

高所潜水: 減圧および減圧表の修正

Decompression Sickness & Modify the Decompression Table in High Altitude Diving

高所低温潜水調査(みくりが池)での高所潜水(High Altitude Diving)に関するレポート

※本稿は、1976年に雑誌『ダイビング ワールド』誌に掲載したものを、加筆・訂正し、表-2はスキャンしたもののなので、見にくいのはご容赦ください。 文責: 杉内信夫

水中に冒険を求めるとき、海ばかりでなく、内陸の河川、湖といったところまで拡大される。陸水にそれを求めたとき、それは海面レベルよりも高い所に位置するので、大気圧の低下、淡水と海水の比重の違い、低温などの自然的要因の変化を十分に考慮しなければならない。特に減圧症については、その探検活動が非常に極地化するので、治療に関する諸問題、計画の挫折などを思うと、絶対に発生させてはならないという条件が義務づけられてくる。

この高所における潜水は、クストーが南米のチチカカ湖(3812m)で試み、スイスのビュールマン博士が、彼の研究所の減圧チャンバーを用いて、1000mと2500mの高所より延べ106回のシミュレーション潜水を、特別に修正した減圧表を用いて成功させ、後にレマン湖(372m)において実際の潜水に応用した。日本においては過去に科学的な高所潜水は試みられていない。

本調査は(ダイバー6名)は、1975年10月9日から12日にかけて、高所潜水の安全性に関する2つの課題の論理的概念を掴むために行った。

1. 標準減圧表を高所潜水用に用いるための修正
2. 低酸素環境における潜水運動(呼吸)生理

◎高所という概念

日本では標高3776mの富士山山頂が最高点である。日本の屋根と呼称される日本アルプスには集中的に3000m峰が連座し、有名峰の高さを平均しても3000m前後である。また水深10m以深の湖(池)は、標高2000m以上では4つだけである。これらの条件から見て標高2000m以上を生理学的に高所と考えるとよいだろう。立山みくりが池は、標高2410m、水深15m

と高さは第2位で深さ15mがあり、本テーマの格好の対象である。

◎要因の差

手元の航空医学・高山医学資料から2410mに最も近い2438m、-0.84℃の752mb、564mmHgの数値を用いて検討した。

表—1 変化する要因の比較

	0m	2438m	P/P ₀	2410m	P/P ₀
気圧	760mmHg	564mmHg	0.74	579mmHg	0.76
比重	海水		淡水		
	1.03		1.00		0.97

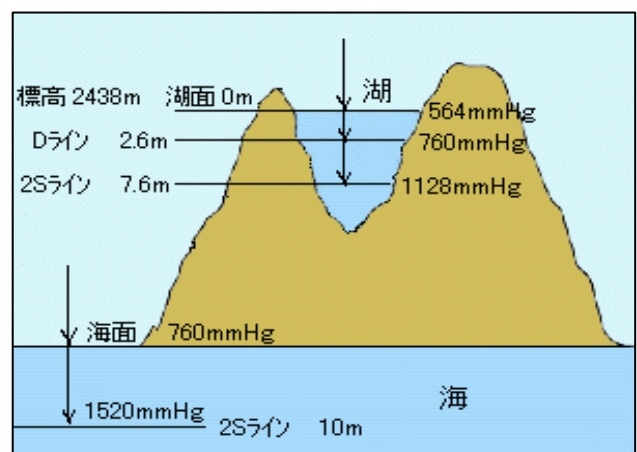
※ 2410mの579Hgは当調査の平均値

◎物理的な圧力変化

表—1より、高所では湖面0mに加わる大気圧力は、海面0mの圧力より小さいので、従来の海面レベルの気圧760mmHgは、湖面下何mかに存在することが示唆される。その深さをD₁とすると

$$D_1 = \frac{760\text{mmHg} - 564\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} \times 10.3 = 2.6\text{m}$$

となり、湖面下2.6mに存在する。



実際のみくりが池のこの深さを D_2 とすると

$$D_2 = \frac{760\text{mmHg} - 579\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} \times 10.3 = 2.5\text{m}$$

で、この深さを D ラインと名づけた。この深さまでが低酸素領域となる(図1)

