

## 運動時の温熱性発汗特性と平均皮膚表面温度の予測

EXPERIMENTS ON THERMAL SWEATING AND PREDICTION OF  
MEAN SKIN TEMPERATURE FOR SUBJECTS IN EXERCISE

松尾 朋浩\*, 窪田 英樹\*\*, 真木 学\*\*\*, 伊地知 健\*\*\*\*

鎌田 紀彦\*\*\*\*\*, 若松 伸 司\*\*\*\*\*

Tomohiro MATSUO, Hideki KUBOTA, Manabu MAKI,

Takeshi IJICHI, Norihiko KAMATA and Shinji WAKAMATSU

Analysing data reported on sweating, it seemed that thermal sweating rate was proportional to mean skin temperature, provided that the thermal equilibrium had been attained. This paper, first, described about the results of experiments conducted on thermal sweating of subjects under bicycle ergometer exercise, in which the linear relationship between the mean skin temperature and sweating rate was confirmed. Applying this relationship into the heat balance equation, a simple equation for predicting the mean skin temperature was introduced as an index of human response to the thermal environment.

Keyword: sweating, mean skin temperature, thermal environment, hot environment, ergometer,

発汗、平均皮膚表面温度、温熱環境、暑熱環境、エルゴメータ

## 1 はじめに

作業時、あるいはスポーツなどの運動時には、中立温感の状態でも発汗することが知られている。暑い環境下では、さらに温熱性の発汗が加わることになる。運動時にはこのように常に発汗が伴うので、その環境評価にはその発汗特性を把握することが不可欠であり、蒸発が密接に関与する湿度の影響を精細に評価することが重要である。また、地球環境との共存、環境安全の観点からも、信頼のおける簡便な環境評価指標が望まれる。

温熱環境を評価する代表的な理論的指標として Gagge・Nishi・Stolwijk による Two-Node-Model<sup>1),2)</sup> を基にした指標と、Fanger による PMV<sup>3),4)</sup> が知られている。前者は、任意の環境下における人体の平均皮膚表面温度（以下 平均皮温）とコア温度、さらに発汗時の濡れ率も解析的に算定し得る優れた特徴を有する。しかし、連立微分方程式を解く必要があるので実用面での利用には工夫がいるのと、運動時に関してはその適用可能な範囲を探定することが必要である<sup>4)</sup>。一方の PMV は「温感」の指標であり、湿度の影響評価が不可欠な発汗温域を評価する指標としては不十分である<sup>41),42)</sup>。

本論文では、定常状態に着目し、温熱性の発汗を平均皮温の関数

で表現することにより、発汗時の平均皮温を解析的に予測することを試みる。

さて、温熱性発汗は、平均皮温とコア温度の関数であることがこれまでに知られている。その中で Benzinger<sup>5)</sup> は「平均皮温は発汗量とは無相関」と述べており、その理由として代謝によって体内温度が異なることをあげている。しかし視点を变えて、同じデータを体内温度が大きく依存する代謝量別に見た場合には、平均皮温と発汗量との間には高い相関がある、という逆の結論が得られる。一方、Stolwijk ら<sup>7)</sup> は運動時の発汗量は直腸温度と平均皮温に一次比例すると述べており、発汗量を両者の関数で表している。Nadel ら<sup>6)</sup> も、運動を短時間行わせて体内温度を高める方法で、安静時に対して通常では得られない高い体内温度を実現し、結果として発汗量を、体内温度・平均皮温それに局所皮膚表面温度の関数で表現した。

このように発汗量は体内温度と平均皮温の関数である。しかし、本論文が対象としている任意の代謝量における定常状態に限定すれば、発汗量を平均皮温のみの関数として表現することが可能となる。それは、環境温度が中立温度より高ければ体内温度も上昇するが、この体内温度の中立温度からの偏差と平均皮温の中立温度からの偏

\* 室蘭工業大学建設工学専攻 大学院生・工修

\*\* 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

\*\*\* 室蘭工業大学建設システム工学科 研究生・工修

\*\*\*\* 大和ハウス工業(株)総合研究所 研究員・工修

\*\*\*\*\* 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・工博

\*\*\*\*\* 国立環境研究所地球環境研究グループ、大気保全研究チーム 総合研究官・工博

Graduate Student, Division of Civil and Environmental Eng., Muroran Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Student, Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, M. Eng.

Researcher, Central Research Laboratory, Daiwa House Industry, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Arch., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Leader, Urban Air Quality Research Team, Regional Environmental Division, National Institute for Environmental Studies, Dr. Eng.

差とは、特別の場合（たとえば、水を大量に摂取する等）を除き、互いに独立ではなく、体内温度の偏差を平均皮温の偏差の関数として表現することができることによる。

一方、中立温感時の（運動性の）発汗量に関しては、代謝量の関数として既に知られている<sup>3)</sup>。

人が高温環境で運動を開始した場合、比較的速やかに反応して、30分から1時間程度で定常状態と見なしえる状態に達することが知られている<sup>7), 8)</sup>。このことから、温熱性の発汗が生ずる温度域においては定常的な状態の環境評価が、労働環境に対してはいうまでもなく、大切であることが理解される。

しかしながら、定常的な状態における運動時の温熱性発汗率を平均皮温のみの関数として表し、さらに、その結果を利用して平均皮温を環境4要素と人体側の2要素の陽関数で表わす試みは、為されていないようである。

本論文では、我々が日常的に経験する作業労働やスポーツなどに対する温熱環境を主な対象として、平均皮温が中立温度から36℃前後の範囲に限定し、定常と見なし得る状態に着目する。まず、代謝量を3 metに設定して被験者実験を実施し、定常状態における温熱性の発汗率と平均皮温との関係を近似した一次式を提示する。ついで、この発汗と平均皮温との関係を人体に関する熱平衡式に適用して、平均皮温について環境4要素と人体側の2要素（代謝、着衣）の陽関数で表される予測式を提示する。

