

●特集・気圧と気体の障害

高地や航空機での危険性

眞野 喜洋*

はじめに

近年、ファン・ダイバー (fun diver) が増加し、毎年8~9万人のダイバーが講習を受けてCカード・ホルダー (C card holder) となり、その結果、Cカード発行枚数は85万枚を突破している¹⁾ (図1)。このことは50万人以上の活動しているファン・ダイバー (fun diver) がいることを予想させる。その中には海外より帰国途中の航空機搭乗が引き金となったり、あるいは東京周辺のダイバーが、西伊豆で潜水後の箱根の山越えすることによって、減圧症に罹患する事例が多く含まれている²⁾。潜水後高地へ移動したり飛行機に搭乗することは減圧症発症を促進することになり、危険性を増すことはよく知られている³⁾。特に近年は自動減圧計が普及しているのでそのリスクはさらに増大している。したがって本稿ではこの危険性について概説する。

減圧に伴う気泡形成

航空機が離陸する場合には国際運行法の定める基準に従って機内は減圧される。一般的には離陸して水平飛行に移るまでに約10分を要して0.8絶対気圧に減圧され、着陸する場合には着陸30分前より徐々に与圧され大気圧に復帰される (図2)。

図3はアガロース・ゲル (agarose gel)^{4)~7)} を用いて大気圧下で飽和しているゲルを減圧することで、どのように形成気泡数が増加するかをみたものであるが、0.8絶対気圧 (大気圧との差圧は0.2気圧) の減圧まではほとんど形成気泡が認められなかったものの、圧力差が増大するに従って気泡数は図3に示される二次曲線で示されるように増

加するので、仮に0.7絶対気圧の場合 ($X=0.3$) 気泡数は単位あたり3.5個となるが、0.6絶対気圧 ($X=0.4$) では気泡数は10.6個となり、十分に減圧症羅患の危険域に入る。ちなみに航空機のカーゴ (cargo) 内は0.5絶対気圧になるので気泡数は20.1個となり、重篤な減圧症羅患の危険がある。このゲル気泡は標準減圧表通りの減圧を行うと単位あたり平均8.0個の気泡数を形成することが知られている⁸⁾ので、潜水を一切していなくとも気圧の低い高地への移動 (海拔5,500m では0.5絶対気圧) を行う場合にもその減圧が急激であると減圧症に罹患する危険性が生じる⁸⁾。したがって、潜水後に正しい減圧を遵守して浮上した場合でも、既に体内には単位あたり8.0個の気泡を有しているダイバーがさらに飛行機搭乗により、過飽和状態が進行するので気泡数は $8.0 + \alpha$ 個となり減圧症を発症させる危険性が増大するといえる。図2は航空機による機種の違いや国内線国際線の相違を勘案して、機内圧力が水平飛行に入った場合の範囲を示したもので、おおむね880~800hpaを維持している。したがって浮上直後に搭乗することは危険であるので、浮上から航空機搭乗までの間隔時間をできるだけ長くすることにより、浮上時に既に形成されている気泡数を減少させる必要がある。

自動減圧計と標準減圧表

10年前頃より自動減圧計が急激に普及してきたおり、我々の調査ではダイバーの68%がこれを利用し、マルチレベルのダイビングを行っている⁹⁾。自動減圧計の登場はマルチレベルのダイビングが可能になったばかりでなく、1日における繰り返しダイビングを効率的に変革し、ファン・ダイバーの強力な味方となった。しかし、その利用方法を誤ると減圧症の危険が生じる。図4は体内に溶

