

## ●特集・非飽和混合ガス潜水の現状と将来

# 混合ガス潜水における呼吸ガス組成と減圧法

橋本昭夫\*

### はじめに

40m以深の潜水では空気の約80%を占める窒素の分圧が麻酔作用を及ぼすので、空気に代わる呼吸ガスの希釈ガス（生理的不活性ガス）としてヘリウムが用いられる。ヘリオックス(heliox)と呼ばれるヘリウム酸素混合ガス、トライミックス(trimix)と呼ばれるヘリウム窒素酸素混合ガスなどが使用される。ヘリウムは高圧になっても麻酔作用がほとんどなく、密度も窒素の約7分の1と高圧になってもガス密度の増加が少ないので、呼吸抵抗の増大も抑えられ希釈ガスとして理想的である。

また、40m以浅の潜水においても潜水時間の延長や減圧の安全性を考慮して空気よりも酸素濃度が高いナイトロックスと呼ばれる窒素酸素混合ガスを使用する場合があるが、ナイトロックス潜水については以前に発表しているのでここでは割愛する。このように潜水で使用される混合ガスには、空気の他に目的に応じてナイトロックス、ヘリオックス、トライミックスという混合ガスが使用される。

混合ガス潜水は一般にはなじみが薄い潜水法であるが、ここでは混合ガス潜水で使用されるガスの種類と減圧法の概要について述べる。

現在のところ、わが国では混合ガス潜水は一般ではほとんど行われていないが、米国では近年、テクニカルダイビングを行うスポーツダイバーの間で頻繁に実施されている。混合ガス潜水の利点は、空気潜水と比較して、より深くより長い潜水が可能となることである。そのため、より深い潜水をめざすテクニカルダイビングで盛んに用いられるゆえんである。一般的に、空気潜水の潜水深

度限界は40mと言われているが、その主な理由は空気の約8割を占める窒素分圧の増大による麻酔作用が増悪するからである。

中枢系酸素中毒だけの観点から判断すると、空気潜水での酸素分圧であれば約70mまでの潜水が可能であるが、その深度に到達する以前に窒素酔いの影響が多くなり、正常な思考能力が維持できなくなる。

当然のことながら、混合ガス潜水で使用される呼吸ガスの組成には一定の条件がある(表1)。まず、混合ガスに含まれる酸素の割合であるが、これは酸素分圧によって制限される。酸素分圧が高くなると、中枢系酸素中毒に陥る危険性が增大する。そのため潜水中の酸素分圧が1.6絶対気圧(ATA)以下になるように酸素濃度を設定する。酸素以外のガス組成は希釈ガスとしての不活性ガスとなる。混合ガス潜水の希釈ガスとして一般的に使用される不活性ガスには窒素とヘリウムがある。窒素ガスの場合も酸素と同じく、その分圧によって制限される。一般的には混合ガス中の窒素分圧は4.0絶対気圧(ATA)以下になるように窒素濃度を設定する。

では、混合ガス潜水ではどのような混合ガスが使用されるのであろうか？窒素酸素の混合ガスであるナイトロックスは深度40m以浅の潜水で使用される。この代表的な例はNOAA I, II<sup>1)</sup>である。次に、ヘリウムと酸素の混合ガスであるヘリオックスは各国海軍のバウンス潜水で用いられている。それから、ヘリウム、窒素、酸素の3種混合ガスであるトライミックスはテクニカルダイビングなどで使用される。

混合ガス潜水はより深い深度で長い潜水を行うため、多くの場合が減圧潜水になる。そのため、減圧をより安全にまた、減圧時間をより短くするために、減圧の途中で呼吸ガスを別のガスに切り

\*海上自衛隊潜水医学実験隊

表1 混合ガス潜水におけるガス組成の条件

酸素分圧：	0.21ATA 以上, 1.6ATA 以下 (但し, 減圧中は除く) 〈理由〉 中枢系酸素中毒の防止
希釈ガス (不活性ガス) としての,	
窒素分圧：	4.0ATA 以下 〈理由〉 窒素酔いの防止
ヘリウム分圧：	特になし