## 2. 記号の説明

$a_{sk}$  : 平均皮温  $t_{sk}$  における飽和水蒸気圧  $P_{sk}$  を  $t_{sk}$  の一次式で近似する時の係数  $kP_a/K$

$$P_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$$

$b_{sk}$  : 平均皮温  $t_{sk}$  における飽和水蒸気圧  $P_{sk}$  を  $t_{sk}$  の一次式で近似する時の係数  $kP_a$

$$P_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$$

$f_{cl}$  : 人体表面積増加率 (= 着衣表面積 / 皮膚表面積) ND

$f_{eff}$  : 人体有効放射面積率 ND

$h$  : 総合熱伝達率 (=  $h_c + h_{rop}$ )  $W/(m^2 \cdot K)$

$h_c$  : 対流熱伝達率  $W/(m^2 \cdot K)$

$h_r$  : 放射熱伝達率  $W/(m^2 \cdot K)$

$h_{rop}$  : 作用放射熱伝達率 (=  $f_{eff} \cdot h_r$ )  $W/(m^2 \cdot K)$

$i_{cl}$  : 着衣の透湿効率 ND

$I_{clo}$  : 着衣の熱抵抗 clo

$k_{adp}$  : 「暑気鍛練」による温熱性発汗割増し係数 ND

$k_{dif}$  : 拡散による蒸散熱流率  $W/(m^2 \cdot kP_a)$

$k_L$  : 潜熱変換係数  $g/h \rightarrow W$  ( $=H_L/3600=0.674$ )  $W/(g/h)$

$k_{Lres}$  : 呼吸による潜熱流率  $W/(m^2 \cdot kP_a)$

$k_{max}$  : 濡れた皮膚表面からの蒸散熱流率  $W/(m^2 \cdot kP_a)$

$k_{rc}$  : 放射と対流による熱流率  $W/(m^2 \cdot K)$

$k_{sres}$  : 呼吸による顕熱流率  $W/(m^2 \cdot K)$

$k_{swt}$  : 温熱性発汗による蒸散熱流率  $W/(m^2 \cdot K)$

$k_{wdif}$  : 拡散による蒸散率  $g/(h \cdot m^2 \cdot kP_a)$

$k_{wswt}$  : 温熱性発汗による蒸散率  $g/(h \cdot m^2 \cdot K)$

$H_L$  : 蒸発潜熱 ( $=2.43 \times 10^3$ )  $J/g$

$LR$  : ルイス数 ( $=16.5$ )  $K/kP_a$

$p_a$  : 空気の水蒸気圧  $kP_a$

$p_{ex}$  : 呼気の水蒸気圧  $kP_a$

$p_{sk}$  : 皮膚表面温度の飽和水蒸気圧  $kP_a$

$q_c$  : 対流による熱流密度  $W/m^2$

$q_{dif}$  : 拡散蒸散による熱流密度  $W/m^2$

$q_H$  : 人体発生熱 ( $= q_M - q_{wk} = q_M(1 - \eta)$ )  $W/m^2$

$q_{Lres}$  : 呼吸による蒸散熱流密度  $W/m^2$

$q_{max}$  : 濡れた人体表面からの蒸散による熱流密度  $W/m^2$

$q_M$  : 代謝密度  $W/m^2$

$q_{Mb}$  : 基礎代謝密度  $W/m^2$

$q_{Mr}$  : 安静時の代謝密度  $W/m^2$

$q_r$  : 放射による熱流密度  $W/m^2$

$q_{sres}$  : 呼吸による顕熱流密度  $W/m^2$

$q_{sw}$  : 発汗による熱流密度 ( $= q_{swe} + q_{swt}$ )  $W/m^2$

$q_{swe}$  : 中立温感時の運動性発汗熱流密度  $W/m^2$

$q_{swt}$  : 温熱性発汗熱流密度  $W/m^2$

$q_{wdif}$  : 拡散蒸散密度  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wk}$  : 外部仕事量  $W/m^2$

$q_{wnmax}$  : 濡れた人体表面からの蒸散密度  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wres}$  : 呼気による蒸散密度  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wsw}$  : 発汗密度 ( $= q_{wswe} + q_{wswt}$ )  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wswe}$  : 中立温感時の運動性発汗密度  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wswt}$  : 温熱性発汗密度  $g/(h \cdot m^2)$

$q_{wt}$  : 人体の体重減少密度  $g/(h \cdot m^2)$

$R_{cl}$  : 着衣熱抵抗 ( $=0.155 I_{cl}$ )  $(K \cdot m^2)/W$

$R_{cle}$  : 着衣の透湿熱抵抗  $(kP_a \cdot m^2)/W$

$R_{dif}$  : 拡散蒸散に係わる皮膚の透湿熱抵抗  $(kP_a \cdot m^2)/W$

$R_s$  : 人体の表面熱伝達抵抗  $(K \cdot m^2)/W$

$R_{se}$  : 人体の表面湿気熱伝達抵抗  $(kP_a \cdot m^2)/W$

$t_a$  : 室温  $^{\circ}C$

$t_{ex}$  : 呼気温度  $^{\circ}C$

$t_{op}$  : 作用温度 ( $= (h_{rop} t_{rop} + h_c t_a) / (h_{rop} + h_c)$ )  $^{\circ}C$

$t_{rop}$  : 作用放射温度  $^{\circ}C$

$t_{sk}$  : 平均皮膚表面温度 (平均皮温)  $^{\circ}C$

$t_{skcr}$  : 式 (41), (45) の適用上限平均皮膚表面温度  $^{\circ}C$

$t_{skn}$  : 中立温感時の平均皮膚表面温度  $^{\circ}C$

$t_{sksw}$  : 温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚表面温度  $^{\circ}C$

$v$  : 相対風速  $m/s$

$w_{max}$  : 発汗による最大濡れ率 ND

$w_{sw}$  : 発汗による濡れ率 ( $= q_{sw} / q_{max}$ ) ND

$\eta$  : 外部機械仕事率 ( $= q_{wk} / q_M$ ) ND

$\eta_{net}$  : ネット効率 ( $= q_{wk} / (q_M - q_{Mr})$ ) ND

$\xi$  : 有効発汗率 ND

## 3. 実験概要

恒温恒湿環境実験室において被験者実験を行った。被験者は男子学生4名(表1)、着衣条件はほぼ裸に近いトランクスのみである。図1に実験室平面図を示す。実験温湿度条件は室温16、19、22、28、34℃、相対湿度50%である。被験者は27℃、50%の中立条件の準備室に入室後、皮膚表面温度測定用のサーミスタ温度計を所

