減圧症発症要因としての気泡形成に及ぼす

環境温の影響に関する研究

Effects of Exposure Temperature on Bubble Formation as a Factor in the Onset of Decompression Sickness

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

Decompression sickness (bends) is generally considered to be due to the effects of bubbles which originate from supersaturated gas dissolved in the blood and other tissues.

The bubbles in the tissues are formed from pre-existing gas nuclei. The gas initially diffused into the gas nuclei in the tissue and is then forced out by decompression, depending on the difference between the inside tension of the gas nuclei and the surrounding tension of the tissue.

Mammalian gelatin samples were first used according to this theory by LeMessurier in 1972 as a model in the etiology of bends, and further careful research has been carried out by Beckman, Yount, Mano and their co-workers. Mano et al. have evaluated the relative effectiveness of standard decompression tables in reducing bubble formation using the agarose gel bubble technique under rigorously controlled conditions.

Bubble formation is mainly due to the decompression ratio, accompanied by hyperbaric exposure; however, the variation of exposure temperatures also influences the formed bubbles even though there are no decompression steps.

Therefore, to understand the relation between the temperature and bubble formation, research was undertaken. This bubble work is composed of two groups of experiments. One involved saturation experiments, and the relation between the number of bubbles and different saturation pressures was obtained as a regression line. The temperature was controlled at $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$.

In the other experiments, the environmental temperature was changed between 5 and 30°C . Agarose gel samples, with 15 cells in a set, were exposed to the same bottom pressure but the environmental temperature was varied in each set of conditions.

The number of bubbles was counted in each sample and the cells were heated to 30°C for 30 min and bubble counting was then done. The exposure time at the bottom pressure was 30, 60, or 120 min in the non-saturation experiments and 6 hours in the saturation experiments. The phenomena of bubble formation according to the variations of the temperature were investigated in detail, and, eventually, significant regression equations could be obtained with good relations in all different conditions of hyperbaric exposure.

This result gives us much information on bubble formation phenomena, which can aid us in carrying out our basic research on decompression sickness, especially as concerns the influence of environmental temperature, although there are differences between *in vitro* and *in vivo* phenomena. Moreover, the standard decompression table by the Ministry of Labour could be evaluated by this bubble counting technique. The safety of the table was questionable, and it was recognized that the table was not necessarily correct. This research will be applied to various fields of diving or compressed air work in the future.

Key words: Bubble formation, Gas nucleus, Agarose gel, Decompression, Saturation, Temperature

気泡形成, ガス核, アガロース・ゲル, 減圧, 飽和, 温度

緒 言

減圧症発症の原因として気泡の形成が有力視され、現行の標準的な減圧表は気泡をできるだけ形成させないような配慮の下に作製されている¹⁾。

気泡形成の成因については色々討論されるところではあるが、生体内に既存のガス核の存在なしには気泡は形成されないと考えることができる^{2,3)}。このような立場に立って、Harvey らは各種のガス核モデルを考えた⁴⁾。今日の生体組織系で形成されるガス核モデルとしては、表面に surfactant を有する skin を持った実質性のガス核の存在が有力である⁵⁾。この気泡形成に関する基礎研究に、生体に代わるモデルとしてゼラチン・ゲルが初めて応用されたのは1972年であり、D.H. LeMessurier⁶⁾ は減圧症の病因を研究する上でゼラチン・ゲル中のガス核を利用した。この研究は E.L. Beckman, D.E. Yount, 並びに Y. Mano らによって1975年頃より積極的に検討され、今日に至っている⁷⁻¹⁰⁾。

気泡の形成に関する主たる要因は高圧暴露後の復帰減圧に伴う減圧比であるが、たとえ圧力の変動がなくとも気泡形成は誘発され、その1例として環境温度の変化が考えられる。温度の変化は気泡形成の要因の中でも重要な位置を占めるものと考えて、これに関する基礎実験をアガロース・ゲルを用いて繰り返し検討したところ、興味ある新知見を得ることができた。

