

●原 著

高圧環境下の呼吸動態に関する研究——体熱損失測定——

小此木国明* 橋本昭夫* 大岩弘典*
西 功** 富澤儀一** 水谷和博**

飽和潜水中の潜水員が被る代謝系や内分泌系への影響、特に body weight loss や hyperbaric diuresis に、高圧ヘリウム環境の“cold stress”の関与が考えられている。特に“cold stress”として、皮膚からの対流性熱損失(Cs)の作用が大きいと考える。

そこで7名の潜水員を被験者とし、200m および300m の飽和潜水時の皮膚からの対流性熱損失の定量的測定を試みた。体熱損失諸量の測定には質量分析計、ニューモタコメータ、サーミスタ、およびコンピュータより成る測定装置を開発し、使用した。Csは体熱平衡式から消去法によって間接的に求めた。

その結果、Csの平均値は200m で $17.9 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ を示し、300m では $38.2 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。対流熱伝達率(hc)は240m までの深度との関係は $hc = 1.42P^{0.63}$ の式($hc : \text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, P: ATA)によって表され、300m でのhcはこの式より求められる値を越えていた。体熱平衡式から見た総体的体熱損失は貯熱が $0 \sim 12 \text{ kcal} \cdot \text{hr}^{-1}$ であったことから、大きなものではなかったが、Csは深度と共にその値が増加し、特に300m でのCsの値が高値を示したことは、被験者にとって感覚的に快適環境にもかかわらず、Csが“cold stress”として生理的に何等かの影響を与えていることが推察される。

キーワード：飽和潜水、体熱損失測定法、質量分析計、熱平衡、対流熱伝達率

A Study of Cardio-Respiratory Behavior under High Pressure Environment

—Methodology of body heat loss measurement—

Kuniaki Okonogi*, Akio Hashimoto*, Hiromichi Oiwa*, Isao Nishi**, Giichi Tomizawa**, and Kazuhiro Mizutani**

* JMSDF Undersea Medical Center

**Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo

To determine if there were any relationship between body heat loss and the phenomena of body weight loss and hyperbaric diuresis in divers during hyperbaric helium exposure, quantitative measurement of convective skin heat loss(Cs) was studied in seven divers participating in 200 and 300m saturation dive simulations. Body heat bal-

ance was measured by using instrument consisting of a mass spectrometer, pneumotachometer, thermistors, electric scale and data processors. Cs was estimated indirectly by using the equation of thermal balance.

Mean value of Cs was $17.9 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ at 200m and $38.2 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ at 300m. Convective heat transfer coefficient(hc) increased linearly up to the depth of 240m shown by the equation: $hc = 1.42P^{0.63}$ in which hc is in $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ and P is pressure in ATA. At 300m it increased beyond what was predicted by the equation. A net thermal balance was maintained fairly well judging from the heat storage (S) which ranged $0 \sim 12 \text{ kcal} \cdot \text{hr}^{-1}$.

From this result, it can be said that Cs may be a factor acting as a “cold stress” during hyperbaric helium exposure even though the room temperature was kept at the subjectively comfortable range.

*海上自衛隊潜水医学実験隊

**東京理科大学理工学部

Keywords :

saturation diving
methodology of body heat loss measurement
mass spectrometer
thermal balance
convective heat transfer coefficient

目 的

飽和潜水水中の潜水員が被る代謝系や内分泌系への影響, 特に, body weight loss¹⁾²⁾や hyperbaric diuresis³⁾⁴⁾は, 高圧ヘリウム環境の“cold stress”の関与が考えられてきた。飽和潜水水中の“cold stress”の影響を客観的に表し, 潜水員の体熱損失量を定量的に測定するのは繁雑である。これは呼吸代謝系のデータの採取と解析法が複雑なためであり, 体熱損失の経時的な測定を困難にしていた⁵⁾。

高圧ヘリウム酸素環境下の体熱損失については, 過去の研究^{5)~8)}から, 対流性熱損失の増大が顕著であるが, 他の放射, 蒸散等の熱損失の変化は少ない。特に皮膚からの対流性熱損失(Cs)を飽和潜水水中に経時的に測定できれば, “cold stress”と他の生理学的指標との因果関係を評価することができる。

