

安全な潜水調査のためのガス消費率と残圧の検討

鉄 多加志¹⁾・中村 雅子²⁾

Examination of gas consumption rate and residual pressure for safe diving survey

Takashi Tetsu¹⁾, Masako Nakamura²⁾

Abstract

The aim of this research is to determine appropriate gas consumption rate for safe diving through the reading of residual pressure values from unconsumed gas in a diving cylinder at the ends of diving. From the point of views of some risks during the diving activities, the appropriate control of the gas consumption rate should be required. We measured the gas consumption rates under the various conditions of the different activities in waters, in combination with the analysis of detailed diving records. This study provided basis for determination of permissible range and minimum of the residual gas volume under various working conditions in waters.

緒 言

潜水をすることで、体内に取り込まれ、浮上によって排出される窒素に対するリスクに関しては、潜水の計画を立案する際に十分な配慮をしているが、空気消費の管理(以後ガスマネジメント)に関しては、多分野にわたる調査や作業において、重要視されていないケースが多い。同様に、潜水士の育成やレジャーダイビングの初期指導、安全講習会などにおいても、ガスマネジメントは、減圧症の発症を防ぐ手順の解説に比して、講義やテキストで扱われている内容が充実していない。

潜水者が水中で呼吸するガス(一般的には空気)は、深度や労作状況によって、一定の呼吸をしていたとしても消費する量が異なる。陸上においては、周囲が呼吸ガスに囲まれている状況なので、運動によって呼吸量が増えても然したる問題ではない。一方、スクーバ潜水のようにボンベからの限られた呼吸ガスの供給をして潜る場合は、全体のガス量を深度と労作状況に照らし合わせて管理しなければ、呼吸ガスが尽きて呼吸ができなくなってしまう。つまり、減圧症などの潜水障害よりも、命に直接かわるため、この呼吸ガスに基づいた計画や管理の重要度が高い。これまでに、浅海域での長時間潜水における EAN ガス使用の

1) 東海大学海洋学部 海洋フロンティア教育センター

2) 東海大学海洋学部 水産学科生物生産専攻 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1

Marine Studies Frontier Education Center, Course of Applied Biological Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka-shi, 424-8610, Japan

(2018年11月22日受付／2019年1月30日受理)

研究(鉄, 2013)や水中遺跡(沈没船)潜水調査における安全対策の検討(鉄他, 2016)が行われてきた。その中で、減圧症の予防に付随してエンリッチドエアナイトロックスガス(以下 EAN ガス)の利用と空気消費に関する安全の重要性が示された。しかし、これらの研究は、EAN ガスを使用した減圧症の防止に注力されているため、空気の消費量や最小限の残圧はどの程度必要であるかと言った議論には及んでいない。そこで本研究では調査潜水における空気消費と残圧について注視し、安全指標の検討を行うことを目指した。

方 法

静岡県で行われた潜水調査にて、潜水時間と残圧を記録して、ダイバーの空気消費を計算して、潜水の状況を集積した。潜水データは、まず潜水開始前に空気ボンベ内の圧力を記録し、潜水終了後に残圧を報告、潜水開始時間と潜水終了時間を報告して、その差を空気消費圧と実際の潜水時間として記録されている。使用した空気ボンベの容量は全て 10 リットルであり、使用圧に 10 を乗じ、消費した空気の量を計算した。この空気消費量を実際の潜水時間で割ることで、1 分間当りの空気消費量(R.M.V.)を求めた(須賀, 1995)。更にその算出した数値を、労作状況別の RMV 表(Table1)と比較して、安全性に関して個別に作業や水温など要因を含めて検討を行った。

結果の項に示した Table.2 から 8 に記載した数値は、算出した R.M.V. とその状態を安静(rest)、軽度(light)、中度(mod)、重度(heavy)と記し

たものである(朝倉書店, 1987)。提供されたデータには潜水開始時間や終了時間、水深などの記載があるため、その時の潜水時の空気消費量の違いを加味することによって、どのダイバーが、誰と、どのような潜水作業を行っていたが、およそ理解できる。詳細に関しては、それぞれの調査における各ダイバーの空気消費傾向として考察の項に記述した。