図1 また、海では水深10mで圧力は倍化するが、この高所では圧力が倍化する深さを $2S$ ラインと呼ぶと

$$2S_1 = \frac{(760\text{mmHg} \times 2) - 564\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} \times 10.3 = 7.6\text{m}$$

実際を $2S_2$ で表すと

$$2S_2 = \frac{(760\text{mmHg} \times 2) - 579\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} \times 10.3 = 7.8\text{m}$$

となる。

このことは、スクイズ(体内空間に圧力による締め付け)やエキスパンション(主に肺の過膨張)のような、圧力の直接作用に及ぼすので、海の潜水とは感覚的に違ってくるので、海同様に十分に留意しなければならない。

◎減圧を考える

潜水を行うとき、水面を離れたとたん人体に加わる圧力変化は、人間が上層へ向かうときの圧力低下の変化とは比較にならないほど加わってくる。海水と淡水の比重の差は実用上無視できるほど小さいが、現在一般的に使用されている米海軍標準表も労働省高気圧障害防止規則も、海水を基準として作成されているので、この減圧表を高所で使用する際には、比重の差も考慮しなくてはならなだらう。先に計算した圧力倍化レベル($2S$ ライン)より明らかなように、高所潜水では、人体の組織不活性ガス圧と高所の環境圧力が平衡したときより潜水すると、海で潜水したときよりも同じ深さでははるかに大きい圧力差が生じる。これは気泡が形成要因としてこの圧力が駆動力として働くので、減圧比を考えるとき重要な因子である。

◎減圧表の修正

安全減圧比 S はは次式によって与えられる。

$$S = \frac{\text{組織不活性ガス圧}}{\text{環境圧(0m)}} = \frac{P_{N2}}{P_B}$$

海面では、 $P_B=1 \text{ kg } 1\text{cm}^2=760\text{mmHg}$

2438mの湖面では、 $P_B=564\text{mmHg}$

実際の2410mの測定では、 $P_B=579\text{mmHg}$

海15mの全圧を P_{15S} と書き

$$P_{15S} = 760\text{mmHg} \times 2.5 = 1900\text{mmHg}$$

そして組織窒素分圧を P_{15SN2} と書き

$$P_{15SN2} = 1900\text{mmHg} \times \frac{80}{100} = 1520\text{mmHg}$$

安全減圧比 S_S は前式より

$$S = \frac{P_{N2}}{P_B} = \frac{1520\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} = 2.0$$

となり、この値が減圧症を発症しない限界値である。

次にこの高所における場合は、

湖の15mの全圧2438mのときを P_{15-1}

実際の2410mのときを P_{15-2} とすると

$$P_{15-1} = 564\text{mmHg} + 760\text{mmHg} \times 1.5 \times 0.97 \\ \approx 1670\text{mmHg}$$

$$P_{15-2} = 579\text{mmHg} + 760\text{mmHg} \times 1.5 \times 0.97 \\ \approx 1685\text{mmHg}$$

また窒素分圧を $P_{15-1SN2}$ 、 $P_{15-2SN2}$ とすると

$$P_{15-1SN2} = 1670\text{mmHg} \times \frac{80}{100} = 1336\text{mmHg}$$

$$P_{15-2SN2} = 1685\text{mmHg} \times \frac{80}{100} = 1348\text{mmHg}$$

それぞれの安全減圧比を S_1 、 S_2 を計算してみると

$$S_1 = \frac{P_{15-1SN2}}{P_{Bh1}} = \frac{1336\text{mmHg}}{564\text{mmHg}} \approx 2.4$$

$$S_2 = \frac{P_{15-2SN2}}{P_{Bh2}} = \frac{1348\text{mmHg}}{579\text{mmHg}} \approx 2.3$$