良く知られている体熱損失の式は, Csが環境温度と平均皮膚温の差および対流熱伝達率(hc)で決まることを示している。このhcは深度, 環境ガス組成, 風速および発熱体の形状等で異なるが, 飽和潜水では環境温度が潜水深度で決まるため, hcは深度依存の係数になると考える。そこでhcが判り, 飽和潜水水中の潜水員のモニタリングで環境温と平均皮膚温を測定すれば, Csを経時的に測定できる。

過去2年間に実施した200mおよび300mの飽和潜水実験で, 体熱平衡式を利用して“cold stress”としてのCsを測定し, hcの算定を試みた。

方 法**1. hcの求め方**

体熱平衡式より, Csは:

$$Cs = (M \pm S) - (Es + Er \pm Cr \pm R) \quad (\text{kcal} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad \dots \dots (1)$$

但し, M:産熱量

S:貯熱

Es:皮膚からの蒸散熱

Er:呼吸からの蒸散熱

Cr:呼吸からの対流熱

R:放射熱

また,

$$Cs = hc \times (Ts - Ta) \quad (\text{kcal} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad \dots \dots (2)$$

但し, Ts:平均皮膚温(°C)

Ta:環境温度(°C)

式(2)から

$$hc = Cs / (Ts - Ta) \times A \quad (\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \quad \dots \dots (3)$$

但し, A:体表面積(m²)

そこで, hcを求めるにあたって, まず, Csを算定するために, 式(1)の右項の各体熱損失量も同時に測定できるように考慮した新しい測定システムを用いた。

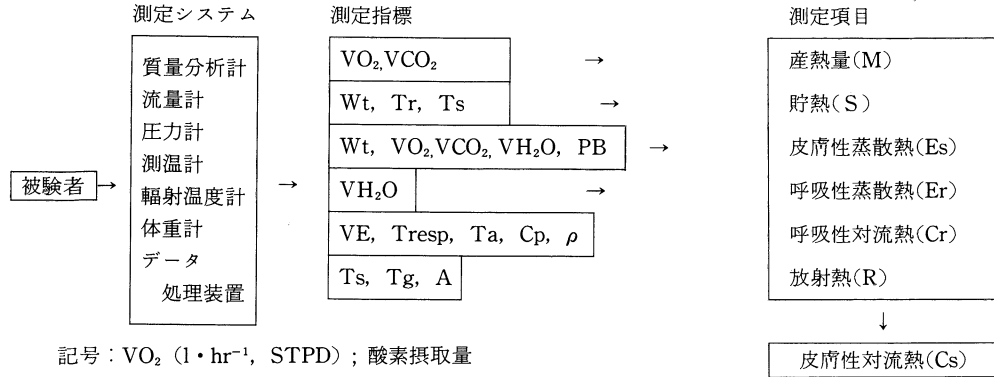
このシステムによる体熱平衡の測定フローチャートを図1に, 体熱平衡式の各熱量の算定式を表1に示す⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾。

2. 体熱損失測定装置**(1) 測定システムの構成**

我々は高圧環境下の呼吸動態の測定を breath by breathで可能とする装置を開発し, すでに報告した¹¹⁾。この装置に温熱測定装置を組み込み, コンピューターで体熱損失諸量を算出できるように本装置を組み立てた。

システムを構成する機器は, 次の通りである。

質量分析計	: Mass-Spectrometer (ウエストロン; WGSS-100D, 磁場型複式コネクタ方式, N ₂ ; O ₂ ; He; Ar; H ₂ O; 0~100%, CO ₂ ; 0~10%)
流量計	: Pneumotachometer (ウエストロン; WFMU-5000, Fleish type ヒーター加熱方式, 38φ)
測温計	: 環境温度; Thermister(宝工業; P XK-67, -5~50°C ±0.1°C, 60 sec) 皮膚温; Thermister(宝工業; P ZL-64, -5~50°C, ±0.2°C, 7 sec) 直腸温; Thermister(宝工業; P XN-46, 35~45°C ±0.2°C, 6 sec)
湿度計	: 乾湿セラミックセンサー(松下電器,