方 法

1. モデル作製方法

生体モデルとして従来から本学公衆衛生学教室で改良され、実験に供されている手法⁹⁻¹³⁾に基づいて、まず1.0 mM の Tris [(Hydroxymethyl)-aminomethane, $\text{NH}_2\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3$] buffer を用意し、pH は少量の HCl を加えることにより7.4に設定し、buffer 液は $85 \pm 0.3^\circ\text{C}$ に保温する。

次に、高純度 agarose powder をこの Tris buffer に加え、0.7% w/w の agarose sol を作製する。agar は発泡量の多い Sigma NOA-6013 agarose-LE Type 1 {Jelly M. Tensity (1%) ABT 800 g/cm², Lot M 3A 5015} と発泡量の少ない Wakoh Agarose-1 電気泳動用スペシ

ャル {強熱残分(硫酸塩)1%以下、硫酸含量0.3%以下、ゲル強度800 g/cm²}を混合比率実験より、23:73として作製する。この時の混合攪拌時には気泡が形成されないように細心の注意を要する。

作製された agarose sol は3 cells を1セットとした disposable counting cells (底面積10 mm×10 mm) Fig. 1を試作し、それぞれの cell に85°C に保温中の agarose sol を同一の batch から1 cell 当たり、0.31 g (0.309 mL) ずつ均等に分画する。これらの cells は水蒸気で飽和した状態にて PTP (press through packing) 包装し、密封した後、常温(15~25°C)下にて保存し、使用直前に開封する。保存期間は精製後6ヶ月以内とし、それ以上の期間経過したものは離晶現象を起こす危険があるので、一連の系の実験はその期間内に終了させ、同種目的の実験に供される cells は同一の batch から作製されたものに限定する。

Fig. 1 Agarose gel samples. Agarose sol was poured into each set of three disposable counting cells. The volume of samples was 0.3 mL (0.31 g) per sample. The bottom area of the cell is ten square mm. A few bubbles were observed in each cell.

2. 実験条件

温度変化の実験の予備実験としてのアガロース・ゲル・モデルの再現性テストを第1群とした。

第1群の実験では、それぞれ5セット15検体のゲル・サンプルを1.0から4.0 kg/cm² (2.0~5.0 ATA :

Atmospheres Absolute, 絶対気圧)にそれぞれ6時間保圧(飽和圧力暴露)し, 減圧は1分当たり 1.0 kg/cm^2 の速度で減圧し, 大気圧復帰3分後に気泡数を計測し, その平均気泡数 $\bar{X} \pm \text{S.D.}$ を求めた。環境温度は室温としたので $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ の範囲内であった。負荷飽和圧力は, $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 \text{ kg/cm}^2$ の6条件とし, それぞれ2ないし3回繰り返した。

第2群の実験として圧力負荷中, はぼ一定の温度環境を維持させる目的で還流システムを組み入れた定温水槽を作製した。これは 20°C 以上ではサーモスタットで, 15°C 以下では水を用いることで水温を $5 \sim 30^\circ\text{C}$ に制御できる装置でゲル・サンプルを挿入して, そのまま高压タンクに入れ, 温度の設定を $5, 10, 15, 20, 30^\circ\text{C}$ とした。但し, 飽和圧力暴露実験では $6, 10, 20, 30^\circ\text{C}$ とした。 6°C となった理由は当初は 5°C であったが, 6時間の保圧中に 1°C 上昇した結果に因る。この温度制御下で 2.0 kg/cm^2 に6時間保圧し, その後2分間で減圧した。減圧3分後に同一温度下で気泡数を計測し, 直ちに 30°C の温水槽へ移し, 30分間保温してから再度気泡数を計測した。

Fig. 2 Relation between number of bubbles and saturated pressure. (decompression rate: $1.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{min.}$, 20°C), $X_{(BN)}$ means bubble numbers, P means saturated pressure (kg/cm^2).

