

[原著]

スキューバダイビングにおける循環生理学的指標の変化 －深呼吸の影響－

佐々木 千穂¹⁾, 吉村 恵²⁾, 伊佐地 隆³⁾

Circulatory physiological change in scuba diving
－ effect of deep breathing －

Chiho SASAKI, Megumu YOSHIMURA, Takashi ISAJI

- 1) 熊本保健科学大学 保健科学部
- 2) 熊本保健科学大学 保健科学研究院
- 3) 帝京大学医学部 リハビリテーション科

【和文抄録】

目的：スキューバダイビング（ダイビング）の安全と限界の指標を確立するための基礎データを得ることを目的とした研究のうち、今回はその1要因として呼吸方法によるダイビング時の循環生理学的指標の変化を調べた。対象：40歳代の健常女性。方法：携帯ホルタ記録器を身体につけ、防水のためドライスーツを着用し、深呼吸と通常呼吸でダイビングを行い、連続的に心電図、血圧、経皮的酸素飽和度（SpO₂）を測定し、両者を比較した。また日常生活と比較するために、ダイビングを含む24時間の連続測定も行った。

結果：深呼吸で行ったダイビング時の平均心拍数、平均血圧、平均SpO₂は、通常呼吸で行った時より低かった。日常生活時との比較では、通常呼吸で行ったダイビング時の血圧は日常生活時より高かったが、深呼吸で行ったダイビング時の血圧は日常生活時と差はなかった。

結論：ダイビング時に生ずる血圧上昇は、深呼吸を行うことで抑えることができる可能性が示唆された。

Key Words : SCUBA Diving, deep breathing, blood pressure

I. はじめに

日本のレクリエーションダイビング人口は、レジャー白書（2010）¹⁾によれば、170万人あまりといわれる。障害者や高齢者を含む、幅広い年齢層の男女が楽しんでいるスポーツの1つである。しかし水圧や呼吸制限、重力変化などの負荷がかかり、リスクを伴うものでもある。近年小児については安全対策に関する報告²⁾がされるようになってきた。一方、スキューバダイビング（SCUBA Diving, 以下ダイビング）人口に占める中高年者の割合は相対的に増加傾向にあるが、有疾病率の高いと考えられる高齢者のための安全管理については特に基準が設け

られていない³⁾という問題点も指摘されている。このような背景をもとに、何らかの許可や制限の指標の必要性を感じてきた⁴⁾。

過去の文献等を検索すると、身体への影響については古くから潜水医学の領域で研究されてはきたが、有疾病者、障害者がダイビングをするにあたっての安全性の根拠となる研究は非常に少なく、それも高圧酸素タンク等を利用した模擬環境で得られたもの^{5) 6)}、水中での研究では息こらえ潜水^{7) 8)}やプール（浅い）潜水による報告⁹⁾が散見される程度で、特に実際のダイビングでの循環生理学的なデータを測定したものは少なく、心拍数についてはいくつかの過去の研究¹⁰⁾があるが、酸素飽和度についてはほとんど

みられない¹¹⁾。非侵襲的なダイビング中の血圧測定については宮坂らの健常者2名を対象に測定したものの¹²⁾があるのみで、障害者や高齢者はもちろん、健常者におけるデータもほとんど見出し得ない¹³⁾。さらに、潜水時の心理的状态とダイビングとの関係についての報告^{14)~16)}は見られるものの、心理的状态がどのように各循環生理学的指標に影響を与えるのかについては、報告を探し得なかった。

そこで我々は健常女性を対象として、リラックス状態を作り出すための1つの方法として深呼吸をしながら行うダイビング時の循環生理学的指標を測定し、通常の呼吸で行うダイビングや日常生活時と比較することによって、循環生理学的指標の変化の要因を推測しその意義を考察した。

