

● 総 説

なぜ三種混合ガス（トライミックス）を用いるのか？

池田知純

キーワード：減圧，減圧症，気泡，潜水，潜函

Why to use trimix?

Tomosumi Ikeda
Division of Environmental Medicine, National
Defense Medical College Research Institute

Keywords :

decompression, decompression sickness, bubble,
diving, caisson,

緒 言

作業現場の環境圧力が従来より高い潜函作業あるいは港湾潜水作業における呼吸ガスとして窒素・酸素・ヘリウムの三種類のガスを混合したいわゆる三種混合ガス（以下，トライミックスとする）を使用することが梨本一郎らによって提唱され¹⁾²⁾，試行段階を経ていまや実用段階に入っているが，肝腎のトライミックスを用いる理由が必ずしも明瞭に認識されているとは言い難い側面がある¹⁾⁴⁾。そこで，本稿では最初に減圧面からみたトライミックスを用いる理由を述べ，ついで，その他の理由について以下に記す。

トライミックスを用いる理由：減圧面から

通常はトライミックスを次のように用いる。海底ないし作業現場までの潜降ないし加圧（以下，潜

函作業も潜水作業に準拠した用語を用いる）は空気あるいはトライミックスを呼吸しながら実施し，海底ではトライミックスを呼吸する。浮上時には空気に切り替え，酸素が使用できるような設備を備えていれば，酸素呼吸が可能な浅い深度から酸素を呼吸しながら海面にまで浮上する。理想的には，体内窒素分圧と空気中窒素分圧が概略等しくなる時点で切り替えるのが望ましいとされるが，そこまで厳密にしないで，浮上開始時点あるいは第一減圧点から空気呼吸に切り替えても大きな支障はない。また，空気を呼吸しながら潜降することもある。

そこで，以上のように呼吸ガスを変換しながら浮上した場合（この方法をガススイッチ法ともいう。本稿ではガス変換法とする）に，生体内の生理的不活性ガス（以下，誤解のないときは単にガスとする）の動態がどのように変化するかを見てみよう。なお，以下の論理の組立は全て灌流モデル⁵⁾⁶⁾に基づくものであることを最初に断っておく。

ここでは，浮上開始時にトライミックスから空気に変換したとする。すると，これはダイバーが呼吸しているガス中のヘリウム分圧が急速に0に変わることを意味する。ということは，ヘリウムを排出しようとする力は生体内と呼吸ガス中のヘリウム分圧の差であるために，ガス変換に伴って圧差を最大限に大きくすることが可能になり，ガスの排出が促進される。勿論，トライミックスから空気へ

表 1 減圧スケジュールの比較 (詳細は本文参照)

潜水	減圧点 (msw)							総減圧 時間
	21	18	15	12	9	6	3	
A	5	6	14	18	21	42	74	185
B	2	5	10	18	21	36	68	165
C	2	5	7	10	13	29	51	122

の変換を窒素の面からみると、空気中の窒素の方がトライミックスよりも多いことから、窒素はガス変換後しばらくは新たに取り込まれることになるが、ヘリウムが排出される速度は窒素が取り込まれる速度よりも速いために、生体内における窒素とヘリウムを合わせたガスの総圧力は、ガスを変換した場合の方が速やかに小さくなる。これは取りも直さず、減圧時間を短くできることを示している。

これが、減圧面からみたトライミックスを用いる理由である。

そこのところを、もう少し定量的に見てみよう。表 1 は深度50m、滞底時間60分の潜水を行った場合に、Aは滞底及び減圧中を通じて全て空気を用いたケース、Bは酸素濃度25%、窒素濃度75%の窒素酸素(ナイトロックス)潜水を行い、減圧中に空気に変更したケース、Cは酸素濃度25%、窒素濃度50%、ヘリウム濃度25%のトライミックスを用い、減圧中は空気に変更したケースを示す。計算に用いたM値はオランダのスターク(W. Sterk)教授の未発表値によるが、基本的な考え方は末尾の補足 1 を参照されたい。減圧時間の単位は分、深度はmeters of sea water(msw)である。

