

高圧ヘリウム酸素環境下の体熱平衡

小此木国明* 大橋光夫* 大岩弘典*

はじめに

高圧ヘリウム環境下ではヘリウムの高熱伝導性にもとづく体熱損失の増加が問題となる。すなわち、体表面からの対流熱損失及び肺からの呼吸性対流熱損失の増加が体熱手術の失調をもたらし¹⁾、潜水事故の原因となる危険性がある。このため飽和潜水ではヘリウム環境温度を確かめるとともに、潜水中ではヘリウム呼吸による水中遊泳中の皮膚温及び呼吸ガス温度を高めるため給湯方式がとられている。

潜水中の事故防止には体熱損失、特に皮膚性対流熱損失及び呼吸性対流熱損失をできるだけ正確に算定することが安全潜水につながることになる。過去、対流熱損失の測定において、その算定の基礎となる対流熱伝達率(hc)の測定が難しいため体熱平衡式から消去法で求めてきた²⁾が、Nishiらはhcを直接求める実験式から対流熱損失を算出した³⁾。

今回我々は60mヘリウム酸素飽和潜水における体熱損失のうち、特に皮膚性対流熱損失および呼吸性対流熱損失に関して方法論的な検討を加え、実際に潜水時の測定に供しうる方法を検討したので報告する。

方 法

表1に身体的条件を示す潜水員(男子)2名を高圧ヘリウム環境下(He77.81%, N₂16.56%, O₂5.63%)に8日間滞底させ、加圧前、加圧中、

表1. Physical Characteristics of Divers.

Diver	Age	Height (cm)	Weight (Kg)	Surface Area (m ²)	Body Density (Kg/L)
S.N.	41	168.8	59.5	1.68	1.073
T.H.	29	162.0	58.5	1.62	1.067

及び加圧後の体熱平衡を裸体安静座位で検討した。

環境温度は高圧下1~3日目までは29℃、4日目27℃、5日目25℃、6日目27℃、7~8日目29℃とし、前後の大気圧下は室温とした。

体熱平衡式は次式の通りである。

$$M \pm S = E + R + Cs + Cr$$

M:産熱量, S:貯熱

E:蒸散熱損失, R:輻射熱損失

Cs:皮膚性対流熱損失

Cr:呼吸性対流熱損失

体熱平衡の各要素の算定は以下の通りである。産熱量(M):ガス量はマスク呼吸によりダグラスパックに採気し、貫通部を通しタンク外で200ℓチソートガスメーター(建部青州堂製)で測定し、呼吸ガス分析はガスクロマトグラフ(島津GC-5A)で行い、 $M = (0.23R + 0.77) \times 5.05 \times V_{O_2}$ の式を用い算出した。

貯熱(S):直腸温(Tr)及び皮膚温(Ts)はサーミスター温度計(0.2級,宝工業製)により測定し、平均皮膚温はDuboisの7点法で算出した。また体重は精密体重計(5g感度,神戸衡器製)で測定し、 $S = 0.83 \times Wt(0.67\Delta Tr + 0.33\Delta \bar{T}_s) / \Delta t$ の式によって算出した。

蒸散熱損失(E):体重の変化量は精密体重計を使用し、裸体安静座位で2時間の量として求め、産

*海上自衛隊潜水医学実験隊

表2. Heat balance during successive 2-hr period in different chamber temperature at 1 ATA-Air and 7 ATA-He-O₂

P ATA	Diver	Ta °C	Ha %	Heat balance (watts)						hc watts/m ² °C	
				M	S	E	R	Cs	Cr		
1.0 Air	S.N.	26.6	57	132	15	(16)	51	78	2	7.1	
	T.H.			124	16	(18)	51	69	2	6.5	
7.0 He-O ₂	S.N.	29.8	62	134	3	27	17	82	11	13.6	
	T.H.	26.5	74	123	6	32	15	72	10	13.7	
	S.N.			147	9	24	16	95	21	13.9	
	T.H.	24.7	70	143	13	29	16	93	18	14.0	
	S.N.			183	16	33	38	108	20	11.3	
	T.H.	27.0	76	165	19	31	30	101	22	12.3	
	S.N.			121	11	24	25	67	16	9.5	
	T.H.	28.9	75	123	8	24	23	66	18	8.6	
	S.N.			120	7	26	19	71	11	10.9	
	T.H.	117	8	24	18	71	12	10.5			
	1.0 Air	S.N.	27.4	73	111	14	24	47	53	1	4.6
		T.H.			119	18	21	39	76	1	7.4

Symbols: P= Ambient pressure,
Ta= Ambient temperature,
Ha= Ambient humidity (R.H.)

