

●特集・非飽和混合ガス潜水の現状と将来

スポーツダイビングにおけるテクニカルダイビング —我が国最初の100m 潜水の事例—

後藤與四之*

A case report of the first technical diving in Japan by 61 years old diver

Yoshiyuki Gotoh*

*Department of hygiene and environmental medicine, Saitama medical school

A diver made a technical dive to 102 msw on 1996 February 3, fulfilling a dream he's had since he was a young man. He had set this as a goal for his 60th birthday. His gas was supplied by open-circuit scuba. The breathing gas was a heliox (12%/88% O₂/He). An intermediate gas of 36% oxygen enriched air and DDC was used. The decompression table was prepared by Dr. R.W. Hamilton. A number of safety factors were used. Two remotely operated vehicles with TV cameras monitored the operation. In addition to those mentioned there was a chamber on board the vessel, and two medical hyperbaric chambers were alerted. Spare gas was available on the stage, both in tanks and by umbilical. Lighting was bright enough so that the sea bottom could be seen from the stage. Perhaps the most important was a health check up since 15 months before the diving. As he has a tendency of hypertension in recent years, he was examined by a cardiologist using treadmill, Holter ECG, brain MRI and coronary angiography. The final assessment of his cardiac function was within normal limit. And ECG record of 102 m dive shows normal ECG except bradycardia on the time of decompression.

Keywords :

Sports-diving
Technical diving
Decompression
Deck-decompression

はじめに

非飽和混合ガス潜水はヘリウム酸素混合ガス (heliox) やヘリウム窒素酸素の三種混合ガス (trimix) あるいは高濃度酸素の窒素酸素混合ガス (nitrox) を使用し、減圧時には酸素呼吸をするのが一般的である。したがって医学的な専門知識のバックアップが必要である。そのうえ船上減圧室 (DDC, Deck Decompression Chamber) や PTC (Personnel Transfer Capsule) と言った大がかりな装備と、それを収載する潜水母船を要し、さらには複雑な潜水器や加温潜水服を使用するのでダイバーには特殊な教育訓練が課せられる。それゆえ混合ガス潜水は商業潜水か軍事関連の潜水作業でなければ実施されなかった。

一般にスポーツダイビングの許容水深は30m であり、プロダイバーでも空気潜水による作業は50m が国際的な限界とされている。しかしながら非飽和混合ガス潜水技術が1986年頃より米国では一部のスポーツダイバーに導入され始めた。その理由は洞窟探検に際し窒素酔いの対策であったと言われている。すなわち空気潜水で許容水深を越える深深度潜水を行うならば、窒素酔い、酸素中毒、呼吸ガス密度の増加による呼吸抵抗の増大とそれに付随する二酸化炭素中毒などにより冷静沈着なダイビングが出来ないからであった。

スポーツダイビング界では混合ガス潜水を用いた潜水をテクニカルダイビングと呼んでおり、テクニカルダイバーは高度な知識と技術をマスターすること自体にも喜びを感じているようにも見受けられるが、実施に当たってはプロダイバー同様の装備が必要である。すなわち高価な heliox や trimix は実際の使用量の2~3倍量を確保しなければならず、減圧時に使用する nitrox も必要で

*埼玉医科大学衛生学

ある。また深深度に於いても呼吸抵抗が少ない信頼性の高い呼吸システム、通話システム、保温システム、支援船そしてサポートダイバーの確保などで、莫大な出費を要するものである。

我が国でも長年スポーツダイバーの指導に携わってきた一人のダイバーによって最初のテクニカルダイビングが行われた。その動機は33年前に空気潜水で100m潜水にチャレンジしたが、窒素酔いと酸素中毒などに対する対策が不十分であったので到達できず、90mの水深からかろうじて生還したが、還暦を迎えたのを機会に改めて最新の装備と知識を駆使して夢を実現することになった。

本事例は単に100mまで潜るだけなので、商業潜水ならば報告するほどの深い潜水事例ではないが、安全にテクニカルダイビングを行うに際しどのように配慮がなされたかが重要なので報告する。

方 法

1. 潜水に使用する呼吸ガスの選定と減圧方法

まず水深100mに滞在するのは2～3分間として、潜降開始から第一減圧停止水深に達するまで時間を15分間とする基本的な減圧スケジュールを作成した。当初チャレンジダイバーはすべて自力で泳いで潜降浮上するプランであったが、100mの海底に滞在するチャレンジダイバーを直接監視するサポートダイバーも自由遊泳とする訳にはいかず、また減圧途上には呼吸ガスを交換しなければならぬので水中エレベーターを兼ねた潜水ステージを使用し、サポートダイバーはステージ上に待機することにした。そして、両ダイバーの90mまでの潜降浮上はステージごとに昇降し、チャレンジダイバーのみ90～100mを自力遊泳することにした。さらに長時間の水中減圧はダイバーばかりでなく支援スタッフにも過大な負担を掛けるので、再圧室を使用した船上減圧法を採用することにした。