II. 対象と方法

対象：40歳代の健常女性で、ダイビング歴は約10年で600本程度、特記すべき既往はなく、測定日の体調も良好であった。

測定ダイビングは沖縄周辺海洋で行った。日中の気温は30℃、水温は平均28℃、測定中の波高は0.5m以下で、潮流もなく、終始穏やかな動きで経過するダイビングであった。測定ダイビングのプロフィールは、ポートエントリーで、入水方法は強い衝撃を避けるために座位からゆっくり入り、潜水は前半の20分でできるだけ等時間間隔に5, 10, 15, 20mと深度をとり、後半その反対に浮上してもらった。ダイビングの全過程はベテランのインストラクターのガイドで、潜降、水中移動、浮上はすべて対象者自身が行なった。

また測定を行う際には、以下の3つの区分で行った。①深呼吸 (deep breathing) による1本のダイビング (15:46~16:24の38分間、最大深度22.8m、平均深度12.4m)、②通常呼吸 (usual breathing) による2本のダイビング (1本目：12:13~12:58の46分間、最大深度21.2m、平均深度12.8m、2本目：15:38~16:23の46分間、最大深度20.6m、平均深度10.1m)、③通常呼吸によるダイビングを行った日のダイビングを含む24時間。深呼吸によるダイビングと通常呼吸ダイビングは別の日に行った。

測定方法は、携帯ホルタ記録器 (フクダ電子社製 FM-800) を身体に装着し、ダイビング時は防水のために特製のドライスーツ (以下、スーツ) (ZERO

社製) を着用し記録を行った。測定指標は心電図から得られる心拍数 (HR)、不整脈、血圧 (BP)、経皮酸素飽和度 (SpO₂)、および自覚的運動強度である。またダイビングプロフィールとして、ダイビング時間、水深および平均水温をダイビングコンピュータ (SUUNT 社製 D4i) によって測定した。心電図とそれに伴う HR、そして SpO₂は無条件で連続記録された。BP は最短間隔2分、最大回数120回/24時間という条件があるため、測定ダイビング周辺の70分間は2分毎に設定し、2本行った通常呼吸によるダイビングの1本目と2本目の間は15分毎、夜間就寝すると予定された22時~翌朝7時は2時間毎、その他の時間は30分毎に設定した。

ダイビング以外の日常生活時の測定については、入浴等における機器の濡れを避けること以外特別な規制はせず、できるだけ通常の生活をしてもらうようにした。ダイビング以外の時間を、睡眠中とそれ以外の日中活動時の2つに区分した。

データ解析方法：データ解析は FM-800の専用プログラムを用いて行った。

HR はすべての RR 間隔時間 (msec) から15秒毎の HR (bpm) 値に換算したものをを用いた。不整脈は実波形からカウントした。BP はすべての計測値を利用した。SpO₂は1秒毎に記録される値を用いた。

なおこの研究はヘルシンキ宣言に基づいて研究計画書を作成し、もって研究代表者が所属する帝京大学医学部の倫理委員会の承認を得ている。また、添付した説明文書を用い、研究対象者に説明を行い、文書での同意を得て測定を行った。使用した機器類のメーカーなどとの利益相反はない。

III. 結果

1. 自覚的症状

ダイビングを含む全測定経過を通して、動悸、胸部圧迫感、胸痛、頭痛、めまい、呼吸困難感などは、全く認めなかった。

2. ダイビングのモード別データ

深呼吸ダイビング時の各平均値、HR 81bpm、収縮期 BP124mmHg および SpO₂97.17% は、通常呼吸ダイビング時の HR 101、収縮期 BP 162、SpO₂ 97.4より低かった。

3. ダイビングと日常生活との比較

深呼吸，通常呼吸それぞれのダイビングと日中活動時，就寝時を比較した。

1) HR：通常呼吸ダイビングのみが高く深呼吸ダイビングと日中活動には差を認めなかった (Table 1)。

2) 不整脈：深呼吸，通常呼吸で出現頻度差を認めなかった (Table 2)。測定全体を通して，心室性期外収縮と上室性期外収縮がみられたが，ダイビン

グ時とそれ以外で明らかな出現頻度の差はなく，いずれも単発で，病的な意味はないとされるものであった。

3) BP：通常呼吸の収縮期 BP は，日常生活時に比べ上昇していた。しかし深呼吸では上昇傾向はなく，日中活動時と比較して差はなかった (Table 3)。

4) SpO₂：通常呼吸 (97.36%) 深呼吸 (97.17%)，日中活動時 (97.44%)，就寝時 (96.86%) で，それぞれ差があった (Table 4) が100%の数値を記録し

Table 1. HR during Diving (Deep Breathing/ Usual Breathing) and the Other Time.

