5	{2.20 0.90	2.2	466	149
25	12.8	3.92	3.5	{2.20 0.90	2.2	510	140
26	13.0	1.26	3.5	{2.20 0.90	2.2	480	140
27	14.3	4.37	3.5	{2.20 0.90	2.2	490	140
28	10.3	2.58	2.5	{2.3 0.88	2.25 ~2.3	485	160
29	12.0	3.95	4	{2.31 0.9	2.3	470	160
30	9.33	4.59	4	{2.31 0.9	2.3	470	160
Mean			6.36		2.15	475.4	146.2
S.D.			2.56		0.06	34.5	7.0

J : Japanese, K : Korean, E : English, C : Chinese.

考 察

減圧症の発症要因として、高気圧暴露により生体内へ溶解された窒素ガスなどの不活性ガスが、その後の復帰減圧により過飽和となって物理的に気泡化し、これが融合成長し血管塞栓や組織圧迫等を生じさせることがその初期的な原因であると一般的に認められている⁸⁻¹³⁾。

減圧によって組織中に形成される気泡の研究については1880年に P. Bert¹⁴⁾ が報告して以来、多くの人々によって検討されており、その形成気泡をできるだけ少なくする努力が取りも直さず減圧症の予防に結び付くと考えられている。本格的な減圧症予防の方策として、J.S. Haldane が1908年に減圧表を発表した¹⁵⁾。Haldane の定律と呼ばれる理論は、主として米海軍で活用、改善され¹⁶⁾、今日の日本の労働省で定めた標準減圧表¹⁶⁾、仏海軍の減圧表¹⁷⁾ 等に共通した減圧理論となっている。

一方、Haldane の定律は perfusion theory に基づいているが、その後1950年代に飽和潜水等の長時間潜水に対する減圧表の作製が検討されると同時に、Hempleman らは Haldane の定律は必ずしも適切でないとして、diffusion theory に基づく減圧理論を展開した¹⁸⁾。

BP 表は Hempleman らの理論に基づいて作製されており、日本の減圧表等と比較すると、かなり長い減圧時間を必要とする。

BP 表の特徴は4時間以下の圧力暴露は非飽和であるが、4時間をこえた場合は生体が飽和に近付くとして、4時間を超え8時間以内は同一の減圧表を使用するように指示している点にある。イギリスでは労働基準法で定められた一日の労働時間が10時間であるため、減圧時間を約2時間とすると、8時間の高圧下作業時間が可能となる^{5,6)}。しかし、減圧症の発症は作業時間が8時間前後の場合に集中しており、且つ4時間以下では減圧症の発症をみなかった (Table 4)。このことから、4時間までの BP 減圧表は減圧症を予防する上で優れたものといえる。また、減圧症の発症を完全に予防することは実際には困難で、D.N. Walder¹⁹⁾ は実作業における発症率が2%前後となることはやむを得ないとしているが、本調査の結果は P.D. Griffiths²⁰⁾ の報告と同様に0.9% (260Bends/28,554 exposures) であったことより、4時間を超える作業における減圧症発症率に関しても不適切な減圧表であるとは言い難い。その上、発症事例のすべてが limb bends であり、II型と呼ばれる中枢神経系 (CNS) や呼吸循環器系 (chokes) 等の重症減圧症は1例も発症していなかったことは特筆されてよい (Table

2)。しかし、Model 1 の応用によって、高気圧滞在時間に対して僅か1%程度に相当する初期減圧時間 (t_1) を取ることで、すなわち全体の減圧時間からみても僅か数分間の時間が延長されただけで、発症率が半減した事実は BP 減圧表における4時間を超えた場合の減圧表に更に改善を加えることが可能であると示唆された。

気泡形成に関するアガロース・ゲルの研究は当研究室をはじめ、E.L. Beckman や D.E. Yount らの研究が数多くなされている²¹⁻²³⁾。

このようなゲル気泡を用いた気泡計測法による評価は生理学的な生体の気泡への対応を含まないので、形成気泡数からのみ減圧症を論ずることを疑問視する考え方もある。確かに同じ条件の圧力暴露と同じ条件の減圧方法を用いながら、減圧症の発症率は Table 1 に示されるように日本人>韓国人>中国人>英国人と人種間の差があるかに考えられ、圧力暴露条件に差異がないことから判断すれば、日本人と英国人との発症率には有意の差があることになってしまう。しかし、高圧下における労働条件が英国人<中国人<韓国人<日本人と異なるので、このような労働生理学的背景に関してはアガロース・ゲル中に形成される気泡数からは判断できない。この点が物理学的な気泡計測法によって評価する場合の限界である。そこで、人種間の発症率 (Table 1) の差異の有無について発症部位 (Table 2) 潜伏期間 (潜伏時間) (Table 3) 等に差はないものと考えられる。更に運動負荷量を勘案すると減圧症発症に関するその人種差はないものと判断される。したがって、その後の検討はすべてのデータを一つの母集団として対処することに支障は生じないと考えた。すなわち、Table 1 は発症率に人種間の差異があるように思われなくもないが、人種間の高圧下における作業量でその負荷量が異なっていた。発症部位については、人種間で全く差異がなかった (Table 2)。圧気作業後の減圧終了から発症に至るまでの潜伏時間についても差異がなかった (Table 3)。これらのことは人種間に差異があるとは肯定できないことを示している。