減圧スケジュールは著者と R.W.Hamilton Ph. D. (Hamilton Research, Ltd.) とで作成した。最深部で使用する呼吸ガス(ボトムガス)は水深100mともなると trimix は減圧時間短縮上のメリットがないので heliox とした。酸素中毒予防のためにボトムガスの酸素分圧は1.6ATA以下に設定しなければならないので、ボトムガスはヘリウム88

%酸素12%とした。また浮上に際しては体内に溶け込んだヘリウムの排出促進目的で高酸素濃度の nitrox を使用することにした。

15分間の潜水計画とはいえ減圧スケジュールは、何らかの原因で所定の水深よりも深く行ってしまった場合と、予定の潜水時間内に浮上が始まらなかった場合の減圧スケジュール、さらに100mに到達直前で断念し急いで浮上させねばならない場合の減圧スケジュールも作成しなければならない。本事例では実施予定のスケジュールは水深100m15分潜水であったが、100mの減圧スケジュールについては5分、15分、20分そして30分間までの減圧スケジュールを作成した(図1)。さらに水深が100mを越えてしまった場合にも対処できるように水深107mの減圧スケジュールも4種類作成した(図2)。ちなみに100m15分潜水では潜降開始から浮上まで水中に滞在するのは73分間であり、それに続く船上減圧が終了して減圧が完了するのは潜降開始152分間になる計算であった。一方最長の107m30分間潜水では水中に滞在する時間は150分で、船上減圧完了までは317分掛かるスケジュールであった。

2. 潜水機材と支援体制

減圧スケジュールを確実に実施するには総重量数百キロにもなる潜水ステージを所定の速度で昇降できるウインチを備えた潜水母船が必要であった。また母船にはダブルロックの再圧室(第2種装置)を搭載するので500トンと大きな船をチャーターした。使用する潜水器は潜降から第一減圧停止点までは全面マスク式のオープンサーキットのスキューバ式潜水器を使用し、14リットル200Kg/cm²G 充填のダブルタンク(内容量大気圧換算5.6m³)を背負うこととした。ステージ到着後海面へ帰還するまでは母船からの送気式(surface-supplied)潜水器にとり替え水深45mから33mまでは空気を呼吸し、水深33mから水面までは酸素濃度36%の nitrox で呼吸するようにした。なお90mまで同行するサポートダイバーは緊急時以外は常に潜水ステージにて待機するので商業潜水同様に母船からすべてがコントロールされる送気式潜水器を使用した。呼吸ガスはチャレンジダイバーと同じ組成として減圧スケジュールが同一のものを使用できるように計画した。