記号：VO₂ (l・hr⁻¹, STPD)；酸素摂取量
 VCO₂ (l・hr⁻¹, STPD)；炭酸ガス排泄量
 Wt(kg)；体重, Tr(°C)；直腸温, Ts(°C)；平均皮膚温
 VH₂O(ml・hr⁻¹, STPD)；水蒸気排泄量, PB(mmHg)；環境圧
 VE(l・hr⁻¹, STPD)；換気量, Tresp(°C)；呼吸温
 Ta(°C)；環境温, Cp(cal・g⁻¹・°C⁻¹)；定圧比熱, ρ(g・l⁻¹)；密度
 Tg(°K)；平均放射温, A(m²)；体表面積

図1 体熱平衡諸量の測定フローチャート

表1 体熱平衡諸量の算定法

測定項目	算定法
産熱量	$M = 4.1 \times CHO + 9.3 \times FAT$ $CHO = 4.51 \times VCO_2 - 3.18 \times VO_2$ $FAT = 1.67 \times VO_2 - 1.67 \times VCO_2$
貯熱	$S = 0.83 \times Wt (0.67 \times \Delta Tr + 0.33 \times \Delta Ts)$
皮膚性蒸散熱損失	$Es = 0.58 \times (\Delta Wt - 0.196 \times 10^{-2} \times VCO_2 + 1.429 \times 10^{-3} \times VO_2 - 0.93 \times 10^{-6} \times PB \times VH_2O)$
呼吸性蒸散熱損失	$Er = 0.413 \times VH_2O$
呼吸性対流熱損失	$Cr = Cp \cdot \rho \cdot VE + (Tresp - Ta)$
放射熱損失	$R = 0.75 \times A \times 0.082 \times 10^{-8} (Ts^4 - Ta^4)$
皮膚性対流熱損失	$Cs = (M \pm S) - (Es + Er \pm Cr \pm R)$
対流熱伝達率	$hc = Cs / (Ts - Ta) \times A$

10~100±5%, 60sec)
 輻射温度計：15φ黒球とThermister(宝工業；P XK-67)
 体重計：電子体量計(ザウター；E1210/081 EC120, 1g感度)
 データ処理装置：1次処理(日本データゼネラル；N-10), 2次処理(日本データゼネラル；Model-30)