結 果

潜水調査は、基本的に 1 日に 2 回行っている。よって Div.No1 及び 2 が 1 日目になり Div.No3 及び 4 が 2 日目の記録となる。Research 1 では、1 日目に比べて、2 日目の方が RMV の値が高いダイバーが多い(Table 2)。

次に、Research 2 では、2 日間の RMV に極端な変化が少ない(Table 3)。Research 3 では、State の半数が light-mod に分類されている(Table 4)。Research 4 では、RMV が 20 を超えているダイビングが 6 回あり、その内の 4 回は F ダイバーである(Table 5)。Research 5 では、RMV が 20 を超えているダイビングが 8 回あり、その内の 3 回は F ダイバーである(Table 6)。Research 6 では、16 回のダイビングの内、light-mod の State が 8 回あり、3 回目のダイビングに集中している(Table 7)。Research 7 では、RMV が 20 を越えるダイビングが 11 回あり、E ダイバーが 2 回目のダイビングで、本調査データ内で最も高い RMV を記録している(Table 8)。

Table 1 Oxygen Consumption and RMV (respiratory minute volume) at Different Rates(朝倉書店, 1987)

WORK RATES	DETAILS	RVM (L/min)	O ₂ intake (L/min)
安静	Sleeping	6	0.25
REST	Siting Quietly	7	0.30
	Standing Still	9	0.40
軽作業	Walk 2 mile	13	0.6
LIGHT	Swim 0.5 knot	16	0.7
中作業	Walk at speed of 4 MPH	27	1.2
MODERATE	Swim at speed of 0.85 knot	30	1.4
重作業	Swim 1 knot	40	1.8
HEAVY	Running 8 MPH	50	2.0

Table 2 Resarch1 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	22.2	light-mod	13.3	light	25.3	mod	25.3	mod
B	24.4	mod	11.7	rest-light	24.0	mod	24.0	mod
C	22.2	light-mod	15.8	light	24.0	mod	25.3	mod
D	18.9	light-mod			21.8	light-mod	18.6	light-mod
E	11.4	rest-light	10.8	rest-light	21.3	light-mod	18.6	light-mod
F	20.4	light-mod	21.6	light-mod	17.8	light		

Table 3 Resarch2 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	21.1	light-mod	18.9	light-mod	20.0	light-mod	19.8	light-mod
B			21.1	light-mod	18.8	light-mod		
C	16.7	light	20.0	light-mod	20.0	light-mod	19.8	light-mod
D	13.3	light	14.4	light	13.3	light	10.0	rest-light
E	16.7	light			17.8	light	18.2	light-mod
F	15.6	light			20.2	light-mod	25.0	mod

Table 4 Resarch3 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	18.1	light-mod	21.7	light-mod	19.1	light-mod	14.5	light
B	22.7	light-mod	23.5	light-mod	20.2	light-mod	23.2	mod
C	22.7	light-mod	18.0	light	19.1	light-mod	21.7	light-mod
D	24.3	mod	18.0	light	16.5	rest-light	10.7	rest-light
E	17.5	light	14.1	rest-light	14.1	rest-light	15.8	light
F			20.7	light-mod	27.4	mod		
G			18.4	light-mod	23.4	light-mod		
H	20.5	light-mod	23.8	mod	20.7	light-mod	26.7	mod

Table 5 Resarch4 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	19.4	light-mod	19.4	light-mod	19.3	light-mod	17.2	light
B	19.4	light-mod	18.3	light-mod	18.1	light-mod	20.4	light-mod
C	19.4	light-mod	19.4	light-mod	18.1	light-mod	16.1	light
D	16.7	light	19.0	light-mod	20.3	light-mod	15.1	light
E	17.2	light	16.0	light	16.8	light	18.2	light-mod
F	29.5	mod	24.0	mod	25.4	mod	22.9	light-mod