水中減圧終了後は速やかに浮上しサポートダイ

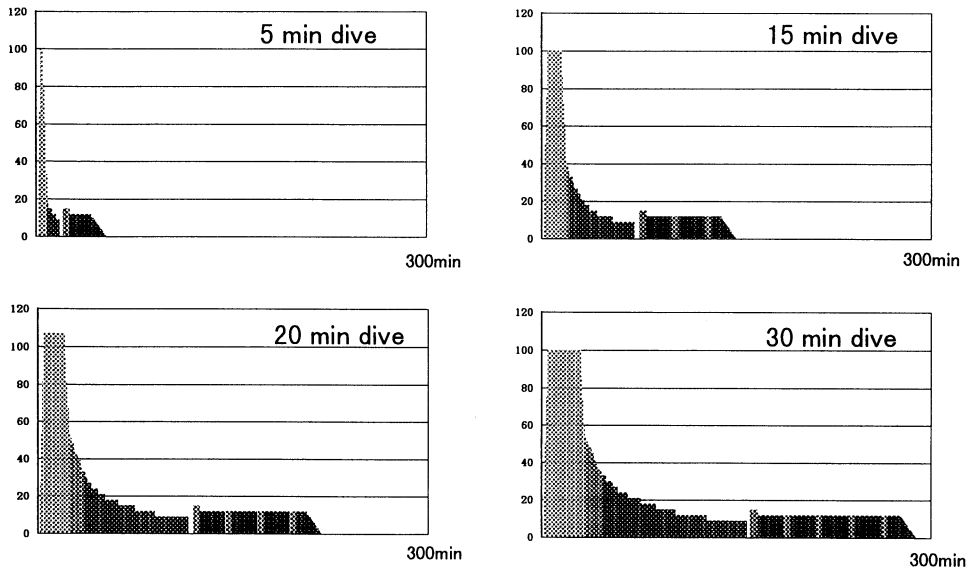


図1 100m 潜水の減圧スケジュール

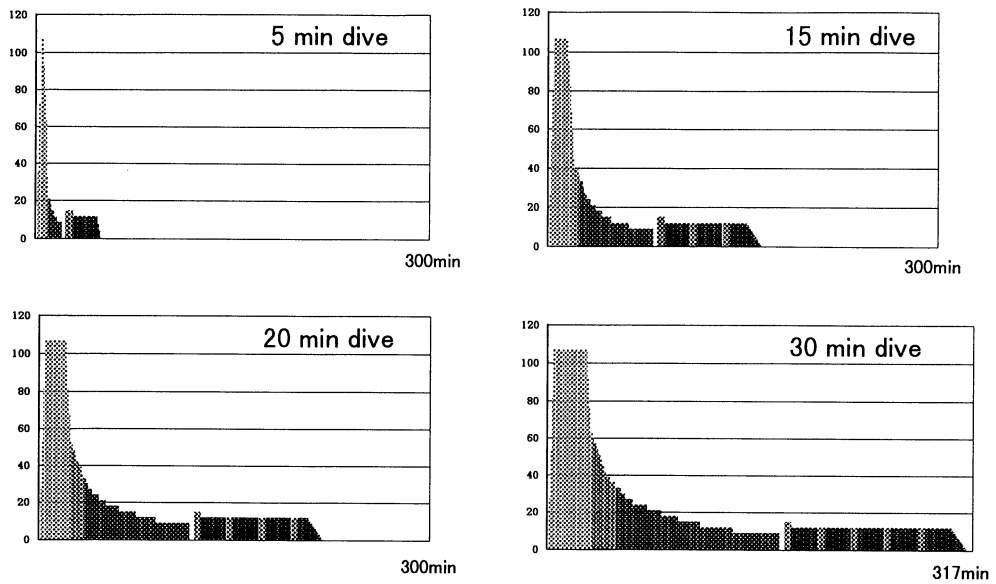


図2 107m 潜水の減圧スケジュール

バー共々潜水服のまま3分以内に船上減圧室に入り、直ちに水深15m相当圧に加圧し、20分間の酸素呼吸と5分間のエアブレイクを繰り返しながら図1のようにして減圧していく船上減圧スケ

ジュールとした。なお船上減圧室は緊急時には再圧室として使用するの、重症減圧症に対する再圧治療スケジュールであるCX-30が実施可能とすべく医療用酸素のほかにヘリウム50%酸素50%の

治療用混合ガスも配管した。

水温は10℃以下になると予想されたので保温対策としてドライスーツ内に熱伝導率の低いアルゴンガスを注入するようにした。そのほか監視カメラを兼ねVTR記録用にROV (Remotely Operated Vehicles) を2台使用した。指揮系統には母船上にコントロールパネルを設置し商業潜水同様にスーパーバイザーが潜降から浮上までのすべての指揮を司った。さらにこの他にも支援ダイバーや潜水機材の管理者、ガス供給システムの管理者、緊急医務班などの多くの支援スタッフが参加することとなった。

3. ダイバーの健康管理

チャレンジダイバーの健康管理を担当したのは順天堂大学医学部循環器内科の河合祥雄医師である。テクニカルダイビングに備えた健康管理は潜水に先立つ15ヶ月前より開始され、初診時の所見は以下のごとくであった。

理学的所見には異常はなく、血圧146/86 mmHg、脈拍74整、呼吸数16、胸部X線写真正常範囲、心電図所見はマスター2段階負荷心電図にて軽度のJ型ST低下。息を止め冷水囊で顔面を覆う潜水反射では35~40秒後に洞調律抑制、結節性期外収縮がみられ、中止後には心房性期外収縮、結節心室癒合収縮を認めたが病的なレスポンスではないと判断された(図3)。したがって結論的には100m潜水を断念すべき所見はないが、それまでの健康診断記録の血圧が年を追って上昇しつつあったことより循環器機能の管理には細心の注意を払うこととなった。

その後プールでの遊泳や息こらえ潜水などのトレーニングをほぼ毎日行い、家庭での血圧測定では156/88~135/81mmHgであったが、潜水前3ヶ月に再度詳しい健康診査を行った結果、血圧は156/100mmHgとやや高値であった。潜水反射の再検では結節調律のみで、中止後も上室性期外収縮のみであった。心臓超音波検査による左心室壁厚測定では心室中隔、左室後壁とも11mmの正常範囲であった。MRアンギオグラフィでは前交通枝に小さな動脈瘤を思わせる異常陰影を認めた。そこで経静脈造影剤点滴によるデジタルサブトラクション(減算)脳血管撮影を行ったが結果は正常血管像であった。したがってMRアンギオグラフィで疑われた前交通枝の動脈瘤様の所見は血