*東京医科歯科大学医学部保健衛生学科健康科学
・保健計画学教授

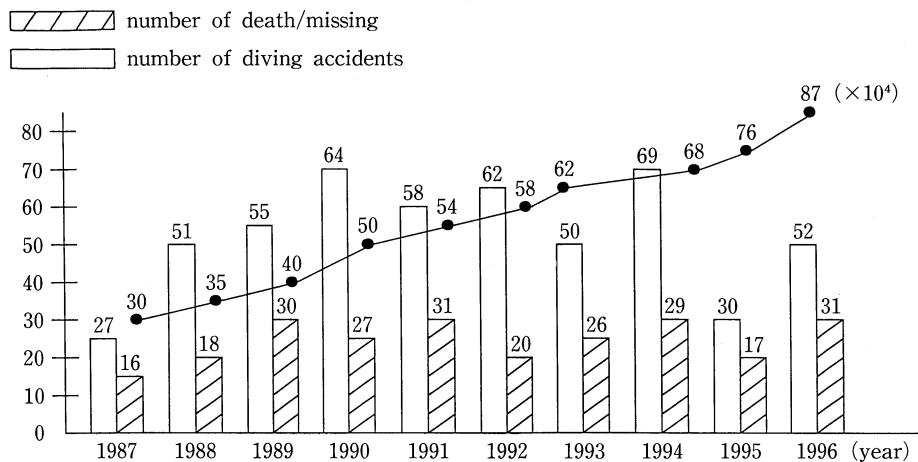


図1 NUMBER OF ISSUED C-CARDS & DIVING ACCIDENTS
C-CARDS : from JAPAN ASSOCIATION OF UNDERWATER EXPLORATION
ACCIDENTS : from THE MARITIME SAFETY AGENCY

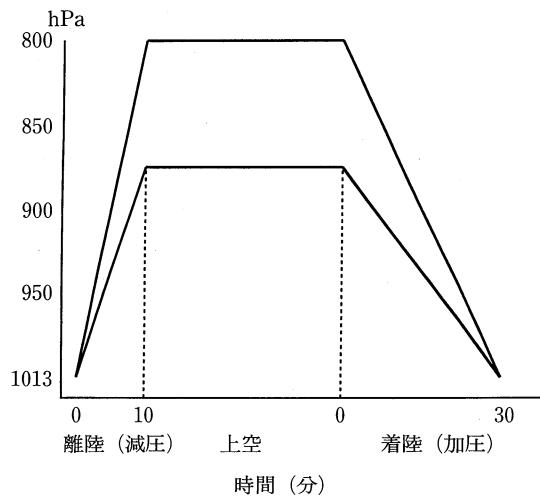


図2 飛行機内の気圧変動

解すると考えられる窒素量を自動減圧計で計算する状況を示している。一方、標準減圧表は、最大水深と潜水時間の（箱形潜水）で窒素量を計算するので、体内への溶解窒素量は過大に評価されることになる。つまり、それだけ減圧時間は余分に積算されるために減圧症に対する安全性は高いといえる。したがって、潜水後の減圧を要する

場合には従来の標準減圧表を利用する時と、自動減圧計を利用する時とでは、後者の方が効率的でより短い減圧プロフィールを示して呉れるが、その分だけ減圧症の罹患率は高くなる。つまり、それだけ過剰な気泡が体内に形成されることとなる。このような状況で航空機に搭乗したり、高所移動を行うことは、さらに減圧症罹患率を高く

