

## ●原 著

## SCUBAによる TRIMIX 混合ガス潜水

小林 浩\* 後藤與四之\* 江田文雄\* 梨本一郎\*

われわれは1987年の夏期に、イタリア、サルジニア島の沖合いで、ジェノバ大学 Dr. Zannini の指導のもとに、TRIMIX により SCUBA 潜水で桃色珊瑚漁を行うダイバーの潜水プロフィールの調査を行った。当調査はわれわれと Dr. Zannini の研究室との共同研究として実施された。4人のダイバーから、21例の潜水プロフィールが DPRAS(潜水記録解析システム)によって得られた。静脈ガス塞栓 (VGE) はダイバーらが浮上後、超音波ドプラー気泡検知器を用いて同様に得られた。各々の潜水の潜水プロフィールから、最大潜水深度は 79.1m から 92.8m, そして在底時間は、16分から30分であった。減圧は Dr. Zannini と Dr. Magno によって計算された減圧スケジュールによって実施されていた。VGE 出現率は、47% (9/21) であった。しかしながら、ダイバーに減圧症罹患例は見られなかった。

キーワード：トライミックス, 潜水, 静脈ガス塞栓, 減圧表, 減圧症

## Deep trimix dive using SCUBA

Koh Kobayashi\*, Fumio Eda\*, Yoshiyuki Gotoh\* and Ichiro Nashimoto\*

\*Department of Hygiene, Saitama Medical School

In the summer of 1987, we investigated the dive profiles of pink coral divers who had dived with SCUBA using trimix, off Sardinia Island of Italy, under the direction of Dr. Zannini's laboratory at the University of Genova. The investigation was carried out as a joint research between his laboratory and ours. We recorded dive profiles with DPRAS (Dive Profile Recording and Analyzing System) in 21 dives of 4 divers. We examined venous gas emboli (VGE) using Doppler bubble detector after their surfacings as well. According to the dive profiles, the maximum dive depths of each dive were ranged from 79.1 to 92.8 meter and the bottom times were from 16 to 30 minutes. Decompressions were carried out according to the schedules based upon the tables calculated by Drs. Zannini and Magno. VGE rate was 47% (9/21). No bends, however, occurred among them.

## Keywords:

Trimix, Diving, Venous Gas Emboli

Decompression Tables

Decompression Sickness

## 結 言

水深 60m を越えるような深い潜水作業においては、窒素酔いや酸素中毒の危険を避け、さらに呼吸抵抗の軽減をはかるため、呼吸ガスとして空気の代わりにヘリウム酸素混合ガス (HELIOX) を用いて潜水を行うことが一般化している。しかしながら、HELIOX の使用においては、ダイバーの体熱損失<sup>1)</sup>、counterdiffusion<sup>2)</sup>等の問題があると同時に高価なガスであるために、軍事その他特殊な潜水以外には採用実施が困難である。さらに、長時間にわたる本格的な潜水作業では、ダイバーの安全をはかるために潜水ベルや、船上減圧室を組み合わせた潜水システムが用いられるが、漁業潜水や漁礁調査等の比較的短時間の作業潜水では、このような大がかりな設備の使用は経済面、運用面などから困難で事実上不可能である。

近年、これらの問題点を軽減するために空気に

\*埼玉医科大学衛生学教室

ヘリウムを、もしくはHELIOXに窒素を添加するヘリウム窒素酸素混合ガスのいわゆるTRIMIXを水深60~120m(中深度)の潜水に応用する方法が考案されてきている<sup>3)4)</sup>。一方、潜水器材もSCUBAの様な簡便な器材でダイバーが窒素酔いに罹ることなく中深度域に潜水することが可能となったが、TRIMIX潜水に関する信頼できる減圧表は現在まで公表されておらず、ダイバーは空気減圧表または、米国海軍HELIOX減圧表<sup>5)</sup>などを適宜修正して用いるしかない。そこで現在、より簡便でしかも安全なTRIMIX混合ガスを用いた潜水方法の開発と確立がハードウェア、ソフトウェアの両面から望まれているが、実際に中深度以深の混合ガス潜水を行っている場合でも、減圧方法を始めとして私企業のノウハウとなるために未公開部分が多い。

