

【原著】

# 繰り返し潜水における安全停止時の酸素吸入が血管内気泡と呼気中一酸化窒素濃度に及ぼす影響

森松嘉孝<sup>1)</sup>, 村田幸雄<sup>2, 3)</sup>, 錦織秀治<sup>1, 4)</sup>, 久木田一朗<sup>5)</sup>, 石竹達也<sup>1)</sup>  
久留米大学 医学部 環境医学講座<sup>1)</sup>  
国際潜水教育科学研究所<sup>2)</sup>  
潜水救急ネットワーク沖縄<sup>3)</sup>  
有限会社 中国ダイビング<sup>4)</sup>  
琉球大学大学院 医学研究科 救急医学<sup>5)</sup>

【要約】

繰り返し潜水における安全停止時の酸素吸入により、血管内気泡および呼気中一酸化窒素濃度の変化について検討を行った。平均年齢（標準偏差）45歳（14.4）の男性インストラクターダイバー9名が1日3本の潜水において、潜水前と各潜水後で心臓超音波検査を行い、呼気中一酸化窒素濃度を測定した。心室内気泡を検出したのは圧縮空気タンク潜水の30m潜水後に1例、安全停止時酸素吸入では20m潜水後1例であり、安全停止時の酸素吸入による気泡抑制効果は確認できなかった。一方、呼気中一酸化窒素濃度は圧縮空気タンク潜水では3本全ての潜水後で低下していたが、安全停止時酸素吸入潜水では潜水後の低下は認めるも3回目潜水後の低下は有意でなかった。血管内気泡量と呼気中一酸化窒素濃度の間には負の相関があることから、繰り返し潜水において安全停止時に酸素吸入を行うことは、血管内気泡を抑制する可能性がある。

キーワード 減圧症, 純酸素吸入, 心室内気泡, 心臓超音波検査, 酸素ファーストエイド

【Original】

**Effects of oxygen breathing during a safety stop on intravascular bubbles and exhaled nitric oxide in compressed-air divers**

Yoshitaka Morimatsu<sup>1)</sup>, Yukio Murata<sup>2, 3)</sup>, Hideharu Nishikiori<sup>1, 4)</sup>, Ichiro Kukita<sup>5)</sup>, Tatsuya Ishitake<sup>1)</sup>

1) Department of Environmental Medicine, Kurume University School of Medicine

2) International Diving Education and Research Laboratory

3) Diving Emergency Network Okinawa

4) Chugoku diving Ltd.

5) Department of Emergency Medicine, Graduate School of Medicine, University of the Ryukyus

**Abstract**

Background and purpose: In Okinawa Prefecture, some experienced recreational divers have been performing no-decompression dives with pure oxygen for 3 to 5 minutes during a decompression safety stop at a depth of 5 m, reducing the risk of decompression sickness. In this study, we investigated whether this diving method is effective in preventing decompression sickness.

(Objectives) We compared intravascular air bubbles and exhaled nitric oxide (FeNO) in divers after repetitive compressed air dives with or without oxygen-breathing during a decompression safety stop.

(Methods) Nine elite male divers (mean age, 45.0 ± 14.4 years) performed three series of compressed air dives with decompression safety stop (5m/5min using air (control group) or pure oxygen (oxygen group)),

the first consisting of three staged dive (30 m, 20 m and 10 m each induration of ten minutes) the second of two staged dive (20 m/10 min and 10m/20 min) and the third of one stage dive (10m/30min) .. Intraventricular bubbles were studied by echocardiographic examinations, and NO was measured using the Niox Vero<sup>®</sup> manufactured by Chest Co. Ltd. before and after each dive, totally four times.

(Results) Intraventricular bubbles were detected in one case after the first dive in the control group and in one case after the second dive in the oxygen group. The FeNO concentrations in the control group decreased significantly after all diving sessions compared to before diving. However, the FeNO concentrations in the oxygen group decreased significantly after the first and second diving sessions compared to before diving; there were no significant differences after the third diving session.