定の部位にはりつけ、そのまま椅座状態で 30 分滞在する。その後実験室へ移動し、『1 分間の立位：体重測定』と『9 分間のエルゴメータ運動』を 1 サイクルとする 10 分周期の作業（平均代謝量 2.8 met）を 120 分間続ける。なお、体重測定の 1 分間には鼓膜温度も測定する。また、自転車エルゴメータ運動の代謝量を 3 met に設定し、この代謝を維持するようにエルゴメータの負荷を  $28.5 \text{ W/m}^2$  に調整した。被験者の皮膚表面温度の測定は、準備室・実験室ともに 5 分間隔で記録した。室温・グローブ温度の測定は 10 分間隔で行った。平均皮温と室温等の計測にサーミスタ温度計（T 社製 K722 / センサー直径 1 mm / 精度  $0.1^\circ\text{C}$ ）、鼓膜温度測定には O 社製耳式体温計（MC0505）、を用いた。エルゴメータは C 社製（EC-1600）、体重測定には電子天秤（A 社製 HP-100 / 最小表示 1g）を使用した。なお、皮膚温測定部位・平均皮温の算出は Hardy-DuBois の 7 点法に基づいた。実験は、1998 年 11 月に実施した。

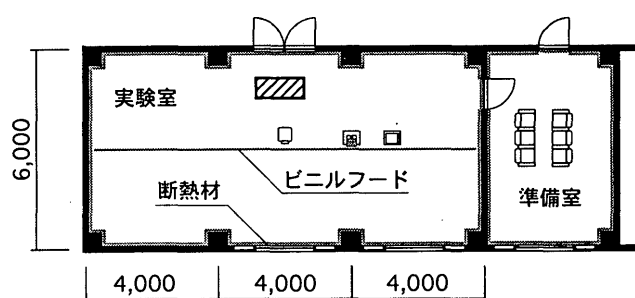


図 1 実験室平面図

表 1 被験者

被験者	年齢 [才]	身長 [m]	体重 [kg]	体表面積 [m <sup>2</sup> ]
T.A.	22	1.78	65	1.81
A.T.	22	1.73	62	1.74
T.H.	22	1.77	64	1.79
T.M.	21	1.69	57	1.65

体表面積 (DuBois 面積) =  $0.202(\text{体重})^{0.425} \times (\text{身長})^{0.725}$  [m<sup>2</sup>]  
 体重 [kg]、身長 [m]

#### 4. 代謝量等の推定

被験者の代謝量・発生熱量は次に示す方法で推定する。

まず、net 効率は次のように定義される。

$$\eta_{\text{net}} = q_{wk} / (q_M - q_{Mr}) \quad (1)$$

自転車エルゴメータの net 効率として 0.23 を適用する<sup>10)</sup>。安静時の代謝量  $q_{Mr}$  は、基礎代謝量  $q_{Mb}$  の 1.2 倍<sup>11)</sup> とし、被験者（平均年齢 22 歳）の基礎代謝量<sup>12)</sup> として  $42 \text{ W/m}^2$  を適用して下記の値を得る。すなわち、

$$q_{Mr} = 1.2 q_{Mb} = 50.4 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

式 (1) から代謝量  $q_M$  は次式のように表される。

$$q_M = q_{Mr} + q_{wk} / \eta_{\text{net}} \quad (3)$$

ここで、設定代謝量  $q_M = 3 \text{ met}$  を保持するために、エルゴメータに外部仕事量として  $q_{wk} = 28.5 \text{ W/m}^2$  を負荷した。すなわち、

$$q_{wk} = (q_M - q_{Mr}) \eta_{\text{net}} = 28.5 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

このときの発生熱量  $q_H$  は次のようになる。

$$q_H = q_M - q_{wk} = q_M (1 - \eta) \quad (5)$$

$$= 145.9 (= 2.51 \text{ met}) \quad (6)$$

一方、体重測定を立位で行ったがこの時の代謝を 1.2 met ( $70 \text{ W/m}^2$ ) とした。従って、「立位 1.2 met: 1 分間」+「自転車エルゴメータ運動 3 met: 9 分間」を 1 サイクルとする 10 分間の平均代謝量は次のようになる。

$$q_M = 0.1 \times 1.2 + 0.9 \times 3.0 = 2.8 \text{ met} (= 162.8 \text{ W/m}^2) \quad (7)$$

また、平均発熱量  $q_H$  は、次のように推定される。

$$q_H = 0.1 \times 1.2 + 0.9 \times 2.51 = 2.38 \text{ met} (= 138.4 \text{ W/m}^2) \quad (8)$$

さらに平均外部機械仕事は  $q_{wk} = 0.9 \times 28.5 = 25.65$  で、平均外部機械仕事率  $\eta = q_{wk} / q_M$  として下記の値を得る。

$$\eta = q_{wk} / q_M = 25.65 / 162.8 = 0.156 \quad (9)$$

#### 5. 温熱性発汗密度の算出法

体重減少  $q_{wt}$  には通常、呼吸と体表からの水分の蒸発と滴下（無効発汗）、呼吸のガス交換による体重減少、体表と着衣への水分蓄積が関与するものとして扱われる<sup>23), 30)</sup>。本論文では、体表からの水分の蒸発を、拡散によるものと発汗によるものとに分離して、体重減少から次の方法で算定した量を温熱性発汗密度とした。

まず、体重減少  $q_{wt}$  は次式で表される。ここで、呼吸のガス交換による体重減少、体表と着衣への水分蓄積の影響は無視した。

$$q_{wt} = q_{wres} + q_{wdif} + q_{wsw} \quad [\text{g/h} \cdot \text{m}^2] \quad (10)$$

拡散による体重減少(蒸散)密度  $q_{wdif}$  は次式を用いて算定する。

$$q_{wdif} = (1 - w_{sw}) k_{wdif} (p_{sk} - p_a) \quad (11)$$

ここで、

$$k_{wdif} = 1 / \{ (R_{dif} + R_{cle} + R_{se}) k_L \} \quad (12)$$

発汗による濡れ率  $w_{sw}$  は、今回の実験では全て有効発汗とみなして、次式で算定した。

$$w_{sw} = q_{wsw} / q_{wmax} \quad [-] \quad (13)$$

$$\text{ここで、} q_{wmax} = k_{wmax} (p_{sk} - p_a) \quad [\text{g/h} \cdot \text{m}^2] \quad (14)$$

$$k_{wmax} = 1 / \{ [0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})] k_L \} \quad (15)^{25), 26)}$$

従って、式 (10) は下記のようにになる。

$$q_{wt} = q_{wres} + [1 - q_{wsw} / \{ k_{wmax} (p_{sk} - p_a) \}] k_{wdif} (p_{sk} - p_a) + q_{wsw} \quad (16)$$