我が国においてはこの潜伏時間は短いといわれており、減圧終了2時間以内に95%が発症し、6時間を超えてから発症する事例は1%以下であるとされている¹⁶⁾。しかし、その日本人も BP 表に基づいて高圧環境より出開してきた場合には、Table 3 のように発症までの潜伏時間は中国人、韓国人や英国人と同様に遅延されていた。これは BP 表が1日1回の作業であるのに反して、日本では split shift と呼ばれる2回作業であるために1回の圧気作業は短い、BP 表を用いた香港での作業の大部分

は6時間以上9時間以内と作業時間がごく長い。このように作業時間の延長が潜伏時間を長くしている原因であると考えられた。しかし、その潜伏時間の分散は、日本人以外の国の入坑者と比較して有意の差はあるとはいえなかった。これは人種間の差異がほとんどないことの傍証ともいえる。

また、すべての減圧症の発症は血管外気泡によるとされる²⁴⁾ limb bendsであった。実質組織の筋肉の半飽和時間は20分間前後とされており¹⁵⁾、BP減圧表の評価に用いた気泡計測法は半飽和時間22.5分のアガロース・ゲルを利用しており、limb bendsの生じる筋肉組織に酷似している材料であり、且つその飽和時間は5時間15分で²⁵⁾、これもBP表の根拠とされるヒトの推定飽和時間とよく一致している。

減圧症の発症予防がいかに形成気泡数を減少させるかに負っていることを勘案すれば、物理的な圧力暴露とその後の減圧スケジュールに対応して形成されるアガロース・ゲル気泡は圧力の変動をよく説明してくれる^{3,4)}。そして、Fig. 3に示されるように t_1 時間をModel 1に準拠させて、僅か5分間の t_1 延長で形成気泡数平均は $\bar{x}=9.5$ から $\bar{x}=1.7$ へと大きく減じた(Fig. 3)ことは、Model 1を応用したことにより生体に加わる減圧の負荷がいかに軽減されたかを判定する上で気泡計測法はごく有効な指標となる。Table 5, 6, 7は減圧症発症事例、気泡計測法に基づく気泡数からみた減圧症に対するlow risk group, およびhigh risk groupのそれぞれ30例の初期減圧時間 t_1 、作業圧力、高気圧下滞在時間(作業時間)、および減圧に要した総減圧時間について例示したものであるが、作業圧力については各30例の平均が 2.14 kg/cm^2 , 2.14 kg/cm^2 , 2.15 kg/cm^2 と全く同一の圧力負荷であった。作業時間の平均(分) $\pm$ S.D.はそれぞれ 434.9 ± 73.4 分, 483.3 ± 51.1 分, 475.4 ± 34.5 分で有意の差はなく、むしろ気泡計測法で判定されるlow risk groupの方が作業時間が長い傾向にあることが知れた。減圧症の発症危険因子からすると発症事例群(Table 5)が、圧力暴露時間が短いので最も負荷量が少なく、次いでhigh risk groupとなっており、low risk groupが負荷量はより大となっていた。総減圧時間に関しては、Table 6のlow risk groupは本来のBP表に初期減圧 t_1 分を加算してあるため、その平均時間は発症事例群に対して9分、high risk groupに対しては11.4分間長くなっている。しかし、その平均値でみると、それぞれ 148.6 ± 17.4 分, 157.6 ± 12.3 分, 146.2 ± 7.0 分であり、S.D.幅を考えると有意の差があるとはいえない。このように作業圧力、作

業時間、減圧時間の3要因が減圧症発症に対する誘発因子であるにも拘らず、差異を認め得ない。しかし、Fig. 2にみられるように、形成気泡数によって区分されたこの3者比較は発症事例群、およびhigh risk groupの2者とlow risk groupの間に有意の形成気泡数の差を認め、high risk groupは減圧症がたまたま発症を免れたものの罹患してもおかしくはなく、幸運であったことを示している。しかし、Model 1に準拠したlow risk groupは他の2群に比較して、有意に気泡数が少ない($p < 0.005$)。