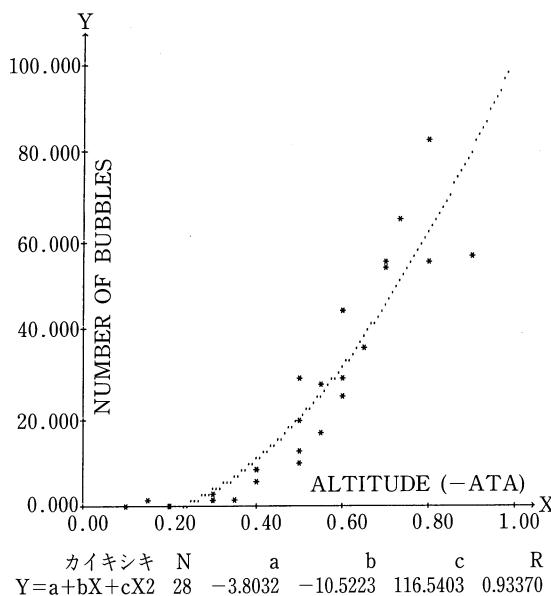


図3 RELATION BETWEEN BUBBLES AND ALTITUDE
 G-NAME AGAROSE V-NO.(X) 1 V-NAME PRESSURE
 V-NO.(Y) 2 V-NAME NUMBER

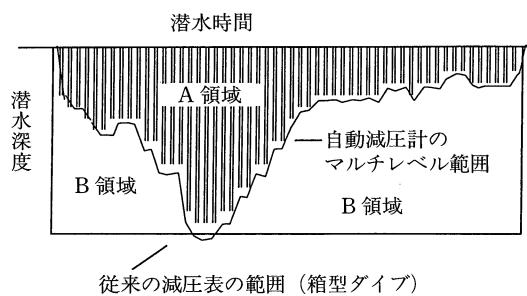
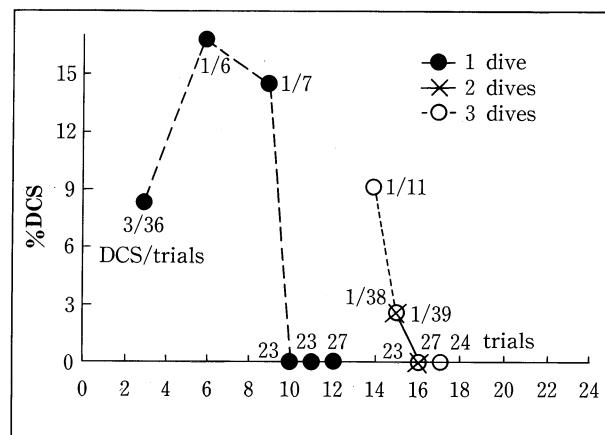


図4 自動減圧計の窒素ガス溶解量計算範囲(A領域)と
 従来の減圧表の窒素ガス溶解量計算範囲(A+B領域)
 比較すると従来の減圧表の窒素ガス溶解量はB領域分だけ多くなる。

する。したがって自動減圧計を利用したダイビングの場合には特段の注意を要する。浮上後の時間と航空機搭乗時間の間隔時間を十分に延長することで、残存されていると思われる気泡数を出来るだけ減少させなければならない。

潜水と航空機搭乗との間隔

米海軍は無減圧潜水後の航空機搭乗との間隔は最低2時間は必要としているが³⁾DAN (Divers Alert Network) は12時間を主張している。これ

図5 Preflight Surface Interval (hours)¹⁰⁾

については同じ米国でも空軍は24時間の間隔を主張しており、同じ国のガイドラインでこのように大きな隔りが生じているのは何故であろうか？これに対し、R.D.Vannは1日における1回の無減圧範囲内潜水とその繰り返し潜水の実験を行い、推計学的手法によって間隔時間について DANによる推論を行った¹⁰⁾。3種類の無減圧範囲内の潜水プロフィールによって1回潜水と2回以上の潜水を組み合わせ、異なる間隔時間による減圧症発症率をもとめた結果、航空機搭乗の前日の潜水が1回の場合には間隔時間は12時間でよいが、2回以上の潜水を行った場合には24時間の間隔を要するとの推論である。図5はVannによる単一の無減圧潜水後の航空機搭乗までの間隔に12時間が必要とした根拠と1日に2回以上潜水した場合には間隔時間は24時間を要するというものである¹⁰⁾。つまり無減圧潜水の枠内にあっても、その潜水後の航空機搭乗まで一定の間隔をとらなければ減圧症に罹患する危険性が示唆されている。DAN-Japanによるホットラインには航空機に搭乗したことで発症した事例ならびに箱根などの高所通過を行ったために発症した事例が計15例記録されている²⁾。図6は西伊豆で潜水を行い、その日の中に箱根の山越えを行って東京方面あるいは山梨方面へ車で移動した場合の標高を示している。御殿場のインターは海拔350mで約960hPaともっとも減圧差圧は小さいが、河口湖へ向かうルートは海

抜1,000mとなり、890hPaとなり航空機搭乗時の圧力に近づいている。西伊豆の場合、潜水終了後、多くのダイバーは1～2時間の間隔時間すぐに高所へ移動するために減圧症発症の危険性が生じる。このような場合、潜水終了後はできるだけ浜辺の海拔0m近くでくつろぎ、体内ガス圧係数を下げるような配慮が望ましい。