計測に用いたアガロース・ゲルはそれぞれ5セット, 15検体とし, 平均気泡数 $\bar{X} \pm \text{S.D.}$ を求めた。

次に, 非飽和圧力暴露実験として15検体のアガロース・ゲル・モデルを設定温度環境下で 3.0 kg/cm^2 へ加圧し, 保圧時間は $30, 60$ および 120 分とし, それぞれの減圧方法は労働省の標準減圧表, 別表1に従った。大気圧下まで減圧し, 3分後に気泡数を計測した後, それぞれを飽和圧力暴露実験と同様に 30°C の温水槽にて30分間保温をし, その後, 第2回目の気泡数計測を行った。

結 果

第1群の飽和圧力暴露実験の結果をFig. 2に示す。単位当たりの形成気泡数は飽和された圧力に依存しており, 飽和圧力 P (kg/cm^2)と平均気泡数 X の間にはFig. 2に示されるごとく, $X = 42.65 \cdot P - 29.87$, $r = 0.986$ の回帰直線式を求めることができた。この式より, 気泡が形成される最小暴露圧力は $X = 0$ を代入して, 0.7 kg/cm^2 となる。本研究で使用したアガロース・ゲルに基づく

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Number of bubbles : $\bar{x}$ (S.D.) (just after decompression)	Number of bubbles : $\bar{x}$ (S.D.) (heated for 30 min at 30°C after decom- pression)
6	49.1 (7.68)	51.2 (9.96)
10	51.7 (7.78)	49.7 (7.65)
20	58.8 (8.47)	58.8 (8.47)
30	65.1 (7.12)	65.1 (7.12)

Fig. 3 Relation between temperature and number of bubbles after saturated pressure exposure of 2.0 kg/cm^2 . (decompression ratio: $1.0 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$), ○: number of bubbles just after decompression at the same temperature, ●: number of bubbles heated for 30 min at 30°C after decompression.

気泡計測法から得られる気泡形成閾値としての最小負荷圧力は 0.7 kg/cm^2 となり、この圧力以下の圧暴露では減圧症は発症しないと予想された。

第2群の中、温度変化実験に基づく 2.0 kg/cm^2 飽和圧力実験ではFig. 3の結果を得た。減圧終了後に 30°C へ保温した影響は全く出現せず、このような飽和圧力暴露実験では、飽和中の環境圧力の方が温度条件よりも形成気泡数に与える影響は大きく、減圧後の加温の影響が新しい気泡を形成しないことを示した。しかし、暴露環境温度が 6°C の場合と比較すると、 30°C では形成気泡数は約1.3倍に増加され、温度の影響も無視できないことを知り得た (Fig. 3)。

次に、暴露圧力を 3.0 kg/cm^2 として、その圧力下における保圧時間が30分、60分、120分とした時の非飽和圧力暴露における温度変化に伴う平均気泡数はTable 1の結果となり、それぞれFig. 4, 5, 6のように高い相関係数を有する回帰式が得られた。温度変化の影響は高気圧環境下における滞在時間が短いほど大きく示され、120分

Table 1 Number of bubbles according to the variation of temperature. (using Japanese standard decompression table).

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Number of bubbles just after decompression $\bar{x}$ (S.D.)	Number of bubbles after heating to 30°C for 30 min after decompression $\bar{x}$ (S.D.)
1. 3 kg/cm^2—30 min		
5	2.77 (1.36)	17.7 (2.29)
10	6.40 (3.09)	15.9 (5.00)
15	9.33 (2.58)	13.5 (2.36)
20	9.86 (3.01)	12.0 (2.98)
30	12.4 (1.30)	12.4 (1.30)
2. 3 kg/cm^2—60 min		
5	9.80 (3.19)	21.5 (5.05)
10	11.5 (2.74)	17.7 (3.63)
15	15.5 (3.94)	15.7 (3.94)
20	17.5 (3.45)	17.5 (3.45)
30	28.0 (3.29)	28.0 (3.29)
3. 3 kg/cm^2—120 min		
5	16.9 (3.18)	17.9 (2.66)
10	22.7 (4.56)	22.9 (4.55)
15	24.3 (3.43)	24.1 (3.56)
20	28.1 (4.25)	28.1 (4.25)
30	34.9 (6.68)	34.9 (6.68)