Conclusion: Because the FeNO concentration is inversely correlated with amount of intravascular bubbles, oxygen decompression possibly reduces intravascular bubbles after repetitive compressed air dives.

**keywords**

Decompression sickness, pure oxygen inhalation, intraventricular bubbles, echocardiography, oxygen first aid

## 背景

圧縮ガスを用いた潜水において注意すべき病態は減圧障害であり、中でも減圧症の発症に重要な役割を担っているのが血管内気泡である。生理的不活性ガス(空気潜水では窒素、以下窒素)由来の気泡は水中から水面への浮上中やその後に発生し、深く長い潜水や急速な浮上(減圧)で大量に発生しやすく、減圧症の様々な病態を惹起する。

Bertらは、減圧中の酸素吸入は組織から窒素を取り除くのに効果的であり、減圧時に酸素を用いることは減圧症の予防に有効であることを初めて提唱した<sup>1)</sup>。動物実験では、潜水前の酸素吸入が減圧時に発生する血管内気泡を抑制させ<sup>2~5)</sup>、ヒトにおいても、圧縮空気タンク潜水前の酸素吸入が血管内の気泡形成を減弱させた報告がある<sup>6)</sup>。Pontierらは、経験豊富なダイバー18名に対して、30m、30分潜水後に水深3mで9分間の減圧停止時に酸素吸入を行った結果、心腔内気泡の指標であるKISS Bubble Scoreが有意に低下したと報告している<sup>7)</sup>。また、潜水終了後に6mで酸素吸入することはダイバーにおける血管内気泡の発生を抑制する<sup>8)</sup>。このように、潜水前、減圧停止中および潜水後の酸素吸入は血管内気泡や減圧症の発生を抑制することが示されている。無減圧潜水で酸素吸入は必須ではないが、沖縄県では一部の経験豊富なレジャーダイバーが、減圧症発症リスクの低減を期待して、主に水深5mでの安全停止時に純酸素を3~

5分間吸入する無減圧潜水を行ってきた。そこで今回、この潜水方法が実際に減圧症発症予防に効果があるのかについて、血管内気泡と呼気中一酸化窒素(以下FeNO)の関連性の観点から検討した。

## 目的

インストラクターダイバーが圧縮空気タンクを使用した繰り返し潜水の際、安全停止中に純酸素を吸入することによる血管内気泡の抑制、および血管内気泡とFeNOの関連を検討する。

## 被験者の募集

2017年9月から10月の間、潜水救急ネットワーク沖縄に登録されているインストラクターダイバー約180名に向けて、国際潜水教育科学研究所およびダイビングショップASHIBEE BLUEのホームページ上で研究内容の説明と被験者募集を行った。なお、心肺疾患を有する者は被験者の除外条件とした。

## 対象と実験の方法

男性のインストラクターダイバー9名に対して、2017年11月、当日の海況を考慮し、海水温24~26℃の沖縄県恩納村真栄田岬、名護市久保田、嘉手納町の3ヶ所いずれかで実験を行った。潜水方法は先行研究にて我々が報告している潜水計画<sup>9)</sup>に沿って行い、インストラクターマニュアルが推奨する1日3本(1本目深

く、2本目中程度、3本目浅く)の潜水を、圧縮空気タンクを用いて行なった。全員がウエットスーツを着用し、潜水前の午前8時半より血圧、脈拍数および末梢血酸素飽和濃度およびFeNOを測定し、心臓超音波検査(以下心エコー)を用いて動画を記録した。1回目の潜水は30mまで潜水し、海底に設置した長さ25mの縄を目印に100mの遊泳を行い、その後20m、10mの水深で同様の遊泳を行い、5mで安全停止5分後に浮上した。2本目の潜水は同日午前10時半より開始して、まず20mまで潜行し、1回目と同様に100mの遊泳を行い、その後10mにて同様の遊泳を2回行い、5mで安全停止5分後に浮上した。昼食をとった後、3本目は午後2時より10mまでの潜水を始め、船底の長さを目印に100mの遊泳を3回行い、5mで安全停止5分後に浮上した。いずれも潜水中の行動(写真撮影など)は制限せず、1回の潜水にかかる時間は35分とした。