なお、呼吸マスクは、シリコン製 oronasal mask を使い、環境温度は、チャンバー内の3点を計測し、平均をもって室温とした。

平均皮膚温は Hardy-Dubois の7点法¹²⁾、体表面積は高比良の式¹³⁾を用いた。

(2) システムの高圧環境下の測定精度

① ガス・サンプリング法

高圧チャンバー内からの、ガス・サンプリング

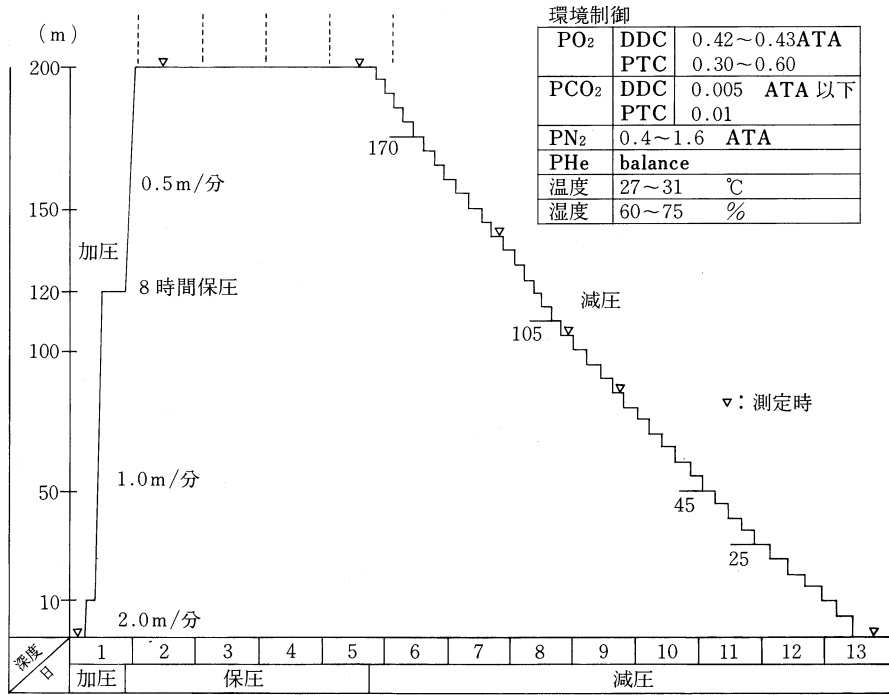


図2 200m飽和潜水加減圧スケジュール

では測定ガスの質を乱さず、呼吸 pattern を忠実に breath by breath で再現できる応答時間を示すことが必要である。我々の方法は深度300mまでの範囲で、サンプリング量は換気量の1%止まり、応答時間は63.2%立ち上がり時間で100ms以下を実現できた¹¹⁾。

②質量分析計の低濃度精度

サンプリングする呼気成分中、酸素および炭酸ガス濃度の低下に対応できるS/N比の改善のためにヘリウムと水蒸気を除いたガス成分の和を100とした。O₂、N₂、HeおよびH₂Oは100%/10Vとし、CO₂は10%/10Vとして処理した。

③ pneumotachometer の高圧特性

換気量測定用フローメータは特に内径の大きい3.8φのFleish型 pneumotachometer を使用した。このフローメータは大気圧から32ATAの圧力まで、校正シリンダー(2000ml)の流量に対して誤差率3%以内の精度を実現した¹⁴⁾。

④データ処理装置のプログラム実行手順

エネルギー代謝および温度の項目はリアルタイムで表示可能とし、熱損失諸量は測定時間中の体

重変化をキーボード入力した後に算出可能とした。呼吸の測定データがsteadyな値を表わすように breath by breath で得られた信号を5分間の平均値として用いた。

3. 実験方法

(1) 200m 飽和潜水実験

200m 飽和潜水のスケジュールを図2に示す。測定は図2の▽印で示す加圧前の大気圧下、200m 滞底時、減圧途中の停止時である140m、105m、85m および減圧終了後の大気圧下で実施した。測定時の環境温度については大気圧は常温とし、飽和潜水時は200mで31°C、140mで30°C、105mで29°C、85mで28°Cで制御し、若干の修正を加え、潜水員が快適と感ずる温度にした。表2に示す3名の健康男子に対し、トランクス1枚の裸体で安静座位1時間の測定を行った。なお2回実施した200m 飽和潜水において、潜水員A.H.は1回目、潜水員T.S.とK.H.は2回目に測定を実施した。2回目では、加圧前、加圧後および200m は2名の被験者に対して行い、減圧中は時間的制約から1名のみで交互に行った。

表2 被験者の身体的特性

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	体表面積(m ²)	体比重(kg/l)
☆ A.H.	35	173	66.9	1.81	1.070
☆ K.H.	44	176	73.3	1.91	1.073
☆ T.S.	34	165	76.0	1.85	1.052
★ S.K.	38	162	63.0	1.69	1.062
★ M.O.	24	172	62.0	1.75	1.067
★ A.H.	36	173	66.0	1.80	1.064
★ M.T.	35	170	66.0	1.78	1.080