上式を整理して、発汗による体重減少すなわち発汗密度  $q_{wsw}$  は次式のように表される。

$$q_{wsw} = \{ q_{wt} - q_{wres} - k_{wdif} (p_{sk} - p_a) \} / (1 - k_{wdif} / k_{wmax}) \quad (17)$$

温熱性発汗密度  $q_{wswt}$  は、上記の発汗密度  $q_{wsw}$  から中立温感時の発汗密度  $q_{wswe}$  を差し引くことにより次式のように得られる。

$$q_{wswt} = \{ q_{wt} - q_{wres} - k_{wdif} (p_{sk} - p_a) \} / (1 - k_{wdif} / k_{wmax}) - q_{wswe} \quad (18)$$

計算には、下記の特性を適用した<sup>4), 15)</sup>。

$$q_{wres} = k_{wres} (p_{ex} - p_a) = 0.0173 q_M (5.87 - p_a) / k_L \quad (19)^{3)}$$

$$R_{dif} = 0.328 \quad (20)^{3)}$$

$$R_{cle} + R_{se} = 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \quad (21)^{25), 26)}$$

$$h_c = 12.1 v^{0.5} \quad (22)^{24)}$$

$$k_{wdif} / k_{wmax} = k_{dif} / k_{max} = \{ 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \} / \{ 0.328 + 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \} \quad (23)$$

$$q_{wswe} = 0.62 (q_H - 58.14) \quad \text{g/(h} \cdot \text{m}^2) \quad (24)^{3)}$$

#### 6. 実験結果と考察

6.1 経時変化 図 2 は、鼓膜温度・平均皮温・発汗密度の経時変化である。図中のプロットは、被験者 4 名の平均値である。実験開始から 60 分程度でほぼ一定の値を示していることがわかり、定

常に達したと見なすことができる。以後、各実験条件の代表値として実験開始 60～120 分の平均値を用いる。

6.2 平均皮温と発汗密度との関係 図 3 に、式(17)を用いて算出した発汗密度  $q_{wsu}$  と平均皮温(Hardy-DuBois 7 点法)の関係を

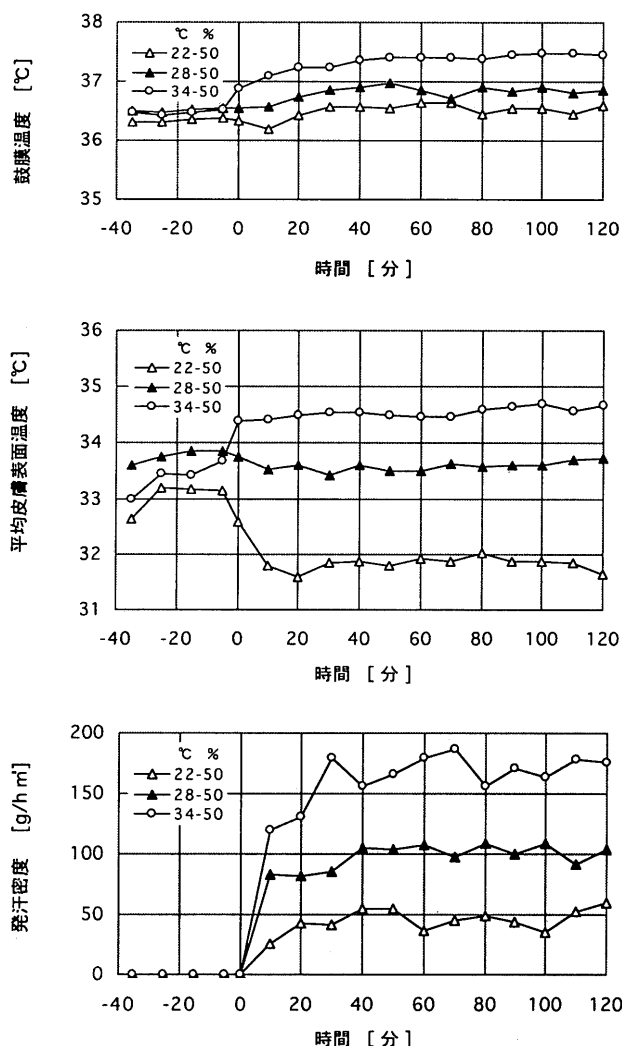


図 2 鼓膜温度・平均皮温・発汗密度の経時変化

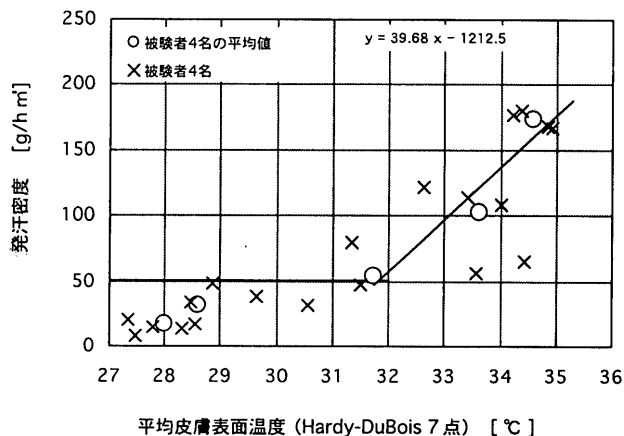


図 3 発汗密度と平均皮膚表面温度に関する実験結果

示す。図中の×は被験者別、○は被験者 4 名の平均値である。また、中立温感時の運動性発汗の推定値は  $50.73 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  (式 (24)) である。実験した室温 16、19℃は中立温感室温(約 22℃)より低温側にある。今回の運動時の温熱性発汗の分析ではこれらのデータを除いて、室温 22、28、34℃における実験データに着目する。

図 3 に示すように、これらのデータにバラツキはあるものの、被験者 4 名の平均値 (○印) はほぼ直線上に並ぶことがわかる。次式はその回帰式である。

$$q_{wsu} = q_{wsue} + q_{wsut} \quad (25)$$

$$= 39.68 t_{sk} - 1212.5 \quad (26)$$

温熱性の発汗密度  $q_{wsut}$  は、上記の値から中立温感時の発汗密度  $q_{wsue} = 50.73 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  を差し引いて得られる。すなわち、

$$\begin{aligned} q_{wsut} &= q_{wsu} - q_{wsue} = q_{wsu} - 50.73 \\ &= 39.68(t_{sk} - 31.84) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、温熱性発汗  $q_{wsut}$  を下記のように表すと、

$$q_{wsut} = k_{wsut}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (28)$$

温熱性発汗率として  $k_{wsut} = 39.7 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、温熱性発汗が開始する臨界平均皮温として  $t_{sksw} = 31.84^\circ\text{C}$  が得られる。

