

ダイバーの体熱損失と保温に関する研究(第3報) —高圧ヘリウム環境下の体熱損失—

富安和徳^{*1} 中山英明^{*2}

1972年—1974年に行った300m飽和潜水模擬実験のシードラゴン計画で、ダイバーの体熱損失量を求める実験を行った。この結果のうち、既報では皮膚温、体温、呼吸気温などの変化を報告した。今回は生体上の温度、環境温度、湿度および呼吸量から体熱損失を求める方法と結果を述べる。酸素摂取量の総量は推定値で示したが、高圧ヘリウム環境下の体熱損失は大気圧下に比べて著しく増加した。また、湿度測定法による不感蒸泄を呼吸と皮膚について別個に行い、呼吸性不感蒸泄量は圧力変化には微少であること、皮膚性不感蒸泄量は圧力増加に伴って顕著な減少を確認した。高圧ヘリウム下では数°Cの気温変化で体熱平衡が維持できなくなることがわかり、環境温度、湿度の重要性を再認識した。

Study on Body Heat-Loss and Heat Insulation or Heating on a Diver. (Report III), Body Heat-Loss under Hyperbaric Helium-Rich Environment

Kazunori Tomiyasu^{*3}, Hideaki Nakayama^{*4}

From 1977 to 1979, JMASTEC performed a series of saturated dive simulations to 300 meters, named "SEADRAGON project". In those project, we experimented on body heat loss of divers. A part of these results, the skin change, rectal and breathing gas temperature were reported on JAMSTECTR No. 6.

This paper describes the results and method for measuring body heat loss. Heat loss through the respiratory system and body surface (skin) at 31 ata are given. Also, insensible water loss was measured in respiration and perspiration at several depths.

Our data show the following:

- (1) Heat loss from skin was at a minimum at comfortable temperatures.
- (2) Respiratory heat loss became greater than one atmosphere.
- (3) Insensible water loss through respiration decreased a little when pressure increasing, but insensible water loss from the skin decreased sharply with pressure.

*1 潜水技術部

*2 産業医科大学 (元潜水技術部)

*3 Manned Undersea Science and Technology Department

*4 University of Occupational and Environmental Health (Formerly Manned Undersea Science and Technology Department)

1. はじめに

恒温動物である人間は、寒くなると衣服を重ね着し、暑くなると衣服を減らして体温をほぼ一定の約37°Cに保っている。

体内の発熱は代謝熱だけであるから、体熱の放散量を調整し、体温を一定にしていると見做すこともできる。

日本人は大気圧下の日常生活で、気温-16~33°C（日内最高最低気温の月平均値）、湿度30~100%RH、風速0~20m/secのもとで、一定体温を維持している。

しかし、高圧ヘリウム（He）環境下のダイバーは、2~3°Cの気温変化で、“寒い”、“暑い”と言ひ、80%RHを越える高湿度で不快をうったえ、また、体熱損失の防止のため、気流速度を2cm/sec以下に押えるべきだとされている。このことは、Heが熱伝導率 $14.15 \times 10^4 \text{ J/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$ （0°C）で、空気の $2.41 \times 10^4 \text{ J/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$ の6倍あり、これを主成分とする環境ガスであり、その密度は圧力に比例して増加することが原因である。

通常、体熱は皮膚面から輻射、伝導、対流、および蒸発で全体の88%、残り12%は呼吸によって放熱される。

放熱量の総量および各熱移動の因子ごとの量は、もちろん、温熱要素である気温、湿度、気流速度および周壁の表面温度（輻射熱）によって影響されるほか、人の活動状況によって異なる。

高圧He環境下のダイバーの放熱量が、もし前述の物理的相違、Heの熱伝導度とガス密度（圧力）だけで増加するならば、深海潜水はきわめて困難なものとなる。生体計測で体熱平衡計算が物理的要素だけでは熱収支が合致しないのは、生理的に慣れや防御反応などが起こるためである。

過去の飽和潜水や大深度の潜水シミュレーション実験で、寒さまたは暑さによってダイバーが危険な状態に陥ったという話を幸いに聞かない。実際にダイバーが良好とする温度に調節すれば問題がないように思われる。しかし、高圧He環境下における温熱要素と熱移動因子ごとの熱量の変化傾向、および生体の変化との相関を知っておけばダイバーの加温、または保温の方法、異常事態の際と対処の仕方に有益と思われる。

この報告は、昭和52年度の200 m および昭和53年度の300 m の飽和潜水シミュレーション実験の温度負荷実験のデータに、昭和54年度の300 m 飽和潜水シミュレーション実験で行った不感蒸泄量計測結果を加え、圧力と体熱損失との関係についてまとめたものである。

表1は3回の実験の概要、表2は、このときのテストダイバーの体位を示す。

2. 方法

2.1 総合熱損失

体温は代謝産熱と体外への熱放散および、輻射熱との間の熱平衡が保たれ、一般に次の式が用いられている。

$$M = S + W \pm K \pm C \pm R + E \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

M：体内の新陳代謝にもるエネルギー生産量

S：体内の蓄熱量

W：運動によって体が行った仕事量

K：皮膚から皮膚に接する固体への伝導熱量

C：体の周りの流体への伝導と対流による移動熱量

R：皮膚からの輻射熱量

E：蒸発熱

(1)式は生理量のM、SおよびWと物理量のK、C、RおよびEから構成されている。前述の温熱要素を、これに該当させると、物理学的因子として、気温、湿度、気流および輻射の4項目があり、生理学的因子として、体表面積、有効輻射面積、蒸発表面積と蒸発量および平均皮膚温の4項目が上げられる。

(1)式の体熱平衡式の各項は、次の通りである。

代謝量Mは、呼吸によって消費した酸素量から、次式で求められる。

$$M = 293 \text{ kcal/h} \times \dot{V}_{O_2} \text{ l/min} \dots\dots\dots(2)$$

しかし、 $\dot{V}_{O_2}$ を測定しなかったため、安静代謝のデータから、 $\dot{V}_{O_2}/\dot{V} = \alpha$ を得、便宜的に次式を用いた。

$$M = 293 \text{ kcal/h} \times \alpha \dot{V} \text{ l/min} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

$\dot{V}_{O_2}$: 酸素摂取量 (l/min)

$\dot{V}$: 呼吸量 (l/min)

α : 安静代謝時の酸素摂取率(%)

表1 300m飽和潜水シミュレーション実験実施概要
Outline of project SEADRAGON (JAMSTEC)

プロジェクト名と時期 project and period	飽和潜水深度と時間 saturation depth and time	テストダイバー subject	実 施 内 容 imports of the experiment
シードラゴン I (1976年11月29日～12月15日) SEADRAGON I (29 Nov.～15. Dec. 1976)	100m (6日14時間, 6 day and 14th)	4	—
シードラゴン II (1977年11月17日～12月12日) SEADRAGON II (17 Nov.～12 Dec. 1979)	150m (7日10時間, 7 day and 10th) 200m (64時間, 64 h)	4	50, 100, 150, 200 mの各圧力下で, 気温に2～3℃の変化を与え, 温熱感覚の調査および皮膚温と直腸温とを2名について測定した
シードラゴン III (1978年9月14日～10月14日) SEADRAGON III (14. Sep. ～14. Oct.1978)	250m (6日16時間, 6 day and 16h) 300m (6日20時間, 6 day and 20h)	3	250m, 300mで快適温度を中心に3℃高温, 3℃低温の気温変化を与え, 体熱損失調査のため, 呼吸気温, 呼吸量, 皮膚温, 直腸温を2名について測定した
シードラゴン IV (1979年7月29日～9月3日) SEADRAGON IV (29. jul. ～3 Sep.1979)	300m (15日13時間, 15day and 13h)	4	適温環境下で, 呼吸性不感蒸泄4名, 皮膚性不感蒸泄1名について測定した

体内の蓄熱量Sは, ある時間内の体熱量の変化を表わすもので, 次式で与えられる。

$$S = W_b \cdot C_{pb} \left(\frac{2}{3} \Delta T_r + \frac{1}{3} \Delta \bar{T}_{sk} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに,

W_b : 体重 (kg)

C_{pb} : 人体の平均比熱 (=0.83kcal/kg・C)

ΔT_r : 直腸温の変化量 (°C)

$\Delta \bar{T}_{sk}$: 平均皮膚温の変化量 (°C)

平均皮膚温は, 測定で実施した7点法および10点法につき, それぞれ次式で求められる。

$$\begin{aligned} 7 \text{点法: } \bar{T}_{sk} = & 0.07(\text{前額}) + 0.35(\text{腹}) + 0.14 \\ & (\text{前腕}) + 0.05(\text{手背}) + 0.19(\text{上腿}) + \\ & 0.13(\text{下腿}) + 0.07(\text{足背}) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 10 \text{点法: } \bar{T}_{sk} = & 0.07(\text{前額}) + \frac{0.35}{3}(\text{前胸} + \text{腹} + \text{背}) \\ & + \frac{0.14}{2}(\text{上腕} + \text{前腕}) + 0.05(\text{手背}) \\ & + 0.19(\text{上腿}) + 0.13(\text{下腿}) \\ & + 0.07(\text{足背}) \dots\dots\dots (4') \end{aligned}$$

表2 テストダイバーの体位表

Phisical conditions of the subjects

プロジェクト名 project	テストダイバー subject	年齢 age	身長 height (cm)	体重 weight(kg)	体表面積 (m ²) surface area
シードラゴン II SEADRAGON II	M. Yamada a)	34	182.0	86.0	2.10
	N. Sakamoto	35	163.0	61.0	1.67
	T. Fukui a)	34	168.5	61.0	1.71
	T. Ochi	38	170.5	69.7	1.83
シードラゴン III SEADRAGON III	N. Sakamoto	36	161.6	62.4	1.68
	S. Ohkake a)	31	167.7	60.2	1.70
	S. Murazeki a)	24	181.0	74.2	1.96
シードラゴン IV SEADRAGON IV	T. Fukui b)	35	168.2	61.5	1.72
	S. Ohkake b)	32	167.7	61.6	1.71
	S. Murazeki b,c)	25	180.5	73.5	1.95
	K. Murase b)	28	168.5	59.5	1.69

a) 皮膚温, 直腸温, 呼吸温測定, temperature measurement of skin, rectal and respiration gas

b) 呼吸性不感蒸泄測定, measurement of respiratory insensible water loss

c) 皮膚性不感蒸泄測定, measurement of skin insensible water loss

人が行った仕事量は, 酸素摂取量から得られる。仕事時の酸素摂取量は, その中に基礎代謝量が含まれているので, これを除去した分がWの値となる。計測姿勢の椅座安静時の代謝量は, 基礎代謝量の20%増であることが知られているので, 基礎代謝量をhとすると,

$$W = 0.2h \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$h = 66.473 + 13.752W_b + 5.003H - 6.755a \quad \dots\dots(6)$$

ここに,

W_b : 体重(kg)

H : 身長(cm)

a : 年齢

高圧He環境下の基礎代謝量は, 大気圧下の値よりも増加するとされるが, 正確な量が不明のため, 大気圧下の(6)式を採用した。

伝導熱量Kは, 次の式で表わされる。

$$K = K_c \cdot S \cdot (T_s - T_A) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに,