	DB	UB	Day time	Sleeping
Average	81.0	101.0	74.0	63.0
Standard Deviation	11.5	9.4	10.8	6.5

DB:breathing UB:usual breathing

Table 2. Arrhythmia during Diving (DB/ UB) and the Other Time (beat)

	PVC's	SVPC's
Deep Breathing	$\frac{0 \text{ (during diving)}}{1 \text{ (the other time)}}$ beats	$\frac{5 \text{ (during diving)}}{4 \text{ (the other time)}}$
Usual Breathing	$\frac{1}{0 \text{ (the other time)}}$	$\frac{1}{6 \text{ (the other time)}}$

Arrhythmia：不整脈 PVC 心室性期外収縮 SVPC: 上室性期外収縮

Table 3. BP during Diving (DB/ UB) and the Other Time.

	DB	UB	Day time	Sleeping
SBP	123.8	162.3	123.6	97.3
DBP	69.8	82.8	69.6	58.3

DB:deep breathing UB:usual breathing

Table 4. SpO₂ during Diving (DB/ UB) and the Other Time.

	DB	UB	Day time	Sleeping
Average	97.2	97.4	97.44	96.86
Standard Deviation	6.8	1.0	1.0	0.7

DB:deep breathing UB:usual breathing

注1：プロブをつけた上肢，手指を使用した際に，自覚症状変化のないときに70%台以下となるようなエラーデータも数点みられたが，今回は有効値として採用した。

た頻度では深呼吸時の方が多くみられた (Fig 1)。すべての指標を区分別にまとめたグラフを Fig 2 に示す。

IV. 考察

1. 測定方法

これまでダイビング時の HR や心電図に関する報告は散見されたが、SpO₂やBPに関するものがほとんどなかった。それは高圧環境ではなく機器の防水

が難しいためと思われた^{11) 12)}。特にBPはカフ圧を上げるために空気を用いるため、どんな測定機器でも機器周辺に空気を確保することが不可欠であり、水中でその環境を作り出すことが難しい。

我々はそのためにまずスーツで測定系全体を防水し、さらに事故水没に備えて機器の部分的防水も施した。研究準備段階では水中でのBP測定ができず、試行錯誤を繰り返した結果、カフ周囲の空間確保、測定時の体動停止、ディスプレイの連用器具への変換などを経て測定可能となった¹⁷⁾。

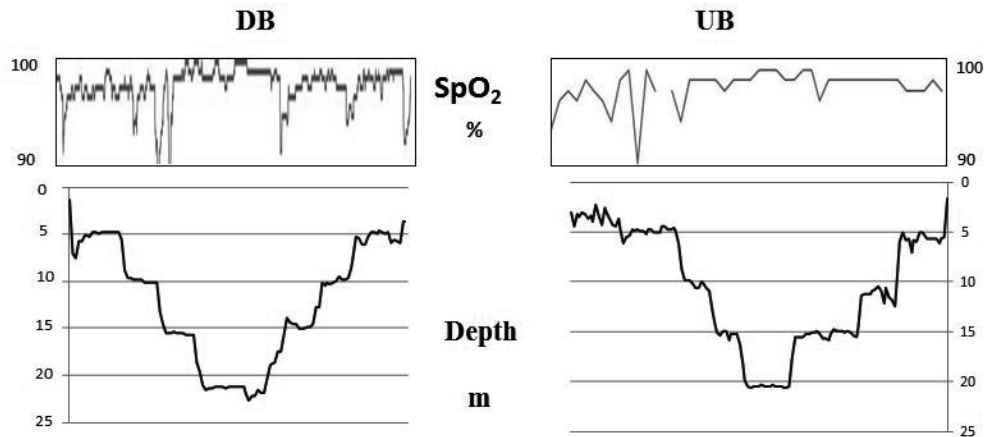


Fig 1. Relation between Depth and SpO₂.
DB :deep breathing, UB :usual breathing
注2 : UB は2本目のデータを表示

