

## 潜水用半閉鎖式呼吸器の安全性について

芝山 正治

Nitrox dive by semi-closed circuit at shallow water

Masaharu SHIBAYAMA

キーワード：スクーバ潜水、Nitrox 潜水、半閉鎖式呼吸器

Keywords : Scuba diving, Nitrox diving, Semi-closed circuit

### 1. はじめに

潜水の機器では、自動減圧計（ダイブコンピュータ）などの新しい機器が開発、実用化され<sup>1,2)</sup>、その中でレクリエーションダイバーを対象とした潜水用半閉鎖式呼吸器(Semi-closed circuit)が開発され、普及されたが、現在の普及は停止した状態である<sup>3,4)</sup>。この半閉鎖式呼吸器は、過去に軍事用に開発され訓練された隊員が技術指導者の管理の元で使われているが、装置そのものの構造的な問題点により事故が多発した経過がある。開放式呼吸器(Scuba)と異なり半閉鎖式呼吸器は、取り扱いに熟練を要し、装置の構造の理解や基礎知識及び技術の修得が必要である。

半閉鎖式呼吸器と開放式呼吸器の違いは、前者が水深に関係なく一定時間の潜水が可能であるのに対し、後者は水深が異なると潜水時間が異なり、水深10mで約45分の潜水が可能とすれば、30mでは約半分の20数分になってしまう点である。また、開放式呼吸器はタンクに空気を圧縮して充填するが、半閉鎖式呼吸器は人工的に酸素と窒素を混同させる必要があり、手間と費用が加わる。

日本においては、1991年に簡便型で短時間用(20分以内)の半閉鎖式呼吸器が発売されレクリエーションダイバー向けに普及していた<sup>3)</sup>。また、1994年には本格的な半閉鎖式呼吸器が開発され、最大水深が30m、使用時間が40分まで可

能な装置として販売された。1997年には、同様な仕様で半閉鎖式呼吸器が開発され、当時は国内でレクリエーションダイバー向けの半閉鎖式呼吸器が3種類となった<sup>4)</sup>。

これらの半閉鎖式呼吸器の中で基礎実験から関わることができた装置について、その問題点と利点について提示する。

### 2. 種類と構造

レクリエーションダイバー向けの半閉鎖循環式呼吸器は、表1の通り3種類である。3種類の呼吸器ともタンク内のガスは混合ガスであり、ガスの種類は酸素と窒素(Nitrox)である。

A typeの呼吸器は、酸素濃度が80%、最大水深が5m、使用時間が10分と17分の浅い海域で簡便に楽しめる呼吸器であるが、本格的な半閉鎖式呼吸器ではない。B及びC typeの呼吸器は本格的な半閉鎖式呼吸器であり、酸素濃度は約40%、最大水深は30m、使用時間は40分の仕様である。

B typeとC typeの詳細な構造は異なるが、基本的な循環方式はほぼ同一と考えられる。半閉鎖循環式であるため一定流量をタンクから送気しているが、その量はB typeで6リットル、C typeで9リットルである。また、回路内のガス量が少なくなると回路内が陰圧となり、ダイヤフラムが働きタンクから開放式呼吸器と同様に

ガスが供給される仕様である。しかし、その結果タンクのガスを消費してしまい、潜水時間は短縮する。

### 3. 性能試験及び結果

被験者は、scuba 潜水の経験を有する男性 6 名とした。平均年齢は、 $32.5 \pm 6.3$  才、潜水経験年数は  $6.2 \pm 9.0$  年である (表 2)。基礎実験として自転車エルゴメータを用いて行った最大運動

負荷における体重当たりの最大酸素摂取量は年齢に伴う平均値の  $41.7 \pm 5.1 \text{ ml/分/kg}$  を示し、平均的なダイバーである (表 3)。

Ctype の呼吸器を用いて自転車エルゴメータで運動負荷を加え、コントロールとして同様の負荷量と比較した。59watt の負荷では両者に心拍数の差は認められなかったが、中程度の運動負荷である 98watt の負荷では有意な差は認められなかったが、心拍数の平均値では呼吸器使

表 1 日本のレジャーダイバー向け半閉鎖式呼吸装置

type	oxygen (%)	maximum depth(m)	dive time (min)	weight (kg)
A type (eOBA)	80	5	10/17	1.8
B type (Fieno)	40	30	40	7.8
C type (Scubino)	39	30	40	8.0

表 2 被検者の特徴

被検者	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)	潜水年数 (年)	タンク使用本数(本)
J S	31	174	66	1.5	20
YY	30	162	70	2	40
AY	35	180	68	7	190
ST	28	170	65	2	30
KH	27	170	62	0.5	2
MS	44	178	83	24	1,100
平均	32.5	172.3	69.0	6.2	230.3
±S.D.	6.3	6.5	7.4	9.0	431.4

