

● Young Scientists Corner

浅深度における混合ガス非飽和潜水

小林 浩*

はじめに

著者は、埼玉医科大学衛生学教室の梨本一郎教授（現名誉教授）の下において、環境衛生学と労働衛生学分野のうち、とくに高気圧障害に関する予防方法の調査研究を中心に約17年間にわたり研究活動を行ってきた。当教室の高圧室には、動物用高圧チャンバーと最大7気圧まで加圧可能な中型の複室式再圧チャンバーがそれぞれ設置されていた。本装置では、飽和潜水の様に大規模な実験設備ではなかったため、主に浅い深度、概ね水深が最大100mまでの潜水と10気圧程度の高気圧作業で、飽和することなく短時間の高気圧環境に滞在することを中心に実験や調査研究を実施した。以下に著者が行ってきた主なことから総会の際の内容を要約して記載した。

潜水プロフィールの計測と解析

減圧症の予防手段として、生体のモデル組織への窒素分圧計算値と限界減圧比より求めた減圧閾値にもとづき、段階的に浮上（減圧）する方法をBoycottらが見いだして以来、実用に供されながら種々の改良が加えられてきた。その結果、潜水深度と在底時間の組合せに対応する減圧スケジュールをまとめた、いわゆる「減圧表」が作成され、潜水の際の潜降、浮上方法の指標として利用されている。しかしながら、実際の潜水では海底の地形、作業の内容、進行状況などから、減圧表に記載されている基準的な潜水深度/在底時間区分にもとづく減圧スケジュールが固定的に遵守されるとは限らない。従って、潜水の際の潜降、浮上がどのように行われているのか、実態を詳細に把握し、またその減圧症罹患リスクの評価を行うこと

は、減圧症の予防対策上きわめて有意義となる。そこで著者らは、潜水者に潜水記録装置を装着させ、詳細な潜水プロフィールを得るとともに、それにもとづき浮上（減圧）時のモデル組織の各コンパートメントの窒素ガス分圧の出納を求め、減圧閾値と比較、さらに後述する超音波ドプラー法による気泡検査結果と併せて減圧症罹患リスクの評価を行った。

潜水プロフィールの調査について初めて行ったのは、1976年から1978年の間に能登半島沖の舳倉島の海女の「息こらえ潜水」に関してであった。当時の計測機器は、現在のように電子技術が格段に進んでいなかったため、小型テープレコーダ式データレコーダに圧力センサーと心電図モニターを取り付け、これを防水ケースに入れ、「海女さん」に装着して計測を行うものであった。これにより得られたデータに関しては、その日そのときの条件によって様々なアーチファクトが入り、基線のドリフトがひどく、判読が十分にはできなかった。その後、紆余曲折を経て、現在では様々な分野でデータ収集では主流となっているICメモリを応用した潜水メモリレコーダを作成、実海域潜水に使用して完全な潜水プロフィールを得ることが簡便にできるようになった。本装置の大きな特徴は、AD変換されたデジタル情報がIC上に記憶され、メカニカルな駆動部がないためアーチファクトには影響されなかった。それとともに、完成前後の時期に比較的安価となったパーソナルコンピュータを用いて簡単に再現を行うことができた。得られた潜水プロフィールからは、体内組織溶解不活性ガスの出納シミュレーションにより減圧方法の評価を試みる事ができた。