☆200m 飽和潜水

★300m 飽和潜水

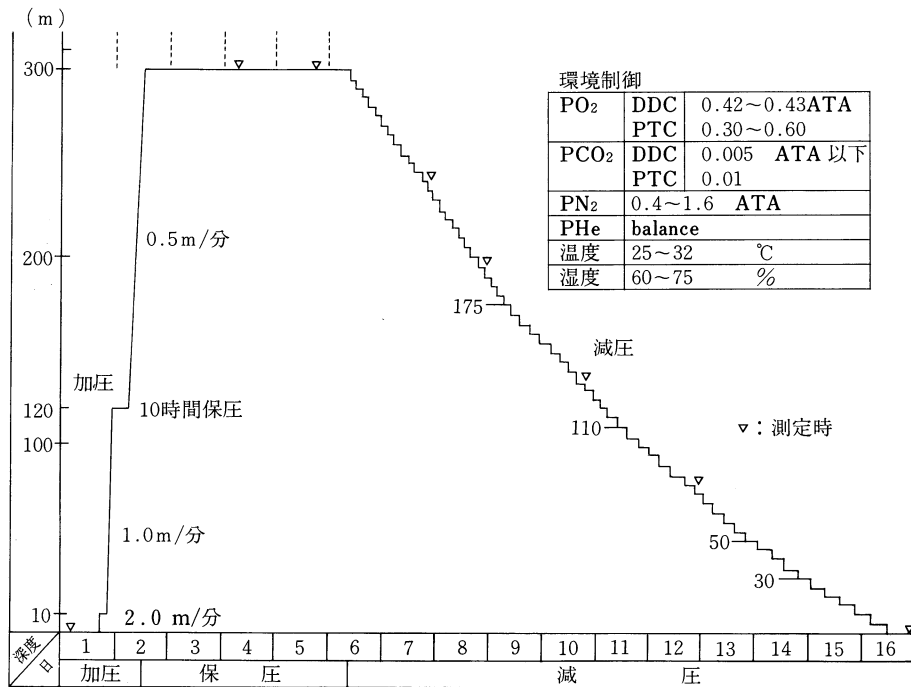


図3 300m飽和潜水加減圧スケジュール

(2) 300m 飽和潜水

300m飽和潜水時のスケジュールを図3に示す。300mの滞底が4日間で減圧11日間、全日程が16日間のスケジュールで行った。この体熱損失の測定は加圧前の大気圧下、300m滞底時、減圧途中の停止時である240m、200m、135m、80m、および減圧終了後の大気圧下の▽印で示した日時に実施した。測定時の環境温度については、大気圧は常温とし、飽和潜水時は300mでは32°C、240mでは

31°C、200mでは30°C、135mでは29°C、80mでは28°Cで制御し、若干の修正を加え、200m実験と同様に潜水員が快適と感ずる温度にした。また、加圧前、加圧後および300mでは、2名の被験者に対して行い、減圧中は1名のみで交互に行った。被験者は表2に示す男子潜水員4名でS.K.とM.O.は1回目、A.H.とM.T.は2回目に測定を実施した。その他の方法は200m実験時と同様に行った。

表3 200m飽和潜水体熱損失測定結果

被験者	深度(m)	環境温度(°C)	環境湿度(%)	(kcal・hr ⁻¹)	
				M±S = E±R±Cr±Cs	hc*
T.S.	O Air	26.7	55	107+32=31+64+ 1+43	2.9
K.H.	O Air	22.5	50	115+11=19+74+ 1+32	1.9
A.H.	O Air	25.0	68	102+ 4=43+51+ 1+11	0.8
K.H.	85	28.0	54	124+ 8=19+23+ 4+86	(13.6)
A.H.	105	29.6	68	104+ 4=44+17+ 5+42	8.1
K.H.	140	30.8	59	137- 6=53+20+ 5+53	9.6
T.S.	200	29.6	55	97+ 2=19+15+ 9+56	12.7
K.H.	200	30.5	64	84- 2=32+16+ 4+30	7.1
A.H.	200	31.2	69	81+ 4=53+13+ 5+14	(4.6)

*kcal・m⁻²・hr⁻¹・°C⁻¹

結 果

表3が200m飽和潜水時の1時間値から求めた体熱損失諸量と体熱平衡状態を示す値である。また消去法より求めたhcの値も示した。200mの飽和潜水においてはCs, Crの増加傾向, E, Rの減少傾向がそれぞれ観察された。hcは若干のばらつきがみられるが、深度の増加に伴って増加した。全体としてみた体熱平衡状態は環境条件を潜水員が快適と感ずる温度に制御した結果、貯熱(S)からみて全体の熱損失は小さく、バランスも大きく崩れなかった。