K_c : 伝導係数 (cal/cm²・h℃)S : 物体と接する皮膚の面積(cm²)T_s : 物体と接する皮膚の平均温度(℃)T_A : 皮膚に接する物体の表面温度(℃)

通常, 物体と接する皮膚面積は小さいので, 無視または次の対流の中に含まれる。計測時は椅子に腰掛けている尻部と, 床上のスリッパにのせた足がこれに相当する面積および熱伝導率に正確を期することができないため, 無視することにした。

対流による熱損失量Cは次の式が与えられている。

$$C = k\sqrt{v} \cdot S \cdot (T_s - T_g) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに,

k : 熱伝達係数

v : 気流速度 (cm/sec)

S : 体表面積 (cm²)T_s : 皮膚温 (℃)T_g : 環境気温 (℃)

しかし, 潜水シミュレーター内の気流の状態は, 環境ガス循環ブローの作動で, 平均風速として, 約2 cm/secと見積られるが, 明確でない。人体における対流熱は, 皮膚からの放熱 (C_s) と呼吸からの放熱 (C_R) からなるので, 次のようになる。

$$C = C_s + C_R \quad \dots\dots\dots(9)$$

同様に蒸発熱Eは、皮膚成分 E_s と呼吸成分 E_R の和であるから次のようになる。

$$E = E_s + E_R \dots\dots\dots(10)$$

水分の蒸発熱は、体表温度付近で580cal/gであるから、体からの水分蒸発量は腎外水分喪失量として知られており、次式で表わされる。

$$W_L = W_{B1} - W_{B2} + I_w + I_F - O_F - O_u - E_b \dots\dots(11)$$

ここに、

W_L : 腎外水分喪失量 (kg)

W_{B1} ; 作業前の体重(kg)

W_{B2} ; 作業後の体重(kg)

I_w ; 飲水量(kg)

I_F ; 摂取食事量(kg)

O_F ; 排泄糞量(kg)

O_u ; 排泄尿量(kg)

E_b ; 呼吸代謝による重量の減少量 (kg)

(注) 高気圧下の体重測定値は環境ガス密度による浮力補正が必要である。

環境条件と生理条件から被検者が発汗のない状態にしておけば、 W_L は不感蒸泄の値として与えられる。しかし、これは皮膚からの不感蒸泄分と呼吸からの分の両方を含んでいるから、 E_s および E_R を別個に求めるには、(11)式とは別途、測定法が必要である。

皮膚からの不感蒸泄量は次のChapman & Cowling (1953) の式から求められる。

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = -D' \frac{\partial P}{\partial X} \dots\dots\dots(12)$$

A ; 体表面積 (m^2)

dm ; 皮膚からの水蒸気の蒸発量(g)
($m = IWL_s$)

dt ; 時間 (h)

D' ; 水の拡散に関する定数 ($0.670 \times 10^{-3} \times g/m \cdot h \cdot Pa$)

P ; 皮膚面上の水蒸気分圧 (Pa)

X ; 距離 (m)

呼吸による不感蒸泄量は次式から求められる。

$$IWL_R = (W_{ex} - W_{in}) \times \dot{V} \dots\dots\dots(13)$$

IWL_R ; 呼吸性不感蒸泄量 (g/min)

W_{ex} ; 呼気中の水分量 (g/l)

W_{in} ; 吸気中の水分量 (g/l)

$\dot{V}$; 呼吸量 (g/min)

以上の結果、(10)式は、次式のように書き換えられる。

$$E = 580 W_L = 580 (LWL_s + IWL_R) \dots\dots\dots(10')$$

輻射熱を求めるには、人体の皮膚は熱線について、ほぼ完全黒体と見做せるので、Stefan-Boltzmannの式が適用される。

$$R = \sigma s e (T_s^4 - T_w^4) \dots\dots\dots(14)$$

ここに、

σ : 1.37×10^{-12} cal/cm²·sec

S : 体表の有効輻射面積 (cm²)

e : 輻射率 (完全黒体では $e = 1$)

T_s : 平均皮膚温度 (°C)

T_w : 室の平均壁面温度 (°C)

大気圧環境下では、体熱損失の40%程度が輻射熱によるものである。輻射は相対する物体の表面温度によって決定されるため、環境条件に影響される。

潜水シミュレーターは、チャンバー内の環境温度と大差がない気温に調節された部屋に設置されていることと、潜水シミュレーターの熱容量がきわめて大きいため、気温を2~3°C変化させても、チャンバー内壁温が短時間で変化せず、輻射量は微量なため無視した。

人体からの放熱は皮膚と呼吸から行われ、これが体内の熱とバランスしていると見方を変えれば、(1)式は(9)式および(10)式を代入して整理すると、

$$(C_s + C_R) + (E_s + E_R) + K + R = M - S - W$$

ここに、皮膚からの熱損失量を Q_s 、呼吸による熱損失量を Q_R とすれば、次の通り書換えられる。

$$Q_s = C_s + E_s + K + R \dots\dots\dots(15)$$

$$Q_R = C_R + E_R \dots\dots\dots(16)$$

したがって、

$$Q_s + Q_R = M - S - W \dots\dots\dots(17)$$

2.2 皮膚からの熱損失量

前述のように、皮膚からの放熱要因のうち、伝導熱量Kと輻射熱量Rは無視し得られると思われる。しかし、計測姿勢や環境条件が大いに影響するので、できれば無視しない方がよい。

対流熱 C_s は気流状態が微風速で、流向が不明確なため、実測値を求めることができない。そこで、

(17)式から求めるには、代謝量算出のために酸素摂取量および呼吸量、蓄熱量計算のために体重、直腸温および皮膚温を測定し、計測時の仕事量と呼吸熱損失量がわかれば、皮膚からの放熱量が総量として求められる。

蒸発熱 E_s は、皮膚からの水分損失量がわかれば発汗のない範囲で(10')式が適用される。

2.3 呼吸からの熱損失量

呼吸からの放熱は(6)式に示す通り、対流と蒸発によるもので、言替えると、呼吸によるガス（水分を含まない）の熱交換と呼気不感蒸泄分の蒸発熱であり、次式の通り書替えることができる。

$$Q_r = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p (T_e - T_i) + \dot{V} \cdot \rho \cdot h_f (W_e - W_i) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここに、

- $\dot{V}$: 呼吸量 (ℓ/min)
- ρ : 呼吸気体の密度 (g/ℓ)
- C_p : 呼吸気体の比熱 (cal/g℃)
- h_f : 蒸発潜熱 (cal/g)
- T_e : 吸気温度 (℃)
- T_i : 呼気 (℃)
- W_e : 吸気中の水分量 (g/ℓ)
- W_i : 呼気中の水分量 (g/ℓ)

呼吸ガスは高圧ヘリウム混合ガスであるから密度 ρ および比熱 C_p は酸素(O_2)、炭酸ガス(CO_2)、水蒸気(H_2O)、窒素(N_2)、ヘリウム(He)の混合ガスとして、次によって算出する。

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{T_e}{273}} \{ P_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + P_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + P_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + P_{He} \times \rho_{He} \} + P_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、ガス分圧 P_{O_2} , P_{CO_2} , P_{H_2} , P_{He} は環境制御用のガスクロマトグラフによる分析値、水蒸気圧 P_{H_2O} は露点湿度計測値と飽和水蒸気圧表から求められる。

表3は各種ガスの密度および比重をまとめて示す。

比熱は圧力による変化は無視でき、ガスの混合割合によって決まるので、次式となる。

表3 ガスの密度と比重
Density and specific gravity of gases

記号 symbol	密度(g/ℓ) density (0℃, 1ata)	比重(参考) specific gravity (consultation)
ρ_{O_2}	1.4289	1.105
ρ_{CO_2}	1.9768	1.529
ρ_{N_2}	1.2507	0.967
ρ_{He}	0.1769	0.1380
ρ_{H_2O}	0.589(100℃)	0.463(100℃)

表4 ガスの分子量と比熱
Molecular weight and specific heat of gas

ガス類 gases	分子量[M] molecular weight	比熱[20~40℃][C] specific heat (kcal/kg, ℃)
O_2	32	0.220
CO_2	44.01	$0.000235\theta + 0.198$
H_2O (水蒸気, vaper)	18.02	$0.0002 \theta + 0.442$
N_2	28.02	0.249
He	4.003	1.24

$$C_{mix} = \frac{\%O_2 \cdot M_{O_2} \cdot C_{O_2} + \%CO_2 \cdot M_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + \%H_2O \cdot M_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{\%O_2 \cdot M_{O_2} + \%CO_2 \cdot M_{CO_2} + \%H_2O \cdot M_{H_2O}} + \frac{\%N_2 \cdot M_{N_2} \cdot C_{N_2} + \%He \cdot M_{He} \cdot C_{He}}{\%N_2 \cdot M_{N_2} + \%He \cdot M_{He}} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、

- C : ガスの比熱
- M : ガスの分子量

表4は各種ガスの分子量および比熱を示す。

呼吸気中の水分量は、露点温度、または相対湿度の測定値から導出することができる。したがって、呼気からの熱損失量を求めるには、環境成分として、環境圧力、環境ガスの組成、気温、呼吸ガス要素として、呼吸量、呼気および吸気温度、呼気および吸気湿度の測定が必要である。

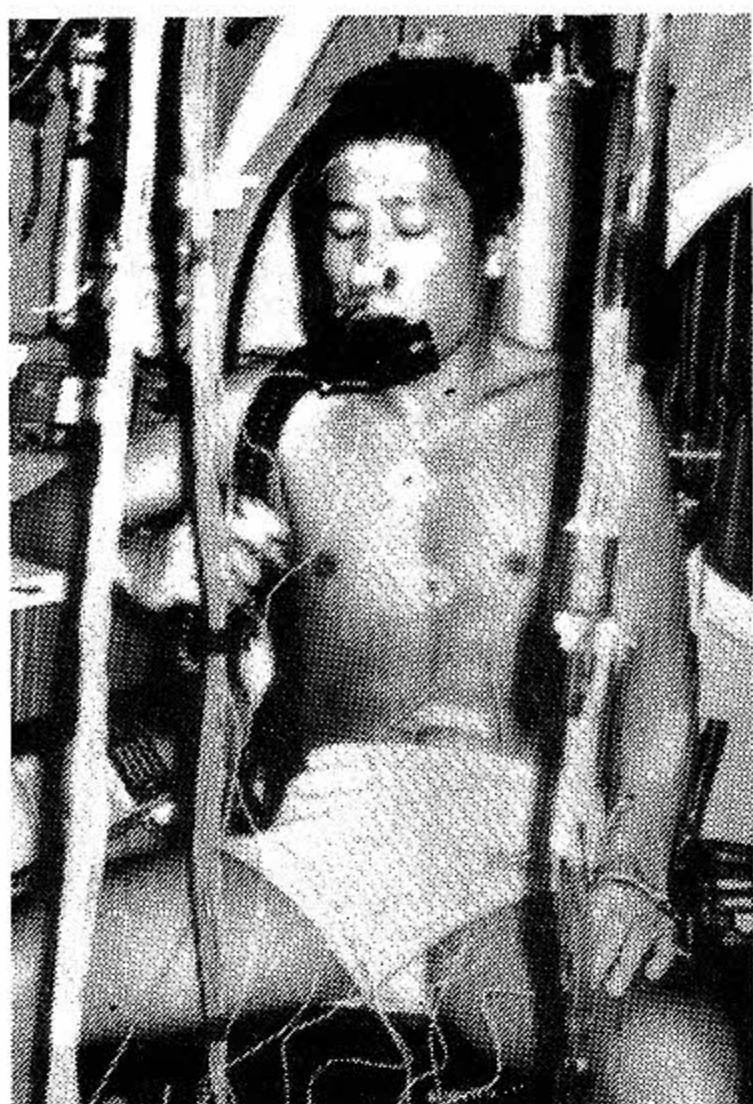


写真1 体熱損失の測定

The subject under measurement

3. 実験方法

表5は体熱バランスの要素を求めるための計測項目を示す。

3.1 昭和52年度および昭和53年度の実験

実験方法と環境気温および被検者の体温、皮膚温、呼吸気温の測定方法¹⁾について詳細を示したが、概略は次の通りである。

チャンバー内の環境気温は、実際はテストダイバー達が快適と判断される気温に調節されている。この適温よりも3℃高くして1.5~2.0時間の高温負荷を与え、次いで3℃低くして同時間の低温負荷を与えたのち適温に戻す。この温度変化は装置の性能上約1.5℃/hとした。