Fanger により中立温感時の平均皮温  $t_{skn}$  は次式で与えられている<sup>3)</sup>。

$$t_{skn} = 34.1 - 0.0275 \{(q_M(1-\eta) - 58.14)\} \quad [^\circ\text{C}] \quad (29)$$

この式から  $t_{skn} = 31.86^\circ\text{C}$  であり、上記の  $t_{sksw}$  はこの値とほぼ一致し、運動時の温熱性発汗は中立温感平均皮温を越えると直ちに始まる、と考えることができる。すなわち、 $t_{sksw} = t_{skn}$  とみなすことができる。

この結果を蒸発による熱流密度で表現すると次のようになる。

$$q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (30)$$

$$\text{ここで、} k_{swt} = k_L \cdot k_{wsut} = 26.8$$

$$\therefore q_{swt} = 26.8(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (31)$$

ここで、温熱性発汗に関する椅座状態の特性  $k_{swt} = 28.8^{21)}$  と比較すると、両者は極めて近いことが分かる。従って、椅座時と運動時を含めた温熱性発汗特性として次式を適用できよう。

$$q_{swt} = 28(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (32)$$

### 6.3 既存の実験結果との比較 (図 4、図 5)

図 4 は、今回の実験結果と、Stolwijk ら<sup>7)</sup>による実験結果(自転車エルゴメーター、被験者：男子 4 名)を筆者らが分析して得た温熱性発汗密度とを比較したものである。横軸は、平均皮温の温熱性発汗開始温度からの偏差である。両者の間に大きな差は見られず、温熱性発汗係数  $40 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$  付近に分布していることがわかる。Stolwijk の論文には被験者の職種に関する記述がなく、普通の男性を被験者に採用したものと推定される。このことから、本実験で得た温熱性発汗率  $40 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$  は、筆者らと Stolwijk らの男性被験者 8 名の平均的結果という条件付きではあるが、普通の男性に対して適用し得るものと考えられる。

一方、図 5 は、Robinson et al. と Lind によるトレッドミルを用いた実験結果を分析して得た結果と比較したものである。これらの発汗密度は本実験結果と 2.5 倍程度の開きがある。Robinson らが採用した被験者(男性 5 名)は、実験前の 1 ヶ月間、毎日高温の室内に 2 時間以上滞在させて暑さに順応させた後に実験を行っている。

一方、Lind の被験者（男性 1 名）は、日常的に高温環境で作業する必要のある職種と考えられる mines-rescue 隊員である。従って、この違いは久野<sup>14)</sup>が述べているように被験者の「暑気鍛練」の差が原因と考えられる。<sup>31), 32)</sup>

以上のことから、式 (31) で表される特性を基準として、それにいわゆる「暑気鍛練」の影響を考慮した係数  $k_{adj}$  を乗ずる形で整理するのが一つの方法と考えられる。すなわち、

$$q_{swt} = k_{swt} (t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W/m}^2 \quad (33)$$

ここで、 $k_{swt} = 26.8 k_{adj}$

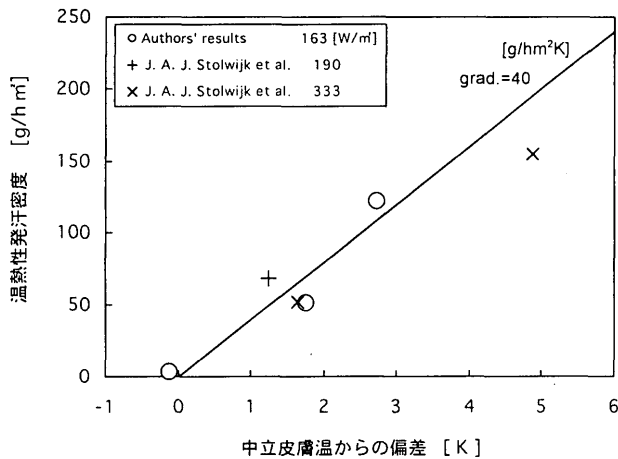


図 4 既存の実験結果との比較 (I)

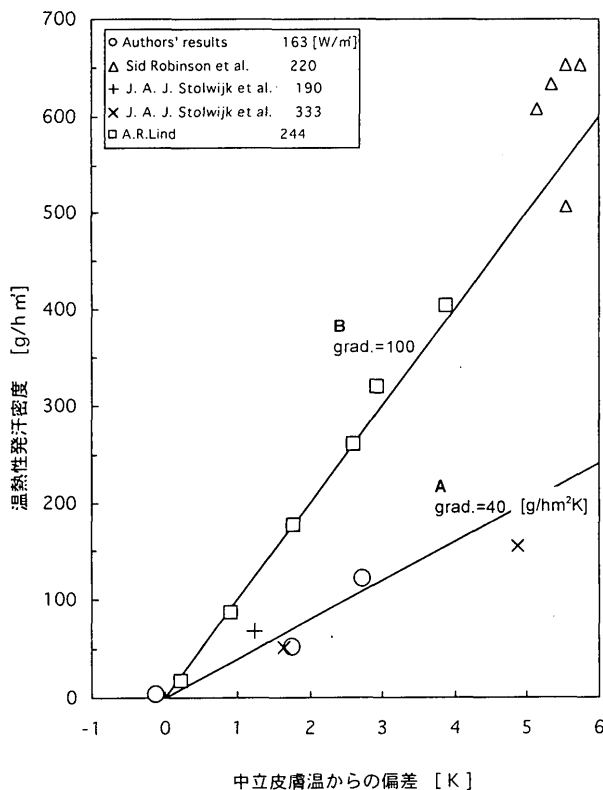


図 5 既存の実験結果との比較 (II)

## 7. 温熱性発汗温域における平均皮膚表面温の予測

$$(t_{skcr} > t_{sk} \geq t_{sksw})$$

人体と環境との間の定常状態における熱平衡式は、Fanger が提示した中立温感時の式<sup>3)</sup>に温熱性発汗の項を加え、さらに有効発汗率  $\xi$  を導入して次式のように表される。

$$q_M(1-\eta) = q_{sres} + q_{Lres} + q_{dif} + (q_{swe} + q_{swt}) \xi + q_r + q_c \quad (34)$$