表 3 最大運動負荷における酸素摂取量

被検者	心拍数 (拍/分)	Vo <sub>2</sub> max* <sup>1</sup> (%/分)	Vo <sub>2</sub> max* <sup>2</sup> (ml/分)	Vco <sub>2</sub> max* <sup>3</sup> (%/分)	呼吸商	換気量 (%/分)	呼吸数 (回/分)	一回換気量 (%)
JS	188	2.88	41	3.10	1.14	180.6	47	2.31
YY	188	3.33	48	3.76	1.13	120.5	47	2.56
AY	182	3.07	45	3.58	1.17	95.6	35	2.73
ST	192	2.17	33	2.37	1.09	73.0	40	1.83
KH	192	2.59	42	2.66	1.03	86.9	50	1.74
MS	170	3.39	41	3.81	1.13	118.9	34	3.50
平均	185.3	2.88	41.7	3.21	1.12	100.6	42.2	2.45
±S.D.	8.4	0.47	5.1	0.60	0.05	18.8	6.8	0.65

※ 1 最大酸素摂取量

※ 2 体重当たりの最大酸素摂取量

※ 3 最大炭酸ガス排出量

用で負荷量が高く現れた (表4)。

プールで行った実験では、最大運動まで負荷を加えた時点の回路内ガス濃度は、平均で酸素が24.6%、炭酸ガスが0.60%であり、酸素欠乏には陥らない値であった (表5)。

実海域で行った実験では、とくに負荷を加えない自由潜水 (写真) で行わせ、その時の潜水中の心拍数及び基礎実験で求められた心拍数か

ら予測される酸素摂取量を求め測定した (表6)。一連の潜水後の浮上直前で回路内ガスを採取し、ガス濃度を調べた。それぞれのガスの平均濃度は、酸素が30.7%、炭酸ガスが0.15%と酸素欠乏には陥らず、炭酸ガスも吸収されていた (表7)。

#### 4. 考察

表4 自転車エルゴメータ運動時 (コントロール) と半開放式呼吸器の使用時 (呼吸器使用) との違いによる運動強度の変化

運動負荷量	被検者	コントロール		呼吸器使用	
		心拍数 (拍/分)	Vo <sub>2</sub> max* <sup>1</sup> (ℓ/分)	心拍数 (拍/分)	Vo <sub>2</sub> max (ℓ/分)
360 kpm (59watt)	J S	131	1.27	126	1.16
	YY	116	1.30	119	1.37
	AY	106	1.47	112	1.60
	OT	112	0.83	113	0.84
	MS	105	1.47	108	1.55
	平均	114.0	1.27	115.6	1.30
	±S.D.	10.5	0.26	7.0	0.31
600 kpm (98watt)	J S	174	2.22	177	1.16
	YY	161	2.33	177	1.37
	AY	127	1.93	137	1.60
	OT	135	1.24	139	0.84
	MS	127	2.06	137	1.55
	平均	144.8	1.96	153.4	2.15
	±S.D.	21.5	0.43	21.6	0.51

20間の自転車エルゴメータ運動

\* 1 最大酸素摂取量

表5 呼吸装置を装着しての水中 (プール) 運動負荷における心拍数と回路内ガス組成

被検者	心拍数 (拍/分)	Vo <sub>2</sub> max* <sup>1</sup> (ℓ/分)	回路内ガス組成 (%)	
			酸素	炭酸ガス
J S	161	1.93	27.4	0.74
YY	174	2.63	22.4	0.94
AY	146	2.35	25.9	0.46
OT	153	1.56	23.9	0.46
MS	133	2.22	23.2	0.42
	平均	153.4	24.6	0.60
	±S.D.	15.4	2.1	.23

200m を6分間で移動し、徐々に負荷を増していく all out 運動。  
最終時点でガスを採取する。

混合ガス中の酸素濃度については、米国で一般的な Nitrox による開放式呼吸器と異なり半閉鎖式呼吸器は循環するガスを再呼吸することにより、供給される酸素の混合濃度は40%であるが、吸気ガスにおける実際の濃度は30~32% (表7) を示し、おおむね米国で使用している Nitrox に準じた酸素濃度となっている<sup>5)</sup>。

一般的概念として、Nitrox の最大のメリットは、窒素ガスの体内への溶解量が軽減される分だけ減圧症罹患の危険が少なくなることである<sup>6)</sup>。さらに水深30m 前後で発症するといわれる窒素酔いに罹患する危険がなくなることである<sup>5)</sup>。また、空気と比べて潜水後の疲労感が少な