上記、3段階の各温度で、椅座位安静による測定を3回ずつ行う。同時に2名の被検者について10min直腸温、皮膚温（7点または10点）、および鉛直方向の気温6点と床および天井の壁温をタカラサーミスターを用い、多点温度データ集録装置K-700で1minごとの記録を取った。呼吸測定は潜水器用のマウスピース、呼吸蛇管に呼吸量計と温度センサーを取付けた器具を作り、呼吸気温はタカラサーミスターの露出型センサーとリニヤライザーを使い、呼吸温度波形としてペンレコーダーに記録し、呼吸量はシチズン精機製のライト呼吸計で呼気量を記録した。

写真1はその測定状況を示す。

3.2 昭和54年度の実験

この実験で行った不感蒸泄量の計測方法は次の通りである。

チャンバーの環境は適温に保たれており、湿度は常にほぼ60%RHに維持されている。測定は圧力が300mの飽和圧力時に2回、減圧時に4回であった。

図1は環境条件と測定時期を示す。

皮膚からの不感蒸泄量の測定方法は、G.E.Nilsson²⁾の方法を用いた。この方法では直接的に蒸発量が測定できる装置を作って使用している。われわれはその装置を入手することができなかったため、湿度計で計る方法をとった。(12)式から、AおよびDが与えられているので、 x を計算に都合のよい1cmとして、写真2の器具を作り、赤、白両端からの温度、湿度の測定を行った。

被検者はテストダイバー1名を選定し、図2に示す9点について測定した。

湿度計が安定するまで約3minを要するので、1点を測定するのに6minかかり、9点の測定所要時間が約1時間である。被検者の活動状態が安定していること、発汗を起さないことが必要であるので、被検者の姿勢はチャンバー内のベッドに仰臥位および背臥位とした。

呼吸による不感蒸泄量の測定法は、呼気および吸気の湿度と呼吸量から得られるので、写真3に示すように、マスク内の呼吸気が直接あたる位置に湿度および温度センサーを取付け、チャンバー外のペンレコーダーに波形を記録し、呼気をチャンバー内の湿式流量計に導き、1minごとの指示値を読取った。

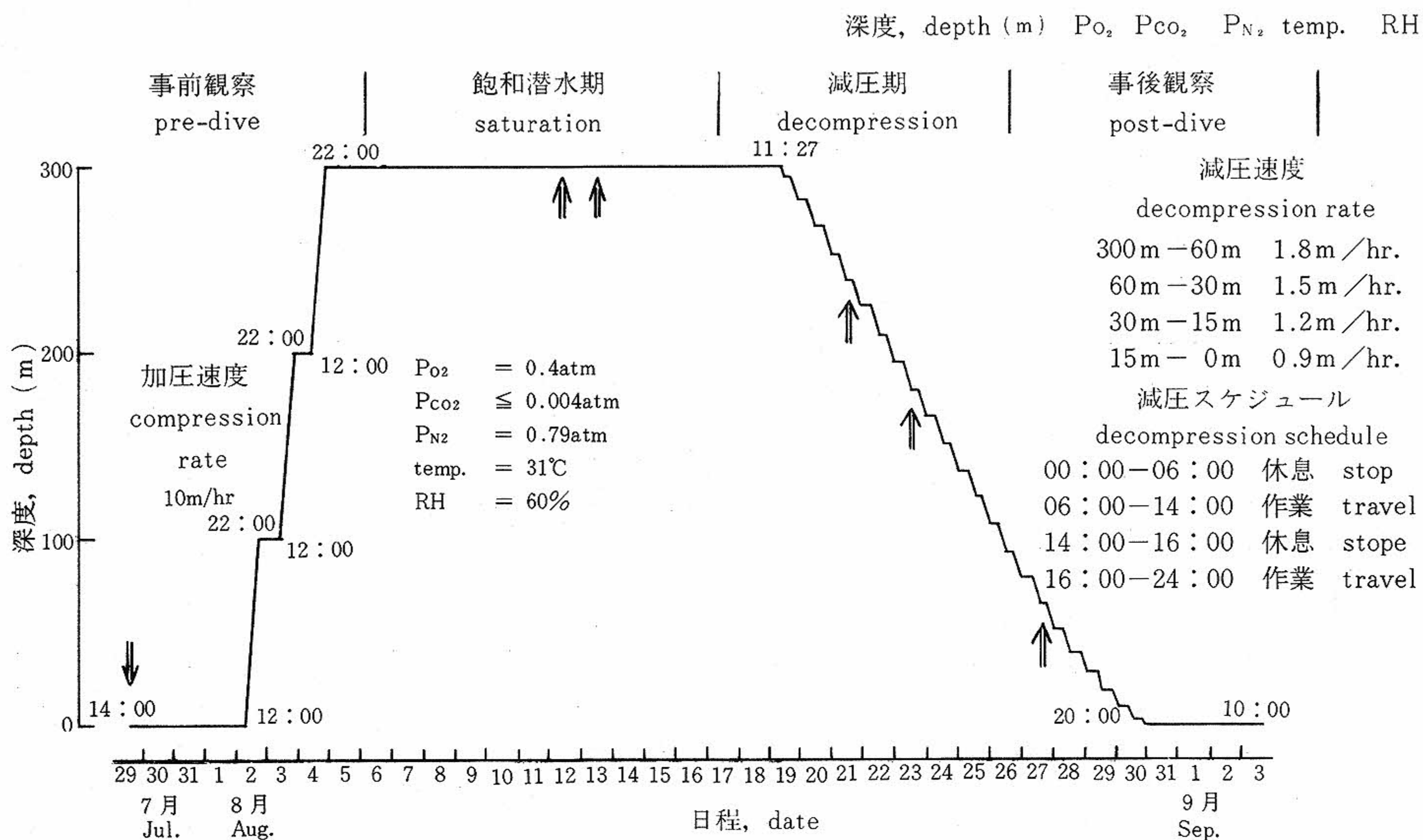
呼吸パターンは、(1)深くてゆっくりした呼吸、(2)深くて早い呼吸、(3)通常呼吸、(4)浅くゆっくりした呼吸、(5)浅く早い呼吸の5項目とし、1minずつ続けて5minの呼吸について測定する。吸入ガスは60%RHの環境ガスと0%RHの非常用呼吸ガスの2種類について行った。被検者はテストダイバー全員（4名）である。

湿度計はTAKARA=VISALA 製高精度湿度計で、センサープローブに静電容量型湿度センサーと、露出型サーミスターセンサーが着いている。この1個のセンサープローブを皮膚計測と呼吸計測の両方に使用した。

表5 計 測 要 目
Measurement items of thermal balance

熱 平 衡 要 素 factor of thermal balance	計 測 項 目 measuring item
代謝熱 [M] metabolic heat	・酸素摂取量 oxygen consumption ・呼吸量 respiratory volume
蓄熱量 [S] heat storage	・体重 weight ・直腸温 rectal temperature ・皮膚温 skin temperature
仕事量 [W] work load	・体重 weight ・身長 height ・年齢 age
伝導熱量 [K] conductive heat	・物体と接する皮膚面積 skin area touched with substance ・物体と接する皮膚温 skin temperature touched with the substance ・皮膚と接する物体の表面温度 surface temperature of the substance touched with skin
対流熱 [C] convective heat	・気流速度 atmospheric-current velocity ・体表面積 body surface area ・皮膚温 skin temperature
蒸発熱 [E] evaporative heat	・環境気温 atmospheric temperature
蒸発熱 [E] evaporative heat 呼吸放熱 respiratory insensible heat loss	・呼吸量 respiratory volume ・気体密度および比熱 specific gravity and specific heat of gases ・環境ガス組成 atomospheric gas component