このことは、Model 1を準用して初期減圧比を小さくする努力が減圧症発症を予防できる有力な手段であることを証明している。更に、Table 5中に記されているModel 1を指導した後に発症した減圧症3例は#28, 29, 30であったが、それぞれは日本人(#28)、韓国人(#29)、中国人(#30)であり、その初期減圧時間 t_1 は、それぞれ6.5分, 4分, 7分と我々の指導が徹底されていないで、改善前の従来のBP表の通りに減圧してしまっていた。すなわち、Model 1を用いた改善群には本来含まれてはいけなかった事例といえた。しかし、改善計画を指示した後に発症した事例であったので、統計処理には改善群に含めざるを得なかった。このことも勘案すると、初期減圧時間 t_1 をModel 1に準用させて、それを徹底化することで形成気泡数を減少させることができ、減圧症の発症を予防する確率はごく高くなり、今後の日本における圧気作業においても、この方式は十分に活用できる対策であるとの結論を導入することが可能である。気泡計測法という減圧管理対策の導入は衛生学的にごく有用な手段であるといえよう。

すなわち、Table 5, 6, 7のそれぞれの減圧時間に対する初期減圧時間(t_1)の平均 $\bar{X}_{t_1}$ (分)が占める割合は3.73%, 5.74%, 4.35%で、low risk groupが最も大となるが、発症群と比較しても3.73%が5.74%と僅か2%の増加分にしかない。それだけの減圧時間の延長で、減圧症の発症率を著しく減ずることが可能であったといえる。しかも、この t_1 時間の延長は入坑作業員に対して苦痛を強いる程の負荷にはなっていない。そして、この変化分の有効性は気泡計測法によって始めて証明できたと考えられる(Fig. 2)。このように減圧スケジュールを評価する上では、アガロース・ゲルによる気泡計測法の利用なくしてその証明が難しかったといえる。

アガロース・ゲルによる気泡計測はそれほど難しくはなく、且つ減圧を停止すると、その減圧比に基づいてゲル中へ溶解されている窒素等の不活性ガスが過飽和とな

って出現してくる。その出現は減圧停止して10秒後に確認でき、3分後には計測が肉眼的に可能となり、10分後には成長は止まり、大きさも決定できる²⁵⁻²⁷⁾。

この性質を利用して減圧スケジュールを比較することは容易であり、特に本研究のように減圧スケジュールを変更した場合の相互の比較にごく有効であった。

今後共、減圧症予防の立場で、新たに作製される減圧表の検討等に対しても気泡計測法を応用し、評価判定の手段とすることは有用であろうといえる。

ま と め

本研究はアガロース・ゲルによる気泡計測法が減圧スケジュール評価の上で有用な方法であることを確認したばかりか、初期減圧時間の数分間の延長で減圧症の発症率を著しく減ずることも知り得た。また、減圧症の発症には人種的な差異はないこと、また BP 表のような作業時間の長い場合には発症までの潜伏時間が長くなることも知り得た。

BP 表は減圧症の発症率が低く、効果的な減圧表であると位置付けられるものの、気泡計測法に基づく気泡数からみると high risk group に属し、更に本報で述べたような改善を加えることより安全性の高い減圧表になることが知れた。

これらの知見は香港で使用された英国の BP 表ばかりでなく、我が国の標準減圧表にも応用することが有用であろうと示唆され、将来の我が国の高気圧下作業における減圧症予防対策の上でも気泡計測法が十分に活用できるものと考えられた。

謝 辞

本研究を進める上で、調査研究に全面的に御協力戴いた K.K. 熊谷組・香港支店、および香港地下鉄建設公団 MTRC に対し、深く感謝の意を表す。また、アガロース・ゲル・サンプルの提供、並びに本研究調査に積極的に御協力戴いた三井東圧化学 K.K.・中央研究所、日向寺昭夫主任研究員はじめ多くの所員の御協力を得たことを付記し、深謝したい。