この様な現状のもとで、われわれはSCUBAでTRIMIXを用い、水深100m前後で珊瑚漁を行うコーラルダイバーについて、イタリア、ジェノバ大学のZanniniらと共同で実海域での潜水プロフィールの記録を行った。この調査の主な目的は、Zanniniらが作成したTRIMIX用減圧スケジュールが、ダイバーらによつて的確に実行されているか否かを潜水プロフィールから知ること、および超音波ドプラー法によるTRIMIX潜水後のダイバーの体内形成気泡の検査から減圧症罹患リスクを調べることであった。

#### 調査対象と方法

調査を行った場所は、地中海イタリア領サルジニア島北端のコルシカ島海峡部の海域であった。この海峡に分布する珊瑚は、水深100m前後の海底に生息しており、1943年にクスターらによる近代的なSCUBAが発明される以前から簡単な送気式潜水器を用いて珊瑚の採取が行われている。調査対象の被験ダイバーは4名であった。ダイバーらは珊瑚採集を専門としており、年間8か月間珊瑚漁を行い禁漁期間には他の職業を持っている非専門ダイバーであるが、国家認定の潜水免許を持っており、減圧表、減圧症に関する知識も比較的豊富であった。表1に被験ダイバーの年齢、体格および経験年数を示す。

TRIMIX潜水時の潜水プロフィールを測定するために、ダイバーらには潜水記録器(DMR)<sup>6)</sup>

**Table 1 The physical status and dive experiences of the pink coral divers**

Subject	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Exp. (yr.)
A	32	177	80	12
B	30	180	86	12
C	21	177	63	7
D	32	168	75	12

を潜水毎に装着した。潜水終了後DMR内の深度データは、パーソナルコンピュータ(EPSON, HC-20)に転送して潜水プロフィールとして得た。これらの潜水プロフィールから潜水作業時の最大水深、在底時間および減圧時間を求め、規定されたTRIMIX減圧表との比較を行った。

Venous Gas Emboli (VGE)の測定は、超音波ドプラー気泡検知器(IAPM製1032G型)により、ダイバーが再圧室入室後30分から120分の間に30分の間隔で各々2分間実施し、同時にテープレコーダに記録を行い、帰国後音響フィルター(リオン社製SA-33D)を用いて詳細に解析を行い、Spencerの分類<sup>7)</sup>に従って評価を行った。

#### 調査結果

##### 1. TRIMIX混合ガス

TRIMIX混合ガスは、潜水深度100m以上用と100m以下用の2種類を、ダイバーら自身が空気とヘリウムを混合して作成した。混合ガス作成の際には、充填温度上昇による空気とヘリウムの混合組成の変動を抑えるために、充填回路内の温度計でシリンダー内が高温にならないように確認を行いながら、ゆっくりと充填を行い、前者の $PO_2$ は0.1bar、後者の $PO_2$ は0.15barに調整された。

##### 2. 潜水装備

ダイバーらは、通常のウェットスーツ(厚さ5mm)と開放式SCUBAを用いていた。海中の約20m以深は水温が低いと同時に、ダイバーはヘリウムガスを呼吸するので防寒のためにウェットスーツ、フードおよび足袋は、2枚から3枚重ねて装着していた。SCUBAのシリンダーは一回の潜水に対して、TRIMIX用として18リットルシリンダー(220~240気圧充填)が2本、空気用として



Fig. 1 The pink coral divers on the board

15リットルシリンダー(220気圧充填)が1本の合計3本を使用していた。ウェイトは、3本のシリンダーが重く、オーバーウェイトになってしまうため装着はしない。また、バラシングベストは、パワーインフレーター(浮力調整具)を装着していた。減圧の際の呼吸ガスホース(酸素、空気)には、交信ケーブル、温水ホースなどを組み合わせ、一つに束ねて使用していた。温水は約40℃あり、船上の湯沸器で作り、高圧ポンプでダイバーまで送っていた。交信には、通常のマイクスピーカーとアンプを用い、ヘリウムボイス変換器は使用していなかった。船上の再圧室は容積2.3m<sup>3</sup>の単室型で、素材には軽量ケブラーを使用し最大加圧々力3bar、酸素呼吸装置はCOMEX社製のダイビングシステムで、呼出酸素を室外へ放出するようにしていた。

### 3. 潜水形態

ダイバーらは、Fig. 1に示す様に海面から3本のポンベを使用して潜降し、潜水作業終了後TRIMIX減圧表により段階的に浮上し、水深12mにおいて酸素減圧を開始、規定の時間滞在後に海面への浮上を行い、浮上後直ちに船上の再圧室に入り、酸素を用いる船上減圧を行っていた。呼吸用ガスについては、潜降開始から作業終了後の浅