Dotted line: heated to 30°C for 30 min
after decompression
 $y = 0.01x^2 - 0.74x + 21.33$
 $r = 0.989$

Solid line : exposure temperature maintained
 $y = -0.013x^2 + 0.846x - 0.899$
 $r = 0.991$

Fig. 4 Relation between exposure temperature ($^\circ\text{C}$) and number of bubbles according to Japanese standard decompression table. (4 ATA 30 min.).

Dotted line: heated to 30°C for 30 min
after decompression
 $y = 0.05x^2 - 1.68x + 28.60$
 $r = 0.994$

Solid line: exposure temperature maintained
 $y = 0.72x + 4.79$
 $r = 0.981$

Fig. 5 Relation between exposure temperature ($^\circ\text{C}$) and number of bubbles according to Japanese standard decompression table. (4 ATA 60 min.).

Fig. 6 Relation between exposure temperature (°C) and number of bubbles according to Japanese standard decompression table. (4 ATA 120 min, exposure).

暴露群のように長時間暴露 (Fig. 6) では、Fig. 3の飽和圧力暴露条件と同様な直線の回帰式で示される気泡数変動の傾向を示した。温度変化の影響は圧力暴露時間が短いほど、暴露される温度条件が低いほど、減圧後に加温される温度差が大きくなるほど気泡形成数の相違も大となる。すなわち、形成気泡数の変動要因は減圧後の加温に依るものであり、加温がそれぞれの設定温度と30°Cの終末固定温度との間の温度差に応じて、あたかも新しい減圧ステップを生じさせるに匹敵する役割を果たしていると説明できる結果を得ることができた。

考 察

気体と液体が隣接している場合、ガスの溶解や放散はヘンリー・ダルトンの法則 (Henry-Dalton's law) に従って、それぞれの異なる気体の分圧に比例する^{14,15)}。空気の場合、温度条件が一定であれば飽和状態に達すると気体と液体の間で平衡状態が生まれ、0°Cの真水100 ml中に溶解する窒素は空気組成比を79%とすると窒素分圧は約600 mmHgであるので、大気圧力環境下では $2.35 \times 600 \div 760 \approx 1.86$ (ml) が溶解する。同様に酸素は21%を

その組成比とすると酸素分圧は160 mmHgであるから、水100 ml 当たり $4.89 \times 160 \div 760 \approx 1.03$ (ml) が溶解することになる。すなわち、水100 ml 当たりの0°C下における空気の溶解量は $1.86 + 1.03 = 2.89$ (ml) となる。空気が水に溶解する量と飽和圧力の関係にはヘンリーの法則によって比例関係が成立し、且つ環境温度が低いほど溶解量は増大する。

Fig. 2は環境温度を20°Cに設定して最大4.0 kg/cm²まで加圧し、それぞれの圧力下で6時間の飽和圧力暴露した後に、減圧速度を毎分当たり1.0 kg/cm²で大気圧 (0.0 kg/cm², 1 ATA) へ復帰減圧させた時に形成される気泡数を求めたものである。過飽和分の溶存空気がすべて気泡化するのではないが、その気泡化した単位当たりの気泡数平均は、 $X = 42.65P - 29.87$ (Xは形成気泡数, Pは飽和圧力)の一次回帰式で示され、 $r = 0.986$ という高い相関係数を有している。この現象は、気泡数をみることによって飽和圧力を逆算することも可能であることを示し、ガスの溶解量が圧力に順相関していることが本実験からも裏付けられた^{8,13)}。