300mの体熱平衡の測定結果を表4に示す。図4は深度と各熱損失の関係をグラフに示したものである。Cs, Crの増加傾向, E, Rの減少傾向が観察される。hcは深度の増加に伴って増加する傾向にあった。特に300mにおいて、体熱平衡式のCsの占める割合が多くなり、hcも大きな値を示した。

totalの体熱損失の状況はS値から見て200m測定時と同様にほとんど損失のない状況であった。

考 察

高圧ヘリウム環境下のダイバーの“cold stress”を表す皮膚からの対流熱損失は、一般に、

Cs=hc(Ts-Ta)で表されている。高圧ヘリウム酸素環境下のhcの値を求める方法は過去いろいろ試みられてきた⁶⁾¹⁵⁾¹⁶⁾が、現在我々が実施している飽和潜水でCsを求めるために使えるhcの値はいまだ得られていない。

Nishiらはナフタリン昇華法¹⁵⁾で、大気圧空気のhcを求め、座位の場合、hc=10V^{0.5}(V:気流速度(m・s⁻¹))として、熱伝達理論よりhcが次式で表されることから、ガス体の物性値さえわかれば、大気圧空気におけるhcに対し補正比率を求めることができることを示した。

$$hc = k (\rho/\mu)^{0.55} (\mu \cdot Cp/k)^{0.33} \quad (\text{但し, } k: \text{熱伝導率 (kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}), \rho: \text{密度 (kg} \cdot \text{m}^{-3}), \mu: \text{粘性係数 (kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}), Cp: \text{比熱 (kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}))$$

この関係を用いれば、圧力環境のみを考えると、気圧Pb(mmHg)におけるhc(hc.b)は、hc.b=hc(Pb/760)^{0.55}となる。

また、US Navyはhcについて、 $hc = 0.13 \cdot k \cdot L^{-1} \cdot [g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (Ts - Ta) \cdot (\mu \cdot \rho^{-1})^{-2} \cdot \mu \cdot Cp \cdot k^{-1}]^{0.333}$ とした¹⁶⁾。

(但し、L:身長(cm), g:重力加速度(cm・sec⁻²), β:膨脹係数(°K⁻¹))

この様に、高圧下のhcの測定には、環境の物理定数や対象物の幾何学的定数が加味されて複雑になってしまっており、生理学的意義に乏しく、飽和潜

表4 300m飽和潜水体熱損失の測定結果

被験者	深度(m) 環境温度(°C) 環境湿度(%)			(kcal · hr ⁻¹)	hc*
	深度(m)	環境温度(°C)	環境湿度(%)	M ± S = E ± R ± Cr ± Cs	
S.K.	0 Air	25.6	66	76 + 10 = 28 + 50 + 1 + 7	0.5
M.O.	0 Air	25.6	66	77 + 11 = 33 + 49 + 1 + 5	0.5
A.H.	0 Air	25.4	47	86 + 9 = 22 + 45 + 1 + 27	2.3
M.T.	0 Air	23.7	53	76 + 16 = 15 + 60 + 1 + 16	1.0
M.O.	80	30.4	68	65 + 1 = 35 + 10 + 3 + 18	5.1
M.T.	80	29.5	74	76 + 12 = 11 + 20 + 2 + 55	(9.1)
A.H.	135	30.2	70	72 + 0 = 15 + 15 + 7 + 35	6.9
M.O.	200	30.1	71	63 + 5 = 19 + 11 + 7 + 31	8.1
S.K.	240	31.5	66	63 + 1 = 17 + 9 + 10 + 28	9.6
A.H.	240	30.7	58	72 + 2 = 24 + 8 + 6 + 36	12.7
S.K.	300	31.5	66	79 + 3 = 17 + 6 + 3 + 56	26.0
A.H.	300	31.3	73	124 - 21 = 10 + 4 + 6 + 83	(35.1)
M.T.	300	30.6	68	85 + 5 = 11 + 8 + 8 + 63	21.6