ここで、有効発汗率  $\xi$  に関しては、発汗による濡れ率  $w_{sw}$  が最大濡れ率  $w_{max}$  より小さい時 ( $w_{sw} \leq w_{max}$ ) は発汗した汗は全て体表で蒸発するものとみなして、 $\xi=1$  とする。

この熱平衡式において、平均皮温を含むのは  $q_{dif}$ 、 $q_{swt}$ 、 $q_r$ 、 $q_c$  の 4 項である。まず、 $q_r$  と  $q_c$  は次のように表される。

$$q_r + q_c = k_{rc}(t_{sk} - t_{op}) \quad (35)$$

温熱性発汗  $q_{swt}$  に対しては式 (30) を適用する。

$$q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (30)$$

$q_{dif}$  は次式のように表される。

$$\begin{aligned} q_{dif} &= (1 - w_{sw}) k_{dif} (p_{sk} - p_a) \\ &= (1 - q_{sw} / q_{max}) k_{dif} (p_{sk} - p_a) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\text{ここで、} q_{max} = k_{max} (p_{sk} - p_a) \quad (37)$$

$$\therefore q_{dif} = k_{dif} (p_{sk} - p_a) - (k_{dif} / k_{max}) \{k_{swt} (t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe}\} \quad (38)$$

平均皮温  $t_{sk}$  における飽和水蒸気圧  $P_{sk}$  を、温度範囲を限定して平均皮温  $t_{sk}$  の一次式で近似する。すなわち、

$$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (39)$$

$$\therefore q_{dif} = k_{dif} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) - (k_{dif} / k_{max}) \{k_{swt} (t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe}\} \quad (40)$$

これらの式(30), (35), (40)を用いると、上記の 4 項  $q_{dif}$ 、 $q_{swt}$ 、 $q_r$ 、 $q_c$  は全て平均皮温  $t_{sk}$  の一次式で表されることになる。

発汗による濡れ率  $w_{sw}$  が  $w_{sw} \leq w_{max}$  のとき  $\xi=1$  において、平均皮温は上記の熱平衡式 (34) から次のように得られる。

( $w_{sw} \leq w_{max}$  のとき)

$$\begin{aligned} t_{sk} = [ & q_M(1-\eta) - \{q_{sres} + q_{Lres} + k_{dif}(b_{sk} - p_a) \\ & + q_{swe}(1 - k_{dif} / k_{max}) \\ & - k_{swt}(1 - k_{dif} / k_{max}) t_{sksw} - k_{rc} t_{op}\} ] \\ & / [ a_{sk} k_{dif} + k_{swt}(1 - k_{dif} / k_{max}) + k_{rc} ] \end{aligned} \quad (41)$$

この結果を利用して、発汗による濡れ率は次式のように表される。

$$\begin{aligned} w_{sw} &= q_{sw} / q_{max} \\ &= \{k_{swt} (t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe}\} / \{k_{max} (p_{sk} - p_a)\} \end{aligned} \quad (42)$$

この  $w_{sw}$  が  $w_{max}$  より大きければ、体表での拡散と発汗による蒸発に関して次式(43),(44)を式 (34)に適用して、平均皮温は式 (45) のように得られる。

$$q_{dif} = (1 - w_{max}) k_{dif} (p_{sk} - p_a) \quad (43)$$

$$(q_{swe} + q_{swt}) \xi = k_{max} (p_{sk} - p_a) w_{max} \quad (44)$$

( $w_{sw} > w_{max}$  のとき)

$$\begin{aligned} t_{sk} = [ & q_M(1-\eta) - \{q_{sres} + q_{Lres} \\ & + \{k_{dif} + (k_{max} - k_{dif}) w_{max}\} (b_{sk} - p_a) \\ & - k_{rc} t_{op}\} ] \\ & / [ a_{sk} \{k_{dif} + (k_{max} - k_{dif}) w_{max}\} + k_{rc} ] \end{aligned} \quad (45)$$

これらの予測式(41),(45)の適用上限値  $t_{skcr}$  は 36℃前後にあるが、上限値の詳細と、これを越える温域の平均皮温予測については別途論じたい。

## 8. 平均皮温の予測値と実験結果との比較

式(41)を用いて理論的に予測される平均皮温と実測値を比較したのが図 6 である。両者はよく一致しているといえる。なお、式(41)の計算には下記の特性を適用した<sup>4), 15)</sup>。

$$q_{sres} = k_{sres}(t_{ex} - t_a) = 0.0014 q_M (34.0 - t_a) \quad (46)^{3)}$$

$$q_{Lres} = k_{Lres}(p_{ex} - p_a) = 0.0173 q_M (5.87 - p_a) \quad (47)^{3)}$$

$$k_{dif} = 1/(R_{dif} + R_{cle} + R_{se}) \\ = 1/\{0.328 + 0.155 I_{cl}/(i_{cl} \cdot LR) + 1/(LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad (48)^{3), 25), 26)}$$

$$i_{cl} = 0.34 \quad (49)^{27), 15)}$$

$$h_c = 12.1 v^{0.5} \quad (50)^{24)}$$

$$a_{sk} = 0.270, b_{sk} = -3.83 \quad (51)$$

( $27 < t_{sk} < 37^\circ\text{C}$ , 5Met 以下で適用可能)

$$k_{swt} = 26.8 \quad \text{— 本実験, Stolwijk} \quad (52)$$

$$= 67.4 (= k_L \cdot k_{swt} = 0.674 \times 100) \quad \text{— Robinson, Lind} \quad (53)$$

$$k_{dif}/k_{max} = \{0.155 I_{cl}/(i_{cl} \cdot LR) + 1/(LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \\ / \{0.328 + 0.155 I_{cl}/(i_{cl} \cdot LR) + 1/(LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad (54)$$

$$k_{rc} = 1/\{0.155 I_{cl} + 1/(h \cdot f_{cl})\} \quad (55)$$

$$t_{sksw} = t_{skn} = 34.1 - 0.0275 \{(q_M(1-\eta) - 58.14)\} \quad (56)^{3)}$$

$$t_{op} = (h_c t_a + h_{rop} t_{rop})/(h_c + h_{rop}) \quad (57)^{28)}$$

$$h_{rop} = 4 \epsilon \sigma \{273.2 + (t_a + t_{rop})/2\}^3 \cdot f_{eff} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (58)$$