いことなどの利点がある。

Nitrox の使用により、無減圧潜水時間を延長できる<sup>6)</sup>が、空気による無減圧潜水時間を大幅に延長することは禁句であり、基本的には空気潜水の減圧表を用い、それを厳守すれば安全率はさらに高くなり<sup>6)</sup>、減圧症の発症率をゼロに近づけることができる。また、さらにその潜水深度を30m 未満とすれば、Nitrox は安全性から考慮すれば優れた呼吸用ガスといえる。ガイドダイバーやインストラクターダイバーなどは、一日に3本も4本も、中には7本も潜水を行う者がいるが<sup>6)</sup>、これらの潜水の中で Nitrox を使用することは減圧症の予防から非常に重要

表6 実海域での潜水中の心拍数と査機摂取量の平均値

被検者	心拍数 (拍/分)		Vo <sub>2</sub> max (ℓ/分)	
	平均	±S.D.	平均	±S.D.
J S	134.4	11.9	1.346	.263
	143.1	12.6	1.535	.277
Y Y	107.8	11.0	1.105	.253
	93.7	6.9	0.730	.286
A Y	130.6	9.7	1.631	.223
	99.8	11.5	1.289	.246
O T	109.3	7.9	1.493	.171
	934	11.5	0.486	.215
K H	126.8	6.2	1.097	.100
M S	83.4	3.5	0.866	.114
平均±S.D.	112.8	2.14	1.145	.423

表7 実海域での潜水中(浮上直前)回路内ガス組成

被検者	酸素 (%)	炭酸ガス (%)
J S	31.1	0.22
	30.1	0.16
Y Y	30.9	0.27
	29.5	0.07
A Y	29.4	0.18
O T	31.8	0.12
K H	30.9	0.14
M S	31.8	0.06
平均	30.7	0.15
±S.D.	.9	.07



自由潜水中の被験者

なことである<sup>7,8)</sup>。

実海域実験で求められた負荷量(表6)は、早歩きの59watt負荷量(表4)に匹敵し、最大運動までの負荷量をプールで行った結果に於いても(表5)、測定された回路内ガス濃度を維持できれば(表7)、半閉鎖循環式呼吸器は、設定された機能が正確に働くならば酸素欠乏症や炭酸ガス中毒の危険性には陥らない呼吸器である。タンク内の残圧の確認方法は、開放式呼吸器と同じ方式の残圧計で確認する方法を用い、回路内への水の流入を防ぐ手段は、マウスピース内の水を外部に吐き出す工夫がなされている。また、急速潜降などで生じる定量供給ガス不足に対しては、自動的に開放式呼吸器として必要吸気ガス量を確保できる構造となっている<sup>9)</sup>。

しかし、回路内のガス組成を潜水中に確認する方法はなく、開放式呼吸器よりも使用部品数が多く、管理面やチェック箇所が多くなり取り扱い方の過ちが発生する可能性がある。また、最大水深が30mと決められているが、この水深を無視して潜降を続けると酸素分圧が上昇し、酸素中毒の発生する危険性がある。呼吸器の取り扱い方を間違えた結果、回路内に水が流入し、

炭酸ガスの吸収能力が低下<sup>9)</sup>したときダイバーに伝達する手段が考慮されていないなどの問題点は残り、今後も安全対策に対する検討が必要である。

#### [引用文献]

- 1) 芝山正治：潜水で用いる自動減圧計によって発症した減圧症について、駒沢女子大学研究紀要、3：95-100、1996.
- 2) 小此木國明：ダイブコンピュータ(Dive Computer)と安全管理について、潜水医学実験隊報告、10(2)：22-35、1993.
- 3) 垣鏑直、中山英明：レジャー用半閉鎖式潜水呼吸器eOBAの評価、生理人類誌、9(3)：305-310、1990.
- 4) 吉田昭彦：半閉鎖式呼吸装置「スクビーノ」、呼吸保護、10(1)：14-20、1995.
- 5) NOAA, Office of Undersea Research, U. S. Department of Commerce: NOAA Diving Manual: Diving for Science and Technology. 1991.
- 6) Nakayama H., Shibayama M., Yamami N. and Mano Y.: Nitrox application for

- leisure diving in Japan, Jpn J Hyperbar  
Mrd, 13-19, 35: 1, 2000.
- 7) 中山晴美、芝山正治、小宮正久、内山めぐみ、山見信夫、高橋正好、眞野喜洋：レジャーダイバーの減圧症罹患頻度について、日高圧医誌、33(2)：73-80、1998.
- 8) 芝山正治、山見信夫、中山晴美、高橋正好、水野哲也、眞野喜洋：レジャーダイバーの現状－現地実態調査からの分析－、日高圧医誌、33(4)：201-204、1998.
- 9) 高橋正好、眞野喜洋、山見信夫、芝山正治：酸素マスクの安全性評価－過激な運動条件下での二酸化炭素吸収特性－、産衛誌、38：149-155、1996.