管の重なりであったと判断した。

トレッドミル負荷心電図ではすでに負荷前の安静時より血圧は上昇していた(190/101~206/116 mmHg)。運動により血圧は更に上昇し9分後には267/113mmHgに達した。心拍数も毎分160を越え、極めて高いダブルプロダクト値を示した。これに伴い負荷6分後よりI, II, aVF, V₄₋₆誘導にJ型ST低下が出現し(図4)、10分後には心室性期外収縮の出現をみたので運動負荷を中止した。J型ST低下は負荷後8分間でも消失しなかった。なお負荷量はステージ4で16METs相当であった。したがって年齢的には過度の運動負荷状況においては心筋虚血を示す心電図所見であり相対的虚血を想定した。100m潜水という通常知られていないストレス下では冠状動脈疾患発症基盤がわずかでも存在するならば、予想外のレスポンスを起こすかわからないので、慎重を期して冠状動脈シネアンギオグラフィーも施行した。予想通り冠状動脈には狭窄病変はなく、左心室収縮も良好であった。

血圧上昇は各種検査を受ける際などの精神的緊張を強いられる際に見られたことより、アンギオグラフィ検査入院中から緊張をほぐすよう指導した結果、退院後の2ヶ月間の血圧は平均で収縮期血圧129±11.4mmHg 拡張期血圧78±5.4 mmHgと安定した。

ホルター心電図記録はスイミングプールでの遊泳時と、水深51mの海において空気潜水でのトレーニング中に測定を行った。その結果プールでの記録は26,169心拍中に心室期外収縮が2拍あり、潜ると徐脈と上室期外収縮が認められた。一方海での潜水トレーニング時の全記録中(77,176心拍)には心室期外収縮が15拍あったが、実際に潜っている時間内には不整脈は認めなかった。潜水後の血圧は147/83mmHgであった。

結 果

潜水母船の都合から実施は厳冬の時期と決まり、潜水場所はその時期に風となる伊豆八幡野沖となった。数日間の余裕を持った日程で準備し天候がベストとなった1996年2月3日に100m潜水は実施された。