文 献

- 1) Mano, Y. and D'Arrigo, J.S.: Relationship between CO₂ levels and decompression sickness; Implication for disease prevention, *J. Aviation, Space and Environ. Med.*, **49**, 349-355 (1978).
- 2) D'Arrigo, J.S. and Mano, Y.: Bubble product in agarose gels subjected to different decompression schedules, *Undersea Biomed. Research*, **6**, 93-98 (1979).
- 3) Mano, Y. and Maeda, H.: Comparison between different decompression schedules by agarose gel bubbles, In "Proceedings of the double joint meeting of the fifth meeting of the panel on diving physiology and technology and the ninth meeting of the panel on marine facilities" (Editor: M. Matsuda), 128-141, *JaMSTeC*, Tokyo (1979).
- 4) Yano, K. and Mano, Y.: Evaluation of standard decompression schedules by agarose gel method, *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ.*, **26**, 197-212 (1979).
- 5) Labour Department, Hong Kong: Factories and industrial undertakings (work in compressed air) Regulations 1975, The government Printer, Hong Kong (1976).
- 6) Labour Department, Hong Kong: Legal supplement No. 2 to the governmental gazette, **51** (CX VII), B937~B999, Hong Kong (1975).
- 7) 眞野喜洋: 異なる減圧表に基づく気泡形成について (第2回潜水技術シンポジウム講演集), 9-16, 海中国際技術協会, 東京 (1980).
- 8) 眞野喜洋: 減圧症, 臨床検査情報, **3**, 1-9 (1973).
- 9) 眞野喜洋: 減圧と減圧症, 海洋科学, **12**, 11-18 (1980).
- 10) Department of the Navy: U.S. Navy diving manual, Best Bookbinders, (Carson) (1975).
- 11) Miles, S.: Underwater medicine, third Ed., 171-293, Staples Press, London (1969).
- 12) Hills, B.A.: Decompression Sickness, **1**, 76-104, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane and Toronto (1977).
- 13) Hallenback, J.M. and Andersen, J.C.: Pathogenesis of the decompression disorders, In "The physiology and medicine of diving" (Editors: P. B. Bennet and D.H. Elliott), third Ed., 435-460, Bailliere Tindall, London (1982).
- 14) Bert, P.: Barometric Pressure; Researches in experimental physiology, p. 201 Undersea Medical Society, Inc. (republished from French), Bethesda (1978).
- 15) Boycott, A.E., Damant, G.C.C. and Haldane, J.B.:

- The prevention of compressed-air illness, J. Hyg. 8, 342-443 (1908).
- 16) 労働省：潜水士テキスト, p. 188, 284-293, 中央労働災害防止協会, 東京 (1975).
- 17) Marine Nationale: Table Francaise de plongee a L'Air, Paris (1977).
- 18) Hempleman, H.V.: Decompression theory: British practice, In "The physiology and medicine of diving and compressed air work, second edit." (Editors: P.B. Bennett and D.H. Elliott), 331-347, Williams and Wilkins, Baltimore (1975).
- 19) Walder, D.N.: The prevention of decompression sickness, In "The physiology and medicine of diving and compressed air work, second edit." (Editors: P.B. Bennett and D.H. Elliott), 456-471, Williams and Wilkins, Baltimore (1975).
- 20) Griffiths, P.D.: Decompression sickness in compressed air workers, In "The physiology and medicine of diving and compressed air workers, second edit." (Editors: P.B. Bennett and D.H. Elliott), 496 - 503, Williams and Wilkins, Baltimore (1975).
- 21) LeMessurier, G.H., Smith, T.N. and Wood, W.R.: Diffusion and nucleation of gas in gel and some implications for the development of decompression procedures, Undersea Biomed-Research, 6, 175-188 (1979).
- 22) Yount, D.E. and Strauss, R.H.: Bubble formation in gelatin: A model for decompression sickness, J. Appl. Physics, 47, 5081-5089 (1976).
- 23) Beckman, E.L.: Recommendations for improved air decompression schedules for commercial diving, LINIHI-SEA-GRANT-TR-7602, NOAA, Dept. of Commerce, Bethesda (1976).
- 24) Hills, B.A.: Thermodynamic decompression: An approach based upon the concept of phase equilibration in tissue, In "The physiology and medicine of diving and compressed air work, second edit." (Editors: P.B. Bennett and D.H. Elliott), 319 - 356, Williams and Wilkins, Baltimore (1975).
- 25) 眞野喜洋, 芝山正治: 気泡計測に基づく圧気作業の減圧管理と減圧症予防対策, 日災医誌, 33, 784-791 (1985).
- 26) Mano, Y., Shibayama, M., Ishiyama, A., Takahashi, S., Doi, N. and Maeda, H.: Evaluation of decompression procedure by a bubble counting technique: Implications to prevent decompression sickness, In "Hyperbaric medicine and underwater physiology (Editors: K. Shiraki and S. Matsuoka), 255-263, Program committee of III UOEH symposium, Kita-Kyushu, (1985).
- 27) Mano, Y., Shibayama, M., Ishiyama, A., Takahashi, S. and Maeda, H.: An actual approach to prevent decompression sickness in compressed air workers, Underwater physiology VIII (Editors: A.J. Bachrach and M.M. Matzen), 181-190, Undersea Medical Society, Inc., Bethesda (1984).

(受付 1986年 6月19日 受理 1986年12月 8日)