となり、海の安全減圧比の値よりも大きくなり、従来の減圧表をそのまま使用することは、減圧症が発症する危険がある。

次に減圧表をどのように使用したら安全かを考えてみると、海の場合の安全減圧比が2.4になる圧力を計算すると、

$$S_1 = \frac{P_{15-1SN2}}{P_{Bh1}} = 2.4$$

$$P_{1N2} = 760\text{mmHg} \times 2.4 = 1824\text{mmHg}$$

$$S_2 = \frac{P_{15-2SN2}}{P_{Bh2}} = 2.3$$

$$P_{2N2} = 760\text{mmHg} \times 2.3 = 1748\text{mmHg}$$

この窒素分圧が 1824mmHg あるいは 1748 mmHg になる深さが、湖 15m に潜水場合の減圧表の圧力に匹敵すると考えて、それを χ とすると

$$1824\text{mmHg} = \chi_1\text{mmHg} \times \frac{80}{100}$$

$$\chi_1 = 2280\text{mmHg}$$

$$1748\text{mmHg} = \chi_2\text{mmHg} \times \frac{80}{100}$$

$$\chi_2 = 2185\text{mmHg}$$

即ち深度 d は

$$d_1 = \left(\frac{\text{全圧}}{\text{海面圧}} - 1 \right) \times 10 = \left(\frac{2280\text{mmHg}}{760} - 1 \right) \times 10 \\ = 20(\text{m})$$

$$d_2 = \left(\frac{2185\text{mmHg}}{760} - 1 \right) \times 10 = 18.75(\text{m})$$

以上の計算結果より、みくりが池水深 15m の深度は 20m となり、減圧表の 21m の欄を使用することになる。

組織に溶け込んだガスが、浮上のとき減圧症が発症する因子つまり安全減圧比から見ると、浅くても気泡が発生しやすい圧力の比をもつ、即ち減圧の安全性からみると、この湖の水深 15m は海の 20m にあたる。ここまでの計算は調査活動前 564mmHg と活動中現地気圧測定のを者を並行して述べた(表-2)。

ここで、この湖の大気圧環境も含めた圧力からみた深さは、

2410m では

$$\left(\frac{1670\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} - 1 \right) \times 10 = 11.9 \approx 12\text{m}$$

2438 m では

$$\left(\frac{1685\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} - 1 \right) \times 10 = 12.1 \approx 12\text{m}$$

となり、海の 12 m に相当する。深さ(水の厚み)から見ると浅くなり、減圧症の安全性から見るとむしろ深くなるという面白い結果が得られた。

また、別のアプローチとして、ホールデンの 2:1 の定律より、仮にこの湖の水面の気圧 579mmHg を 1ATM とすると、その圧力が倍化するレベルは前述の計算より 7.6m になるので、減圧表を使用する際、水深 7.6 m のところは減圧表の 10m を見なければならぬことが推察される。とするとこの湖の深さは 15m なので、ほぼ 7.6m の 2 倍に相当するので、小数点以下は安全を見込んで繰上げ 21m のところを見ることになり前の結果と合致する。

次に減圧点の周世だが、これも前述した考え方と同様に安全減圧比を計算すればよい。

水深 3m 組織窒素ガス分圧を $3P_{N2}$ 書くと

海の場合

$$3P_{SN2} = 760\text{mmHg} \times 1.3 \times 0.8 = 790\text{mmHg}$$

湖の場合

$$3P_{1SN2} = \{564\text{mmHg} + (760\text{mmHg} \times 0.3 \times 0.97)\} \times 0.8 \\ = 628\text{mmHg}$$

$$3P_{2SN2} = \{579\text{mmHg} + (760\text{mmHg} \times 0.3 \times 0.97)\} \times 0.8 \\ = 640\text{mmHg}$$

安全減圧比 S は

海の場合

$$S_s = \frac{790\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} = 1.03$$