早朝からシンカーを用いた母船の固定や潜水機材の最終点検、ROVの作動確認、ダイバーとの通

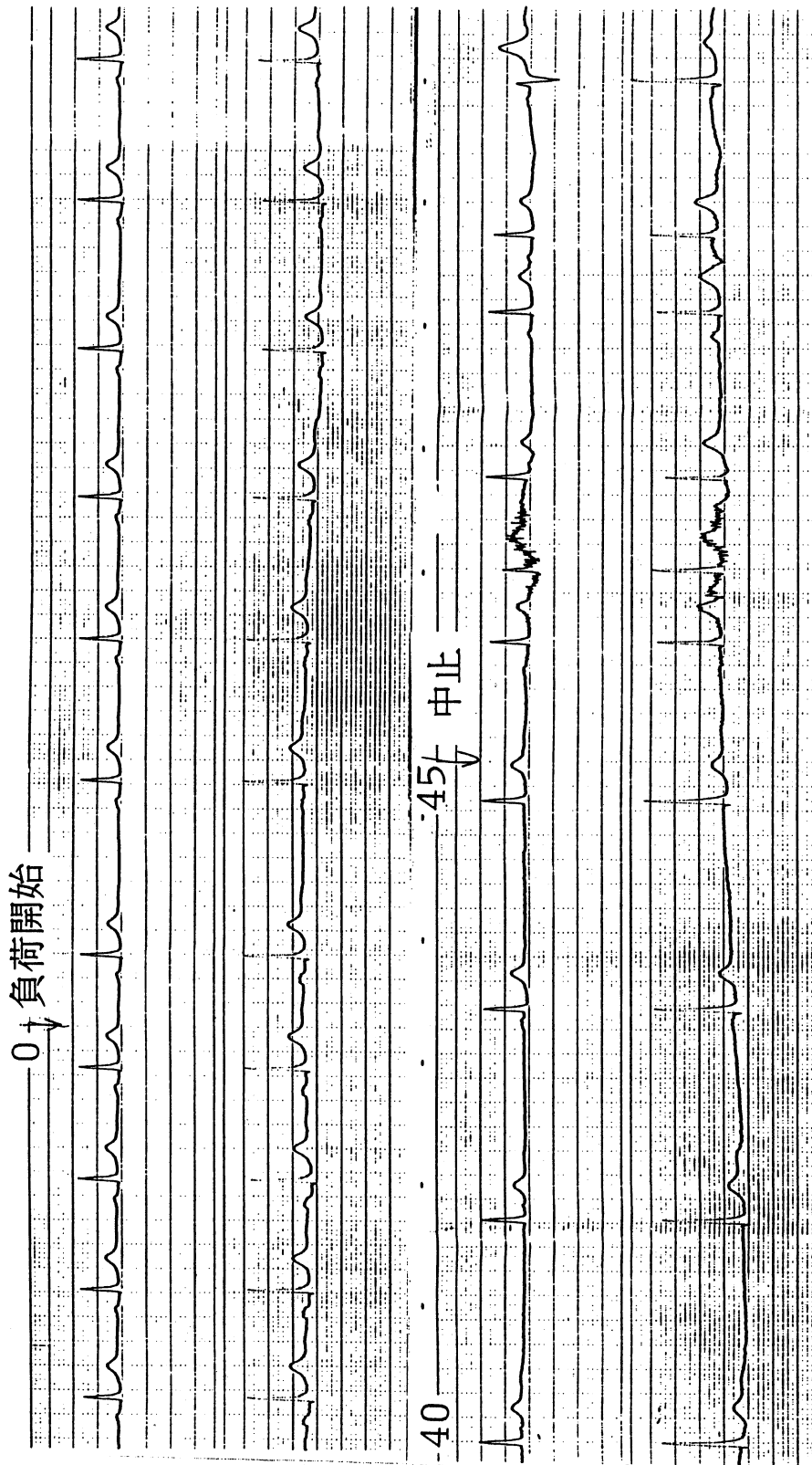


図3 潜水反射 (第1回)