アガロース・ゲルは0.7% w/wのagarをTris bufferに加えたものであるため、気泡形成に関する物性は水と差がないものと考えてよい¹⁴⁾。温度設定条件である5, 10, 15, 20°Cの各温度下で、アガロース・ゲルに空気が飽和溶解している場合の30°Cとの溶解ガス量の差 (過飽和ガス量) を計算すると、5°Cでは100 mlの水溶液 (実際にはアガロース・ゲル) 当たり、3.9 mlとなる。同様に10°Cより30°Cへ加温されると、その過飽和ガス量は2.9 ml, 15°Cより30°Cへの変化では1.9 ml, 20°Cより30°Cへの変化では1.2 mlとなる。すなわち、温度変化が小さくなるほど、単位当たりの過飽和ガス量、つまり30°Cの溶解ガス量との差は小となる。ゲル中への溶解ガス量と温度との関係から考えると、当初は低温の方が溶解ガス量が大きいため、気泡数が増えると予想されたが、実験結果は逆の傾向を示した。これは、低温になるほど加圧時にゲル中へ溶解するガス量は増加し、それが減圧後も過飽和状態のままゲル中に溶存されており、気泡化しない溶解ガス量が高温の場合以上に増大されていること、更に活性化エネルギーの点から気泡に至るまでのガスの凝集力が低温環境であるほど低下することとの相乗効果で最終的な気泡数は減少すると考えられた¹⁵⁾。

Fig. 4で代表されるような温度変化に伴う気泡数増大 (図中の実線から点線への変化) をもたらす要因についての解釈であるが、これらの結果は短時間圧力暴露の変化率が大きくなっていた。Table 1およびFig. 4, 5, 6を

みても明らかなように、それぞれの温度条件下における減圧直後の形成気泡数は 3.0 kg/cm^2 での滞在時間が延長されるにしたがって、労働省で定めた標準減圧表に基づく減圧ステップを採っているにも拘らず、増大している。 5°C の場合を例にとると、30分の圧暴露では気泡形成数平均 $\bar{X}$ が単位当たり2.77個だったものが60分では9.80個(3.5倍)、120分では16.9個(6.1倍)に増加している。この現象は前述のヘンリーの法則に基づく説明、並びに既述の考察で理解できるものではあるが、更に現行の労働省で定める減圧表の作業(潜水)時間に対する減圧症発症危険率がどのような場合でも同一であるとすれば、気泡数の変化は生じてはならず、30分圧暴露と60分圧暴露との減圧終了時の過飽和ガス量は等しくなり、単位当たり形成気泡数は一定となるべきである。これは、現行の減圧表が必ずしも一定の危険率(安全率)で作製されてはいないことを証明しているといえる¹¹⁾。ところが、減圧終了後 30°C の温水槽で30分間の加温を行った後の単位当たりの平均気泡数は30分群では $\bar{X}=17.7$ 個であり、60分群では $\bar{X}=21.5$ 個、120分群では $\bar{X}=17.9$ 個となっていた。30分群と120分群とでは同数であり、60分群が多いように思われるが、S.D.の幅を考慮すると、3者の間に有意の差があるとはいえない。