現在では、この種の装置は一般化され、リストウォッチの様に小型になったが、この装置の開発当初は教室を挙げて取り組み、1980年の当時とし

*テイサン(株) 医療事業部

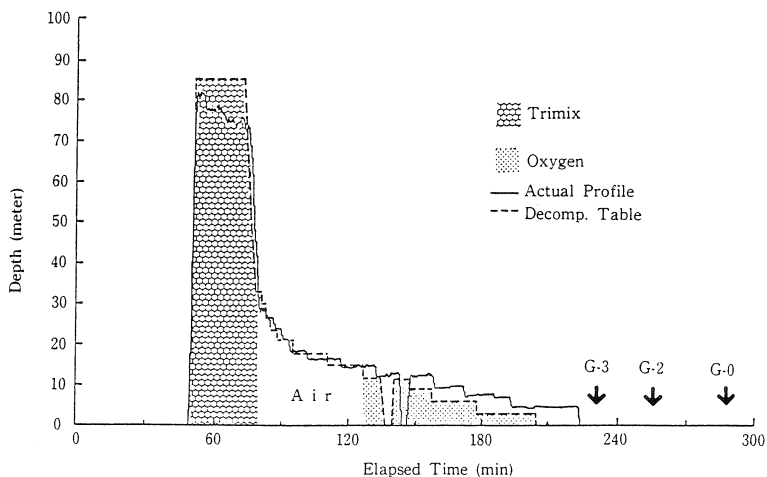


図1 珊瑚漁ダイバーの Trimix 潜水作業において得られた潜水プロフィールと減圧表との比較 (G-*は、減圧性気泡の検査結果)



図2 イタリア・サルジニア島沖の Trimix 潜水による珊瑚漁ダイバー潜水風景

ては潜水関係においては世界で初めての画期的な計測器であったと思われる。これ以降、この潜水メモリを使用し、様々な形態の潜水として、港湾潜水作業、リクレーション潜水、貝取り潜水漁等を、また国外においては共同研究の働きかけがあり、イタリア・ジェノバ大学、トルコ・イスタンブール大学、スペイン・CRIS で実海域潜水の共同調査、また、米国海軍 NMRI での共同研究を行っ

た (図1, 図2)。

様々な潜水の作業形態の各種の潜水方法についてのデータ収集を行ったが、潜水後の浮上(減圧)方法が適切であるかどうかを判定する方法は、従来から結果として得られる減圧症発症率に統計的手段を用いて解析されているが、個人差、圧力変動、環境温度などの諸条件に左右されるために、同一の減圧症罹患状態の再現性が困難である。そ

ここで、1968年に Spencer らによる超音波ドプラー気泡検知器の開発により、減圧症の早期診断が可能となり、潜水時の減圧コントロールの適否が即時に、ある程度の確に判断されるようになった。そこで、潜水プロフィールの調査の時点に同時に実施した、被験者の減圧性気泡の検査結果と、潜水プロフィールの組織内不活性ガス分圧を比較検討することにより、その潜水の減圧方法が適切か不適切かどうか評価する事が併せてできた。さらに、今後の課題として、潜水プロフィールの安全性の解析に、従来から行っているような減圧症罹患率をもとにした方法であるよりも、Weathersby らによる Likelihood を用いて解析を試みる必要がある。

混合ガス潜水

1. Nitrox 潜水

空気による潜水では深く、また簡便に潜水することが不可能であるので、大規模潜水システムを利用しないで、いかに安全に快適に潜水する事ができるかどうか、また浅い潜水深度で、減圧コントロールをいかに効率化できるかどうか、高压チャンバーによるチャンバー潜水と実海域における各種の試験を行った。

潜水は無減圧潜水安全限界の関係で「浅い潜水」、おおむね20m から30m の潜水であっても潜水時間が非常に制限された実作業となってしまうことは周知の事実である。我々が港湾堤防の基礎構築現場で港湾潜水ダイバーを調査した結果からみても、減圧コントロールはほぼ無視されて実施されていることが明らかであり、経験的に行った減圧コントロールでの減圧症罹患リスクは超音波ドプラーによる減圧性気泡の結果からみても決して低いものではなかった。