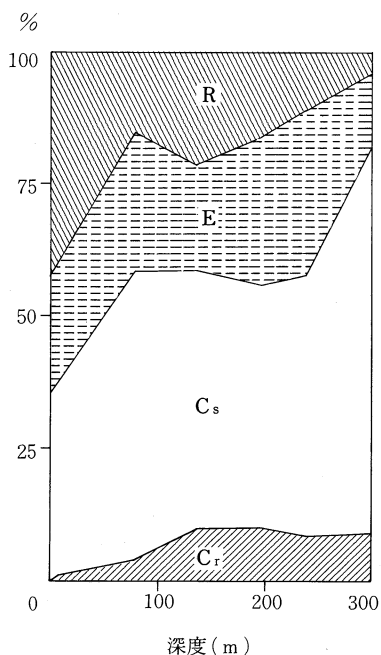
*kcal · m⁻² · hr⁻¹ · °C⁻¹

図4 産熱量に対する体熱損失の割合

水における生理学的研究の中でCsを表す式に代入するには難がある。

今回我々が用いた方法は、すでに Raymond ら⁶⁾によって報告され、生理学的な方法として評価されている。但し、Raymond らの方法では、代謝量の測定が複雑な古典的手法を用いるため、高圧下の測定が難しく、誤差が大きくなりやすい。また、各熱量を同時刻に測定できない等の欠点がある。同じ方法で追試した結果では、満足するデータが得られなかった⁵⁾。

そこで、我々は、高圧環境下の“cold stress”としてのCsを、応答性の早い質量分析計、測温 Thermister および高圧環境用に改善した Pneumotachometer をデータ処理装置に組み込んだ新しいシステムを用いて経時的に求めようとした。

このCsから求めたhcの値は、飽和潜水の深度依存係数であり、この値を以後実施する飽和潜水で測定される他の生理学的指標の解析評価に必要な“cold stress”係数としたい。

今回測定したhcの値について、深度との関係

は、深度 0 m から 240m までについては、 $hc = 1.42P^{0.63}$ ($r=0.95$, $P<0.01$) (但し、 P : 絶対圧力 (ATA)) となり、先の Raymond らの報告⁶⁾に近い式を示した。深度 300m の hc は、彼等の報告した値と比べ、約 1.8 倍の値を示し、300m の値を入れた深度との関係式は、 $hc = 1.21P^{0.73}$ ($r=0.92$, $P<0.01$) となった。

300m における hc の値については、300m から大気圧に戻される呼吸ガスの O_2 , CO_2 の濃度が非常に低くなることから、質量分析計の感度の限界に近いところで測定しており、この誤差が反映することも考えられる。

また hc の値にばらつきが見られる理由は hc が発熱体の形状に影響されることから被験者によって異なる値を示し、また気流速度にも大きく影響されるためであると考えられる。それゆえ、比較する場合には個人差の消去および気流速度の測定値が必要である。しかし個人差を正確に求める方法は繁雑で、また実験例数を多く取ることも困難である。また、タンク内の気流測定は気流が遅く、方向が一定していないことから、適当なセンサーがなく、非常に難しい。そのため、我々は気流速度が一定であると仮定している。

我々のこの方法による C_s の算定は体熱平衡式から消去法で間接的に求めるため、他の値の誤差が影響する。それゆえ、個々の測定を正確に実施する必要がある。

今回の 200m 及び 300m の実験結果から見て、total の体熱平衡はバランスが取れているが、深度の増加につれて、 C_s が大きな値となっていることは、“cold stress” として、生体が生理的に何等かの影響を受けていると考えられる。

今後このシステムを使用して、飽和潜水中のデータを積み上げ、各深度における、正確な hc の値を決定し、深度、環境温度および平均皮膚温から飽和潜水中の“cold stress (C_s)” を求め、他の生理機能との関係について研究を進めたい。