海域まではTRIMIXを、またそれ以降酸素減圧に入るまでは空気を各々のレギュレータを介し呼吸をしていた。潜水回数は、1日1回を原則として遵守していた。

### 4. 潜水方法

潜水作業の手順は、以下のごとくであった。

- ① 潜水船のロラン航法装置により未潜水地点を選択し、魚群探知機により正確な深度を測定後、最適なポイントを探し(起伏がある様な海底)、ブイに石をつけた目印を落とす。
- ② ウェットスーツ着用。時計は、デジタル式とアナログ式の2個を両腕に装着。また、両手には、網とハンマーを持ち、腰には目印用のブイと珊瑚の網を上げるためのためのロープ付きビニール製ブイを装着する。
- ③ ポンベを背負い、ボートの縁に座り、ブイのところへ近づくとテンダーが秒読みを始め、ダイバーは計時を開始して、瞬時にエントリーを行う。このエントリー時には、4名のダイバーのうち2名はTrimixガスを、他の2名は空気のレギュレータで潜降時に呼吸を行った。
- ④ 水深50m近辺でTrimix呼吸を開始し、水深80~100m近辺にて珊瑚採集を行う。
- ⑤ 海面では、船上のテンダーがダイバーらの気

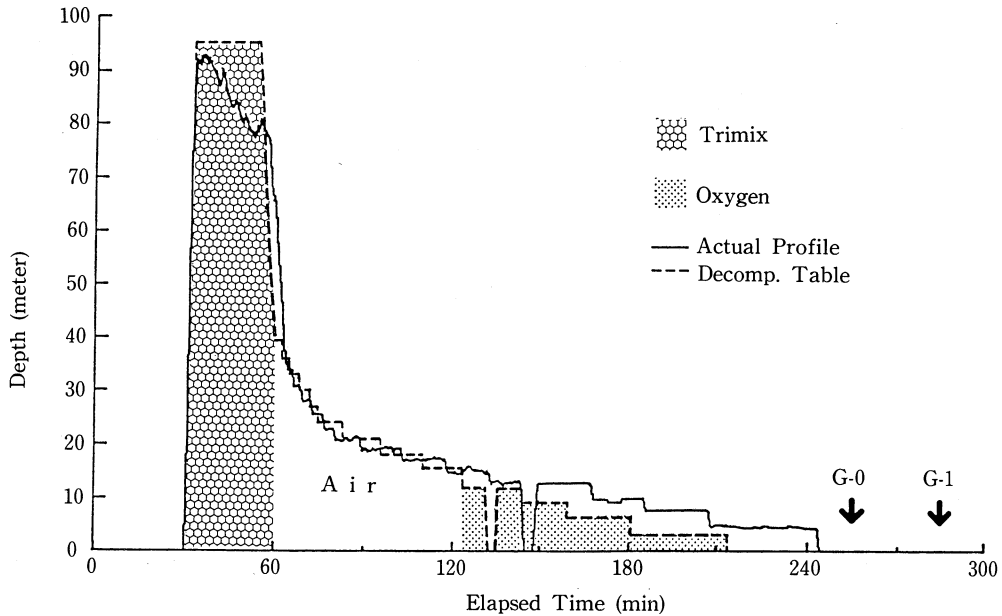


Fig. 2 The comparison of an actual dive profile and trimix decompression table with VGE grades.

泡を追いかけて、その近辺を回旋し、約20分経過すると1個目のブイが浮上するので、これを監視する。

- ⑥ 海底のダイバーが1個目のブイを放って、テンドーが回収すると、その紐にブイを付けて放す。
- ⑦ 2個目のブイの赤いビニール袋のブイが浮上すると、それをめざしてポートを進めブイを回収して、そのラインに直径20mm、10kgのアンカー付きのロープをカラビナをガイドにして約50m降ろす。
- ⑧ ロープが降りるとそのラインに呼吸装置などを付けて降ろし、ダイバーの呼吸音が聞こえると、通話装置により交信を始める。
- ⑨ ダイバーの減圧開始が確認されると、ブイの付いたラインを引き上げると末端に珊瑚の入った網袋が付いている。
- ⑩ ダイバーは温水ホースを、首筋から背中に入れて浮上停止を開始する。浮上停止の姿勢は、下がり綱に手でぶら下がり減圧表を見ながら停止時間を行う。減圧停止時間の管理は、ダイバー自身が行う。
- ⑪ 海中から浮上後、即座にスーツを脱ぎ、約3