また、 30°C へ加温後の気泡数は、それぞれの異なる圧暴露時間群でみると、30分圧暴露群では温度変化率が小さくなるほど形成気泡数が減少し、60分群では減少傾向を示した後に増加し、120分群では徐々に、且つ直線的に増加していた。120分暴露ではほぼ飽和暴露に近似した現象であり、これはアガロース・ゲルの飽和時間が5時間15分で、半飽和時間が22.5分であることから計算できる。すなわち、周囲環境圧力を $P_0 \text{ kg/cm}^2$ 、アガロース・ゲル内圧を $P \text{ kg/cm}^2$ として、ガス拡散の基本式： $P=P_0 E^{-RT}$ (R は定数、 $R=1.175$ を採用、 T は時間)^{16,17)}に当てはめて 3.0 kg/cm^2 に120分暴露した場合のガス溶解量 P_1 を求めると、 $P_1=3\int_0^{120} E^{-1.175T} = -\frac{3}{1.175}\{E^{-2.350}-1\}=2.310$ となる。すなわち、 3.0 kg/cm^2 に120分間圧暴露されると、飽和量に対する割合はそれぞれを絶対気圧に換算すると、 $(2.310+1.0)\div(3.0+1.0)\times 100=82.75(\%)$ に達している。飽和時間は5時間15分であるが、120分(2時間)の圧力暴露で、その飽和量の80%以上にまでガスが溶解していることが知れ、Fig. 6のような2時間の圧力暴露でもFig. 3の飽和圧力暴露に匹敵した一回帰式になることを示している。Fig. 5はFig. 4とFig. 6の中間の状態を示しており、移行型で

あることがわかる。60分間の圧力暴露ではFig. 5に図示されるように暴露環境温度が 15°C の状態より 30°C へ加温されても形成気泡数には影響を与えていない。形成気泡数変化を生じるような温度差は 15°C 以上が必要となる。しかし、Fig. 4のように30分間の圧力暴露では 10°C の温度変化でも形成気泡数は増加し、このように短時間の圧力暴露ほど気泡形成現象に与える温度変化の影響が大となる傾向を示した。すなわち、短時間ほど圧依存性の影響が少なく温度依存性が強く出現し、減圧という圧力の変化を伴わないにも拘らず、新しい減圧ステップを踏むと同様の発泡現象を呈するといえる。

しかし、実際の圧気作業において生体の温度変化はこのような過大な状態にはなり得ないので、気泡形成の上では*in vivo*では起こり得ない現象といえる。

可能性のある唯一の場合は、圧気土木作業に比較して圧力暴露時間が短く、且つ冷水暴露の機会が多い潜水における問題点があげられる。

ダイバーが潜水直後に入浴をすると皮膚が痒くなる、いわゆる皮膚症状と呼ばれる軽症の減圧症に罹患することがあるのはよく知られた事実であり、これも本研究結果で説明ができる。また圧気土木作業においては、減圧中の気間室(マンロック)が 10°C 以下では保温対策を行うように安全衛生規則第20条で定められている¹⁸⁾。実際の環境測定を行った結果ではマンロック内を最大 38°C に暖房していた²¹⁾。しかし、減圧中、ないし減圧終了後に過度に温度差の大なる暖房を行うことは、本実験結果から適切でないといえる。日本では高気圧環境下の土木作業(圧気作業)としてのケーソン作業が建設省の河川敷の関係で河川の橋梁建設の基礎工事として、渇水期の冬期に発注される傾向にある。そのために、圧気作業後の作業員は河川の野ざらし状態下の寒冷対策として気間室で保温を行いながら減圧するように指導されている。我々の調査ではほとんどすべてのこのような作業場が暖房システムを採用していたが、中には作業環境が 10°C 以下で気間室を 30°C 以上に暖房している所が認められ¹⁹⁾、作業時間が短い場合の過暖房では余分の減圧ステップを負荷させて、気泡形成を促進させる恐れがある。