高所における潜水の危険

現行の標準減圧表は原則として海拔0mを基点として潜水後の減圧方法を算出している。しかし、高所にある湖沼で潜水する場合には、そこにおける標高によって海で潜水するときと比較すると潜水中に生体へ加わる圧力の影響は修正した概念で考察しなければならない。図7は海水と真水との相違や温度補正などの影響する要因を無視した形でシェーマとして示されている。

海面では1絶対気圧が加わるために水深10m毎に1気圧ずつ増大するので、水深10mではそこで飽和状態に達すると地上の2倍の圧力（2絶対気圧）が加わるため、2倍の窒素ガスが体内へ溶解される。もし、標高1,200mの湖で潜水すると仮定するならば図7からもわかるように、標高1,200mは0.87絶対気圧であるので、水深8.7mのレベルで、水面にて溶解していた窒素ガス量は飽和状態に達すれば、その2倍の量が溶解する。つまり、海での潜水では水深10m毎に生体に加わる圧力

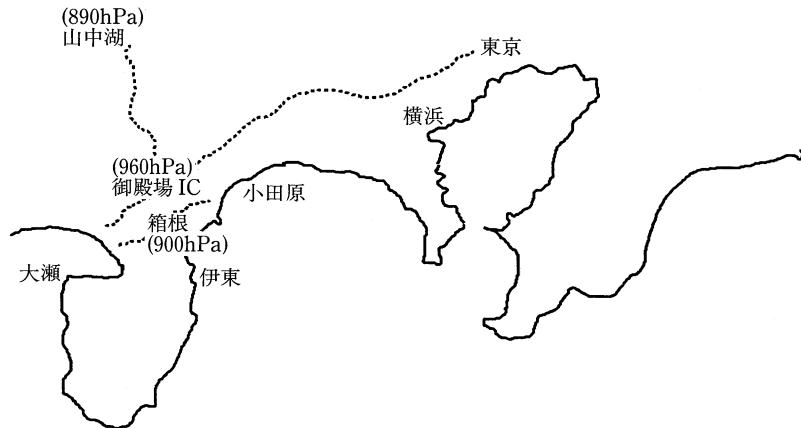
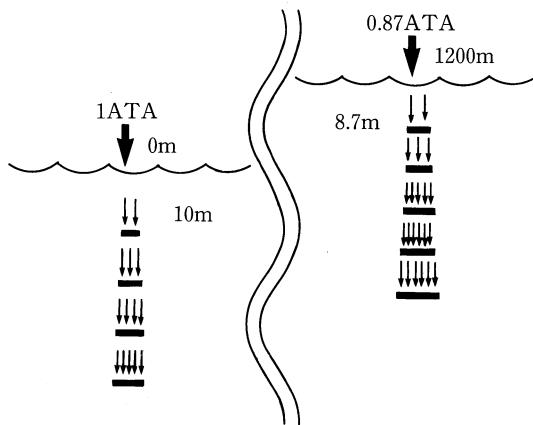


図6 潜水後の高所移動経路



$$\text{図7 概算深度(m)} = \left[\frac{\text{現地気圧(ATA)} + \text{実測水深(m)} \times 1/10}{\text{現地気圧(ATA)}} - \text{現地気圧(ATA)} \right] \times 10m$$

によってガス溶解量が、比例的に増加されると考えられるが標高1,200mの湖水では水深8.7m毎に増加されると勘案しなければならない。このことを減圧表にあてはめた上での概算式が図7に表記してある。したがって、標高1,200mにおける潜水では、水深8.7mのレベルが海で水深10mに相当するとして標準減圧表を読まなければならぬ。仮にこの高所における湖水の水深20mへ潜水したとすると、概算深度は海での潜水におきかえると水深23mに相当するので、海での水深20mに40分の潜水をする場合には無減圧範囲内である

が、この高所では水深23mで40分の潜水をしたものと読み換える必要があり、その補正を行うと湖での水深20mで40分間潜水した場合には減圧時間をとらないと減圧症に罹患する危険が生じる。

このように高所における潜水の場合には、その標高に見合った高所用の減圧表を用いなければならないが、海用の一般的な減圧表を利用する場合には、前述のような換算した修正減圧表を概算して、それを利用しなければならなくなる。