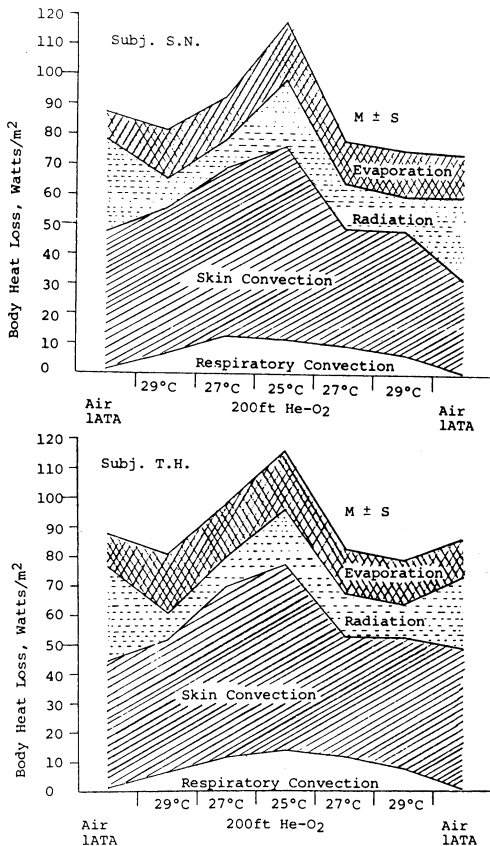


図1 Routes of body heat loss in resting males in several ambient temperatures at 7ATA (He-O₂).

熱量測定時に求めた炭酸ガス排泄量と酸素消費量から $E = 0.626(\Delta Wt - 1.98 \dot{V}_{CO_2} + 1.49 \dot{V}_{O_2}) / \Delta t$ の式を用い算出した。

輻射熱損失(R)：黒球温度計による放射温度、環境温度、及びブローの風量から算出した気流によって平均放射温度を求め、平均皮膚温との関係式 $R = 0.75 \times A \times 0.082 \times 10^{-8} (\bar{T}_s^4 - T_g^4)$ によって算出した。

皮膚性対流熱損失 (Cs)：Cs=M±S-E-R-Crの熱平衡式から既知の値を代入し求めた。

呼吸性対流熱損失 (Cr)：チソトガスメーターで測定した換気量と、サーミスター温度計で求めた呼気及び吸気温度から次式 $Cr = V_E \times \text{密度} \times \text{比熱} \times (T_{exp} - T_{ins})$ により算定した。

対流熱損失(hc)：平均皮膚温、環境温度、及び間接的に求めた皮膚性対流熱損失より次式で求めた。 $hc = Cs (\bar{T}_s - T_a) A$

結 果

表2に体熱平衡の算定結果を示す。Mは大気圧Airより7ATA He-O₂の方が若干高値を示し、また7ATA He-O₂環境下では24.7°Cの最低温度の時に最高値を示している。Sについてはすべてマイナスの値を示したが、大気圧Airよりも7ATA

He-O₂環境で予測に反して高い値を示した。しかし7ATA He-O₂環境下では温度の低下とともにSの値も小さくなっている。Eは高圧He環境下で減少することが、これまでの報告から予測されたが、今回は大気圧Airの測定値の方が低い値を示した。また7ATA He-O₂の環境では環境温度が低くなるにつれて高値を示している。Rについては、大気圧Airで高い値を示し、7ATA He-O₂下では環境温の低い程高い値を示している。Csは予想通りの結果であり、寒冷刺激の強い環境ほど高い値を示した。Crも予想通りの変化を示しているが、大気圧Airと7ATA He-O₂との差がはっきりに出ている。この間接的方法によるhcの値は7ATA He-O₂環境下で8.6~14.0watts/m²°Cで平均11.8watts/m²°Cであった。Raymondらの値9.12watts/m²°Cに比べ、若干高値を示した。

図1は以上の値をグラフに示したものである。環境温の低下によりCs及びCrの増加がみられる。また環境温の段階的变化で、後半の27°C, 29°CのCs及びCrが前半より低値を示した。これは低温環境に対する生理学的insulationが影響していることが示唆される。