$\epsilon$ :放射率,  $\sigma$ : Stefan-Boltzmann 定数

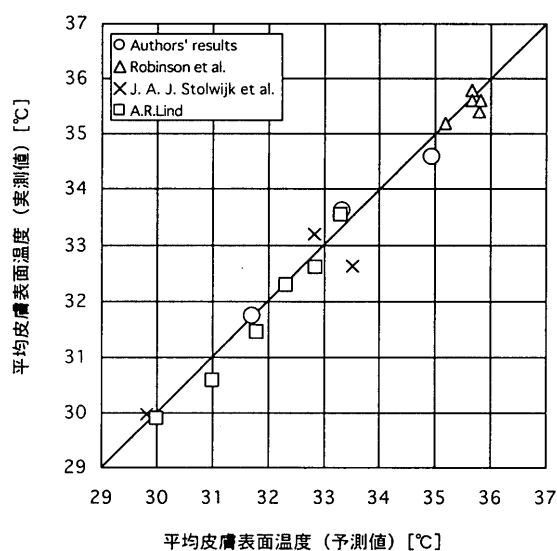


図 6 平均皮温の予測値と実験結果との比較

## 9. 結論

男性被験者 4 名による実験を行い、自転車エルゴメーター運動時における温熱性発汗密度  $q_{wswt}$   $\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ と温熱性発汗熱流密度  $q_{swt}$   $\text{W}/\text{m}^2$ を、平均皮温  $t_{sk}$ と発汗開始平均皮温  $t_{sksw}$ の差( $t_{sk} - t_{sksw}$ )の一次式で表わした。

$$q_{wswt} = k_{wswt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

$$k_{wswt} = 39.7 \quad \text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W}/\text{m}^2$$

$$k_{swt} = 26.8 (= k_{wswt} \cdot k_L) \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

さらに「暑気鍛練」による発汗の増加率  $k_{adp}$ を考慮した次の関係を導入した。

$$k_{swt} = 26.8 k_{adp} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

この関係  $q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw})$   $\text{W}/\text{m}^2$ を、定常状態における人体と環境との間の熱平衡式に適用することにより、平均皮温  $t_{sk}$ を温熱環境 4 要素と人体側の 2 要素の陽関数で表した。

( $w_{sw} \leq w_{max}$ )のとき

$$t_{sk} = [q_M(1-\eta) - \{q_{sres} + q_{Lres} + q_{swe}(1 - k_{dif}/k_{max}) + k_{dif}(b_{sk} - p_a) - k_{swt}(1 - k_{dif}/k_{max})(t_{sksw} - k_{rc} t_{op})\}] \\ / [a_{sk} k_{dif} + k_{swt}(1 - k_{dif}/k_{max}) + k_{rc}]$$

( $w_{sw} > w_{max}$ )のとき

$$t_{sk} = [q_M(1-\eta) - \{q_{sres} + q_{Lres} + \{k_{dif} + (k_{max} - k_{dif}) w_{max}\}(b_{sk} - p_a) - k_{rc} t_{op}\}] \\ / [a_{sk} \{k_{dif} + (k_{max} - k_{dif}) w_{max}\} + k_{rc}]$$

また、運動時の温熱性発汗が開始する臨界平均皮温  $t_{sksw}$ は Fanger による中立平均皮温とほぼ一致した。

さらに、椅座時を含めた任意の代謝に対して適用する場合の実用的温熱性発汗熱流密度として次式を提案した。

$$q_{swt} = 28 k_{adp}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad \text{W}/\text{m}^2$$

謝辞 この実験を行うにあたって Larry Berglund 東北大学教授を中心とした温熱生理研究会(主査 吉野 博東北大学教授)の方々の実験方法等についてご教示いただいた。お礼申し上げます。また、佐竹正規、山崎大史、竹内崇、朝比奈亮、浜田博之、山越健弘、秋山竜也、伊藤亜希彦、穂苅高志、宮下雅之、三井雪恵、森原崇、赤上ゆきの、山村由香の諸氏には実験とデータの分析に協力いただいた。感謝致します。この一部は真木学の修士論文、宮下雅之、三井雪恵の卒業研究としてまとめられた。

尚、この研究は、国立環境研究所を中心とする地球環境研究プロジェクトの一環として進められた「家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究(平成 3-5 年)」「地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究(平成 6-8 年)」の研究の過程で発想されたものであり関係各位に感謝いたします。

本論文の内容の一部は下記の機会に報告した。

1. 窪田英樹、松尾朋浩他：運動時の発汗特性と平均皮膚温予測モデル、日本建築学会大会学術講演会梗概集（九州）、pp.715-716, 1998.9
2. Kubota, H., Kamata, N., Ijichi, T., Horii, T., Matsuo, T.: Prediction of mean skin temperature as an index of human response to the thermal environment, Proceedings of the International Congress CLIMA 2000, 1997, Brussels, Belgium