湖の場合

$$S_1 = \frac{628\text{mmHg}}{564\text{mmHg}} = 1.11$$

$$S_2 = \frac{640\text{mmHg}}{579\text{mmHg}} = 1.10$$

となる。

減圧点水深 3m の修正は、湖の安全減圧比が海のどの位に当たるかを知ればよく、更にその比を考えればよいので

$$\frac{S_s}{S_1} = \frac{1.03}{1.11} = 0.93$$

$$\frac{S_s}{S_2} = \frac{1.03}{1.10} = 0.94$$

即ち 3m の減圧点は
2438m(564mmHg) のとき

$$d_1 = 3m \times 0.93 = 2.79 \approx 2.8(m)$$

2410m(579mmHg) のとき

$$d_2 = 3m \times 0.94 = 2.82 \approx 2.8(m)$$

と 2.8m に上昇してくる。同様に

$$6m \rightarrow 5.4m \quad 9m \rightarrow 7.9m \quad 12m \rightarrow 10m$$

になる。

高所で潜水する場合、ヘリコプターなどで、いきなり海拔 0m に近い環境から高所に行き潜水は行わないようにしなければならない。なぜならば海拔 0m 近傍の体内のガス圧が残存し、生体には反復潜水同様の効果を与えるからである。しかし、その修正値は減圧表からは見いだせないの、高所現地に着いてからは 12 時間滞留すれば高所環境圧力と体内ガス圧が 98.5% 平衡するからである。

本稿は、海上自衛隊潜水医学実験部の伊藤敦之医学博士に、ご指導ご助言を頂きました。

みくりが池後数年に渡り、アンデスやヒマラヤの湖で高所潜水を実践してきました。参考までに次項に各湖のデータ示しました。

また、本編『辺境の海へ 1 と辺境の海へ 2』の「雲の上で潜る、チチカカ湖に潜る、赤い糸」をご参照ください。

みくりが池潜水調査記録表

表-2

日	付	天候	気温 (正午)	気圧	最低水温	潜水回数	潜水地点	ダイバー	深度	減圧表 深度	潜水時間	反復 記号	休憩 時間	ガス 圧少 値	次回 潜水 修正 時間	無減圧 潜水に おける 次回潜 水可能 時間	潜水内容
10/9		曇	3°C	772 mb	4°C	①	A-E-中-A	S. M. K	15m	21m	A. M. 8:50-9:30 (40分)	H	2:20	E	30分	30分	ウォーミング・アップのための予備潜水 記録撮影
						②	A-B-A	S. M. K	12m	18m	A. M. P. M 11:50-12:20 (30分)	J	2:50	E	—	—	
						③	B	S. M	7m	10m	P. M. 3:10-3:30	終了	—	—	—	—	
10/10	快晴	0°C	775 mb	4°C	①	A-E-中-A	S. M. Ys. Y _M	15m	21m	A. M. 9:10-9:40 (30分)	F	2:50	C	20分	30分	水中撮影生物採集 採泥 ※水面遊泳 において空気希薄 のため、ほぼ全員 酸素不足による疲 労が出、3回中止	
					②	中央部	S. M. K. Ys. Y _M	15m	21m	A. M. 12:30-1:00 (30分)	K	終了	—	—	—		
10/11		曇→雨 (みぞれ)	4°C	775 mb	4°C	①	中央部-C	S. Ys	15m	21m	A. M. 9:00-9:40 (40分)	H	3:20	D	—	—	採泥 ガス採集 生物採集 岩盤撮影
				501 mm Hg		②	C-B-A	S. M.	5m	7m	P. M. 1:00-2:70 (90分)	終了	—	—	—		
10/12		曇→雨 (みぞれ)	4°C	772 mb	4°C	①	A-E-C	S 単独	5m	7m	A. M. 9:30-11:00 (90分)	H	2:30	D	—	—	岩盤撮影 採水、生物採集 沈下物引上げ
						①	中央部	M 単独	15m	21m	A. M. 9:30-10:00 (30分)	F	3:30	C	—	—	
						②		S. M. J.	6m	9m	P. M. 1:30-3:00 (90分)	終了	—	—	—	—	

各湖の圧力変化と水深 15mときの修正値(小数点以下繰上げ)

	北アルプス みくりが池	ヒマラヤ ポクスンド湖	南米 チチカカ湖	南米 アリコーマ湖
標高(m)	2410	3600	3812	4800
高度気圧 (mmHg)	580	490	470	427
Dライン(m)	3	4	4	5
2Sライン(m)	8	7	7	6
修正深度(m)	19	23	24	26
減圧表深度(m)	21	24	24	27

減圧表の欄

みくりが池……………水深 15m減圧表 21m欄
 ポクスンド湖……………水深 15m減圧表 24m欄
 チチカカ湖……………水深 15m減圧表 24m欄
 アリコーマ湖……………水深 15m減圧表 27m欄