次に、同じダイバー9名が、前述の潜水を行なった翌日以降に、同様のプロフィールで、各潜水において浮上時水深5mでの安全停止時に5分間純酸素を吸入する繰り返し潜水を行なった(図1)。吸入する酸素は水深5mに専用のタンクを潜水前に設置しておいた。

## 血管内気泡およびFeNO測定

Chest社のNiox Vero<sup>®</sup>を用いて、潜水前と浮上後の合計4回、FeNOを測定した。血管内気泡は、ポータブル心エコー(PaoLus UF-760AG, FUKUDA DENSHI)を用い、潜水前と毎回潜水から浮上後30分経過してから、4チャンバービュー動画を約13秒間記録した。後日、本検査に関与していない別の心臓超音波専門技師および日本循環器病学会指導医がEftedal and Brubakkのグレード分類<sup>10)</sup>を用い、0:観察される気泡なし、1:たまに気泡が見られる、2:4心拍で少なくとも1つの気泡を認める、3:少なくとも毎心拍ごとに気泡を認める、4:全てのイメージで1cm<sup>2</sup>に一つの気泡を認める、5:1つ1つの気泡が区別できないほどホワイトアウトしている、と血管内気泡を6つのグレードに分類した。

## 解析方法

先行研究<sup>9)</sup>と同様の潜水プロトコル群をC群、安全停止時に5分間純酸素を吸入するプロトコル群をO群とした。被験者の基本情報については平均値(標準偏差)で、得られたデータは中央値(25-75%タイル)で表し、両群内で潜水前と各潜水後の間で対応のあるノンパラメトリック検定(Wilcoxonの符号順位和検