分以内には再圧室に入る。

- ⑫ 再圧室の内圧は、12mもしくは9mに加圧し、9mから酸素呼吸を開始する。
- ⑬ 再圧室での減圧終了後、次の組のダイバーが同様の手順によって作業が行われる。

## 5. 潜水プロフィール

4名のダイバーから総計21例の潜水プロフィールが得られた。その代表的な潜水プロフィールをFig. 2, 3に示す。Fig. 2の潜水プロフィールからは、最大潜水深度が92m、在底時間は予定の減圧スケジュール通りに正確に25分であった。またFig. 3に示す潜水プロフィールでは、最大潜水深度が82m、在底時間は25分であった。両者の潜水プロフィールとも、深い深度まで潜降を行い、徐々に浅い深度に移動する作業パターンを実施していた。Fig. 2およびFig. 3の点線は、各々の潜水プロフィールに使用された減圧表であるが、実際の潜水では、所定の減圧スケジュールよりも約20分程度減圧を延長していることが知られた。

21例の潜水の最大深度と在底時間は、表2に示すごとくであった。最大潜水深度は79mから92mで、在底時間は16分から31分であった。

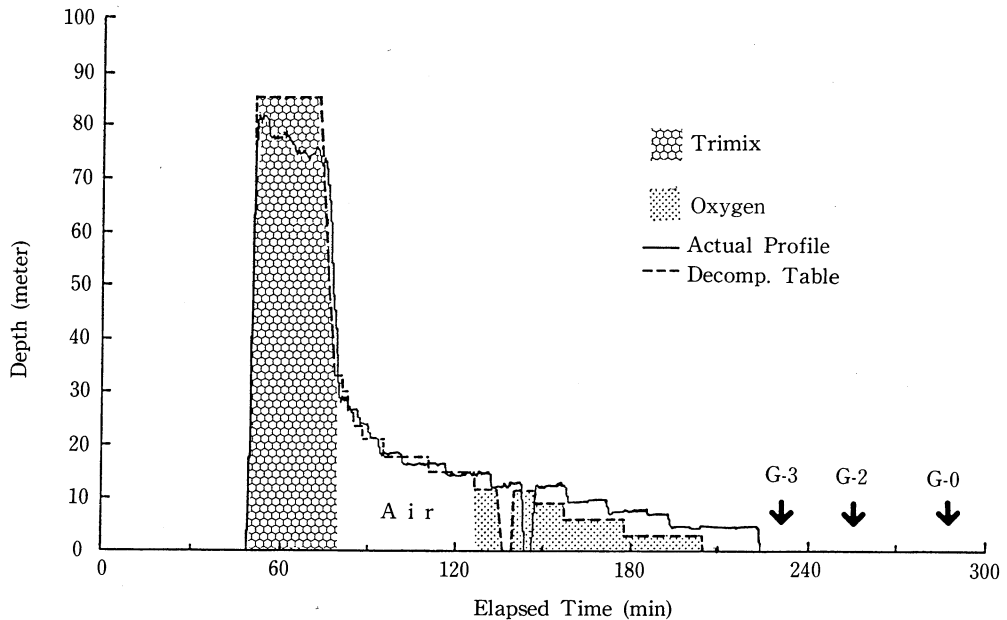


Fig. 3 The comparison of an actual dive profile and trimix decompression table with VGE grades.

## 6. 減 圧 表

ダイバーらの減圧症罹患リスクを減らすこと、および中深度域での在底時間の延長を目的として、Zanniniらは、空気潜水による潜水を行っているダイバーらに、TRIMIXでSchreinerの減圧理論<sup>8)</sup>に基づき作成した減圧スケジュールを使用させている。減圧表の深度/時間区分の詳細は、確認することは出来なかった。

## 7. V G E

超音波ドプラー気泡検知器によるVGEの検査において、21例中9例(43%)のダイバーにVGEが認められた。これらのダイバーのうち、最大のグレードは、G-4であった。表2に被験ダイバーのVGEの最大値を示す。

## 8. 減 圧 症

今回の調査時点でのダイバーらに、減圧症罹患者は見られなかった。

## 考 察

コーラルダイバーの多くは現在でも空気潜水を行っているが、1970年代以降にHELIOXを導入するダイバーもおり、この場合は米国海軍の減圧表と経験を併用した潜水方法を行っている。空気潜水での重症減圧症例が多いため、ZanniniらはTRIMIXと、その減圧表を特定のコーラルダイバーらに使用させ、減圧症罹患の有無を調べたことを1986年以来実施し、その結果この年の一年間においては、減圧症が皆無であり、空気潜水、HELIOX潜水と比較してより優れていたと報告<sup>9)</sup>している。しかしながら、空気、HELIOX減圧表の評価が同時に行われていないので、TRIMIXの潜水プロフィールのみでこれらを単純に比較評価することは困難であった。