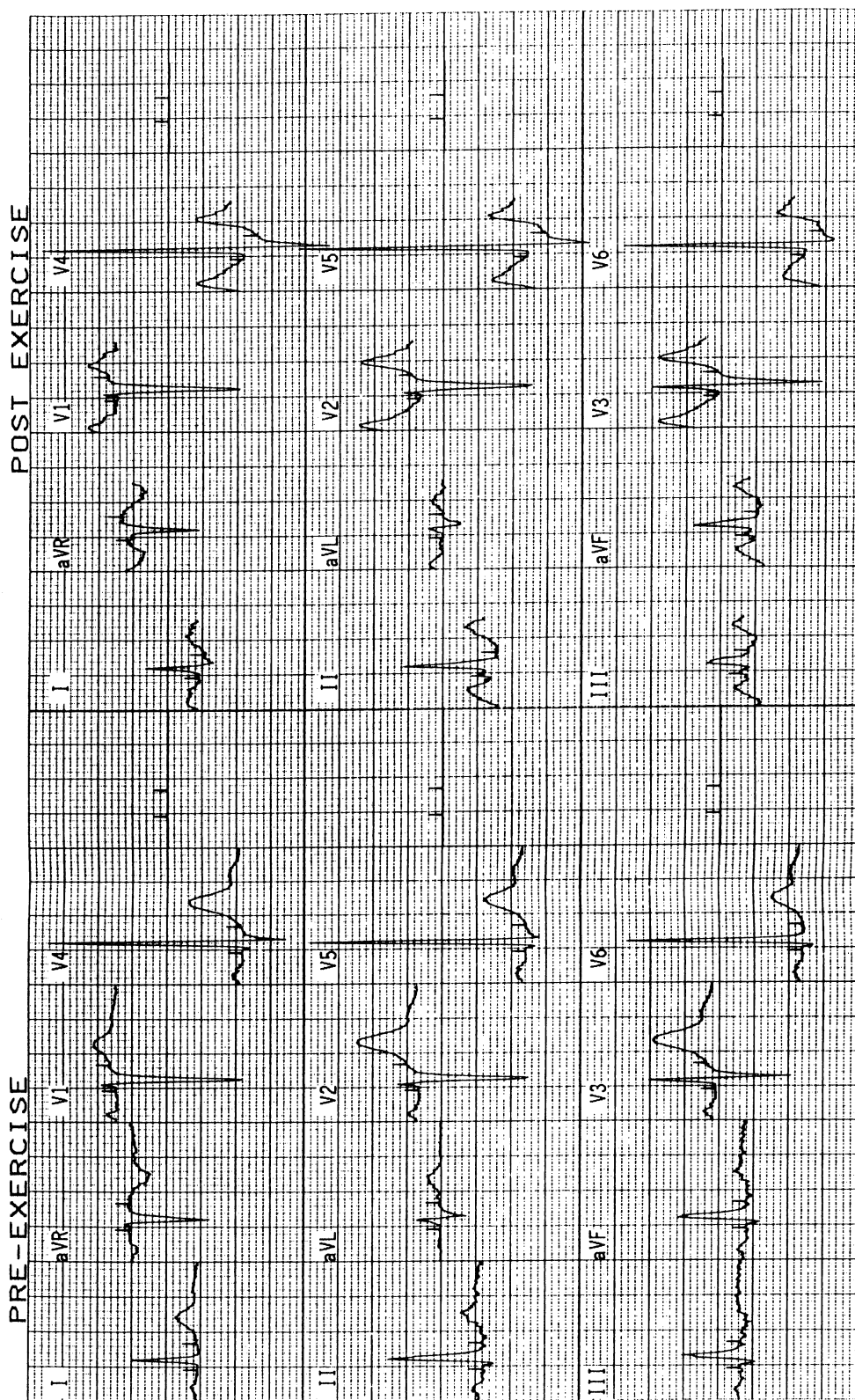


図4 トレッドミル負荷心電図

話回路の点検, ガスサンプリング, 医師の診察による体調のチェックなどを行い潜水は午前11時24分に開始された。

潜水ステージの急激な降下は危険なので, まずサポートダイバーを乗せたステージが降ろされ, 3分遅れてチャレンジダイバーは潜降し水深25mで合流した。チャレンジダイバーの潜降開始後7分40秒後にステージは90m地点に達し, チャレンジダイバーはそこからは自力遊泳で下降し午前11時35分海底の102mの地点に到達した。海底ではROVから102mにいるダイバーの様子を確認し, その様子をVTRカメラで撮影後すみやかに浮上を開始し15分間の制限時間内に水深90mで待つステージに戻った。ステージ帰還後はすべて母船上のスーパーバイザーの指示管理のもと浮上し, 予定通り水深45mでスキューバから送気式の潜水器に交換し空気呼吸に替えた。さらに水深33mからは酸素36%のnitroxに切り替え, 潜降開始から88分後の12時55分に浮上を完了した。船上減圧室への移動は速やかに行われ2分半のうちに水深15m相当圧に加圧された。ここまでの減圧スケジュールは100mを2m程越えていたので誤差も考慮し107m15分潜水のスケジュールを使用した。以後の船上減圧スケジュールには余裕があったので実際の潜水時間より長い107m20分潜水の船上減圧スケジュールを実施し, 潜降開始から3時間37分後の午後3時04分にロックアウトした(図5)。

なおホルター心電計を用いてこの潜水中連続して記録できた心電図は図6である。潜水開始後脈拍は減少し毎分80前後で安定し, 102mに達した時点においても脈拍変動や不整脈の発生はなかった。浮上に際しては後半より毎分46の洞性徐脈を示し, 船上減圧室でも同様の洞性徐脈を示した。潜水の全経過を通し心室期外収縮は1個, 上室期外収縮は数個であった。100m潜水後の血圧は179/97mmHgであったが, 翌日以後は収縮期120~130mmHg 拡張期80~70mmHgであった。

考 察

本事例はわが国では初めてのテクニカルダイビングであるが, 60歳を過ぎたとはいえチャレンジダイバーは長年潜水作業にも従事した経歴の持ち主である。また支援グループは潜水母船のクルー

を始め多くのプロ集団の支援を得たものであった。このことは混合ガス潜水を用いるテクニカルダイビングは営利目的でないからと言っても, それをこなす技量が有りしかも周到な準備と有能な支援スタッフがいて初めて成功するものであることが示されている。

減圧スケジュールの作成はHamilton博士の作成したコンピュータソフトであるDCAP Plus¹⁾で計算したが, 時間通りに浮上開始が出来なかった場合や, ダイバーが遭難し海底にまでサポートダイバーが収容に行かねばならなかった場合, あるいは100m到達の直前で緊急浮上をしなければならなかった場合を想定したオプション減圧スケジュールを作成した。さらに予定より深く潜ってしまった場合も同様のオプションを作成し, 合計8種類の減圧スケジュールを作成した。こうした配慮は必要不可欠でありトラブルが起こってからでは間に合わないので, 立案と同時にケーススタディーを十分に行っておかねばならない。

潜水機材に関するトラブルはテクニカルダイビングでは生死に関わる問題である。チャレンジダイバーは33年前に空気潜水でバディーダイバーと同じ装備で90mまで到達した時点で意識が混乱しかろうじて引き上げられたそうだが, その原因は窒素酔いと推定される。しかしながら酸素分圧は2.0ATAに達しており, そのうえ加圧による空気の粘性増加で呼吸抵抗が増しており換気不全による二酸化炭素の蓄積状況下である。さいわい急性酸素中毒の痙攣発作に見舞われなかったので生還出来たのであろう。今回はhelioxを使用しこの問題は克服され, 減圧時にも効率よく不活性ガスを排泄促進出来るよう高酸素濃度のnitroxが使用されたが, もしテクニカルダイビングがなまはんな知識で行われるならば大変危険なことである。もし今後テクニカルダイビングを試みるスポーツダイバーが増えるならば, そのリスクを明示し安全確保について専門家のアドバイスを受けるよう指導すべきである。

高齢なスポーツダイバーがいつまで潜れるかについての年齢制限は国際的にも見当たらないが, Edmondsらは45歳以上では心疾患のリスクに関するアセスメントを受けることを推奨している²⁾。すなわち虚血性心疾患はダイビング中の死亡事故の背景因子としてもっとも重要であるとの