減圧時間の短縮と減圧症罹患リスクを減少させる目的として、高压暴露後の減圧過程で呼吸気として高濃度酸素を使用することにより、不活性ガスの排泄を促進させる効果があることが知られているが、急性酸素中毒招来の危険性から高压下での使用には限界がある。酸素中毒の危険性を侵さずに、浮上（減圧）の効率化と減圧症罹患リスクの低下を主眼として、圧暴露下、減圧を通して空気組成成分の酸素分圧を上昇させた窒素酸素混合ガス（Nitrox）を使用することにより、同一条件

下での空気呼吸による方法よりも、窒素の体内溶解量を減少させることが可能となる。その結果、体内溶解窒素量から計算された現行の空気減圧表を、窒素分圧の減少分だけ等価潜水深度（Equivalent Air Depth : EAD）と呼ばれる浅い深度に換算し、これにより無減圧時間の延長や減圧時間の短縮、もしくは同一の減圧表で、より長い暴露時間を得ることができる。Nitrox を用いた EAD による潜水は、20年以上前より閉鎖循環式潜水器、半閉鎖循環式潜水器に応用されてきているが、近年開放式潜水器を用いる方法が増加している。しかしながら、Nitrox 潜水と減圧症罹患リスクとの関係を評価した多くの報告は、減圧症罹患率に関してのみ論じられているため減圧症の病因とされる減圧性気泡から見た減圧症罹患リスクに関しての報告はなされていない。そこで同一圧暴露条件下での空気呼吸と Nitrox 呼吸による減圧性気泡を超音波ドプラー法および超音波断層法を用いて観察し、減圧性気泡発生状況と減圧症罹患状況から Nitrox 使用による減圧時間短縮効果についてノルウェー海軍の減圧表と日本の労働省別表2の両者を使用したチャンバーダイブによる被験者による試験を実施した（図3）。

2. Trimix 潜水

深い潜水では、窒素酔いを防止する手だてとしてヘリウム混合ガスの使用が一般的であるが、この一般的な方法は、システム潜水の考え方で実施されるのが当然であり、中途半端なシステムは危険であることは周知の事実である。しかしながら、この深い深度とは、といった疑問については、果たして何 m から何 m が相当するのであるか、といった議論が出てくる。そこで、われわれは水深50m から100m 程度の深度範囲で潜水を行うことを念頭において、この水深領域を「中深度潜水深度」と定義した。

潜水の方法は、簡便に潜降と浮上が可能な SCUBA を利用することとして考え、短時間で浮上可能な方法として、Heliox（ヘリウム-酸素）よりもアドバンテージのある Trimix の使用を考慮した。Trimix の組成成分は、Heliox に窒素ガスを混合した、窒素、ヘリウム、酸素の三種混合ガスの形態である。Trimix は Heliox よりは少ない比率ではあるが、ヘリウムを含有することによって、空気潜水と比較し、ヘリウムの固有の特徴

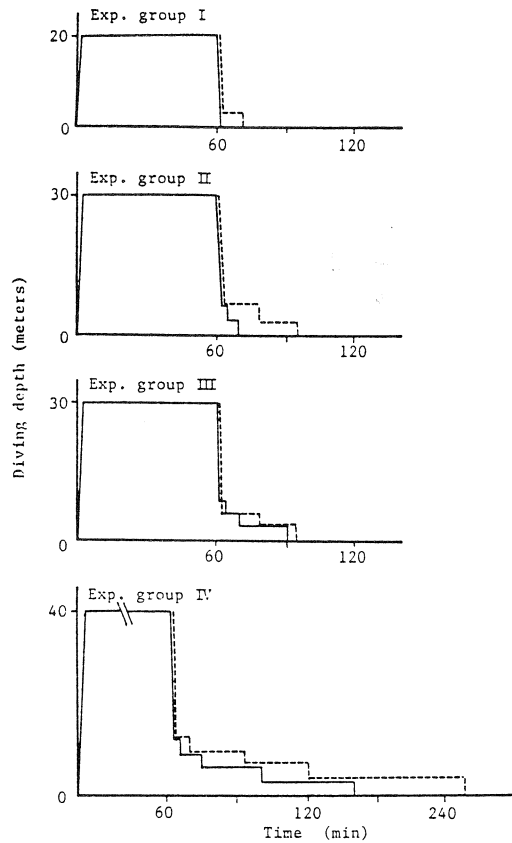


図3 Nitrox呼吸と空気呼吸によるチャンバー潜水の際の圧曝露プロフィール
 (Nitrox [実線] I, II; N₂60%—O₂40%, III,
 IV; N₂67.5%—O₂32.5%, 空気 [点線])