さらに、Fig. 2, 3の潜水プロフィールから、ダイバーらは減圧スケジュール通りに在底時間は遵守するが、減圧スケジュールを自己の経験や、その時の状況によって多少延長することが知られたので、減圧表と減圧症の関係を正確に反映しているとは考えにくい。これはこれまでの潜水経験から、少しずつ減圧時間を延長する何等かのファク

Table 2. The maximum dive depth, bottom time and maximum VGE grade of the each dives using trimix

No.	Subject	Max.Depth (m)	Bottom Time (min)	Max.VGE Grade
1	A	92.1	25	1
2	B	86.0	24	4
3	C	92.1	26	0
4	D	89.0	29	0
5	B	87.9	21	2
6	D	92.8	21	3
7	D	90.9	31	3
8	B	88.6	22	0
9	C	92.1	23	0
10	B	82.9	23	0
11	A	82.9	23	2
12	C	80.6	16	4
13	D	81.7	26	3
14	C	81.7	26	0
15	B	79.1	26	0
16	A	79.1	26	0
17	B	79.1	24	0
18	A	81.0	29	0
19	D	81.0	29	4
20	B	82.9	30	0
21	C	82.9	30	0

ターをダイバーらが付け加えているためであり、実海域における減圧表と減圧症罹患リスクの評価を行うことは、ドライチャンパーにおける評価方法による管理された潜水と明らかに異なることが知られた。

TRIMIX潜水での減圧症およびVGEに関する報告が現在皆無であるため、比較検討が困難であるが、今回のVGE測定結果から、ダイバーらにVGE検知率が高く、検知例中の気泡グレードも相対的に高い値であった。このことは、TRIMIX潜水における減圧症罹患リスクが必ずしも低くないことを示唆するとともに、超音波ドプラー法気泡検知による減圧症罹患の早期診断にも限界があることを示唆している。

Zanniniらの減圧表が、詳細を公表する過程まで至っていないために、正確な深度/時間区分を記述することが出来なかったが、少なくともTRIMIXの中深度域での潜水に実用可能なことが示唆された。

#### [参 考 文 献]

- 1) Shilling, CW., Werts, MF. and Schandelmeier, NR. Eds.: Man in the Ocean Environment, Cold, The Underwater Handbook, New York, Plenum Press, 1976, pp.230-248
- 2) D'Aoust, BG. and Lambertsen, CJ.: Isobaric gas exchange and supersaturation by counter-diffusion, Eds. Bennett, PB and Elliott, DH., The Physiology and Medicine of Diving, London, Bailliere Tindall, 1982, 383-403
- 3) Bennett, PB.: The high pressure nervous syndrome in man, Eds. Bennett, PB and Elliott, DH., The Physiology and Medicine of Diving, London, Bailliere Tindall, 1982, pp.285-296
- 4) Berghage, TE., Denelson, C. and Gomez, JA.: Decompression advantage of trimix, 5: pp.233-242, Undersea Biomedical Research, 1978
- 5) Navy Department: Helium-oxygen surface-supplied decompression tables, US Navy Diving Manual Vol.2, NAVSEA 0994-LP-001-9020, 1979, pp.Chap.14, 15-32
- 6) 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, Vol.22:

- pp.163-70, 日本高気圧環境医学会雑誌, 1987
- 7) Spencer, MP. and Johanson DC., Investigation of new principles for human decompression schedules using the doppler ultrasonic blood bubble detector, Technical Report, 1974, ONR No.0014-73-C-0094
  - 8) Shreiner, HR. and Kelley, PL.: Computation methods for decompression from deep dives, Ed. Lambertsen, CJ., Proceedings of 3rd Symp, Underwater Physiology, Baltimore, Williams & Wilkins, 1967, 275-299
  - 9) Zannini, D. and Magno, L.: Procedures for trimixi scuba dives between 70 and 100m: A study on the coral gatheres of the Mediterranean sea, Eds. Bove, AA., Bachrach AJ. and Greenbaum, LJ., Proceedings of 9th Symp. on Underwater and Hyperbaric Physionlogy, Bethesda, UHMS, 1987, 215-218