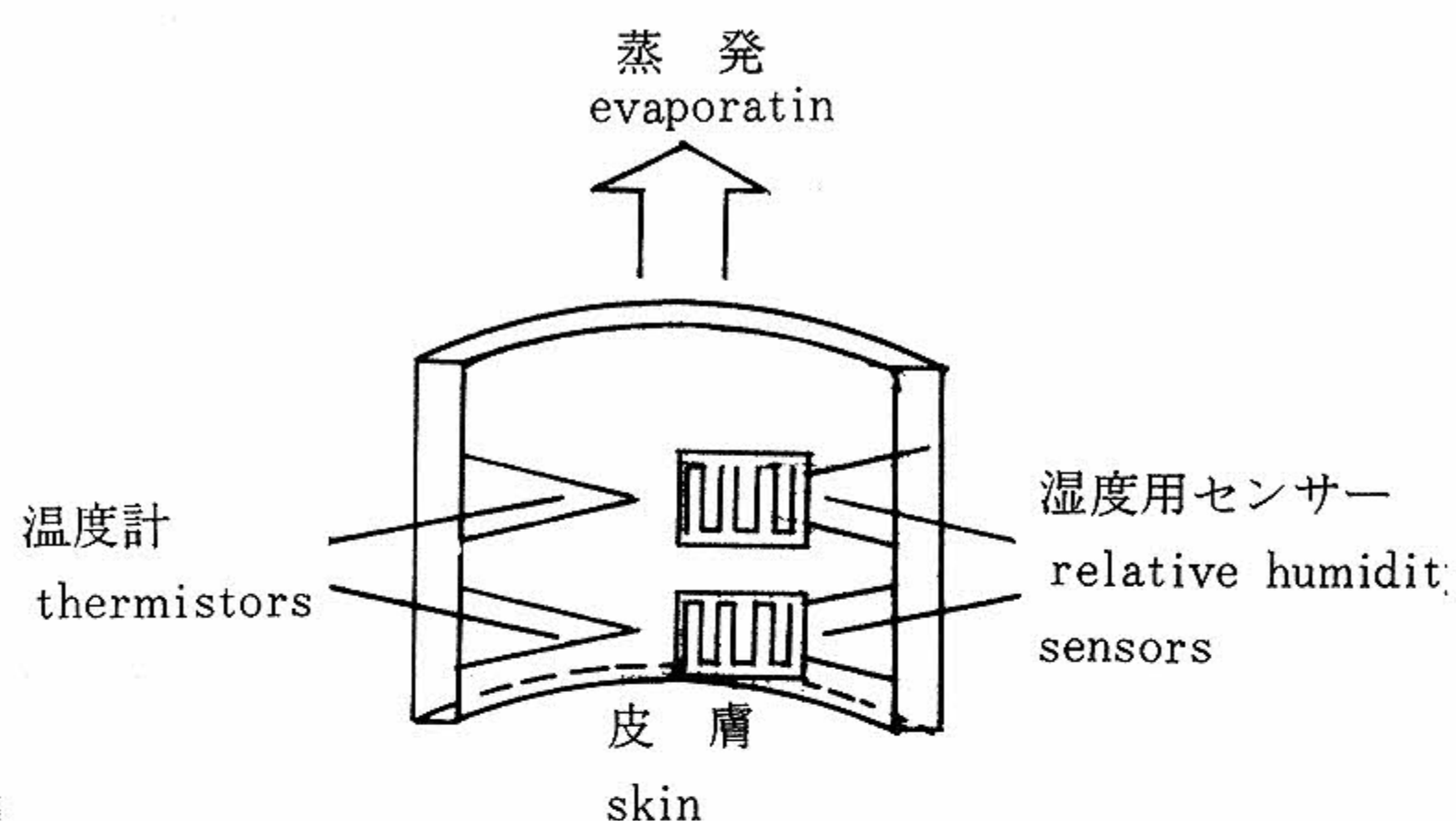
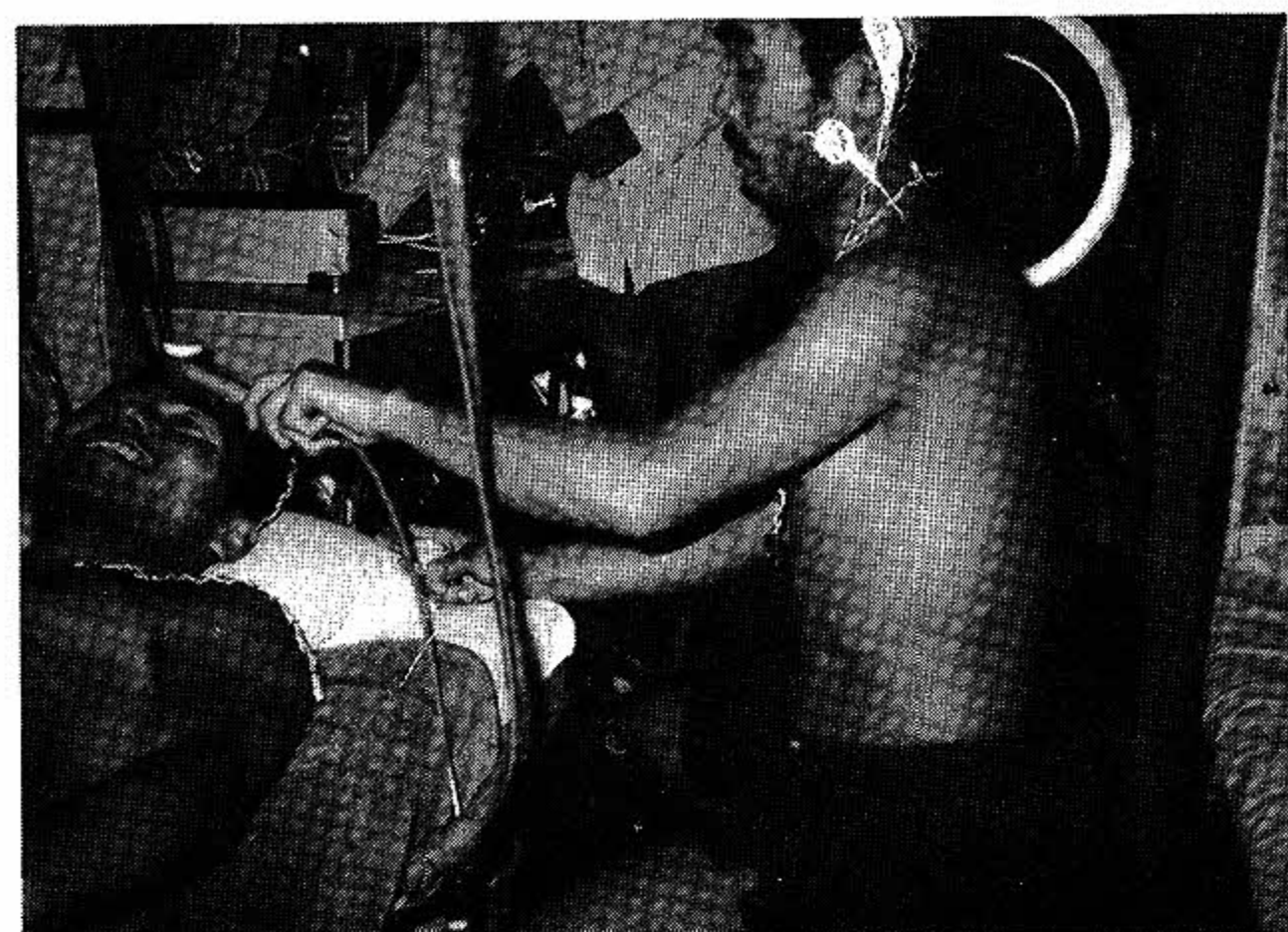
	・呼吸気温 inhale and exhale gas temperature ・呼吸気湿度 inhale and exhale gas humidity
蒸発熱 [E] evaporative heat 腎外不感蒸泄量 insensible water loss without urine	・体重 weight ・飲水量 water intake ・摂取食事量 food intake ・排泄糞量 excretive feces ・排泄尿量 urine ・呼吸ガス交換による重量減少 loss weight by respiration for O₂ exchange to CO₂
蒸発熱 [E] evaporative heat	・体表面積 body surface area ・皮膚面の水蒸気圧 vapor pressure over the skin ・皮膚面の気温 atmospheric temperature on the skin
蒸発熱 [R] evaporative heat 呼吸性不感蒸泄量 insensible water loss of inhale and exhale gas	・呼吸気温 inhale and exhale gas temperature ・呼吸気湿度 inhale and exhale gas humidity ・呼吸量 respiratory minuite volume
輻射熱 [R] radiant heat	・体表の有効輻射面積 effective radiation area of body surface ・皮膚温 skin temperature ・室内壁面温度 wall surface temperature in the room
環境 atmosphere condition	・圧力 atmospheric pressure ・気温 atmospheric temperature ・湿度 humidity ・気流速度 atmospheric-current velocity ・ガス組成 gas component ・壁面温度 wall surface temperature



シードラゴンⅣ ; 31 ata 1979年7月～9月
 Seadragon IV ; 31 ata jul.~Sept. 1979

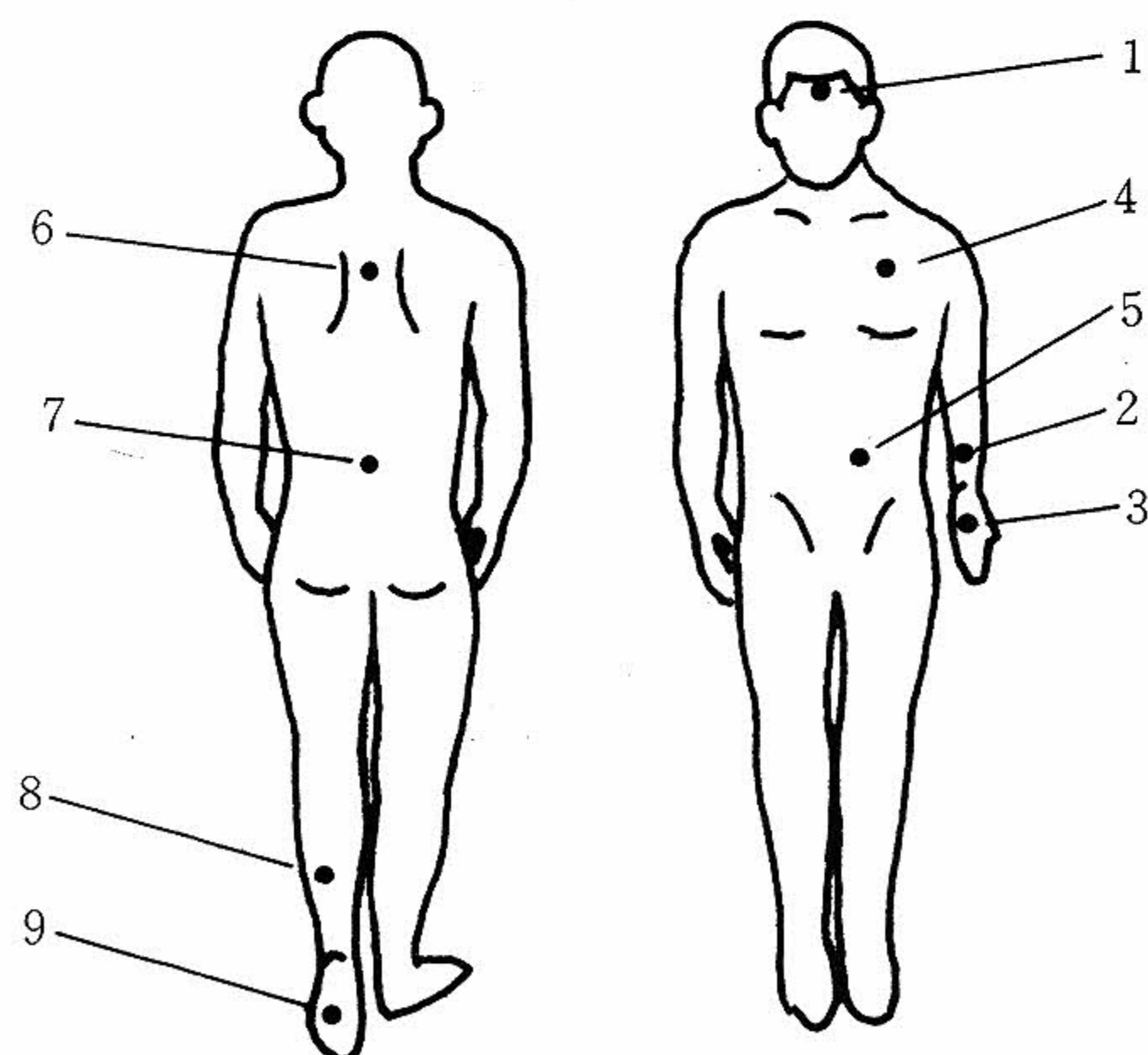
図中の矢印は測定を行った時期を示す。
 The arrow shows a measuring point.