表2 混合ガス潜水における呼吸ガスの選択基準

1	潜水深度
2	潜水時間
3	潜水装備 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自給気式, 他給気式</li> <li>・ 開放式, 閉鎖式呼吸回路</li> <li>・ 水中減圧 (ステージ減圧, ダイビングベル減圧), 水上減圧</li> </ul>
4	減圧時間
5	減圧中のガススイッチング
6	経済性

替える「ガススイッチング」が行われる。これは呼吸ガスを別のガスに切り替えることによって潜水中 (在底中) に体内に溶解した不活性ガスを気泡化することなく速やかに体外に排出することができるからである。

通常, 切り替える呼吸ガスは酸素分圧が在底中の呼吸ガスよりも高いガスで, 浅い深度になると純酸素呼吸に切り替える方法がよく用いられる。つまり, 中枢系酸素中毒の危険性がない程度にできるだけ酸素分圧を高くする方法が採られる。純酸素呼吸ができない深度での呼吸ガス中の不活性ガスは, 在底中の呼吸ガス中の不活性ガスとは違った不活性ガスに置き換えられる。減圧中に切り替える呼吸ガスが多いほど減圧時間は短くなるが, 通常, 実用性・経済性の面から2種類程度に限定される。

混合ガス潜水においてどのような基準で呼吸ガスを選択するか (表2) というと, まず, 潜水深

度がある。つまり, 予定最大深度での酸素分圧をできるだけ高くするような混合ガスが最適となる。また, 深度が深いと窒素酔いを防止するためヘリウムの割合が多くなる。次に, 潜水時間であるが, 潜水時間が短い場合はヘリウムの割合は少なくなる。これはヘリウムの溶解速度が窒素の約2.5倍あるので体内に早く溶解し, その結果減圧時間が相対的に長くなるからである。どのような潜水装備で潜水を実施するかということも呼吸ガス選択基準の重要な要素になる。自給気式潜水器を使用する場合は, ガスの供給に限りがあり, 深い深度まで長く潜ることはできないので, 減圧時間とのかねあいをみた場合, ヘリウムの割合が少なくなる。

一方, 他給気式の場合は, ガスの供給が制限されないため, 自給気式潜水器よりも深い深度で長時間の潜水が可能となり, ヘリウムの割合が多くなる。

また、自給気式潜水器のガスの供給を延長しようという考えから、循環式再呼吸回路の潜水器、いわゆる、「リブリーザー」の利用も考えられる。減圧については、水中減圧か、水中減圧でもステージ減圧かダイビングベル減圧かによっても減圧中の切り替えガスの種類が違ってくる。ダイビングベルによる減圧の場合、呼吸ガスはベル内の環境ガスであり、この環境ガスが何であるか、またどういう呼吸装置を使用するかによって呼吸ガスも変わる。水上のチェンバーで水上減圧を行う場合はチェンバー内の環境ガスや呼吸ガスを何にするかが重要となる。減圧時間を長くとれる場合、できるだけ短時間で済みます場合などによっても減圧中の呼吸ガスが変わってくる。また、減圧中のガススイッチングを行うか行わないかによっても、呼吸ガスの選択が変わる。

さらに、職業潜水の場合は経済性の問題がもっとも重要となる。ヘリウムは窒素と比較して値段が高いので、ヘリウムの使用量をできるだけ少なくした方が安く済む。このように混合ガス潜水の呼吸ガスの選択には、様々な要素を考慮しなければならない。