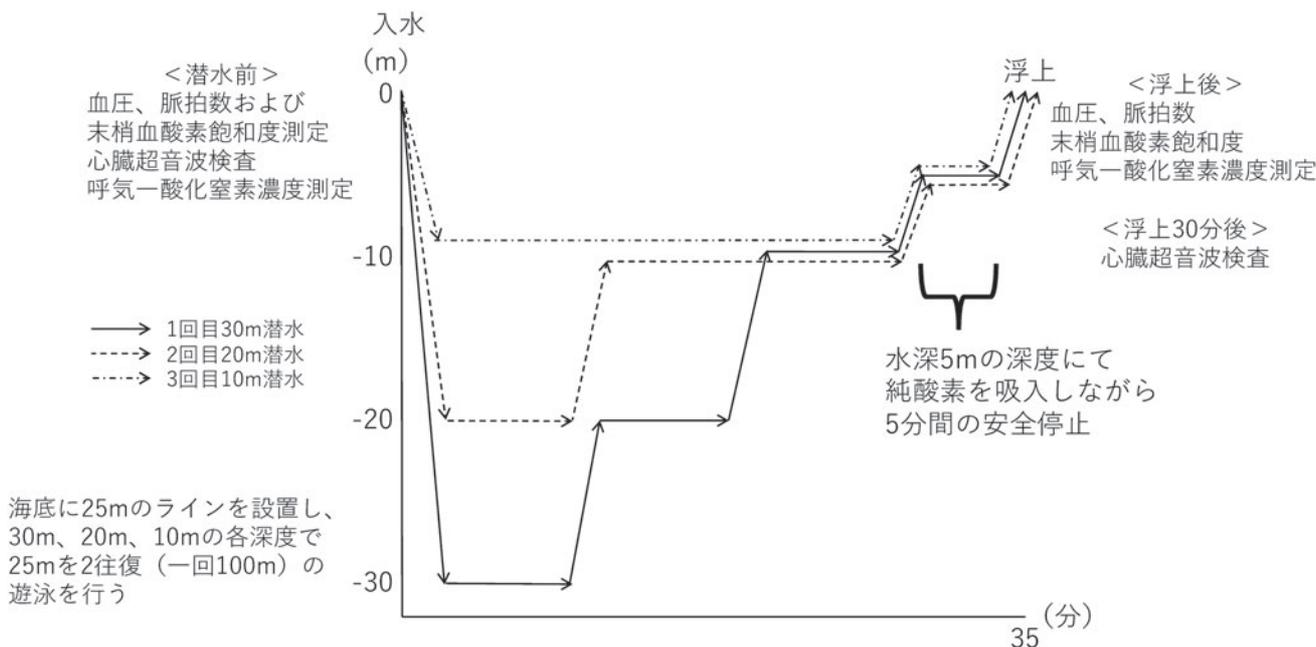


Fig. 1 Diving protocol with oxygen decompression during safety-stop and measurement parameters

定)を行った。統計ソフトはSPSS Ver. 24 (USA)を用い、有意水準は0.05未満とした。

本研究は久留米大学倫理委員会の承認(研究番号: 17139)を得た後、ヘルシンキ宣言を遵守して行った。また、琉球大学附属病院救急部の緊急時受け入れ体制を確立した後、日本救急医学会専門医1名の立会いのもと、現場に監視ダイバーが1名待機した状態で、バディ潜水にて行った。

## 結果

被験者は男性9名、平均年齢(SD)45.0歳(14.4)、平均身長(SD)169.9cm(5.5)、平均体重(SD)65.8kg(7.4)、平均BMI(SD)22.8(2.4)で、平均潜水歴(SD)24.1年(11.9)であった。既往歴を含む喫煙歴有りは7名(77.8%)であった。潜水前後の収縮期血圧、拡張期血圧および末梢血酸素飽和度に有意な変化は見られなかったが、脈拍数はC群で2回目の潜水後に、O群では1回目潜水後にいずれも有意な低下が認められた(表1)。心室内気泡の評価では、グレード1の心室内気泡をC群2回目の潜水(最大深度20m)後に1例、O群1回目(30m)後に1例それぞれ認めた(表2)。FeNOは、C群では全ての潜水後で有意な低下を認め、O群では1,2回目潜水後に有意な低下が見られた(表3)。

## 考察

### 繰り返し潜水におけるFeNOと心室内気泡の関係

FeNO値が35ppb以下の被験者を対象としたPontierらの報告<sup>11)</sup>では、最大水深15mの圧縮空気タンク潜水前後でFeNO値に変化はなかったと報告されているが、我々の実験では、1本目の潜水後から

FeNO値は低下していた。このことから、深度が深くなればFeNOは低下することが明らかになった。さらに、C群では全潜水後で有意な低下を認める一方、O群では3回目潜水後のみ低下は有意でなかった。健康成人男性のFeNOは酸素分圧に依存し、FiO<sub>2</sub>の上昇によりNO産生が増加しFeNOは上昇する<sup>12)</sup>ため、本研究における3本目潜水の安全停止時酸素吸入がFeNOの低下を抑制したのはNO産生増加によるものと考えられる。FeNOと血管内気泡量の間には負の相関があることから<sup>11)</sup>、この時の血管内気泡形成は抑制されているはずであるが、今回、心エコーでそれを捉えることはできなかった。これは本研究における潜水方法が無減圧潜水で、M値(maximum allowable value)に対する割合が低いため、血管内気泡の絶対量が少なかった可能性がある。また、今回用いた血管内気泡量の評価方法は、心臓超音波機検査専門技師の目視による半定量法のため、今後は、血中NOまたはその代謝物による評価が必要である。