Table 6 Resarch5 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	17.0	light	14.3	light	15.9	light	16.5	light
B	19.0	light-mod	18.1	light-mod	17.8	light	21.2	light-mod
C	16.0	light	23.0	mod	19.2	light-mod	21.2	light-mod
D	18.8	light-mod	16.1	light	19.2	light-mod	16.9	light
E	21.2	light-mod	25.7	mod	19.2	light-mod	19.3	light-mod
F	27.1	mod	22.7	light-mod	17.2	light	26.2	mod

Table 7 Resarch6 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	17.2	light	15.8	light-mod	21.6	light-mod
B	19.2	light-mod	16.7	rest-light	21.6	light-mod
C	19.2	light-mod	14.0	rest-light	21.6	light-mod
D	13.3	light	11.8	rest-light	19.1	light-mod
E	15.3	light	21.1	light-mod	24.0	mod
F					22.4	light-mod

Table 8 Resarch7 Respiratory Minute Volume and states

Diver	Div.No1		Div.No2		Div.No3		Div.No4	
	RMV	State	RMV	State	RMV	State	RMV	State
A	16.7	light	15.8	light	16.0	light	18.0	light
B	22.6	light-mod	18.0	light	21.4	light-mod	27.0	mod
C	22.6	light-mod	17.1	light	21.4	light-mod	21.6	light-mod
D	17.0	light	17.8	light	15.6	light	20.0	light-mod
E	22.0	light-mod	33.3	mod				
F	19.8	light-mod	29.5	mod				
G			22.9	light-mod				

考 察

空気消費量は、ダイバーの潜水時間や性別、気温、水温、潜水深度、地形、流向、流速、波高、体格差、年齢、その日の体調、労作負荷、使用しているスーツの種類、調査・作業地点までの距離等の影響を受ける。そのため、本研究のようなモニターを毎回の潜水の際に行い、ダイバーごとの空気消費の状況を把握し、事後の安全を考慮した潜水計画を立てる資料として、重要なデータとなる。このような潜水記録は、高気圧作業安全衛生規則第20条の2にある「作業の状況の記録等」

が示す通り、書類を作成して、この記録は5年間保存しなければならないとあるため、法令を順守する立場からも必要である（中央労働災害防止協会、2016）。

大まかな空気消費量は、簡単な計算で算出することが可能で、その数値を目安に、個人のダイビングスキルや前回のデータとの比較によって潜水時の体調、調査への慣れ、などの状況が確認できる。例えば、水深10m(2ATA)で安静：直立（空気消費9ℓ/分）をしている程度の労作負荷状態における空気消費量の目安は9リットル/分×2ATA=約18リットル/分となる。

調査 1 (Table2)

A, B, C のダイバーの潜水は類似データが多い事から 3 名が同じ作業に携わっていたことが示唆される。2 回目の潜水を除き、その他の潜水では 18 リットル / 分を超えているので、2 回目の潜水では運動量の少ない調査であったことが予測される。D のダイバーは 2 回目のダイビングを行っていないので、他の 5 名との比較はできないが 1, 4 回目のダイビングに比べて 3 回目のダイビングでは運動量の多い調査をしていると考えられる。E のダイバーは 1, 2 回目のダイビングは運動量の極端に少ない調査をしているが、3, 4 回目は運動量のある調査を行っている。F のダイバーは E のダイバーと反対に 1, 2 回目のダイビングの運動量が多く、3 回目の調査は運動量が少ないことから、負荷の大きい作業を交代で行ったことが考えられる。

調査 2 (Table3)

A のダイバーは、4 回目を除きそれ以外の調査がほぼ同じ作業内容であったことが示唆される。B のダイバーは 3, 4 回目の調査に携わっていて運動を伴う調査を行っていることが示唆される。C のダイバーは A とバディを組んでいると考えられるが 1 回目の空気消費量に差がある。これは経験を含めたレベルの違いによるものであることが予測される。D のダイバーは、本調査内で最も空気消費量が少なく、長い潜水の経験を積んでいる者か、あるいはダイビングに精通した女性であることが予測される。E のダイバーは、F のダイバーと同一の調査を行っているか、バディを組んでいるが、直近で違う調査内容を行なっていることが考えられる。

調査 3 (Table4)