それでは、混合ガス潜水においてどのような減圧法を行うかという問題であるが、現在、NOAA ナイトロックス潜水や各国海軍のヘリウム酸素潜水を除いて、これといった一般の減圧表は存在しないのが現状である。この理由は、まず第一に、前述したように混合ガス潜水においては呼吸ガスの選択一つにしても、様々な種類が考えられること。第二に、混合ガス潜水の実績が少なくデータの蓄積がないことによる。しかしながら、特定の混合ガス潜水における減圧計算は可能で、この計算には以下に示すようにいろいろな計算モデルが用いられる。

1. 「Haldane - Workman - Schreiner Tonawanda II」モデル<sup>2)</sup>は Hamilton によって提唱されている計算モデルで、ホールデンの理論とワークマンのM値を基本としている。

2. 「Exponential-Linear」モデル<sup>3)</sup>は米海軍のThalmannによって考案されたモデルで、ガスの体内での取り込みは指数関数的で、ガスの排出は直線的であるという考えで成り立っている。米海軍が使用している閉鎖循環式潜水器 MK15, 16の減圧表はこのモデルを元に開発されている。

3. 「Kidd - Stubbs」モデル<sup>4)</sup>はカナダのDCIEMで開発されたモデルで、体内での不活性ガスの移動は並列的ではなく直列的に起こるという考えに基づいている。

4. 「Tiny Bubble」モデル<sup>5)</sup>はハワイ大学のYountによって考案されたモデルで、ゼラチン内での気泡形成動態観察結果から、その理論が導き出され、変動透過性モデルとも呼ばれている。

5. 「t-delta-P」モデル<sup>6)</sup>は各半飽和組織中の過飽和状態を減圧中、常に計算しながら減圧していくというもので、深くて長い潜水では該当しないホールデンの理論の弱点を補ったモデルである。

将来、混合ガス潜水の信頼できる潜水プロフィールデータの蓄積が進めば、統計学的理論に基づくMaximum Likelihood (最尤法)による減圧モデル<sup>7)</sup>も可能となると思われる。

ここで、実際に使用されている、あるいはある程度の実績がある混合ガス潜水の減圧表の例を5つ示してみる。これらの例はすべて水中減圧で、潜水深度150フィート、潜水時間60分の減圧例を示してある。

〈例1〉他給気デマンド式潜水器を使用した米海軍のヘリオックス潜水の減圧 (UNS HX21)<sup>8)</sup>で、50フィートから酸素呼吸の後40フィートから水面までそのまま減圧を行う例 (図1)

〈例2〉自給気式潜水器で酸素21%ヘリウム40%、窒素39%のトライミックス潜水 (TX21/40)を行い、60フィートから水面まで空気減圧 (AIR)をする例 (図2)

〈例3〉同様に自給気式潜水器でTX21/40トライミックス潜水を行い、60フィートから水面まで50%酸素50%窒素のナイトロックス (NX50) 減圧を行う例 (図3)

〈例4〉同じく、TX21/40トライミックス潜水で、60フィートから20フィートまでNX50減圧を行い20フィートから水面まで酸素減圧の例 (図4)

〈例5〉同じく、TX21/40トライミックス潜水で、60フィートから20フィートまで空気減圧し、20フィートから水面まで酸素減圧の例 (図5)

最後に参考として、米海軍空気潜水標準減圧 (USN STD AIR) から空気潜水、空気減圧の例を示した (図6)。これらの潜水プロフィールを比較すると、同じ潜水深度・潜水時間の混合ガス潜水であっても在底時あるいは減圧時に呼吸するガ

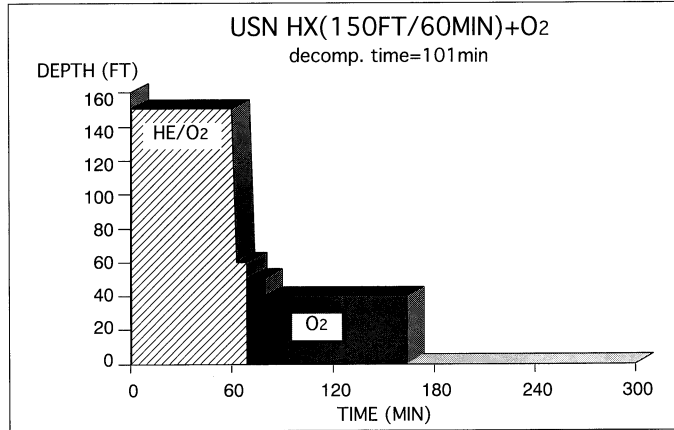


図1 ヘリオックス潜水+酸素減圧(米海軍)