総減圧時間を見ると、AとBの差は、ナイトロックスと空気中の酸素濃度の変化にほぼ反比例した数値を示しており、酸素の効果で減圧時間が相応に短くなるのが理解できる。興味深いのはBとCの比較である。酸素濃度は両者に差はなく、いずれも25%に設定されているので、もし酸素濃度のみがガスの排出に関与しているのであれば、両者の間で減圧時間に差は現れないはずである。ところが、ここに見るように、総減圧時間はナイトロックスでは165分であるのに対し、トライミックスでは122分と40分以上、率で言えば25%以上短くなってい

る。このことから、トライミックスを用いることが減圧面で如何に有効であるか一目瞭然であろう。

しかし、ここで次のことを考えておかねばならない。というのは、ガスを排出する面からみると、ヘリウムを混じているとは言え、なお多くの窒素が含まれているトライミックスよりも、酸素以外は全てヘリウムであるヘリウム酸素混合ガスを海底で呼吸した方が、減圧時における生体内外のヘリウムの圧較差を大きくすることができ、より効果的であるからである。

では、何故にガス排出効率のよいヘリウム酸素(以下、誤解のない場合はヘリウムとも称する)を用いる代わりにその劣るトライミックスをわざわざ用いるのであろうか。

それは窒素が含まれていないヘリウム環境から急に空気に変換すると、めまいや吐き気を生じることがよく認められることから、それらの症状を防ぐために、当初から窒素の含まれているトライミックスを用いるのだ、とされている(Sterk, 私信, 2001)。めまいが生じる機序としては、ガスを変換した際に発生するいわゆる等圧力気泡形成(isobaric bubble formation)が関与しているのではないかとされている⁷⁾(等圧力気泡形成についてのやや詳しい説明は末尾の補足 2 を参照)。

ただし、このガス変換に伴うめまいの発生については、欧州では当たり前のこととして認識されている由であるが(Sterk, 私信, 2001)、それを明瞭に記した資料文献は管見の限りでは見当たらない。わずかに、米海軍の潜水医官テキストに、深度150ft(約45m)以深でヘリウム環境から空気環境に急に移行した際にめまいが発生することがある、との記載があるが、その根拠は記されていない⁷⁾。一方、筆者が1983年に英海軍において飽和潜

水の訓練を受けた当時は、ガス変換法を用いるバウンス潜水の手法としては、ヘリウム環境から直ちに空気環境に移行することがルーチン化されており、その後上に記したような認識が醸成されていったのかもしれないが、英海軍の方法をいまだに用いている組織もあり、詳細は未詳である。

また、混乱のないように次のことも記しておかねばならない。というのは、トライミックスを用いた圧曝露には次の2種類があることに注意しておく必要があるからだ。一つは上に示したようにガスを途中で変換する潜水方法にトライミックスを用いる場合であり、もう一つはガスを変換することなく常時トライミックスに曝露するケースである。後者の曝露は通常の潜水で用いられることは殆どないが、ガスの動態を知る上で、このような場合におけるガスの変化についても知っておいた方がよいだろう。

一般にヘリウムは窒素に比較して半減時間が短いためにガスの溶け込む速度が速く、窒素よりも多く組織に取り込まれると誤解されがちであるが、溶解度は逆に窒素よりも小さいので、減圧の面からは総じて長時間の潜水では溶解度の小さいヘリウムを用いた方が好ましく、短時間の潜水では半減時間の長い窒素の方が望ましいとされる。実際にこのことについて減圧症への罹患頻度を指標として検討した数少ない動物実験によれば、曝露時間が長くなるほどヘリウムの割合を増やした方が短い時間で減圧できたことが示されている⁸⁾。