A, B, C のダイバーは、同じグループで同一の調査をしていることが数値から示唆される。D, E のダイバーは、1 回目と 2 回目の調査ではバディで同一作業を行なっていることが示唆される。しかし、3 回目と 4 回目の調査では、単独か別々の調査に携わっていることが予測される。F, G のダイバーはバディ潜水で同一調査を行なっていることが示唆される。H のダイバーは、単独で作業負荷の高い調査を行なっていることが考えられる。

調査 4 (Table5)

A, B, C のダイバーは、同じグループで同一の調査をしていることが示唆される。D, E のダイバー

は一見するとバディに感じるが、平均的な消費量の少ないダイバー同士の場合は、同一作業を行なっているのならば、このような差は見られない。F のダイバーは、単独で作業負荷の高い調査を行なっていることが考えられる。

調査 5 (Table6)

A, B, C のダイバーは、過去のデータから考えると一緒のグループで調査をしていることが予測できるが、この空気消費量の不揃いから C ダイバーの運動量が多い調査を行い、A, B のダイバーは運動量の少ない調査に従事していたことが予測される。D, E, F ダイバーの関係性は、その状況に応じてバディになることも単独になることもあり、つねに一定ではないことが考えられる。1 回目の潜水では、D, E はバディであることが示唆されているが、F は単独で調査に従事していることが分かる。2 回目は 3 名とも単独で行動していることが示唆される。3 回目は同じグループとして行動をして、4 回目は 3 名が単独で行動していることが考えられる。

調査 6 (Table7)

A, B, C のダイバーは 3 回の調査を同じメンバーで行なっていることが予想される。水中において、何らかの協力態勢はあると考えられるが D, E, F のダイバーは単独で調査をしていることが考えられる。

調査 7 (Table8)

A のダイバーは、単独で調査を行なっていることが予測される。B, C のダイバーはバディと考えられるが、4 回目の潜水時の消費量に大きな差が見られる。これは、消費量の多い B のダイバーが調査器具などの運搬や回収に携わったことが考えられる。D のダイバーは平均して空気消費量が少なく、作業負荷が小さい調査に従事していると考えられる。E, F のダイバーはバディで作業負荷の高い調査をしていることが考えられる。G のダイバーは D のダイバーとバディを組んで調査を行なっていたと考えられる。

結果の示す空気消費の傾向から、同日の調査で同じ作業を繰り返し行っている、2 回目よりも 1 回目、4 回目よりも 3 回目の方が空気の使用量が多い事が示唆された。

極端に残圧が少ない潜水記録があるが、この

データについては、空気消費量の多くなると考えられる運動量ないし範囲の広い、重量物の運搬の伴う調査において、自分の予想を上回る早さで空気が無くなるために起こっている場合と、その反対に運動量の少ない調査や調査地点からの移動距離が少ない調査にも起きている。後者の場合は、作業に集中し過ぎて、残圧の確認不足によって起きている事が考えられるため、前者の場合よりも注意が必要である。

このデータの中で最も注意が必要となるのは、バディ同士で潜水をしていて、ほぼ同一の空気消費量で、しかも少ない残圧で調査を終えているケースである。これは、同じレベルのダイバーがバディを組んでいる事が予測され、このシステムの意味が理解されていないと考えられるからである。リーダーを決めやすく、残圧に差が出る事で空気のシェアリングができる技量や経験の差がある者同士をバディとすることを提案したい。作業や調査効率を優先させると、潜水能力の高いダイバー同士を組ませる場合があるが、安全の観点から考えると、効率は悪くなるが、技術や経験に差のあるダイバーを組ませることが大切である。拮抗する空気消費量のダイバーが、残圧に無理な範囲にまで及ぶ潜水をした場合を想像すれば、それが如何に危険であるか理解できる。実際、そのような状況下で重大な潜水事故は起きる可能性が高くなる。