である、ダイバーの音声の変異、体熱損失、および窒素よりも早い飽和速度などによって、明らかに空気潜水とは違う潜水の方法をとる必要がある。しかしながら、Trimixに関する復帰減圧の方法については、公表されている部分が少なかったため、過去の実績のレポート、ヘリウム使用の際の減圧の理論的計算等、試行錯誤で新規に作成し、後に共同研究者として参加したオランダ・ライデン大学のSterk教授によって完成の域に達することができた(図4)。

3. Trimix 潜函作業

4 kg/cm²Gをこえる潜函作業では、呼吸ガスの麻酔作用や、気道抵抗の上昇等により作業の安全性が脅かされる。われわれは、8 kg/cm²G程度ま

での高い圧気潜函作業の安全な実施を可能にするため、麻酔作用がなく分子量の小さいヘリウムを含むTrimixの有用性に着目し、最大作業圧7 kg/cm²Gでの潜函作業へのTrimixの利用を想定し、高压タンクによるシミュレーション圧暴露テストをチャンバーで行いその実用性を検討した。

暴露圧力は5, 6, 7 kg/cm²Gの3種、在底時間は60分とし、被験者によるチャンバー潜水で試験を行った。Trimixの組成は最大暴露圧において急性酸素中毒や窒素酔いを生じないような酸素分圧の限界値(PO₂≤1.6kg/cm²)、窒素分圧の限界値(PN₂=3.2kg/cm²)以下となるように、N₂-He-O₂の各分圧を適宜調整した。Trimix呼吸はマスクを介して加圧時に3 kg/cm²G到達後から減圧