#### 参考文献

1. Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y., An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans, Vol. 77 (Part I), pp. 247-262, 1971
2. Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L. G., A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans, Vol. 92, Part II b, pp. 709-731, 1986
3. Fanger, P. O., Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation, ASHRAE Trans, Vol. 73, Part II, pp. III 4.1-III 4.20, 1967
4. Fanger, P. O., *Thermal Comfort*, McGraw-Hill, New York, 1972
5. Benzinger, T. H., Heat regulation: Homeostasis of central temperature in man, Physiological reviews, Vol. 49, No. 4, pp. 671-759, Oct. 1969
6. Nadel, E. R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A. J., Importance of skin temperature in the regulation of sweating, J. of Applied Physiology, Vol. 31, No. 1, pp. 80-87, July 1971
7. Stolwijk, J. A. J., Saltin, B., Gagge, A. P., Physiological factors associated with sweating during exercise, Aerospace Medicine, 39, pp. 1101-1105, 1968
8. Lind, A. R., Determination of environmental limits for everyday industrial work, Industrial Medicine and Surgery, 29, pp. 515-518, 1960
9. Robinson, S., Turrell, E. S., Gerking, S. D., Physiologically equivalent conditions of air temperature and humidity, Am. J. Physiol., 143, pp. 21-32, 1945
10. 佐藤彦彦監修、人間工学基準数値数式便覧、技法堂出版、1992
11. 田尻幸吉著、活動のエネルギー代謝、労働科学研究所、1974
12. 中山・入来編、新生理体系 22「エネルギー代謝・体温調節の生理」医学書院、1987
13. 横山真太郎、生体内熱移動現象、北大図書刊行会、1993
14. 久野 寧、汗の話、光生館、1981
15. ASHRAE HANDBOOK: FUNDAMENTALS, 1997
16. 人間—環境系編集委員会、人間—環境系（上巻）、人間と技術者、1972
17. 中山昭雄、体温とその調節、中外医学双書、1970
18. 中山昭雄編、温熱生理学、理工学社、1981
19. McIntyre, D. A., Indoor Climate, Applied Science Publishers LTD, 1980
20. Lind, A. R., Bass, D. E., Optimal exposure time for development of acclimatization to heat, Fed. Proc., 22(3), pp. 704-708, 1963
21. 松尾、朝比奈、浜田、山越、窪田、椅座時の温熱性発汗と人体平均皮膚表面温度に関する基礎実験、空気調和衛生工学会北海道支部第33回学術講演会、pp. 81-84, 1999.3
22. Lind, A. R., A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work, J. Appl. Physiol., 18(1), pp. 51-56, 1963
23. Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D., Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients, J. Appl. Physiol., 21, pp. 967-977, 1966
24. Winslow, C. -E., Gagge, A. p., Herrington, B. P., The influence of air movement upon heat loss from the clothed human body, Journal of Physiology, 127, pp. 505-518, 1939
25. Nishi, Y., Gagge, A. P., Moisture permeation of clothing - a factor governing thermal equilibrium and comfort, AHRAE Trans., Vol. 76, Part I, pp. 137-145, 1970
26. Oohori, T., Berglund, L. G., Gagge, A. P., Comparison of current two-parameters indices of vapor permeation of clothing - as factors governing thermal equilibrium and human comfort, AHRAE Trans., Vol. 91, Part 2A, pp. 85-101, 1984
27. McClough, E. A., Jones, B. W., Tamura, T., A data base for determining the evaporative resistance of clothing, AHRAE Trans., Vol. 95(2), pp. 316-328, 1989
28. Winslow, C. -E. A., Herrington, L. P., Gagge, A. P., Physiological reaction of the human body to varying environmental temperature, The American Journal of Physiology, Vol. 120, No. 1, pp. 1-22, 1937
29. 小川徳雄、発汗のメカニズムについて、日本建築学会、環境工学委員会、第23回熱シンポジウム、pp. 31-34, 1993
30. 平田耕造、運動による生理反応と着衣、人間工学、Vol. 30, No. 3 pp. 131-135, 1994
31. 菅屋潤壹、小川徳雄他、暑熱順化による発汗能増大における中枢性機序の関与、愛知医科大学医学会雑誌、Vol. 14, No. 4, pp. 653-661, 1986
32. 大西範和、小川徳雄他、冷環境下の運動鍛練に伴う発汗増進機序、愛知医科大学医学会雑誌、Vol. 14, No. 4, pp. 663-669, 1986
33. 小川徳雄、温熱性発汗活動の変動とその分析、愛知医科大学医学会雑誌、Vol. 18, No. 4, pp. 377-389, 1980
34. 小川徳雄、運動と発汗、体力科学、45, pp. 289-300, 1996
35. Adams, W. C., Thermoregulation during marathon running in cool, moderate, and hot environments, J. of Applied Physiology, Vol. 38, No. 6, pp. 1030-1037, 1975
36. Davies, C. T. M., Influence of skin temperature on sweating and aerobic performance during severe work, J. of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology, Vol. 47, No. 4, pp. 770-777, 1979
37. Frye, A. J., Kamon, E., Sweating efficiency in acclimated men and women exercising in humid and dry heat, J. of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology, Vol. 54, No. 4, pp. 972-977, 1983
38. Adams, W. C., Mack, G. W., et al., Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise, J. Applied Physiology, Vol. 73, No. 6, pp. 2668-2674, 1992
39. Regan, J. M., Macfarlane, D. J., Taylor, N. A. S., An evaluation of the role of skin temperature during heat adaptation, Acta Physiol Scand, Vol. 158, pp. 365-375, 1996
40. Douglas, G., Jacobs, I., McLellan, T., Miyazaki, M., Sabiston, C., Thermal regulation in the heat during exercise after caffeine and ephedrine ingestion, Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 70, No. 6, pp. 583-588, 1999
41. 堀越哲美、PMV と快適方程式の検討、空気調和・衛生工学、Vol. 60, No. 10, pp. 13-19, 1986
42. 西 安信、PMV の成果と問題点、日本生気象学会雑誌、Vol. 29, No. 3, pp. 164, 1992
43. 持田 徹、新有効温度 ET\* の成果と問題点、日本生気象学会雑誌、Vol. 29, No. 3, pp. 163, 1992
44. 近藤徳彦、西保岳、鍋倉賢治、池上晴夫、汗の拍出頻度よりみた安静時と運動時の発汗調節の比較—非定常状態の場合について—、日本生気象学会雑誌、Vol. 24, No. 3, pp. 135-144, 1987
45. 早川和代、磯田憲生、温熱環境が運動時の人体に及ぼす影響、日本生気象学会雑誌、Vol. 25, No. 3, pp. 129-136, 1988
46. 深井一夫、後藤 滋、斎藤純司、伊藤 宏、標準新有効温度(SET\*) と温熱感覚に関する実験的研究—第 1 報 冬季被験者実験による検討—、空気調和・衛生工学会論文集、No. 48, pp. 21-29, 1991
47. 深井一夫、斎藤純司、伊藤 宏、後藤 滋、代謝量の異なる場合の標準新有効温度(SET\*) と温熱感覚の関係—歩行時と椅座安静時の比較—、空気調和・衛生工学会論文集、No. 55, pp. 99-108, 1993
48. 持田徹、堅田兼史、長野克則、島倉一實、佐古井智紀、等しい温熱感を申告した時の平均皮膚温とぬれ面積率の関係に関する基礎的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No. 72, pp. 107-115, 1999
49. Galloway, S. D. R., Maughan, R. J., Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man, Medicine & Science in Sports & Exercise, Vol. 29, No. 9, p. 1240-1249, 1997

(1999年5月10日原稿受理、1999年8月2日採用決定)