考 察

高圧He環境下で体熱損失について検討したところほとんど予想通りの結果を得たが、實際上測定方法が複雑すぎる。我々の行った方法は皮膚性対流熱損失をCs=M±S-E-R-Crという式から間接的に求めるため、蒸散や輻射による熱損失の算定誤差が反映する恐れがある。Nishiらによって皮膚性対流熱損失をCs=hc(T_s-T_a)にあてはめ直接求める方法が報告されている。しかし対流熱伝達率hcにどんな値を用いるかは研究者で異なり、特に高圧He環境下ではその算定が難しい。Nishiらはナフタリン昇華法⁴⁾で大気圧Air中のhcを求めhc=10V^{0.5}(V:気流速度)とした。これに熱伝達理論から求めた補正比率としてhc=k(ρ/μ)^{0.55}(μ·Cp/k)^{0.33}, (k:熱伝導率, ρ:密度, μ:粘性係数, Cp:定圧比熱)を考慮して、ヘリウム混合空気中の対流熱伝達率が求められる。この方法に今回の我々の実験値を代入した結果が表3のCsであり、また表4のhcである。我々の行った間接的方法と比較するとCsの値は若干低い値を示したが同じ傾向であり、hcも

表3. Skin conductive heat exchange (Cs) and respiratory conductive heat exchange (Cr) measured with Nishi's method

P ATA	Diver	conductive heat exchange (watts)	
		Cs	Cr
1.0	S.N.	30	1
	Air T.H.	30	1
7.0 He-O ₂	S.N.	70	2
	T.H.	64	2
	S.N.	80	5
	T.H.	79	4
	S.N.	112	7
	T.H.	97	4
	S.N.	83	3
	T.H.	90	4
1.0 Air	S.N.	57	1
	T.H.	50	1

表4. convective heat transfer coefficient (hc) calculated with Nishi's method

P ATA	hc watts/m ² °C
1.0 * Air	2.7
7.0 He-O ₂	11.8
1.0 ** Air	4.9

* before compression

** after decompression

7ATA He-O₂では11.8watts/m²°Cとなり同様の値を得た。

この結果から高圧ヘリウム環境のCsを算出するには、kcの値は実験値を以って、平均皮膚温と環境温度との差に乗じて得る値を使用して何らさしつかえないと考える。

呼吸性対流熱損失(Cr)の測定は高圧He環境

下での換気量 (\dot{V}_E), 吸気ガス温度 (T_{ins}), および呼気ガス温度 (T_{exp}) の値を正確に測定する必要がある。今回我々が測定した Cr は高圧 He の dry 環境であったが, 実際潜水中の Cr の測定の必要性を考慮すると, 水中での種々の姿勢変化に追従できる直接的な換気量の測定法⁵⁾と吸気開始時及び呼気終末時の時定数に追従できる測温センサーの開発が必要である。 T_{exp} の値を $34^\circ C$ と仮定し, T_{ins} を環境温 (T_a) と置きかえた Nishi らの $Cr = 0.0014 \times M (34 - T_a) \times p^{0.55}$ の式に今回の我々の実験値を代入した結果が表 3 の Cr の値である。この成績は高圧ヘリウム環境の温度変化を正しく反映しているとは考え難い。この結果から正確な測定が可能な技術を早急に確立する必要性が認められる。

結 論

- 1) 2名の潜水員に対し, 60m $He-O_2$ 下 8日間 ($25 \sim 29^\circ C$) の飽和潜水を行い, その時の体熱損失を算定した。
- 2) C_s については hc と $\bar{T}_s - T_a$ の関係から求める値が間接法から求めた値とほぼ一致し Nishi らの方法が応用できる見込みがたった。
- 3) Cr については換気量, 密度, 比熱, 及び呼吸

ガス温度から求める式が比較的良好な値を示すことがわかった。

- 4) C_s 及び Cr の潜水中の算定には皮膚温, 呼吸ガス温度, 及び換気量の精度の良い測定方法の確立が必要である。

〔参 考 文 献〕

- 1) Webb, P., Body heat loss in undersea gaseous environments, *Aerospace Med.* 41(11), 1282—1288, 1970.
- 2) Raymond, L. W., E. Thalmann, G. Lingren, H. C. Langworthy, W. H. Spaur, J. Crothers, W. Braithwaite, and T. Berghage, Thermal homeostasis of resting man in helium-oxygen at 1—50 atmospheres absolute, *Undersea Biomedical Research*, 2(1), 1975.
- 3) 西安信: 人体と環境との熱交換, 温熱生理学, 東京, 1981, 理工学社, 33—72.
- 4) Nishi, Y. and A. P. Gagge, Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *J. Appl. Physiol.*, 29(6), 830—838, 1970.
- 5) Daskalovic, I. Y., Akio Hashimoto, N. A. Carlson, and E. H. Lanphier, Monitoring and Fractionation of Ventilation during immersion using a respiratory inductive plethysmograph (RIP), *Undersea Biomedical Research*, 9 (1, Suppl.), 16, 1982.