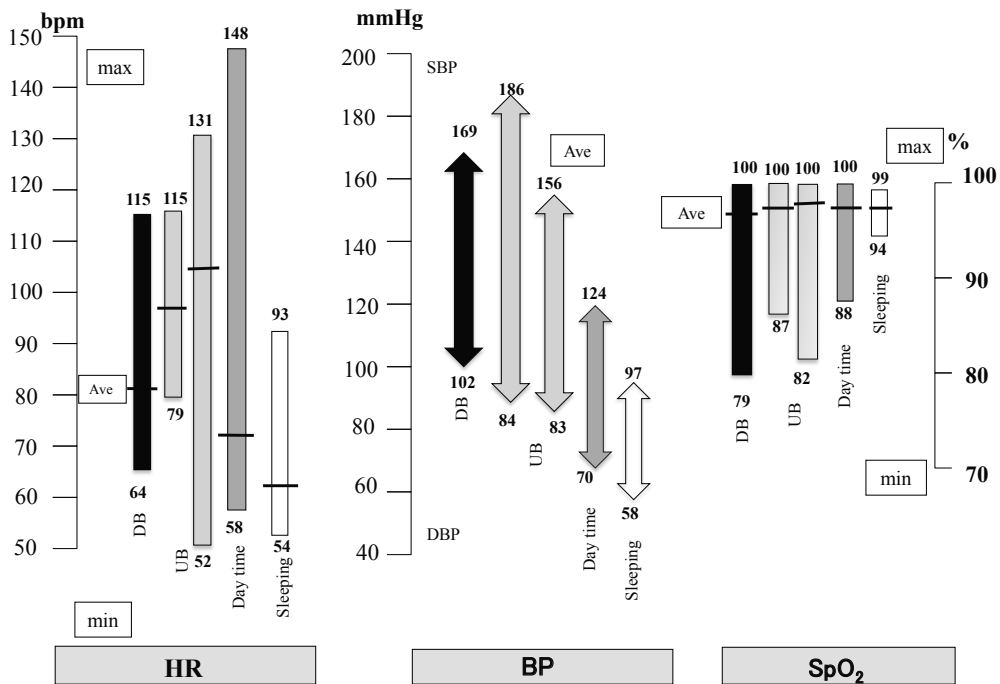


Fig 2. Comparison between UB(usual breathing),DB(deep breathing) and daily activities

しかし、ダイビング時のBPに関しては、まずは浮力を適切に減らしながら潜っていく関係で、スーツ内に十分に空気を確保できないときや、水中での移動のために体を動かしているときには測定できないこともあり、今回も特に深度が深くなると測定できないことがみられた。

対象者の選定に関しては、今回は呼吸条件を変えたダイビングの循環生理学的指標の変化を調べることを目的としたため、初心者ではなくある程度のダイビングスキルをもつ経験者を選定した。また海況も穏やかな時やポイントを選び、水温や気温も深呼吸ダイビング、通常呼吸ダイビングではほぼ同様の状況で測定できる条件を整えた。

2. HR

今回の結果では深呼吸時のHRは通常呼吸時より低かった。また日中活動時に比べダイビング時に増加していた。前述したとおりダイビング時における呼吸方法の違いによるHRの報告はなく、一般的に水中で心拍数は抑制傾向を示すという報告が散見されるのみである。宮坂らが実際の海洋でインストラクター2名を対象に行った心拍数測定では、我々の今回の結果や過去の報告¹⁸⁾と同様に、特に徐脈傾向はなかったと報告し、これらの要因に関してダイビング活動における運動負荷等の関与についてふれている。今回深呼吸時ダイビング、通常呼吸ダイビング、いずれもダイビングプロフィールが同じ条件であることから、運動量そのものに変化はなかったと考えられる。したがって深呼吸時でHRが低かった理由として、ダイビング時でも深呼吸により自律神経が相対的に副交感神経優位になったと推察する。