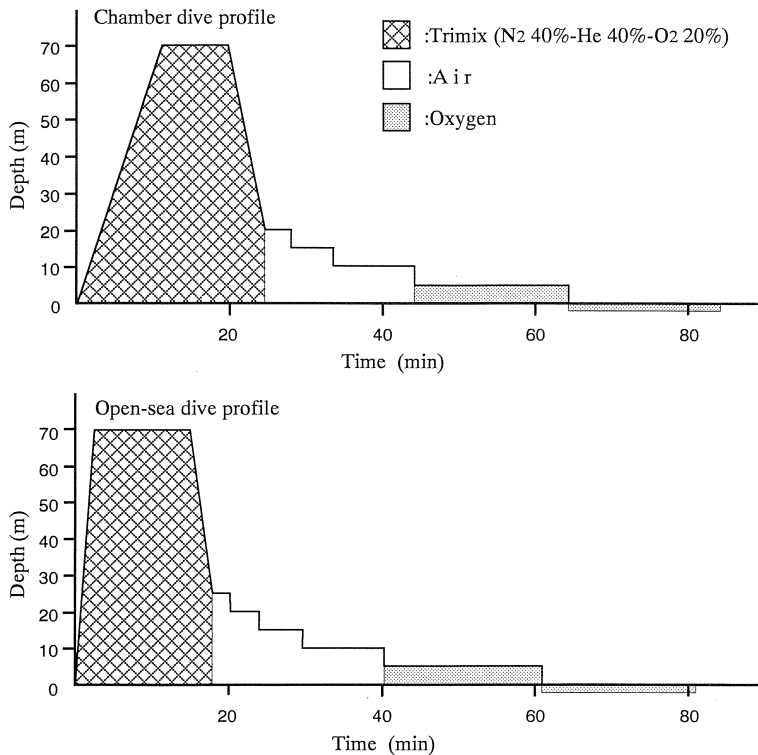


図4 Trimixによるチャンバー潜水と実海域潜水の潜水プロフィール

時の第1減圧点まで行った。その減圧は通常用いる酸素と空気の併用（酸素減圧）とともに、減圧時酸素使用不可能な際のバックアップ用として空気みの減圧（空気減圧）のテストも実施した。この際の減圧スケジュールはW. Sterkの方法によって行った。減圧スケジュールの妥当性評価のためには、減圧中、減圧後に減圧症候の有無の観察とともに、減圧終了後、超音波ドプラー法により気泡検査を実施した。

テストの結果は、高圧暴露中に急性酸素中毒や窒素酔いの症候が全く認められなかったことにより、Trimix組成の妥当性が示され、またTrimix高圧暴露後の酸素減圧についても妥当性が認められた。各圧暴露の試験において減圧症の発生はなく、超音波ドプラー法の気泡検査で腋窩静脈にわずかな気泡が出現したのみであったことからみても、減圧症罹患リスクはきわめて低いといえ、例数は少ないもののこれら減圧方法の妥当性が一応示されたといえる（図5、図6）。

おわりに

埼玉医科大学衛生学教室に設置された高圧室は、最大加圧能力は7気圧程度の中型の複室式再圧チャンバーであった（現在は他施設へ移設）。このため、大がかりな飽和潜水の様な実験は到底不可能であり、主に浅い深度、水深が最大100mまでの潜水と10気圧程度の高気圧作業で、飽和することなく、短時間の高気圧環境に滞在することを中心に実験や調査研究を進めた。

教室は教育機関の一研究室であり、大きなプロジェクトを組むことは到底出来なかったため、チャンバー潜水では、被験者の募集から、混合ガス等の手配、験者のスケジュール調整等多くの困難があり、また、実験予算の捻出には多大な苦労があった。このため、必然的に実験に参加された被験者数は限られるとともに、各種の実験条件を替えて行うことのみならず、その反面、同一事例の圧暴露プロフィールについては十分な例数の実