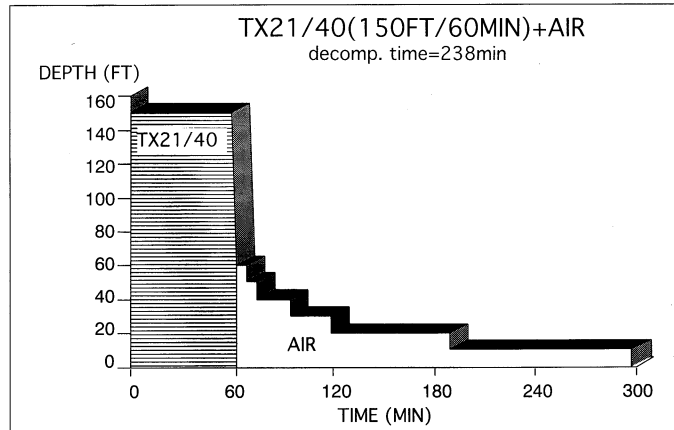


図2 トライミックス潜水+酸素減圧

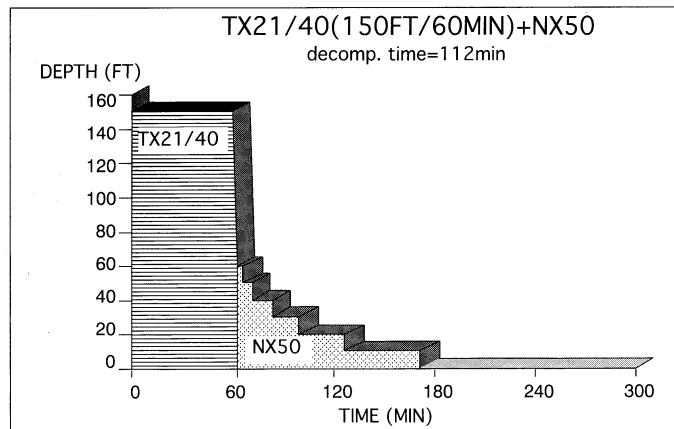


図3 トライミックス潜水+ナイトロックス減圧

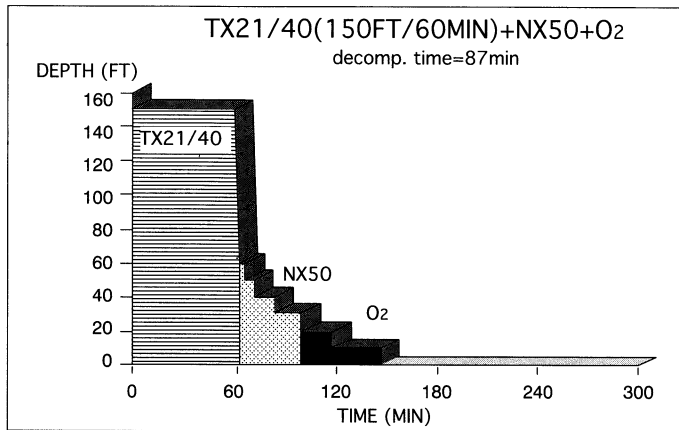


図4 トライミックス潜水+ナイトロックス/酸素減圧

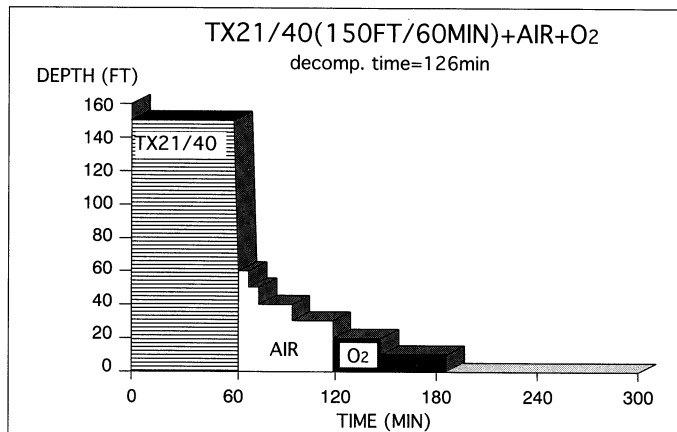


図5 トライミックス潜水+空気/酸素減圧

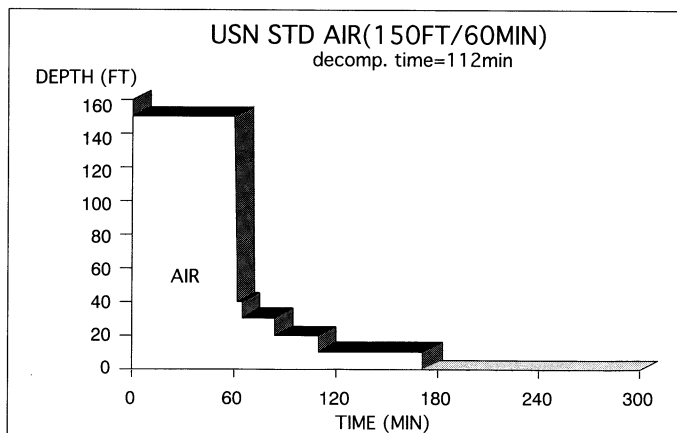


図6 米海軍空気潜水減圧

スの種類によって減圧時間が大きく変わることがわかる。

### ま と め

混合ガス潜水の利点は、適切な呼吸ガスの選択を行えば空気潜水の場合よりも、より長くより深い潜水が可能となることである。しかしながら、呼吸ガスの選択、減圧法は潜水深度、潜水時間、潜水装備、潜水法などによって大きく左右される。さらに、混合ガス潜水において重要なことは潜水中断時の対応をも含めた周到な潜水計画を必要とすることである。

### 〔参 考 文 献〕

- 1) NOAA Diving Manual (Third edition). October, 1991
- 2) Schreiner. H. R. and P. L. Kelley: A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen, C. J., ed. Underwater physiology IV. New York: Academic Press, 1971
- 3) Thalmann E. D.: Computer algorithms used in computing the Mk15/16 constant 0.7 ATA oxygen partial pressure decompression tables. NEDU Report, 1-83. Panama City, FL: US Navy Experimental Diving Unit, Jan. 1983
- 4) Stubbs B. A. and D. J. Kidd: 65-R-1. Down-sview, ON Canada: Canadian Forces Institute of Aviation Medicine, 1965
- 5) Yount D. E. and D. C. Hoffman: On the use of a bubble formation model to calculate diving tables. Aviat Space Environ Med 57: 149-156, 1986
- 6) Peterson R.E. and R. W. Hamilton: development of saturation decompression procedures for nitrogen-oxygen and air habitat diving operations. In: Bove A. A., Bachrach A. J. and Greenbaum L. J. Jr., eds. Underwater and hyperbaric physiology IX. Bethesda. M. D.: Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1987
- 7) Weathersby, P. K., L.D. Homer & E. T. Flynn. On the likelihood of decompression sickness. J. Appl. Physiol.: Resp. Environ. Exercise Physiol. 57(3), 815-825, 1984
- 8) US Navy Diving Manual Volume 2(Mixed-Gas Diving), Revision 3, 15 May 1991