図1 シードラゴンⅣの潜水行程と不感蒸泄測定的时间
 Dive profile of SEADRAGON IV and the measuring
 point of insensible water loss



円筒形カプセル測定器の構造
Cylindrical capsule

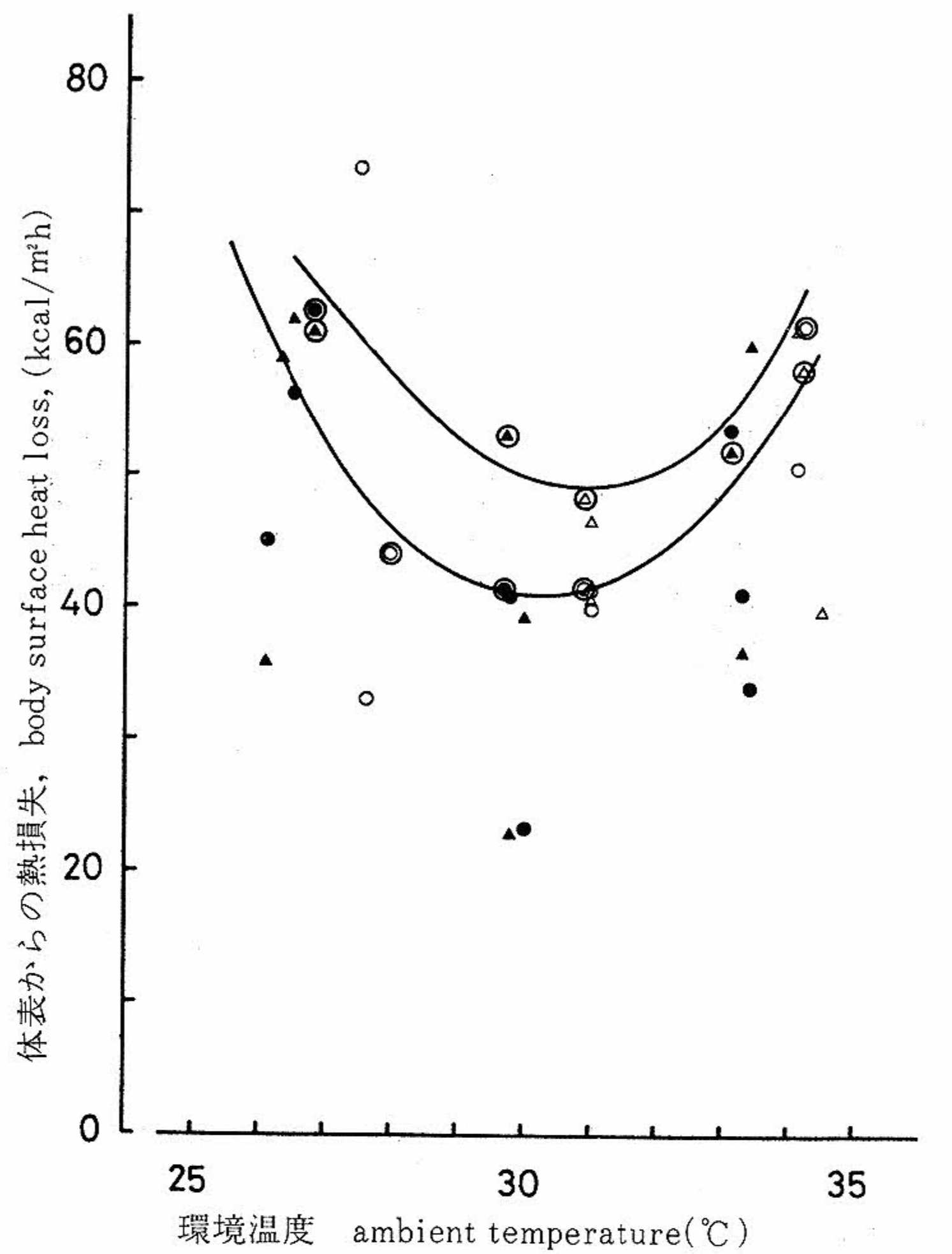
写真2 皮膚不感蒸泄の測定
Measurement of body surface water loss



測定部分 measuring point	体表面積率(%) body surface area rate
1.前額 forehead	6.3
2.前腕 forearm	15.2
3.手背 palm	3.5
4.胸部 chest	9.0
5.腹 abdomen	9.0
6.背中 upper back	9.0
7.腰部 lower back	8.9
8.ふくらはぎ calf	34.2
9.足背 sole	4.9
計 Total	100.0

$$BSA = 0.2024 W^{0.425} H^{0.725}$$

図2 皮膚不感蒸泄の測定点と体表面積率⁹⁾
Measuring points of skin insensible water loss
and rates of the body surface area



○; shows the the body surface heat loss value
at 90 min after start of the constant temperature.

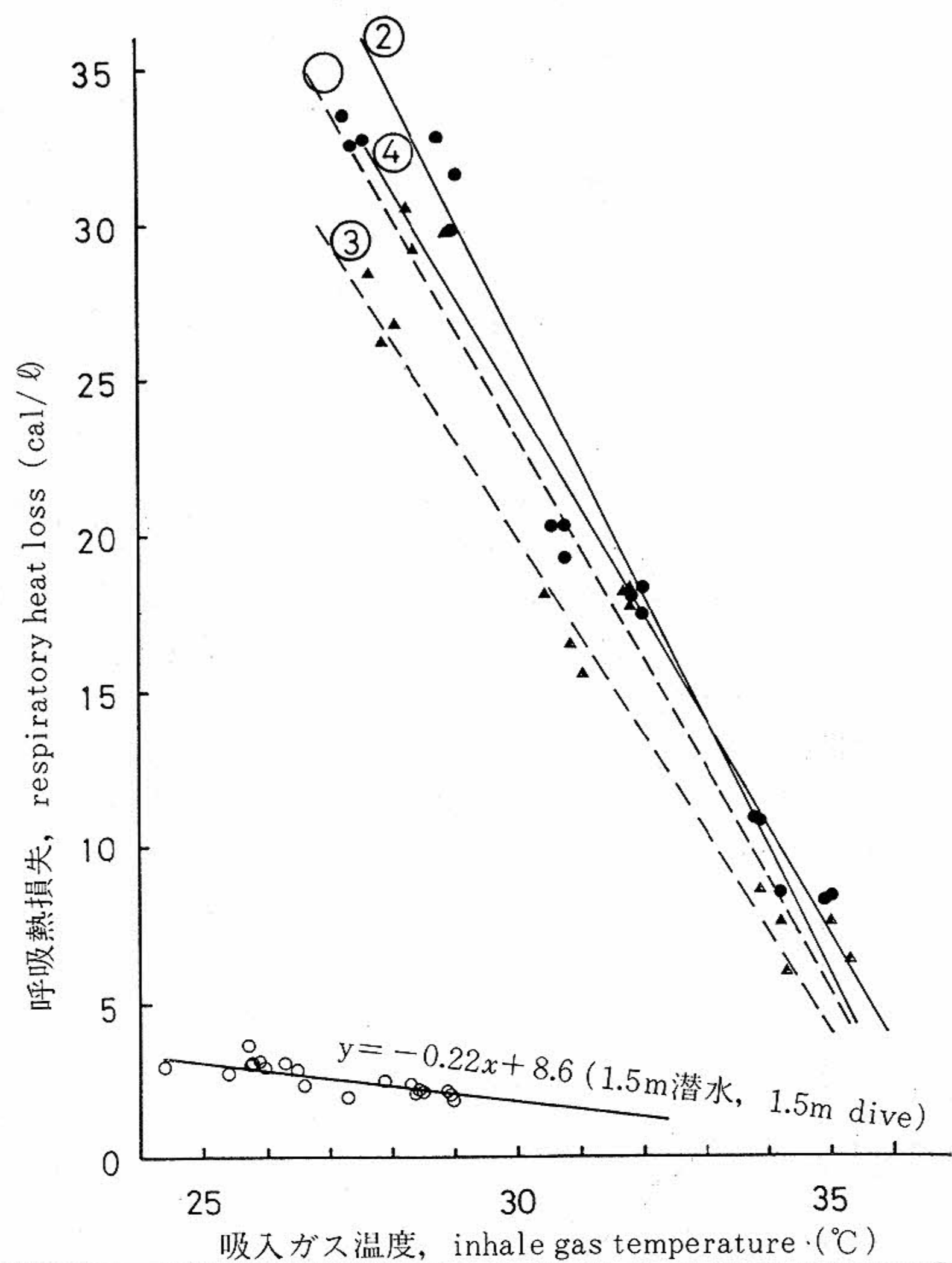
記 号 symbol	テストダイバー subject	圧力(ata) pressure
●	S O	26
▲	S M	
○	S O	31
△	S M	

(1) 体表からの熱損失

Body surface heat loss under 26 and 31 ata

図3 放熱量の測定結果 (その1)

Measurement results body heat loss (part 1)



記号 symbol	ストダイバー subject	圧力(ata) pressure	回帰式 regression formula
I ▲	S O	31	$y = -3.58x + 130.7$
II ●	S M		$y = -3.94x + 144.9$
III △	S O	26	$y = -3.18x + 115.5$
IV ○	S M		$y = -3.43x + 127.3$

(2) 呼吸による熱損失

Respiratory heat loss under 26 and 31 ata

図3 放熱量の測定結果 (その2)

Measurement results of body heat loss (part 2)

表6 不感蒸泄の計測結果
Measurement results of insensible water loss(IWL)

(単位 unit : g/day)

圧 力 depth (m)	湿度測定による humidity measurement method			体重測定による body weight measurement method	
	呼吸蒸泄 * ⁴ IWL from re- spiratory	皮膚蒸泄 * ⁵ IWL from skin	合 計 total	1 日の変化 * ¹ 24 hours	4 時間の変化 * ² 4hours no intake and rest during 4 hours
0	220	1070	1290	1936 * ³	1253±63
55	220	999	1219	948	—
170	220	711	931	1027	—
230	220	685	905	981	—
300	220	412	632	728	634±130

*¹ 体重測定値は当日の起床時と翌日の起床時の値を利用し、呼吸代謝による重量減少は測定していないので、測定当日、休息状態であったため、一律に3g/h×24hとした。
*² 竹内らの報告値¹⁾を24時間に換算した。
*³ 当日の測定を行わなかったため、翌日の値を採用した。
*⁴ IWL_R 測定値の荷重平均値を1日あたりに換算した。
*⁵ IWL_Sは測定値を10倍した値とした。