[参考文献]

- 1) Moore, T.O., J.F. Morlock, D.A. Lally, and S.K. Hong: Thermal cost of saturation diving: Respiratory and whole body heat loss at 16.1 ATA, In: Lambertsen, C.J., ed., Underwater Physiology V, Bethesda Maryland, FASEB, 1976, 741-754.
- 2) Webb, P., Body heat loss in diving, Report on U.S. Navy Contract No0014-72-C-0057, 1980.
- 3) Shiraki, K., N. Konda, S. Sagawa, H. Nakayama, and M. Matsuda, Body heat balance and urin excretion during a 4 days saturation dive at 4ATA, Undersea Biomed. Res. 9: 321-333, 1982.
- 4) Nakayama, H., S.K. Hong, J.R. Claybaugh, N. Matsui, Y.S. Park, Y. Ohta, K. Shiraki, and M. Matsuda: Energy and body fluid balance during a 14 days dry saturation dive at 31ATA, In: Bachrach, A.J., and M.M. Matzen, eds., Underwater Physiology VII, Bethesda Maryland, Undersea Medical Society, Inc., 1981, 541-554.
- 5) 小此木国明, 大橋光夫, 大岩弘典, 高圧ヘリウム酸素環境下の体熱平衡, 日本高気圧環境医学会雑誌, 21 (3): 121-129, 1986.
- 6) Raymond, L.W., E. Thalmann, G. Lindgren, H.C. Langworthy, W. H. Sparr, J. Crothers, W. Braithwaite, and T. Berghage, Thermal homeostasis of resting man in helium-oxygen at 1-50 atmosphere absolute, Undersea Biomed. Res. 2(1): 51-67, 1975.
- 7) Varene, P., J. Timbal, H. Vieillefond, H. Guenard, and J.L' Huillier: Energetic balance of man in simulated dive from 1.5 to 31ATA, In: Lambertsen, C.J., ed., Underwater Physiology V, Bethesda Maryland, FASEB, 1976, 755-763.
- 8) 垣鏑直, 吉田燦, 中山英明, 高圧ヘリウム混合ガス空間の温熱環境に関する基礎研究, 日本建築学会論文報告集, 305: 112-121, 1981.
- 9) 西安信: 人体と環境との熱交換, 中山昭雄 編, 温熱生理学, 東京, 理工学社, 1981, 31-72.
- 10) 永坂鉄夫: エネルギー代謝の測定法, 中山昭雄, 入来正躬 編, エネルギー代謝・体温調節の生理学(新生理科学大系22), 東京, 医学書院, 1987, 35-47.
- 11) 大岩弘典, 小此木国明, 橋本昭夫, 甲斐有司, 大野文夫, 妹尾正夫, 鈴木卓, 永野昭則, 富澤儀一, 渋谷寛人, 石井均, 西功, 高気圧環境下の呼吸循環動態に関する研究—breath by breath 呼吸気 pater および換気・血流測定法に関する基礎的研究, 日本高気圧環境医学会雑誌, 22: 61-69, 1987.
- 12) Hardy, J.D. and E.F. DuBois, The technic of measuring radiation and convection, J. Nutr., 15: 461-475, 1938.
- 13) 高比良英雄, 日本人新陳代謝論(其2), 日本人体表面積の測定並に之を表す式に就て, 栄養研報, 1: 61-95, 1925.
- 14) 富澤儀一, 橋本昭夫, 西功, 永野昭則, 小此木国明, 鈴木信哉, 大岩弘典, 高圧ヘリオックス環境下の呼吸気の連続分析, 質量分析, 36: 35-48,

- 1988.
- 15) Nishi Y., and A. P.Gagge, Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalen sublimation, J. Appl. Physiol. 29: 830-838, 1970.
- 16) Flynn, E.T., J.Vorosmarti. Jr., and H.I.Modell, Temperature requirment for the meintenance of thermal balance in high pressure helium oxygen environments, Research Report 21-73, Navy Experimental Diving unit, Washington D.C., 1974.