ところで、この項の最後に、上に述べたことと矛盾する知見を米海軍が得ていることを知り得たので⁹⁾、それについても触れておくべきであろう。というのは、米海軍ではガスの排出の上からはガス変換法が有効であろうと考え、それを厳密にコントロールされた条件で実証すべく人を被験者とした実験を行ったところ、予想とは正反対の結果が出てしまったのだ。すなわち、ガス変換法では16名中3名が減圧症に罹患したのに対し、変換しなかった群では32名中1名が減圧症に罹患したに過ぎなかったのである。この結果は全く予期し得ないもので、減圧理論からは説明がつかない。しかしながら、結果を無視するわけにもいかず、より確実な知見を得るためにはさらに実験を行う必要があるものの、現時点ではガス変換法の有効性は見

いだせなかった、と結論づけている。

このことは、ガスの動態の把握が一筋縄ではいかないことをあらためて認識させるものとも言えようが、欧州で実施されることの多いガス変換法についてのより信頼性の高い知見が待たれるところでもある。

トライミックスを用いるその他の理由

減圧の利点以外のトライミックスを用いる理由は以前より認識されていたもようであるので、一部誤解されやすい部分の留意事項を含め以下に簡単に記しておこう。

〔窒素酔いの軽減〕

空気で潜ると深度が深くなるに従って窒素酔いが強くなることは周知の通りである。窒素酔いは文字通り高分圧の窒素によって生じるので、窒素の代わりにヘリウムを混入すれば、その分窒素酔いは軽減される。ある意味では、次の経済的理由とともに、これがトライミックスを用いる主要な理由であると言ってもよいだろう。

〔費用の軽減〕

通常ヘリウムは高価なので、ヘリウムを安価な窒素で置き換えれば、その分、費用が軽減されるのではないかとされるが、本邦では、意外にそうではない。ガス専門会社による混合過程の費用がかさみ、むしろヘリウム酸素混合ガスの方がトライミックスよりも廉価である¹⁰⁾。

ところが、レジャーないしスポーツ潜水にトライミックスを用いることが早期に案出された米国では、これとは事情が異なっている。というのは、米国では個人が個人の考えに基づいて潜る場合の自己責任の捉え方がわが国よりも徹底しており、その一環として、用いる潜水用呼吸ガスの精度も自らが判断すればよいことになっているからだ。実際、潜る深度が特別に深くない多くの場合、それぞれのガスの割合については日本におけるほどその精度に気を使っていないのが実状だ。具体的には、ガスを専門に扱うとは言えないダイバー自身ないしダイバーが依頼した潜水業者が、ボンベ内の圧縮した空気に純ヘリウムを混入することによってトライミックスを製造している。ガスの組成は基本的には単純な分圧の法則によってあらかじめ計算されており、わが国のように厳密な微調整は行わない。そうすると、ガス代として要求される費用はヘリ

ウムの実費のみであるところから (Hamilton, 私信, 2000), 当然ヘリウムの量が多いヘリウム酸素混合ガスよりも, ヘリウムのかなりの部分を窒素で置き換えたトライミックスの方が安いことになる。これが米国においてトライミックスを用いる第一の理由になっているが¹¹⁾, これをそのまま日本に当てはめることが出来ないのは, 先に記したとおりである。

〔音声のゆがみの軽減〕

ヘリウム環境下では音声に変化し, 聞き取りにくくなることがよく知られている。そこで, ヘリウムの一部を空気の性状により近い窒素で置き換えれば, 当然音声のゆがみも少なくなることが期待される。しかしながら, トライミックスを用いた実際の作業潜水では深度が限定されることから, これが取り上げられるほどの利点であるか否か, 疑問である。

〔熱損失の軽減〕

ヘリウムの熱伝導度が高いためにヘリウムを用いた潜水では熱損失が増加し, ダイバーは冷えやすくなると言われているところから, トライミックスを用いる理由として熱損失の軽減を挙げる向きもあるが, これは必ずしも正しくはない。

というのは, たしかにチャンパーの中や昔からのヘルメット潜水のように体の周囲がヘリウムで囲まれている場合は, ヘリウムの高い熱伝導度のために空気ですべて囲まれている場合よりも熱損失が大きく, ひんやり感じるが, ここで問題となって来るのは別ルートの熱損失である。