3. 不整脈

ダイビングでのHR、心電図の報告でも不整脈に言及したものは少ない。Yamaguchiら¹⁹⁾がプール潜水時のテレメトリでの不整脈の記録を報告しているが、様々な不整脈が出現し個人差が大きいとしている。ダイビング時の不整脈がダイビング時に特別に出るものなのか、平常時からその人が基本的に持っているものなのかを知るためには、ダイビング以外の日常生活時との比較が不可欠である。伊佐地が脊損例で報告したのと同様今回の研究でも、ダイビング時の不整脈出現頻度は日常生活時と同程度であり、ダイビングが特に不整脈を誘発するものでは

なかった。

また今回の呼吸の違いによる不整脈の出現頻度や種類等の違いもみられなかったことから、呼吸状態は不整脈の出現に影響するとは考えにくい。

4. BP

今回の結果では通常呼吸でみられたダイビング時のBP上昇が深呼吸によって抑えられた。過去BPを測定した研究が少ないことはすでに述べたが、前掲の宮坂ら¹²⁾は、浸水直後から収縮期血圧は増加傾向を示したが、拡張期血圧はほぼ一定の数値を示したとし、また海洋での2名の測定ではドライスーツ着用後潜水ポイントまでの移動ですでに血圧の上昇がみられたため、潜水後の急激な上昇はみられなかったとしている。血圧上昇の原因については、水圧と姿勢維持のための努力活動が影響を与えたのではないかとしている。また伊佐地らの脊損例で全介助のダイビングにおいても¹³⁾、健常者例でも¹⁸⁾BPは上昇していた。ダイビング以外の研究では、息こらえ潜水をSieber²⁰⁾がまとめていて、息こらえ潜水中の直接的なarterial blood pressure測定においては変化なし、あるいは緩やかな上昇と結論している。しかしダイビングに拡大されるものではないとも断っている。さらに模擬的な環境での測定では、Stuhrら²¹⁾がラットを用い5気圧の高圧環境で心機能を調べ結果、左室圧が30~50%上昇したことを報告している。人を対象にしたものでは、Ferrignoら⁷⁾が水深40-55mのダイビングの状態を高圧タンク内の水槽で再現し、3名の2分程度の息こらえ潜水時の血圧を観血的に測定した結果、血圧は急速かつ急激に上昇し、ピーク時で280/200、290/150を記録した。その他、顔面浸水、低温暴露²²⁾でもBPは上がるとされ、ダイビングに関連する高圧環境、呼吸の圧迫感、水への暴露、低温すべてが関係して上昇するものと推測される。

今回は比較的ダイビングスキルの高い対象者であり、水温も気温も比較的高めで海況も穏やかな状況で行ったダイビングであった。BP上昇の要因と考えられる要素のうち、高圧環境は存在するが、潜水反射の誘因となる気温と水温の差²³⁾はなかった。一方で通常呼吸時は日中活動時と比較して上昇していた。しかし呼吸方法を変化させたことで、BP上昇を抑えることができた。変化させたのは呼吸方法だけであったため、BPの差はこの効果であると考え

られる。BP 上昇がダイビングという非日常的な身体活動による交感神経の活性化による影響と考えると、深呼吸によるリラックスした状態がBP 上昇を抑えることにつながったのかもしれない。今回深呼吸ダイビング時と日中活動時のBP に差がみられなかったことから、深呼吸ダイビングにより通常の生活程度の緊張状態にあったといえるかもしれない。

5. SpO₂

平均値では深呼吸ダイビング時の方が通常呼吸ダイビング時よりも低かった。また日常生活と比較すると日中活動時の方がダイビング時よりも高く就寝時がもっとも低かった。ダイビング時と日中活動時の関係は過去の測定例とは異なる結果であった。