このような気泡形成に関する基礎研究は減圧症の原因究明の上で必要であり、実際の安全衛生上の課題として利用発展させることも可能であり、且つ必要であることが知れた。

ま と め

アガロース・ゲルによる気泡計測法は圧力依存性が高

いが、温度依存性もあり、特に短時間圧力暴露では温度変化の影響を受けやすい。

これらの変化については、それぞれ相関係数の高い回帰式を得ることができた。

本研究は今後のアガロース・ゲルによる気泡計測法を行う場合の温度補正等に有用な指標として利用することが可能である。

また、現行の標準減圧表は減圧症発症に関する危険率が必ずしも一定であるとはいえないことが証明された。

更に、実際の潜水や圧気作業上における皮膚症状等の軽症の減圧症発症に関して理論的な説明を与えることができ、労働衛生学的にも貴重な成果を得ることができた。

謝 辞

本研究を行うにあたって、三井東圧化学KK・中央研究所、日向寺昭夫主任研究員以下、同研究所各位の助力を得たことを付記し、深謝したい。

文 献

- 労働省安全衛生部編：潜水土テキスト，184-201, 284-293，中央労働災害防止協会，東京（1980）。
- Kunkle, T.D. and Yount, D.E.: Gas nucleation in gelatin, In "Underwater Physiology VI" (Editors: C.W. Shilling and M.W. Beckett), 459-468, Federation of American Societies for Experimental Biology, Bethesda (1978).
- Yount, D.E., Yeung, C.M. and Ingle, F.W.: Determination of the radii of gas cavitation nuclei by filtering gelatin, J. Acoust. Soc. Am., **65**, 1440-1450 (1979).
- Harvey, E.N.: Physical factors in bubble formation, In "Decompression Sickness" (Editor: J.F. Fulton), 90-144, National Research Council, Washington (1951).
- Yount, D.E.: Skins of varying permeability: A stabilization mechanism for gas cavitation nuclei, J. Acoust. Soc. Am., **65**, 1429-1439 (1979).
- LeMessurier, D.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 Biomedical Research, **6**, 175-188 (1979).
- Beckman, E.L.: Sea Grant Technical Report, UNIH-SEAGRANT-TR-76-02, NOAA Office of Sea Grant, Bethesda (1976).
- Yount, D.E. and Strauss, R.H.: Bubble formation in gelatin: A model for decompression sickness, J. Appl. Physics, **47**, 5081-5089 (1976).
- 眞野喜洋，芝山正治，井田和美，宮本智仁，矢野敬児，松永彦二，大串賢太郎，柏倉章男，前田 博：現行の減圧表に関する一考察，日高圧医誌，**12**，17-18，(1977)。
- Mano, Y. and Maeda, H.: Comparison between different decompression schedules by agarose gel bubbles, In "Proceeding of the fifth UJNR panel on diving physiology and technology" (Editor: M. Matsuda), 128-141, JaMSTeC, Tokyo (1979).
- Yano, K. and Mano, Y.: Evaluation of standard decompression schedules by agarose gel method, Bull. Tokyo Med. Dent. Univ., **26**, 197-212 (1979).
- Mano, Y., Shibayama, M., Ishiyama, A., Takahashi, S., and Maeda, H.: An actual approach to prevent decompression sickness in compressed air workers, In "Underwater Physiology VIII" (Editors: A.J. Bachrach and M.M. Matzen), 181-190, Undersea Medical Society, Inc., Bethesda (1984).
- 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)。
- D'Arrigo, J.S.: Improved method for studying the surface chemistry of bubble formation, Aviat. Space Environ. Med., **49**, 358-361 (1978).
- 桜井俊男，玉井康勝編：応用界面化学，60-70，朝倉書店，東京（1967）。
- 吉村寿人，高木健太郎，猪飼道夫編：生理学大系 IX，531-534，医学書院，東京（1970）。
- Workman, R.D. and Bornmann, R.C.: Decompression theory: American Practice, In "The physiology and medicine of diving and compressed air work" (Editors: P.B. Bennett and D.H. Elliott), 307-330, The Williams & Wilkins Co., Baltimore (1975).
- 労働省衛生課監修：高気圧作業安全衛生の手引き，p. 258，建設業労働災害防止協会，東京（1983）。
- 眞野喜洋：圧気作業に関する実態調査，1-12，建設業労働災害防止協会，東京（1981）。

(受付 1986年 6月21日 受理 1986年11月29日)