航空機や高所に対する減圧症の予防

航空機に搭乗する場合には潜水後の間隔時間を十分にとること、また高所における潜水では、標高に見合った減圧表を概算することで減圧症の発症リスクは大幅に減少させることができる。しかし、それだけでは十分であるとは言えない。その危険性を減ずる方法としては最近米国におけるダイバーの間で普及してきた、ナイトロックス (Nitrox) の呼吸用ガスの使用がある。正確には enriched oxygen gas と表現した方が良いが、窒素と酸素の混合比率を 64 : 36 または 68 : 32 とした酸素富加ガスを使用する方法である¹¹⁾。その日の最後の潜水を行う上でナイトロックスガスを使用すると、窒素の体内への溶解量が減じられるので空気による通常の SCUBA 潜水と比較して、安全レベルが高くなる。その他にもナイトロックスの利点は窒素酔いになりにくく、空気と比較して同一条件での使用時間が延長される。潜水後の疲労度が軽減されるなども挙げられるが、注意点は水深 30m 以深への潜水禁止であり、深く潜降すると急性酸素毒性の危険性が生じる。あるいは、減圧症発症予防のためにまだ日本では利用されていないが、酸素減圧あるいは浮上直後に酸素を吸入する方法がある。潜水後に純酸素を吸入することは、短時間で窒素の洗い出し効果があり、「酸素窓効果」とよばれているが、減圧症発症予防の効果は大きい。わが国でも一般ダイバーが、潜水後に酸素を吸入するシステムが近日中に実現の運びとなると思われ、この利用は高所潜水でもごく有効といえよう。

ファンダイバーは無減圧範囲内の潜水深度と時間を守ることが原則でこの範囲を逸脱しなければ、99.5% の確率で減圧症の予防は可能であるが、この場合の危険率 0.5% はダイバーがベストな条件で疲労、睡眠不足、深酒などの影響のない場合の条件であり、体調を壊していくれば、その危険率は 3 ~ 5 % にまで上昇してしまう。何より大切なことはダイバーとして安全潜水を心掛ける自覚の下に体調を整えることであり、潜水時間とは潜水

の為に家を出発してから帰宅するまでの広義の解釈をすべきであろう。そのような立場で安全意識を高めることによって、航空機や高所移動などに無理なスケジュールを組まなくなるものと信じる。

[参考文献]

- 1) 真野喜洋：ダイビング事故とメディカルチェック、日経スポーツメディシン、'97, 44-49, 日経メディカル, 1997
- 2) Yamami, N., Mano, Y., Shibayama, M. et al: Hyperbaric exposure after diving and decompression sickness on emergency calls of divers alert network in Japan., Undersea & Hyperbaric Medicine, vol 23, 58, 1996
- 3) 関邦博、眞野喜洋、横山眩一(訳)：U. S. Navy ダイビング・マニュアル, 316, 朝倉書店, 1987
- 4) Mano, Y., D'Arrigo, J. S.: Relationship between CO₂ levels and decompression sickness., Aviation, Space and Environmental Medicine, 49(2) : 349-355, 1978.
- 5) D'Arrigo, J. S., Mano, Y.: Bubble production in agarose gel subjected to different decompression schedules, Undersea Biomedical Research, 6(1) : 93-98, 1979
- 6) Mano, Y., Shibayama, M. et al: Relation between bends onset and agarose gel bubbles, In Proceeding of the sixth meeting of the U. J. N. R. panel on diving physiology and technology (ed. Miller, J. W.) 29-39, Washington, D. C. 1981
- 7) Mano, Y. et al: Relation between number and volume of dysbaric bubbles concerned with decompression sickness., Jpn J. Aerospace Environmental Medicine, (24) : 63-74, 1987
- 8) Bühlmann, A. A.: Tauchmedizin, 7-18, Springer-Verlag, Berlin, 1983
- 9) 真野喜洋(編著)：潜水医学, 257-265, 朝倉書店, 東京, 1992
- 10) Vann, R. D. et al: A comparison of recent flying experiments with published flying after diving guidelines: Undersea & Hyperbaric Medicine, (23) : 36, 1996
- 11) NOAA: NOAA diving manual, (15) 1-13, NOAA, Washington D. C. 1994