### 酸素を吸入する潜水について

現在、我々が確認している沖縄県の安全停止時酸素吸入を行っているダイバー数は3名であり、以前より少なくなっている。その理由は①潜水前の業務が増えること、②浮上時の手技が増えること、③酸素中毒<sup>13)</sup>に対する恐怖、そして④ナイトロックに代表される混合ガスを用いた潜水が普及していることが挙げられる。インストラクターダイバーは新しいことを試すことに対して面倒と感じる傾向があるため、重量があるタンクが増え、あらかじめ潜水前に海中へ吊るす作業が増えることは望まない。また、ダイブコンピューターに従った無減圧潜水を行い、且つ水深5mで3~5分の安全停

Table 1. Vital signs during 2 protocol dives

		収縮期血圧	p 値	拡張期血圧	p 値	脈拍数	p 値	SpO <sub>2</sub>	p 値
C群	潜水前	130.0(115.0-137.0)	—	80.0(71.0-95.0)	—	73.0(67.5-79.0)	—	98.0(98.0-98.0)	—
圧縮空気タンク 潜水	1回目(30m)潜水後	129.9(118.0-134.0)	0.98	90.0(77.0-99.0)	0.16	73.0(66.5-79.0)	0.40	98.0(95.5-98.5)	0.30
	2回目(20m)潜水後	126.0(120.0-133.0)	0.61	80.0(79.0-88.0)	0.82	66.0(60.5-79.0)	0.04*	98.0(96.0-99.0)	0.67
	3回目(10m)潜水後	130.0(120.0-138.0)	0.90	80.0(67.0-93.0)	0.47	80.0(66.5-86.0)	0.95	99.0(97.5-99.5)	0.90
O群	潜水前	130.0(126.0-137.0)	—	80.0(74.0-91.0)	—	72.0(70.5-81.5)	—	98.0(97.5-99.0)	—
安全停止時酸素 吸入潜水	1回目(30m)潜水後	136.0(127.0-139.0)	0.11	90.0(78.0-92.0)	0.07	68.0(60.0-77.0)	0.01*	98.0(97.5-99.0)	0.38
	2回目(20m)潜水後	128.0(119.0-136.0)	0.35	80.0(75.0-89.0)	0.73	75.0(69.0-81.5)	0.67	97.0(95.5-98.5)	0.09
	3回目(10m)潜水後	130.0(126.5-138.0)	0.96	80.0(67.0-90.0)	0.42	75.0(72.0-81.5)	0.81	97.0(96.5-98.5)	0.09

Table 2. Changes in grade of intraventricular bubbles during 2 protocol dives

被験者	C群：圧縮空気タンク潜水				O群：安全停止時酸素吸入潜水			
	潜水前	1回目(30m)潜水後	2回目(20m)潜水後	3回目(10m)潜水後	潜水前	1回目(30m)潜水後	2回目(20m)潜水後	3回目(10m)潜水後
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 3. Changes in exhaled nitric oxide concentration during 2 protocol dives

		FeNO(ppb)	p 値
C群	潜水前	26.0(11.0-45.0)	—
圧縮空気タンク潜水	1回目(30m)潜水後	24.0(10.0-31.5)	0.0210**
	2回目(20m)潜水後	26.0(9.5-31.0)	0.0205**
	3回目(10m)潜水後	22.0(11.5-31.0)	0.0190**
O群	潜水前	29.0(12.5-44.5)	—
安全停止時酸素吸入潜水	1回目(30m)潜水後	25.0(10.0-39.5)	0.0078**
	2回目(20m)潜水後	25.0(11.5-40.5)	0.0039**
	3回目(10m)潜水後	22.0(13.0-43.5)	0.1406

中央値(25-75%タイル)