現在トライミックスを用いた潜水で主流となっている潜水呼吸器は基本的にスクーバ潜水と同じデマンド型呼吸器であるために, 供給されるガスはほとんど全て呼吸に使用されている。言い換えれば, ほとんど全てのガスは肺の中, 少なくともダイバーの呼吸器の一部を経由する事になる。すると, ダイバーに供給される多くの冷たいガスが体温近くまで暖められてから外に排出されることになり, これに要する熱量, すなわち呼吸による熱損失がダイバーから失われる熱量の多くを占めるようになる。その場合, ガスを暖めるのに要する熱量は比熱×密度に比例するために, ヘリウムを呼吸した方が少なくすむ (ヘリウムの比熱は窒素よりも大きい, 比熱の定義が重量当たりであることか

ら, このようになる)。これは, よく間違っ理解されていること, として潜水医学シンポジウムの招請講演でも特に言及されている¹²⁾。

もつとも, 先に記したように, ダイバーの体を取り巻くガスを問題とする場合は, トライミックスを用いた方が熱損失は少なくなるのは言うまでもない。

以上から, 潜水の方法にもよるが, 熱損失の軽減をトライミックスを用いる主要な理由として挙げるのは妥当ではないと考える。

〔呼吸抵抗の軽減〕

呼吸ガスの密度が大きくなるに従って呼吸抵抗は増加するので, 空気中の窒素の一部を密度の小さいヘリウムで置き換えると, その分呼吸抵抗は小さくなる。そのようなところから, 呼吸抵抗の減少をトライミックスの利点として捉えることもある。

しかしながら, 呼吸抵抗が死活的に問題となるような深度では, そもそも窒素酔いのために空気ですること自体が現実的ではない。そのような場合はヘリウム酸素で潜ることが多いので, トライミックスを用いた潜水の方がヘリウム酸素潜水に比べて窒素が多く混じっている分, 呼吸抵抗が増大する。

したがって, 呼吸抵抗の軽減をトライミックスを用いることの主要な理由とすることは出来ないだろう。

結 語

従来必ずしも十全には認識されていなかったトライミックスを用いる理由について概説し, 減圧面での利点大きいことを強調した。トライミックスを用いた潜水の正確な理解に寄与できれば幸甚である。

謝 辞

トライミックスを用いた潜水についてディスカッションをいただいたオランダのスターク (W. Sterk) 教授及び米海軍の最新の情報をご提示いただいたフリン (E.T. Flynn) 米海軍退役大佐に衷心より謝意を表す。故梨本一郎埼玉医大名誉教授からは本邦におけるトライミックス潜水の現場の状況について貴重な知見を得る機会とともに, スターク教授との意見交換の場もご提供いただいた。また, 潜水技術センターの望月徹氏にもスターク教授とのスケジュール調整等, お世話になった。併せて篤くお礼申し上げる。

〔参考文献〕

- 1) 小林浩：三種混合ガスを用いたバウンス潜水（第28回日本高気圧環境医学会総会シンポジウム演題）。日本高気圧環境医学会雑誌。28:23, 1993
- 2) 小林浩：浅深度における混合ガス非飽和潜水。日本高気圧環境医学会雑誌。30:227-233, 1995
- 3) 梨本一郎：3種混合ガス（トライミックス）による潜水技術とその土木分野への応用。土木学会誌。81:18-21, 1996
- 4) 特殊な圧気潜函工事に係る健康障害防止基準に関する調査研究報告書。東京；建設業労働災害防止協会。2001
- 5) 池田知純：減圧をめぐる諸問題。防衛医科大学校雑誌。23:149-162, 1998
- 6) 池田知純：減圧と減圧症。日本高気圧環境医学会雑誌。35:197-203, 2000
- 7) Flynn ET, Catron PW, Bayne CG: Lesson 64. Isobaric bubble formation. In: Diving Medical Officer Student Guide. Naval Technical Training Command, 1981
- 8) Berghage TE, Donelson C IV, Gomez JA: Decompression advantages of trimix. Undersea Biomed Res 5:233-242, 1978
- 9) Flynn ET, Parker EC: Failure of Nitrogen to Accelerate Decompression in Constant 1.3 ATA Oxygen in Helium Environment. 米海軍の報告書として出版予定
- 10) 池田知純：海上自衛隊で実施した空気及び窒素酸素飽和潜水。日本高気圧環境医学会雑誌。32:131-136, 1997
- 11) Mount T, Gilliam B: Mixed Gas Diving. The Ultimate Challenge for Technical Diving. San Diego CA, Watersport Publishing Inc. 1993. [ISBN 0-922769-41-9]
- 12) Kuehm LA: Invited review: Thermal effects of the hyperbaric environment. In: Bachrach AJ & Matzen MM eds. Underwater Physiology VIII. Bethesda MD: Undersea Medical Society, pp. 413-39, 1984