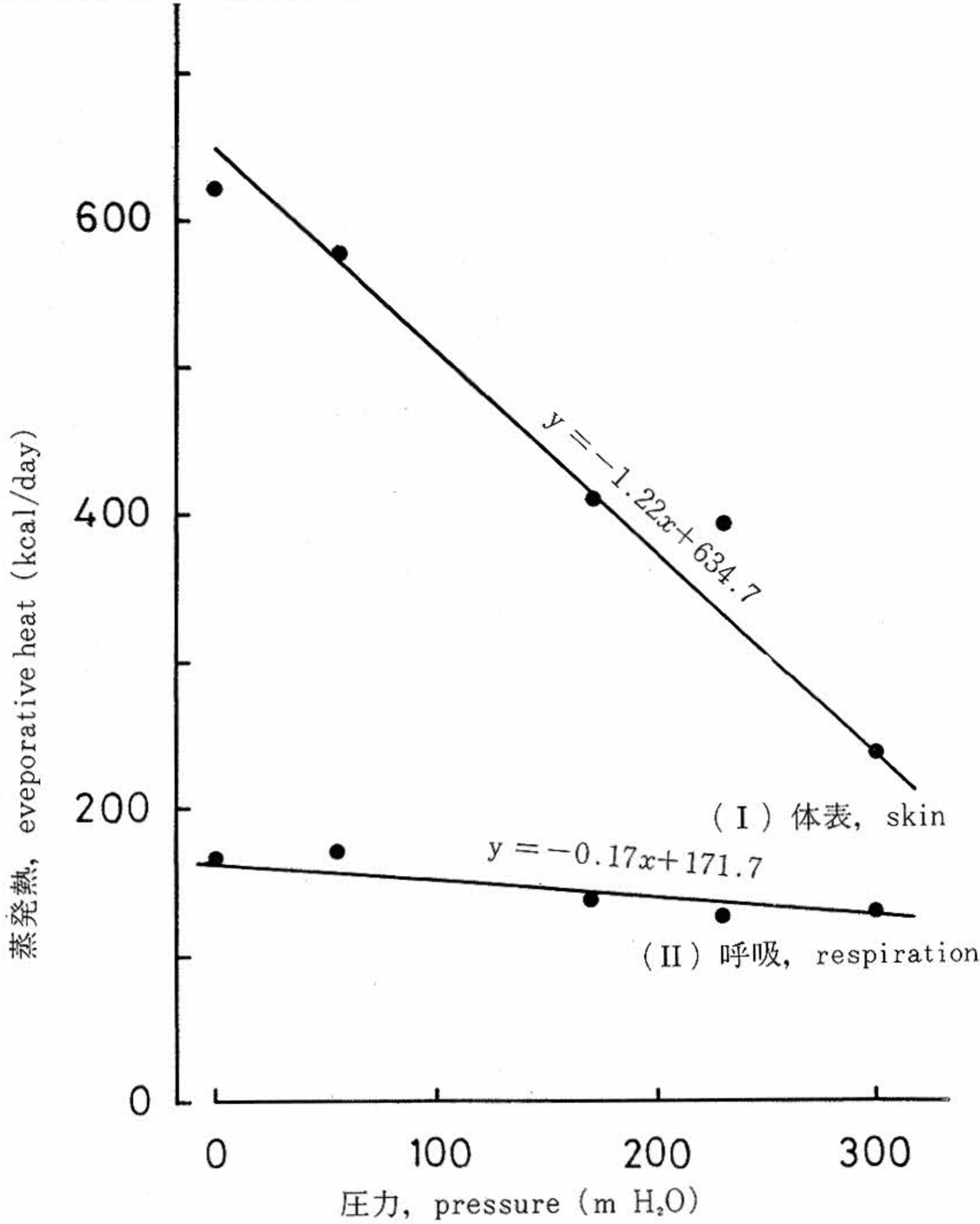


図4 不感蒸泄による蒸発熱
Evaporation heat by insensible water loss
(at SEADRAGON-IV)

4. 結 果

シードラゴン II の際は、He 高圧環境下の温度と温熱感覚の調査および皮膚温の変化を調べるのが主目的であったほか、実験と測定が順調に行なわれなかった。それは、150 m 飽和潜水時の高温負荷（適温よりも 3°C 上げて 32°C とした）のときは、テストダイバーが不快感をうったえたため、以後の高温負荷の実験を中止し、低温負荷も適温より 2°C 下げるように変更した。さらに 200 m 飽和潜水時の測定は、計器の故障でデータが得られなかった。また、ヒートロスの計算に必要な安静代謝、呼吸温度および呼吸量の測定が不完全であった。

したがって、体熱損失の結果にはシードラゴン II のデータは利用しなかった。

4.1 皮膚からの放熱量

図 3 の(1)には 250 m および 300 m He- O_2 環境の飽和潜水下での皮膚温測定値とエネルギー代謝の推定値とから計算した結果を示す。

90 min の高温部および低温部では、気温が一定に保たれているにもかかわらず、直腸温が安定せず、かなりのばらつきがみられるが、全般には適温での放熱量が最小で、適温よりも高温および低温へ移動すると増加することを示す。



写真 3 呼吸不感蒸泄の測定
Measurment of respiratory
insensible water loss

4.2 呼吸性放熱量

図 3 の(2)には 250 m, 300 m 飽和潜水の圧力下で、呼吸気温と呼吸量から算出した呼吸放熱量を示す。

ただし、このときの呼吸蒸発熱は呼気湿度が 95 % RH と仮定した。また、1.5 m 潜水の値は同一プロジェクト実験中の大気圧時のウェットチャンバーで、潜水実験したダイバーのものである。

4.3 蒸発熱

不感蒸泄量の計測は、1 個のセンサープローブを皮膚測定用円筒と呼吸測定用のマスクの両方に付け替え使用したため、皮膚測定の実施に手違いがあった。

すなわち、計測円筒の側面からセンサープローブを差し込むが、測定時には、センサープローブの取り付け穴の一方を塞がなければならないところ、これを行わなかった。したがって、煙突のように気流が流れ、実際よりも低い値を示した。

湿度測定から得た不感蒸泄量の結果は次の通りであった。

呼吸性不感蒸泄量は、60 % RH の環境ガス吸入では、170 m, 230 m および 300 m 時の値が大気圧および 55 m 時に比べ、約 20 % 減少した。圧力との相関は全般的には減少傾向がみられるが不明確である。また、0 % RH の非常用呼吸ガス吸入についての値は、環境ガス吸入の値の約 2 倍で、圧力との相関はみられなかった。呼気湿度は環境ガス吸入の時 90 ~ 95 % RH, 乾燥ガス吸入の時の約 80 % RH であった。

皮膚性不感蒸泄量は、前述のように、不確実な測定値になったが、圧力の増加に伴って、減少する傾向が明確に示された。

不感蒸泄の総量は呼吸性と皮膚性の値の合計である。

しかし、(1)呼吸性不感蒸泄量は、圧力によって変化しない、(2)皮膚性不感蒸泄量は、計測値の 10 倍を真値とする、との仮定によって計算すると、表 6 の通り、体重測定から得た結果と近似した。また、この結果は竹内らが行った測定値との比較でも一致した。

以上より、不感蒸泄量の測定結果が正しかったとして、蒸発熱を計算し、図 4 が得られる。

5. 考 察

5.1 全放熱量の大気圧値との差

人体からの放熱は、はじめに述べたように輻射、伝導、対流および蒸発によるものであり、体表と呼吸（対流、蒸発）の2系路から行われる。

実験の環境条件で輻射および伝導熱を無視するとしたが、これらは皮膚温、体温、代謝量などに反映されているので、測定結果の皮膚性放熱量と呼吸性放熱量の合計は、全放熱量を表わしている。

図5は300 m 高圧He環境下の放熱と大気圧時のものを比較したものである。

放熱量は29~32℃のとき、最小値となっておりこの温度域は大気圧下でも300mのHe環境下でも変わらないようである。また、この温度域が裸体における快適温度範囲と一致している。

高圧He環境下では適温値が明確化され、ダイバーの感覚による適温が250mで30℃、300mの時31℃であったように、圧力の増加と共に、上昇しているのがみられる。

図5のグラフは高圧He環境の温度が体熱損失には、きわめて大きな影響を及ぼすことを示す。

5.2 熱伝導要素による比較

人体からの放熱経路の割合は、そのときの環境によって異なる。日常の状態では図6に示すような大気圧部(1 ata)のものが知られている。

ここでは輻射が最大の比率を占める300 m実験環境では不明確ながら、無視できるほどに小さかったと想定される。

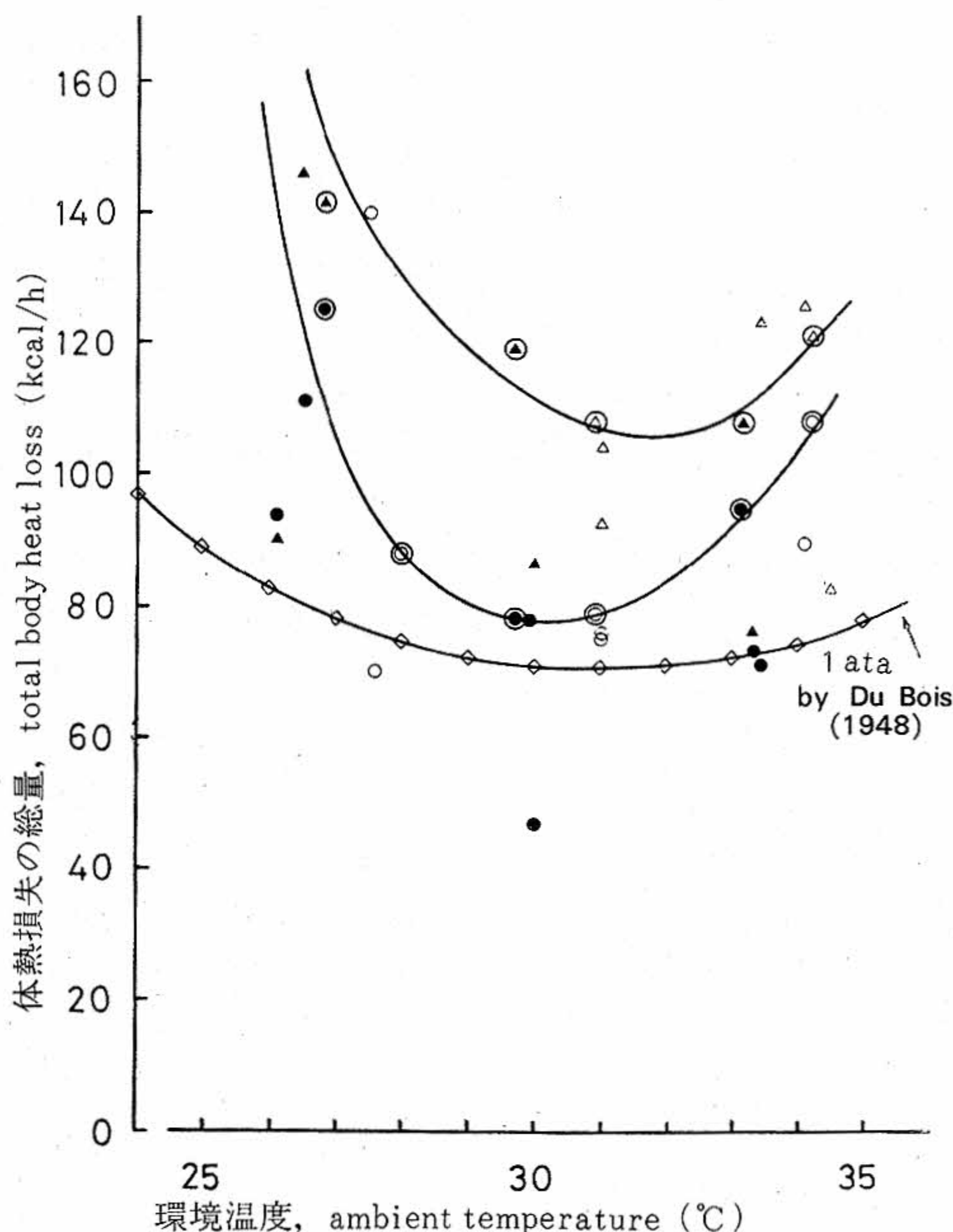
潜水シミュレーター内部気温と室内壁面の温度差が0.5~2.0℃以下であるほか、チャンバーの熱容量が大きく、断熱材が表面に巻いてあるため、気温を2~3℃変えても、2時間程度ではかん体温度が容易に変化しないためである。したがって海の現場でSDC（水中エレベーターの一種）や潜水船などの場合と状況が異っている。

高圧He環境の放熱では、呼吸放熱量がきわめて大きくなっていることが特徴としてみられる。これは呼吸放熱が(18)式によって求められており、圧力と温度の両方に影響を受けることからもうなずけるし、Schmidtの理論検討では高圧下のヒートロスの主因は呼吸放熱であると結論している。

蒸発熱は不感蒸泄量がHe環境下では、圧力増加に伴って減少するため、高圧下の発汗は大気圧下の場合と異なる状態をもたらすことが考えられる。

不感蒸泄量は気温と比例関係にあり、皮膚温が約34℃を超えると発汗が起こることが知られている。水の蒸発は図4に示したように、圧力が増加するに従って減少するので、高圧環境下で高温になるとダイバーの不快感が増進するだろう。

それは、図7の推定のように水の蒸発に関して、温度に対する生理的作用と圧力に關与する物理的作用が合致しないからであろう。



○ ; shows the body heat loss value, at 90min after start of the constant temperature.