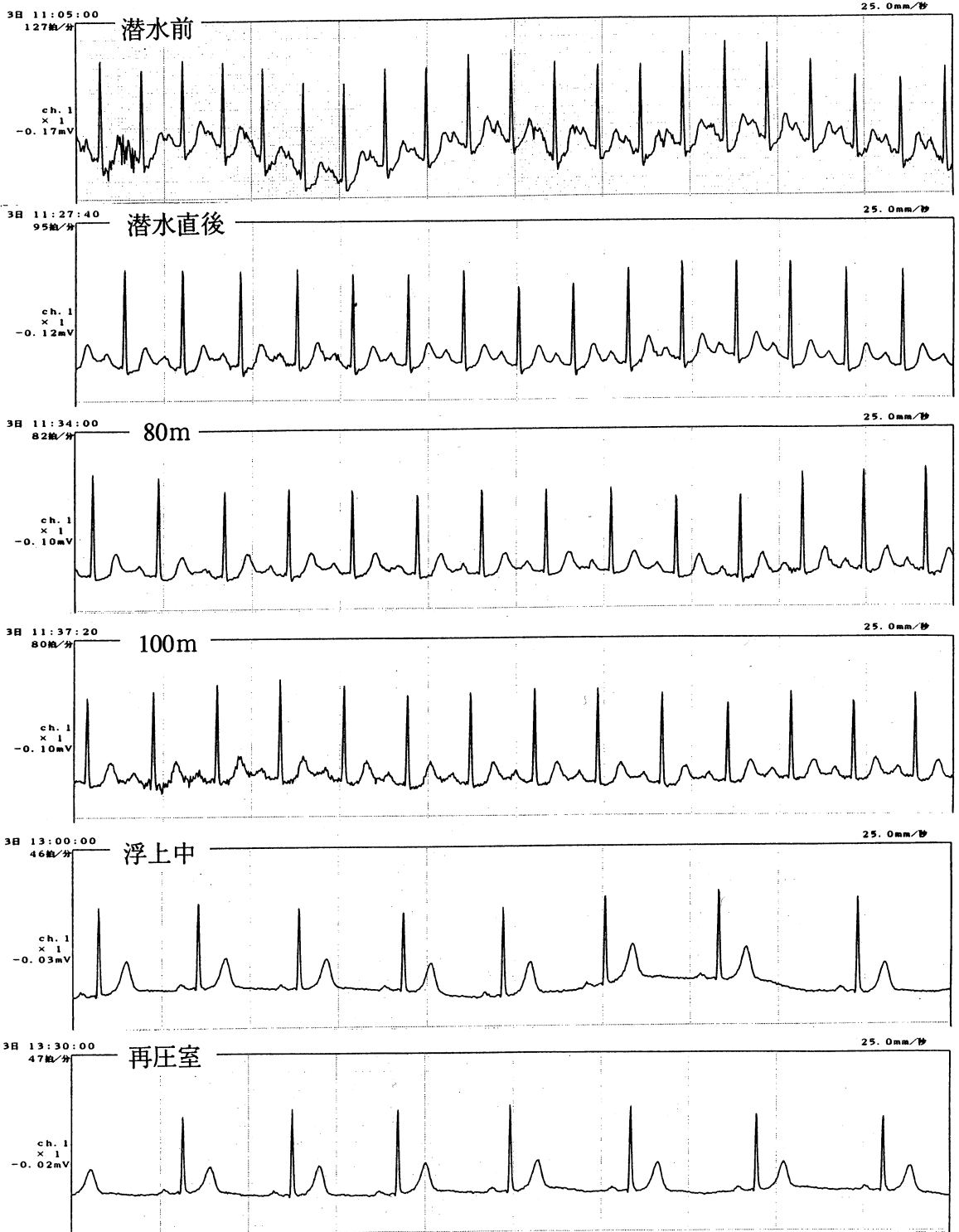


図5 102m 潜水水中のホルター心電図

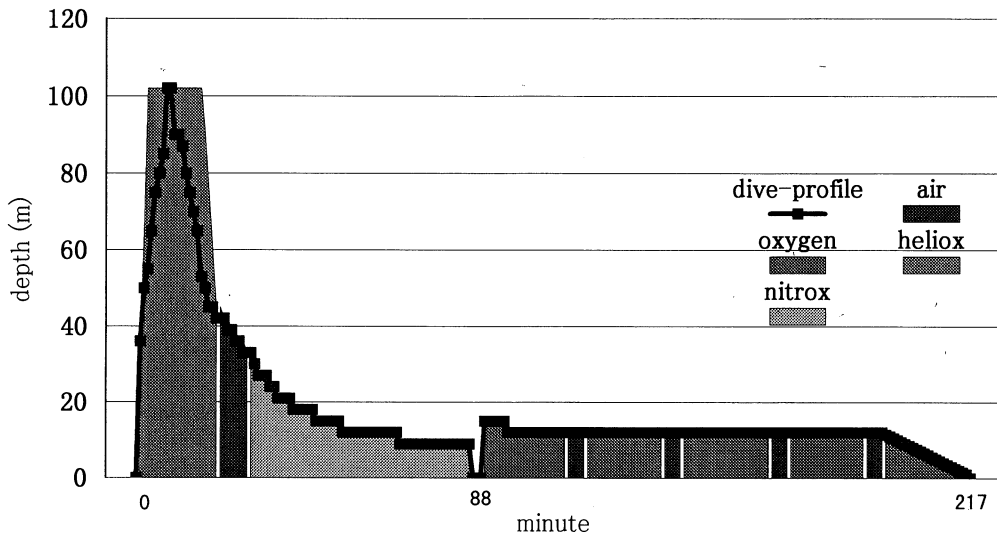


図6 102m テクニカルダイビングの潜水プロフィール

報告³⁾や、潜水事故死亡例に心臓発作が多かったとの報告⁴⁾もある。本事例でもダイバーの健康管理は特別に重要な課題であった。それは高齢であり、しかも境界型高血圧であったからである。また一般に高齢になるほど減圧症罹患リスクが増大することが知られているが⁵⁾、この点に関してはテクニカルダイビングでは一般にカスタムメイドの減圧スケジュールを作成するので、より安全サイドのスケジュール作成によりある程度対応は可能である。しかしながら身体能力の衰えについては正確にアセスメントを行い運動許容量を決定しなければならない。本事例では最終的には冠動脈撮影まで実施してテクニカルダイビングの可否を決定した。入院して行う冠動脈撮影にはリスクを伴うので、テクニカルダイバーすべてがそこまで検査する必要はないと思うが、少なくともトレッドミルや自転車エルゴメーターを使用する負荷心電図検査をテクニカルダイバーは受けておくべきであろう。

潜水反射の検査で見られた洞調律抑制と結節期外収縮あるいは中止後の結節期外収縮は許容範囲のレスポンスと言えよう。低水温の海底では心理的ストレスは過大となっているはずなので、もしも潜水反射に有害な不整脈が見られたならばテクニカルダイビングは断念すべきであったら

う。本事例のように本人はまったくの健康体と思っても、深深度潜水では想像を絶する困難に遭遇し過大な身体的ストレスが加わることがあり得るので、本事例のように慎重な健康診査を行う必要性が示されたと思う。

なお本事例ではデータ収集目的でトレーニング段階からホルター心電計による潜水中の心電図記録を行った。その結果、本事例では長年のトレーニング効果のためか、水平方向に遊泳するプールでの測定のほうがダイビング中よりも心電図上のレスポンスは少なかった。また100m潜水時には不整脈はなく自力遊泳時の脈拍数は80前後であり、ステージに戻ってからは純粋な潜水徐脈と思われる毎分46程度の洞性徐脈であった。

結 論

1. 我が国最初のテクニカルダイビングが還暦を迎えたダイバーによってなされた。
2. 専門家により減圧スケジュールは作成され、潜水中の呼吸ガスはhelioxから空気そして高酸素濃度のnitroxにスイッチされ、浮上後が酸素呼吸を用いた船上減圧が行われた。