水中でのSpO₂を調べた報告も少ないが、前掲の田中ら¹¹⁾の結果では、陸上に比し潜水中のSpO₂は高値を示した。理由の1つに高圧環境をあげており、今回の我々の結果と異なるが、生データのトレンドで深呼吸時の方が100%を示す回数が多かったことと矛盾し、エラーデータの影響なども考えられ、今回のSpO₂の結果だけで深呼吸の影響を考察することは困難であった。

6. この研究の限界と意義について

1例のデータからの考察であり、一般普遍性はない。しかし、実際の海洋でのダイビングで、心電図、BP、SpO₂すべての循環生理学的データを比較検討した研究は伊佐地らの報告¹³⁾のみであり、さらに呼吸条件を変化させて解析を行ったのは今回の我々の報告が初めてである。また、日常生活のデータも同時に比較しているため、ダイビングでどのような変化が起こるのかを知るためには有意義なものと考えられる。今後複数の健常者のデータを集め、それを基礎として、高齢者や障害者について分析をすすめていく予定である。過去において呼吸方法を変化させてダイビング中の循環生理学的なデータを回析したものはこれが初めての報告であり、複数の知見と合わせて報告することは意義があると考えられる。

V. 結語

我々が考案した新しい方法によって、健常女性を対象に、実際の海洋でのダイビング時の心電図、心拍数、血圧、酸素飽和度を測定し、呼吸方法の違い

による変化や日常生活との相違、過去の報告との比較から、ダイビング時の生理学的パラメータの変化の特徴を明らかにした。深呼吸をしながらリラックスしてダイビングを行うことによって、BP 上昇をおさえることができる可能性が示唆された。海洋の条件や経験の程度、ダイビングプロフィールの違いによって循環生理学的動態は影響を受ける可能性が高いことは以前から推測されてきたことであるが、BP 上昇については、本研究の結果をもとにさらに検討を続け、安全なダイビングの方法を確立していきたい。

結果の一部は第48回日本高気圧環境潜水医学会および The 8th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine で発表した。

謝辞: 本論文をまとめるにあたり、貴重なアドバイスをくださいました山見信夫先生に深謝いたします。本研究はJSPS 科研費23650332の助成を受けたものである。

【文献】

- 1) (財)日本生産性本部: レジャー白書, 生産性出版, pp25-26. 2014.
- 2) 山見信夫, 外川誠一郎, 中山晴美, 他: レジャーダイビングにおける問題点. 日本高気圧環境・潜水医学会雑誌; 41: pp13-17, 2006.
- 3) Cilveti R, Osona B, Pena JA, et al: Scuba diving in children: Physiology risks and recommendations, *An Pediatr (Barc)*. May 25. pii: S1695-4033 (15), 2015.
- 4) 伊佐地隆, 大仲功一, 安岡利一: バリアフリーダイビング全国大会の参加者状況. *リハビリテーションスポーツ*, 25: 32, 2006.
- 5) 稲垣英昭, 藤内由美, 大久保淳, 他: 高気圧酸素治療(HBO)中の血圧と心拍数の変化について. *日本高気圧環境医学会 雑誌*, 32, pp51-51, 1997.
- 6) 東幸司, 沖野勝広, 長野準也, 他: 高気圧酸素治療時の血圧変動及び心拍数について. *日本高気圧環境・潜水医学会雑誌*, 44, pp 162-162, 2009.