補足 1：トライミックス潜水における減圧計算

トライミックス潜水における減圧計算の基本的な考え方は以下のとおりである。

すなわち、まず窒素とヘリウムという二つのガスの内、窒素の割合に従って環境（外界）の窒素分圧を求め、その窒素分圧を用いて通常の灌流モデルに基づく減圧計算を行い、組織内の窒素分圧を算出する。ついで、ヘ

リウムの半減時間は拡散係数の比較から窒素の2.65分の1としてヘリウムの半減時間を求め、同じようにしてそのヘリウムの生体内の分圧を算出する。ついで、このようにして算出された窒素とヘリウム双方の分圧を足した合計をその組織全体としての不活性ガス分圧とし、その値がM値を超えないように制御しながら浮上スケジュールを求めるものである。なお、スタークは独自のM値を用いている。

具体的な数値を挙げてもう一度わかりやすく解説しよう。今、ヘリウム30%、窒素50%、酸素20%のガスを呼吸しているとす。そこでたとえばある圧力のもと、濃度100%^aのある不活性ガスを20分間呼吸したあとの10分組織における不活性ガス分圧を $P(20)10$ として表すとすると、100%窒素を呼吸した場合の窒素分圧は $P(20)10$ 、50%窒素の場合は $P(20)10 \times 0.5$ になる。一方、ヘリウムの半減時間は窒素の半減時間の2.65分の1なので、半減時間10分の窒素と同じ組織のヘリウムに対する半減時間は $10/2.65$ 、約3.8分になる。したがって、その組織のヘリウムによる不活性ガス分圧は $P(20)3.8 \times 0.3$ になる。そこで、その組織全体としての不活性ガス分圧は双方の単純な加法和、 $P(20)10 \times 0.5 + P(20)3.8 \times 0.3$ で表される、という訳だ。そして、このようにして求められた全体としての不活性ガス分圧がM値を超えないように減圧していけばよい、ということになる。

補足 2：等圧力気泡形成

等圧力気泡形成（isobaric bubble formation）とは、深度あるいは圧力の変化なしに気泡が出現する現象を言い、その機序として次の三つの考え方が提唱されている。一つは、deep tissue differential inert gas exchange というもので、窒素環境からヘリウム環境に急速に移行した場合に、窒素とヘリウムの半減時間に差があることから移行後過飽状態になり気泡形成を来すというものである。二番目はisobaric counterdiffusionと称されるもので、ヘリウム環境下で窒素を呼吸した場合に、脂肪組織と水性組織との間のガス拡散速度の差から気泡形成を来すものである。三番目としてisobaric counterperfusionという機序が考えられている。これはたとえば外側の皮膚組織の血流が深部の血流よりも少ない場合に、ヘリウム環境下で窒素を呼吸すると、血流量の相違から過飽和を来すというものである。三番目の機序は脂肪層を想定しなくてもよいところから、脂肪組織の認められない内耳が関与していると思われるめまい等の発現をよく説明し得る。

^a 濃度100%の不活性ガス、言い換えれば酸素濃度0%のガスを呼吸して生存することは不可能だが、一つのモデルとして了解すればよい。