3. 健康診査は潜水前15ヶ月から開始され、ダイバーには高血圧の傾向があったので事前の健康管理は循環器内科の医師により慎重になされた。

4. 潜水反射の検査や水面遊泳時の心電図にはわずかな所見が見られたが、潜水中には潜水徐脈以外はまったくの正常波形であった。

謝辞：資料を提供されたチャレンジダイバーの須賀次郎氏と河合祥雄氏に感謝します。

(参 考 文 献)

- 1) Hamilton RW & Kenyon DJ; DCAP Plus: New concepts in decompression table research, In MTS 90 Science and technology for new oceans decade Proceedings, Washington, marine Technology Society, 1990, pp738-743
- 2) Edmonds C, McKentzie B and Thomas R;

Diving medicine for scuba divers, JL Publications, Melbourne, 1992, Chap 38-p2

- 3) Edmonds C.; The statistics of diving fatalities (2), In Bennet PB & Moon RE, Diving accident management, Bethesda Maryland, UHMS, 1990, pp27-30
- 4) Mabane YG; Recreational diving medical standards: DAN in the United State, In Elliott DH ed, Medical assesment of fitness to dive, Biomedical Seminars, England, 1995, pp50-56
- 5) Gray JS; Constitutional factors affecting susceptibility to decompression sickness, In Fulton JF ed., Decompression Sickness, Philadelphia, WB Saunders Company, 1951, pp182-191