- 7) Ferrigno M, Ferretti G, Ellis A, et al. Cardiovascular change ダイビング uring deep breath-hold dives in a pressure chamber. J Appl Physiol: 83: pp1282-1290, 1997.
- 8) Breskovic T, Uglesic L, Zubin P, et al.: Cardiovascular change ダイビング uring underwater static and dynamic breath-hold dives in trained divers. J Appl Physiol: 111: pp673-678, 2011.
- 9) Rost R, et al: Die Herz function unter Koperlicher Belasatung. Herz und Sport; Fachbuch-Verlagsgesellschaft: pp11-33, 1984.
- 10) 伊佐地隆, 大仲功一, 安岡利一: 障害者のダイビング時の心拍数－日常生活時との比較－. リハビリテーションスポーツ: 24: pp24-24, 2005.
- 11) 田中博史: スクーバダイビング中における末梢血中酸素飽和度及び心拍数. 宇宙航空環境医学 45, pp61-67, 2008.
- 12) 宮坂裕也, 河合祥雄, 石原智美: ドライスーツ潜水における血圧の変化. 水と健康医学研究会誌: 14, pp21-32, 2011.
- 13) 伊佐地隆, 山本昌義, 原元彦: スキューバダイビングにおける循環生理学的指標の変化－脊損1例での予備的検討: 日本脊髄障害医学会雑誌 Vol.27. pp24-30, 2014.
- 14) Morgan WP: Anxiety and panic in recreational scuba divers. Sports Med. Dec; 20 (6): pp398-421, 1995.
- 15) Anegg U (1), Dietmaier G, Maier A, et al: Stress-induced hormonal and mood responses in scuba divers: a field study., Life Sci. Apr 26; 70 (23): pp2721-34. 2002.
- 16) Steinberg F, Doppelmayr M: A BRIEF NOTE ON THE RELATIONSHIP BETWEEN ANXIETY AND PERFORMANCE IN SCUBA DIVING IN ADOLESCENTS: A FIELD STUDY, Percept Mot Skills. Jun; 120 (3): pp960-70, 2015.
- 17) Isaji T, Sasaki C. Circulatory physiological change in scuba diving – Comparison between scuba diving and daily living –. 4th conf on diving physiol, tech & HM: pp13-14, 2013.
- 18) 伊佐地隆, 佐々木千穂, 山本昌義: スキューバダイビングにおける循環生理学的指標の変化－健常者での検討－. Jpn J Rehabil Med, 50 (suppl), S337-S337, 2013.
- 19) Yamaguchi H, Tanaka H, Obara S, et al. Changes in cardiac rhythm in man during underwater submersion and swimming studied by ECG telemetry. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 66: pp43-48, 1993.
- 20) Sieber A, L'Abbate A, Kuch B, 他: Advanced instrumentation for research in diving and hyperbaric medicine. UHM; 37, pp259-269, 2010.
- 21) Stuhr LE, Stuhr JA, Tyssebotn I: Increased cardiac contractility in rats exposed to 5 bar. Acta Physiol Scand 136, pp167-176, 2006.
- 22) Khurana RK, Wu R: The cold face test: A non-baroreflex mediated test of cardiac vagal function. Clin Auton Res; 16: pp 202-207, 2006.
- 23) 宮本博司, 山口久雄, 他: 人体の潜水性応答. 体力科学; 42, pp219-226, 1993.

(平成28年1月27日受理)

Circulatory physiological change in scuba diving – effect of deep breathing –

Chiho SASAKI, Megumu YOSHIMURA, Takashi ISAJI

Objectives : To know the influences of different type of breathing on the circulatory physiological index on scuba diving (Diving), in order to refer to the disabled with restrictive ventilatory dysfunction. Participant: A 40s healthy female standard diver. Interventions: After the portable Holter recorder was put on the body, electrocardiogram (ECG), blood pressure (BP) and oxygen saturation (SpO₂) were recorded during 3 Diving's performed by wearing special dry suit for waterproofing. Each Diving (20m/40 minutes) was performed by boat entry in the sea of Okinawa Japan. 1st Diving was performed with deep abdominal breathing, 2nd and 3rd Diving with usual breathing as control data on the other day. 1st Diving were also compared of those data in the usual daily living followed by the Diving's. Results : Average HR (81bpm), systolic BP (124mmHg) and SpO₂ (97.17%) during Diving with deep breathing are all significantly lower than average HR (101), systolic BP (162) and SpO₂ (97.44) during Diving with usual breathing. There was no significant difference between systolic BP during Diving with deep breathing and that (124) in the usual daily living, and average HR during Diving with deep breathing is significantly higher than that (74) in the usual daily living. Conclusions: It might be possible that deep breathing suppress the extraordinary change of HR and BP during Diving.