記 号 symbol	テストダイバー subject	圧力(ata) pressure
●	S O	26
▲	S M	
○	S O	31
△	S M	

図5 高気圧下の体熱損失

Body heat loss under 26 and 31 ata

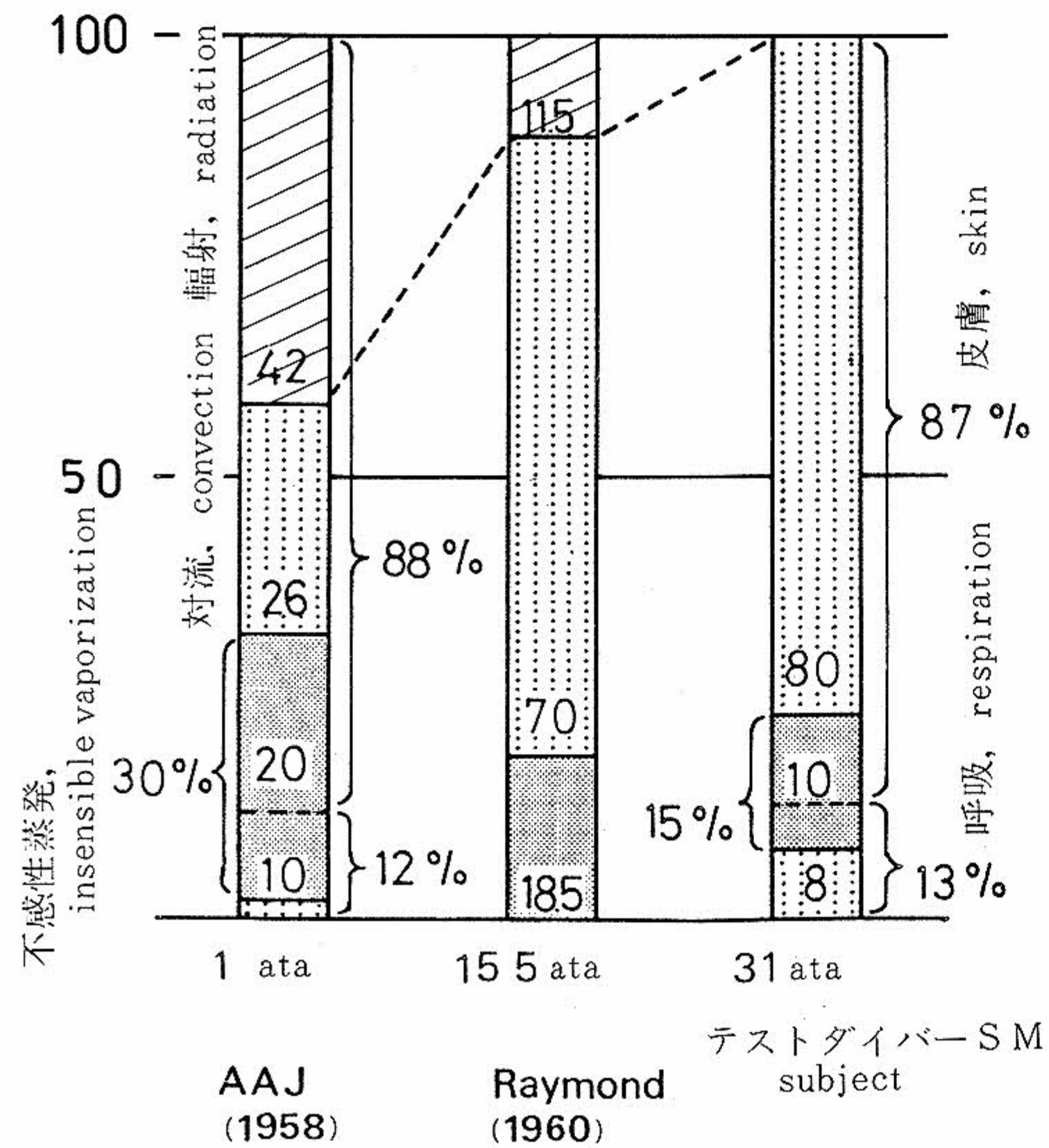
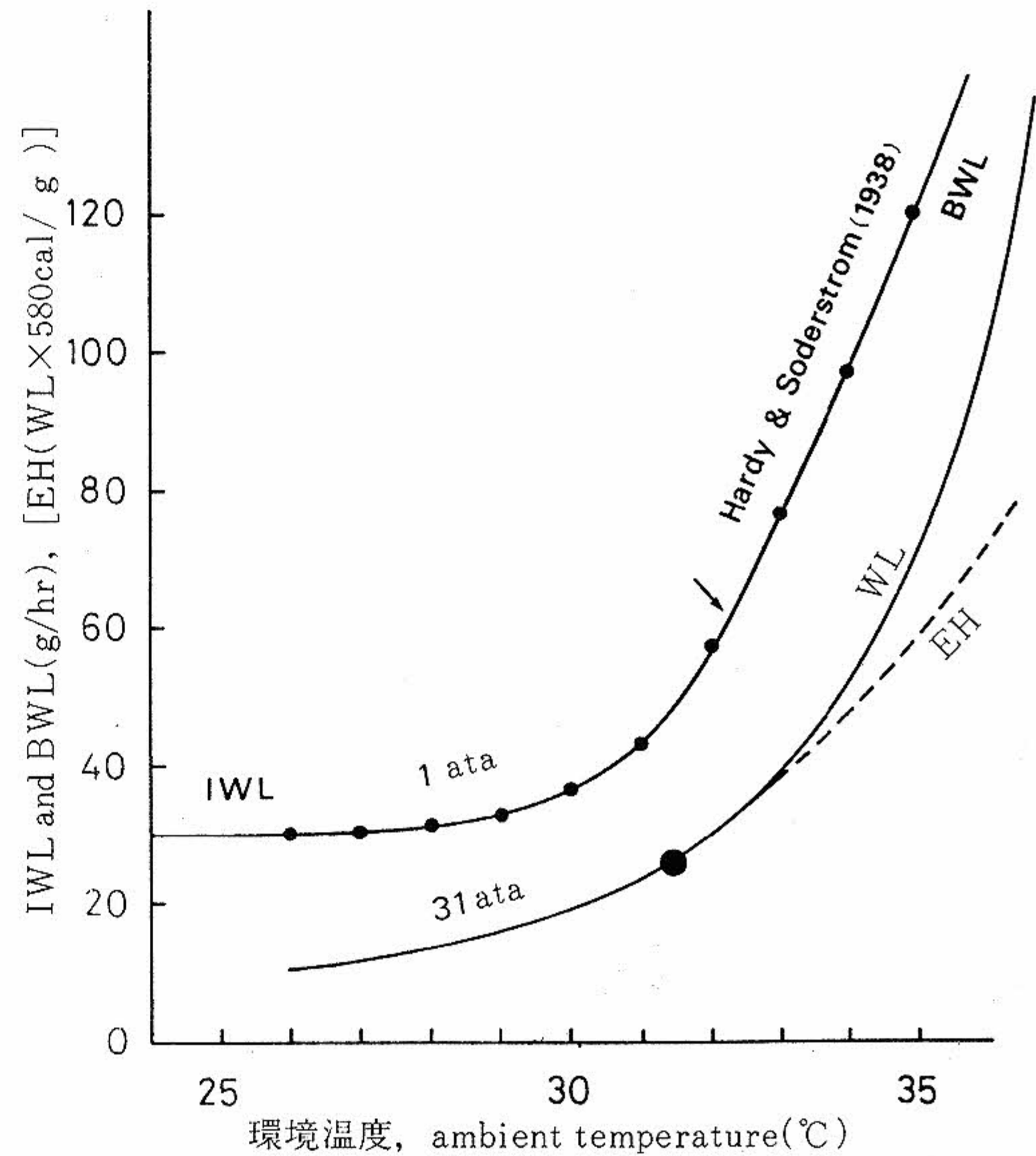


図6 適温環境下の体熱損失割合
Percentage of body heat loss under
comfortable temperature on various pressures



IWL ; 不感蒸泄量, insensible water loss
BWL ; 腎外水分損失量, body water loss without urine
WL ; 蒸泄量, water loss
EH ; 蒸発熱, evaporative heat

図7 不感蒸泄量の推定
Estimate of insensible water loss (31 ata)