止を行うこと、ナイトロックスを使用することで普段から十分に減圧症が予防できていると考えていることから、酸素を吸う利点を感じないと思われる。一方、酸素中毒を不安視する声もある。例えば、NAUIスクーバダイビング認定コースでは、「水深約7m以深の深さで純酸素を吸うと、死亡を含む重大な傷害を起こす可能性があり、純酸素は毒性を持ち非常に危険です」と教示されている<sup>14)</sup>。このように、潜水中の酸素使用には酸素中毒の危険性があり、扱いに注意が必要なものも、酸素吸入を躊躇する一因と思われる。

2015年、高気圧作業安全衛生規則が改正施行さ

れ、潜水者が溺水しないような措置を講じて浮上を行わせる場合には、酸素分圧は220キロパスカル以下まで認められ<sup>15)</sup>、水深12m相当より酸素減圧が可能となった。これを受け最新の潜水士テキストでは、「水中酸素減圧は、通常は9mもしくは6mから行われる。」と記載されている<sup>16)</sup>。厚生労働省安全衛生部へのQ&Aでも、「呼吸用ガスにおける医療用酸素は、専門医療施設と十分な連携を図って利用する<sup>17)</sup>」とされたが、これらの情報周知度はインストラクターダイバーに対する我々の予備調査の結果、約59%と決して高くなかった<sup>18)</sup>。潜水中に酸素中毒が発症した場合、溺

水から死亡事故につながる恐れもあるため、厚労省Q&Aにもあるように<sup>17)</sup>、酸素使用にあたっては適切な教育、トレーニングが必要である。一般社団法人社会スポーツセンターではこのQ&Aを受け酸素講習の教本を出版しており<sup>19)</sup>、インストラクターダイバーを対象とした酸素取扱講習を行っている。また、一部の大学のスポーツ学科生に対しても酸素ファーストエイド講習を開講しており、このような取り組みが広まることで、適切な酸素の使用知識が得られると思われる。

ファンダイブの現場において、伊豆では各地域を管理している事務所だけでなく、エントリービーチにも医療用酸素が常備され、いつでも使用できる体制にある。一方、沖縄県はダイビングポイントが多いことから地域を管理する事務所はなく、ダイビングショップが各自で医療用酸素を購入しているが、その購入割合は約70%にとどまってお<sup>20)</sup>、医療用酸素の準備状況には地域差が存在する。今後は、医療機関も含めた潜水・潜函作業現場における緊急時の酸素利用状況を明らかにし、潜水における血管内気泡・減圧症を抑制する具体的な酸素吸入方法を明らかにすることが、減圧症発症予防につながると考える。

### 本研究の限界

本実験は安全面を第一に考慮し、潜水プロトコールは推奨されている無減圧潜水を用いたため、画像にて血管内気泡を捉えられた事例が少なく、NOと血管内気泡量の相関検討を行うことができていない。また、血中NOの定量値は未測定のため、血中NO変化の絶対量は捉えられていない。

### 結語

沖縄を拠点とするインストラクターダイバーが安全停止時に酸素を吸入しないプロトコールと、水深5mで安全停止時に酸素を5分間吸入するプロトコールによる繰り返し潜水を行なった。両プロトコールともに心臓超音波検査による血管内気泡の検出率は低く、安全停止時の酸素吸入による血管内気泡減弱効果は確認できなかった。一方、潜水後の呼気中一酸化窒素濃度は、前者では毎回低下したままであったが、後者では潜水2本目まで低下したものの、3本目は低下が抑

制されていた。これより、繰り返し潜水において安全停止時に酸素吸入を行うことは、血管内気泡を抑制する可能性がある。

### 謝辞

本研究において多大なご支援をいただきました医療法人きなクリニック院長喜納美津男先生、済生会日田病院副院長大坪仁先生、臨床検査科千崎政教様、久保田優斗様、およびダイビングショップSecond Station松原飛鳥様に紙面を御借りして御礼を申し上げます。