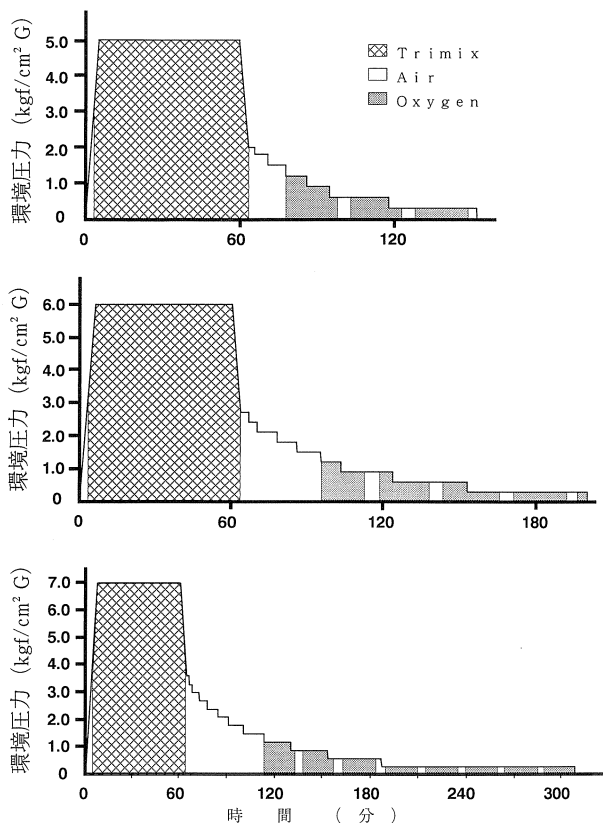


図5 Trimix 潜函作業における圧曝露試験プロフィール

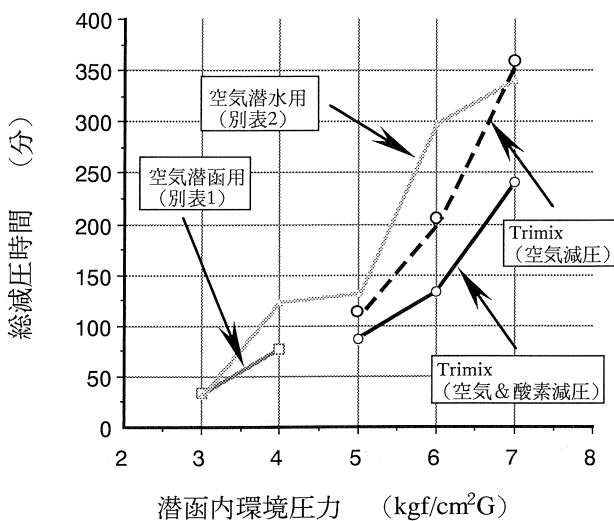


図6 Trimix 潜函において高压下での作業時間を60分とした場合の労働省減圧表と Trimix 減圧表の総減圧時間の比較

験は行えなかった。また、実験をサポートしていただいた方々も被験者と同様にボランティアであったために人数が少なく、実験部署の掛け持ちとなり安全性以外の生体情報等のデータ取りには苦労があった。これらの実験結果については、誌面の都合で記載できなかったもので、詳細については関連文献を参照していただきたいと思います。

埼玉医大では高圧環境の研究に関して、一応一連の研究活動を行ってきたが、現在は生体にとって重要な役目を果たし、臨床上ごく一般的に使われている医療用呼吸ガス、またこれらに関連する様々なガスの新しい用途を高圧環境への応用も含めて検討している。

謝 辞

研究活動の際に快く被験者となっていたいただいたダイバーの方々に多大なる謝意を表します。また、学会総会会長であり、座長であられた名古屋大学・高橋英世教授に感謝いたします。さらに、埼玉医科大学衛生学教室に在籍した際にご指導していただいた埼玉医科大学・梨本一郎名誉教授、後藤與四之客員教授に深謝しますとともに、実験の際に協力していただいた江田文雄博士、関係者の

皆様に謝意を表します。

〔参 考 文 献〕

- 1) 小林 浩, 野寺 誠, 後藤與四之, 梨本一郎: スポーツダイビングの潜水プロフィール, 日本高気圧環境医学会雑誌, 22: 163-170, 1987
- 2) 小林 浩, 後藤與四之, 江田文雄, 梨本一郎: SCUBAによるTRIMIX混合ガス潜水, 日本高気圧環境医学会雑誌, 24: 153-159, 1989
- 3) 小林 浩, 後藤與四之, 野寺 誠, 荒木隆一郎, 梨本一郎: 港湾潜水作業における潜水プロフィールと減圧症罹患リスクの評価, 日本高気圧環境医学会雑誌 28: 135-142, 1993
- 4) 小林 浩: 窒素酸素潜水の減圧時間短縮および減圧症予防効果に関する実験的研究. 産業医学, 35: 294-301, 1993
- 5) 梨本一郎, 小林 浩, 高野耕輔, 大元邦夫: 大深度ニューマチックケーソンにおける無人化施工とバックアップシステム, 基礎工, 3: 50-55, 1994
- 6) 後藤與四之, 小林 浩, 高嶋力彌, 梨本一郎: 三種混合ガス(He-N₂-O₂)潜水に用いる減圧スケジュール開発の試み, 埼玉医科大学雑誌, 22: 175-182, 1995
- 7) Kobayashi, K., Sterk, W., Gotoh, Y., Eda, F. and Nashimoto, I.: Use of trimix breathing in deep caisson work, Proceeding of 20th European Undersea Baromedical Society Meeting, Turkey, 336-341, 1994