この潜水調査では、10リットルの容量のタンクを使用したので、平均で19.6メガパスカル(約200 kgf/cm²)の圧力で充填された状態では、最大で約2000ℓの空気を呼吸することができる。レジャーダイビングなどで慣例的に利用されている安全な範囲を考慮して、5メガパスカル(約500ℓ)を残した状態で出水することを前提にすると

$$1500\ell \div 18\ell / \text{分} = \text{約} 84 \text{ 分}$$

が潜水可能な時間として導き出される(成山堂書店, 2012)。

この調査水深では、減圧停止が不要であることが予測される、特に初回の潜水時の残圧が極端に少ないことがあり、これも改善策を講じる必要性がある。一般的には、潜る際に使用するポンベの容量を10リットルから12リットルへと増やすことで解決が図れるが、作業潜水や調査潜水の場合は、その仕事が終わるまで、あるいは仕事の目処

が立つまで潜水を続行する傾向が強いので、ポンベの容量に関わらず、例えば「残圧 30 kgf/cm²」といった客観的な数値を提示して、それを厳守させるように指示する必要がある。その根拠となる数値は、本分析データで示した1分間あたりに必要な空気量とその作業程度から見当ができる。さらに言及するのであれば、着手している調査や作業の分時換気量と安全に船まで戻れる残圧を帰路の距離との相関で、理解することが可能である。その許容範囲が、自身の経験やスキル、現場の天候や海況、気温、水温、装備等と勘案して安全であると客観視できれば、その残圧こそが最もその場に即した数値であると考えられる。その数値が、仮に一般的には過少な数値であったとしても、それを判断できるダイバーは、その現場で十分に研鑽を積んでいるダイバーに他ならないからである。ただし数か月程度の短期間で、ここで述べているような研鑽を積む事は不可能である。そのため、然るべき有資格者の直接監督下で調査を行う必要があり、少なくとも指導的な立場にある有識者の間接監督下における潜水が望ましい。

まとめ

2016年に静岡県内で行われた潜水調査の記録を使って、潜水計画と潜水管理の側面から残圧に注視した安全な潜水についての検討を行った。しかし、市販の残圧計を一般のダイバーが読み取っていることやメーカーの違い、残圧計の個体差などが考慮されていない事もあり、今回の研究は、規程の残圧量を定めることやそれを厳守させ、空気消費の管理を適切に行う事で、今後の調査において、安全性の高い潜水の環境を整える事が可能になるとの考えに留めた。

業務潜水における作業は、根本的に送気式の考え方が根強く残っており、有線式の水中通話装置によって水上(船上)と会話ができるため、使用される呼吸ガスはダイバーが管理するものではなく、オペレーターやスーパーバイザーが管理し、ともすれば減圧のスケジュールも船上からの指示によって行われる。そのため、水上依存型の潜水の歴史が長く、その方法が慣例になっている。よって、ダイバー自身が水中で無減圧潜水時間も呼吸ガス消費量も管理する、自立型のスクーバ潜水用

の教育や常識が未だに立脚されていないことは、多くのダイビングの教本やマニュアルに、呼吸ガスの管理に関する記述の少ないことが証明している。

このことを踏まえ、今後もデータを蓄積し、整理・分析するだけでなく、次回の調査当日に潜水者個人に対して空気消費量の情報をフィードバックできるようにして、ガスマネジメントをチーム体制だけでなく、早い段階で個人レベルでも出来るようにすべきだと考える。

今後は残圧量を同じ器材を使って記録し、今回言及できなかった内容に取り組んでゆきたい。また、現行の R.M.V. や水面空気消費率 (Surface Consumption Rate) をベースに、様々なリスク要因を係数化して、新たな公式を考案して、残圧ないし危険度を可視化する研究を継続したいと考える。

引用文献

- 鉄多加志 (2013) 東海大学海洋研究所 研究報告第34号
鉄多加志, 小野林太郎, 木村淳, 坂上憲光 他2名 (2016) 東海大学海洋研究所 研究報告第36号
須賀次郎 (1995) JUDF ダイビング・マニュアル 全日本潜水連盟
中央労働災害防止協会 (2016) 潜水土テキスト 中央労働災害防止協会
朝倉書店 (1987) US.NAVY ダイビング・マニュアル
日本潜水科学協会 (2012) 最新ダイビング用語事典 成山堂書店