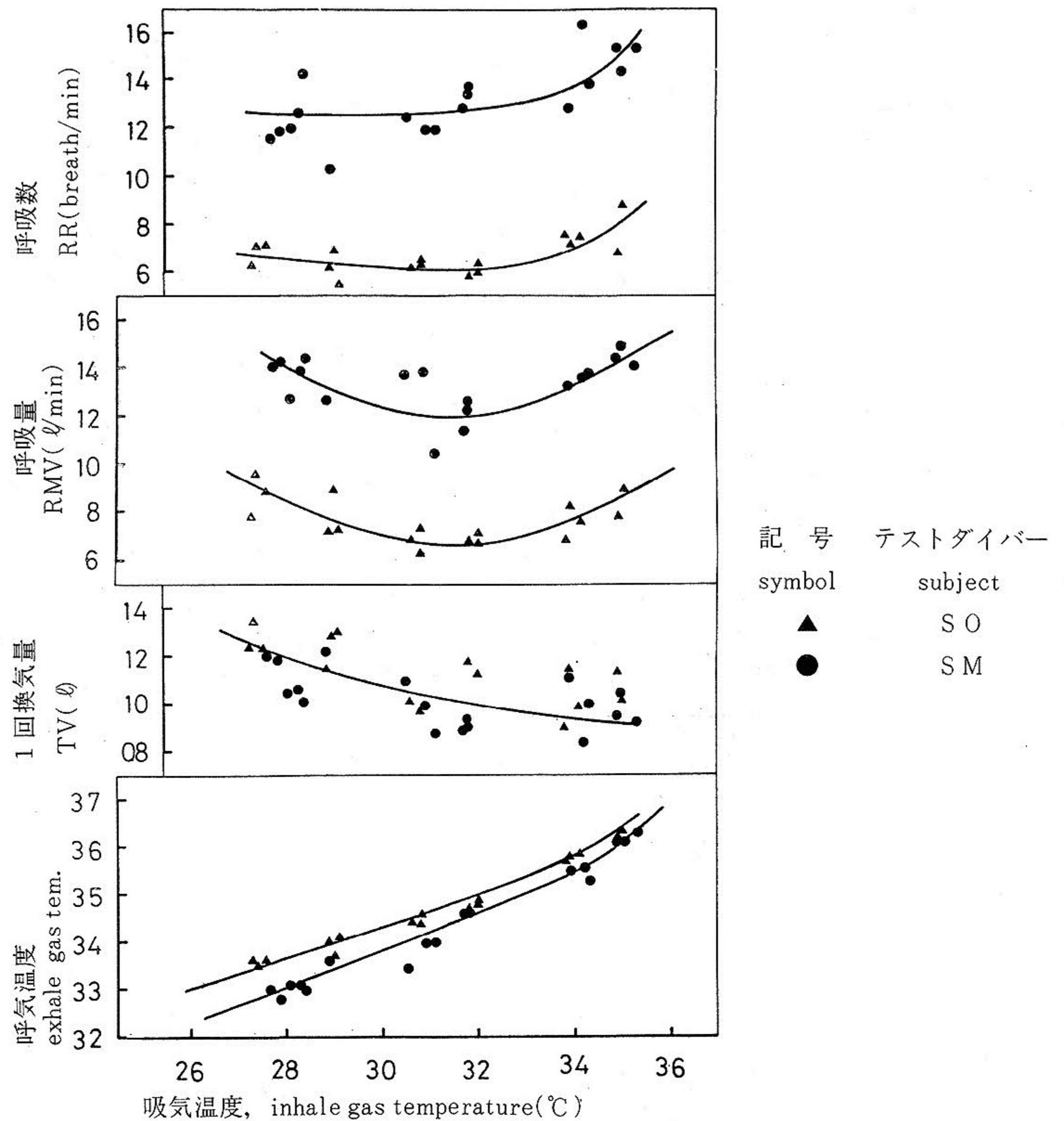


図8 吸気温度と呼吸 (31 ata)
Respiration and inhale gas temperature
(SEADRAGON-IV ; 31 ata)

5.3 放熱量の圧力との相関

高圧環境下で、体熱損失を少なくするには、環境気温を適温に保つことが最良の方法と思われる。

熱伝導の要素別にみると、つぎのようになる。

輻射は皮膚温とチャンバー内の壁温によって決定される。潜水シミュレーターや空調された船室内のDDC (船上減圧室) などでは、圧力が高くなるに従って環境気温を高くするため、圧力上昇に伴って輻射の影響は減少する傾向となる。

対流放熱のうち、皮膚からの放熱量は、圧力上昇に伴って熱伝導率のよいHeの割合が増えるため、圧力上昇と共に増加するが、圧力の影響よりも温度の影響の方が大きい。

伝導熱は皮膚と接する物体の表面温度と伝導率の関係にあるので、圧力は関与しない。また、接触面積は通常、極く狭いので考慮しなくともよいと思われる。

蒸発熱は不感蒸泄量の総量測定から圧力上昇に伴って減少することが知られていた。しかし、われわれの測定結果から、その主因は皮膚からの不感蒸泄量の減少であることが、明らかとなった。

5.4 温度に伴う生理変化

環境気温が変ることによって呼気温度、皮膚温度および体温の変ること、また、体熱損失の増加することが知られている。高圧He環境下ではこ

れらの変化がさらに顕著になることを知った。

これらは当然、代謝量の変化を伴うはずである。酸素消費量の測定値に代表される代謝量の測定は、残念ながら行わなかった。

しかし、代謝の増進は呼吸量の増加となって現われるので、椅座安静時の呼吸量を気温との対比でみると、体熱損失量と同様の曲線、つまり、図8のように、適温時には最小で、高温および低温に向うと増加する傾向がみられる。

分時呼吸数は高温部で増加し、1回換気量は気温が降下するに従って増加する傾向がみられた。呼吸量と心拍数の間に比例相関のあることが知られている。

心拍数(HR)は計測しなかったが、シードラゴンⅣの300 mの高温負荷時の非常な暑さをうったえたときに計ったところ、被検者SOはHRが 82 ± 2 beat/min, SMは 99 ± 4 で、300 m下での安静時の計測(医学的定時刻計測)時の平均値、各々65.5および58.5に比べ大幅な増加をみた。

高温負荷時の心拍数は、軽作業時の状態と等しく、高圧下の高温がダイバーにとって負担となることがわかった。

6. 結 論

この報告は、シードラゴン計画における3回の飽和潜水シミュレーション実験の結果から、体熱損失として整理して検討した。

実験方法で述べたように、伝導、輻射を計測から除外し、また、気流速度の計測ができなかったことから、皮膚からの放熱を仮定計算にて求めた。

この仮定値を実値とするためには、酸素消費量の測定が必要があるが、行わなかったなど、不備の点が多々あった。将来、機会があれば再実験を試みたいと思う。

今回の実験結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 高圧He環境の熱伝導要素が、大気環境と異なるのは、Heと空気の熱伝導率と、圧力上昇に伴う環境気体の熱容量の増加とにある。

体熱損失は、皮膚と呼吸の2系路から行われ、皮膚からの放熱には、主にHeガスの熱伝導率、呼吸からの放熱には、気体密度が作用する。したがって、圧力増加に伴う、熱損失の増加は、気体密度の増加の作用の方が大きく、熱量的に

は低気温になると呼吸からのものが皮膚からのものより大きく、高圧下での放熱の主因となり、圧力の増加と共に、その差はさらに拡大する。実験結果もこれを示した。

- (2) 呼吸放熱量は圧力に比例し、環境気温に反比例する。

その変化は直線的であり、潜水を行うに当り、環境圧力、呼吸ガス密度が増大することは必然であり、これをさけることができない以上、体熱損失防止のため潜水タンクの環境温度、また潜水時の呼気温度は適当な範囲で、できるだけ高温にすべきである。呼吸による熱交換は、肺と気管で行われる。このことは、低温吸気が、直接、体の中心部を冷却することにつながるの

- (3) 皮膚からの放熱量は、快適温度域で最小となり、低温部では対流および輻射によって増加し、高温部では不感蒸泄、さらに高温になると、発汗によって増加する。

呼吸性熱損失がほとんど無感覚であるのに対し、皮膚性熱損失による暑さ、寒さの感覚は敏感である。

適温の範囲と調節は高圧になるに従って狭まり、また温度が上昇する。しかし、温度に対する体感曲線と皮膚放熱曲線は一致するようである。

- (4) 対流による放熱は、Heの熱伝導率、高圧による密度の増加、さらに皮膚温と気温の差によって増大する。

高圧He環境下の気流速度の増加は、これを増大させるので、平均風速を小さくする必要がある。

- (5) 輻射熱は潜水シミュレーターのように空調した室内に設置されている場合は、あまり大きくなく、場合によっては、無視することができる。

しかし、支援船デッキ上のDDCや海中のSDCなどは、かなり大きくなると予想されるので、チャンバーの内壁温が低温とならないような断熱の工夫が必要であろう。

- (6) 蒸発熱は呼吸と皮膚から放出される。

呼吸からの蒸発は高圧で幾分減少する傾向がみられる。皮膚からの蒸発は圧力が増加すると減少し、31 ata気圧下では大気圧の約38%に減少した。これは高圧下の体熱損失の防止に有効であるが、体熱放散を必要とする高温時には逆効果となり、蓄熱によって体温上昇をきたす。高圧下で発汗を起すほどの高温は防止すべきであり、またこのような場合、除湿が急務である。

(7) 生理的現象の変化では、気温の上昇によって呼吸量、心拍数が増加した。

文 献

- 1) Goodman, Maxwell W., et.al, "Hyperbaric respiratory heat loss study", Westinghouse Electric Corp. Annapolis Md. Ocean Research and Engineering Center, AD-732039., N00014-71-C-0099(1971)
- 2) 石堂正三郎, 猶崎正也, "住居環境学" (1972), 化学同人
- 3) 神田修治, 垣 鋸直, ほか, "高圧ヘリウムチャンバー内の壁面温度測定, 大陸棚有人潜水作業技術の研究開発," 昭和52年度 科学技術庁 海洋開発技術研究委託費による研究^{2/2}, (1978), JAMSTEC
- 4) 中山英明, 富安和徳, 設楽文明, "ヘリウム環境の適応範囲に関する研究, 大陸棚有人潜水作業技術の研究開発," 昭和52年度 科学技術庁 海洋開発技術委託研究費による研究成果報告書^{2/2}, (1978) JAMSTEC
- 5) 中山英明, 富安和徳, 設楽文明, "高圧ヘリウム混合ガス環境の適温範囲に関する研究," 未発表
- 6) Nilsson, Gert E., 1977, "On the measurement of evaporative water loss., Methods and clinical applications", Linköping University Medical Dissertation (48)
- 7) Raymond, L.W.et.al, 1968, "Body temperature and metabolism in hyperbaric helium atmospheres," Journal of Applied Physiology 24, (5)
- 8) 斎藤一, 三浦豊彦, "日本の高温労働 - その実態と対策-", 労働科学叢書18, (1969), 2版, (財)労働科学研究所
- 9) Schmidt, T.C. "Theoretical heat loss and survival times in cold hyperbaric helium environment," Oceans '76(1976), MIS-IEEE
- 10) "新労働衛生ハンドブック"(1974), 労働科学研究所
- 11) 竹内久美, 設楽文明, 桐ヶ谷紀昌, ほか, 1980, "高圧 He-O₂環境下の水分代謝 (第1報)", JAMSTECTR(5), 211~221
- 12) 富安和徳, 1971, "海中居住の雰囲気調節" 海洋科学 (3)
- 13) 富安和徳, 中山英明, "300mHe環境下に於ける体熱損失について", 第14回 日本高気圧環境医学会 (1979)
- 14) 富安和徳, 中山英明, "飽和潜水と温熱感覚", 第2回 潜水技術シンポジウム (1980), 海中開発技術協会
- 15) 富安和徳, 中山英明, "ダイバーの体熱損失と保温に関する研究 (第2報), 高圧ヘリウム環境下の生理温度の変化", JAMSTECTR (6) 115~135
- 16) 富安和徳, 中山英明, "高圧環境下における不感蒸泄量の減少," 第15回 日本高気圧環境医学会 (1980)
- 17) Webb, Paul, 1970, "Body heat loss in under-sea gaseous environment", Aerospace Medicine, (Nov.)
- 18) 吉村寿人, 緒方維弘, "代謝の生理学 I", 生理学的大系 IV-1 (1970), 医学書院