本研究に関し、申告すべきCOIはありません。

### 引用文献

- 1) Bert P, Haldane JS: Decompression Theory. The technical Diving International URL; <http://www.dive-tech.co.uk/bert%20and%20haldane.htm>
- 2) Webb JT, Pilmanis AA: Preoxygenation time versus decompression sickness incidence. *Saf J* 1999; 29: 75-78.
- 3) Butler BD, Little T, Cogan V, Powell M: Hyperbaric oxygen pre-breathe modifies the outcome of decompression sickness. *Undersea Hyperb Med* 2006; 33: 407-417.
- 4) Katsenelson K, Arieli Y, Abramovich A, Feinsod M, Arieli R: Hyperbaric oxygen pretreatment reduces the incidence of decompression sickness in rats. *Eur J Appl Physiol* 2007; 101: 571-576.
- 5) Arieli R, Boaron E, Abramovich A: Combined effect of denucleation and denitrogenation on the risk of decompression sickness in rats. *J Appl Physiol* 2009; 106: 1453-1458.
- 6) Castagna O, Gempp E, Blatteau JE: Pre-dive normobaric oxygen reduces bubble formation in scuba divers. *Eur J Appl Physiol* 2009; 106: 167-172.
- 7) Pontier JM, Lambrechts K: Effect of oxygen-breathing during a decompression-stop on bubble-induced platelet activation after an open-sea air dive. *Eur J Appl Physiol* 2014; 114: 1175-1181.
- 8) Blatteau JE, Pontier JM. Effect of in-water recompression with oxygen to 6 msw versus normobaric oxygen breathing on bubble formation in divers. *Eur J Appl Physiol* 2009 ;106:691-695.
- 9) 森松嘉孝, 村田幸雄, 合志清隆, 大坪仁, 千崎正教, 他. : インストラクターダイバー唾液中コルチゾールを用

- いたストレス評価. 九州高気圧環境医学誌 2020; 20: 7-14.
- 10) Eftedal O, Brubakk AO: Agreement between trained and untrained observers in grading intravascular bubble signals in ultrasonic images. Undersea Hyperb Med 1997 ; 24: 293-299.
- 11) Pontier JM, Buzzacott P, Nastorg J, Dinh-Xuan AT, Lambrechts K: Exhaled nitric oxide concentration and decompression- induced bubble formation: An index of decompression severity in humans? Nitric Oxide 2014; 39 :29-34.
- 12) Schmetterer L, Strenn K, Kastner J, Eichler HG, Wolzt M: Exhaled NO during graded changes in inhaled oxygen in man. Thorax 1997; 52: 736-738.
- 13) スタンリー・マイルズ著 町田喜久雄 訳:潜水医学入門. 東京;東京大学出版会.1971;pp111-133.
- 14) NAUIJAPAN監: NAUIスクーバダイバー (日本語版) 第3版. 東京;エンタープライズ. 2011; pp.74.
- 15) 厚生労働省. 高気圧作業安全衛生規則の一部を改正する省令. 平成26年12月1日厚生労働省令第132号.
- 16) 中央労働災害防止協会:潜水士テキスト-送気調節業務特別教育用テキスト 第5版. 東京. 中央労働災害防止協会. 2015;pp.104.
- 17) 厚生労働省安全衛生部労働衛生課. 高気圧作業安全衛生規則に基づく減圧表や再圧室などに関するQA. 0327第1号 平成30年3月27日
- 18) 森松嘉孝, 村田幸雄, 合志清隆, 玉木英樹, 大坪仁, 他: 沖縄本島インストラクターダイバーの健康・安全管理に対する予備調査. 九州高気圧環境医学誌 2020: 20; 15-22.
- 19) 野澤徹: ウォータースポーツのための酸素ファーストエイド. 第1版. 東京;一般社団法人 社会スポーツセンター. 2017.
- 20) 特定非営利活動法人 沖縄県ダイビング安全対策協議会:平成21年度 美ら海構築促進事業 沖縄県ダイビング業界実態把握調査 報告書. 沖縄県観光振興課. 2010;pp.7.