

温熱性発汗特性を考慮した椅座時の平均皮膚表面温度の予測

PREDICTION OF MEAN SKIN TEMPERATURE FOR SEDENTARY SUBJECTS CONSIDERING CHARACTERISTICS OF THERMAL SWEATING

窪田 英樹*, 松尾 朋浩**, 伊地知 健***, 鎌田 紀彦****, 若松 伸司*****

Hideki KUBOTA, Tomohiro MATSUO, Takeshi IJICHI,

Norihiko KAMATA and Shinji WAKAMATSU

Skin temperature has been recognized as a major factor in judging the thermal sensation. Analysing data reported on sweating, whose rate seemed to be represented by skin temperature, provided that the thermal equilibrium had been attained. This paper, first, describes about the results of experiments conducted on thermal sweating of sedentary subjects, 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, thermal sensation,

発汗、平均皮膚表面温度、温熱環境、暑熱環境、温熱感

1 はじめに

地球環境との共生をはかる上で「許容し得る室内環境」の内容を十分に検討することが、これまで以上に大切になることが予想される。さらに、熱波等の異常気象とも関連する「建築環境安全」的な観点からも、より細かな環境評価が要求されよう。そこでは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 (以下 TNM と略称) を基にした指標^{11), 12)} と、Fanger による PMV^{8), 9)} が知られている。前者は、人体をコア部と皮膚層に 2 分割したモデル(Two-Node)を基礎にして、コア温度と皮膚表面温度を変数とする連立微分方程式で構成されている。このモデルを用いて、任意の環境下における人体の平均皮温とコア温度、さらに発汗時の不快感に密接に関わる「濡れ率」も解析的に算定することができる。この指標は、人体の生理的状态を算定することができるという優れた特徴を有する。しかし、連立微分方程式を解く作業が含まれているのでコンピュータの手を借りる必要があり、その結果、入力と出力との間がブラックボックスになっていて、実用面での利用に工夫がある。一方 PMV は、計算は比較的簡易ではあるが、温熱感のみに着目した指標である結果、日本の夏のように発汗するような温度域を評価する指標として利用するには疑点が残る^{39), 51)}。

本論文は、定常状態に着目して、椅座時の全身からの温熱性発汗率が、平均皮膚表面温度(以下、平均皮温)が概ね 34~36℃の範囲では、近似的に平均皮温に一次比例して増加すると見なすことができることを被験者実験により示し、その結果を適用することにより、平均皮温を温熱環境の 4 要素と人体側の 2 要素(着衣、代謝)の関数で表現し得ることを論じたものである。

本論文ではこのように、温熱性発汗率が平均皮温のみの関数で表示できることを前提としている。しかしこれまでに知られているのは、温熱性発汗率は平均皮温のみの関数ではなく体内温度の関数でもあることである。このことに関する筆者らの考え方は次のようである。まず、Benzinger⁴⁾は、発汗率は頭部の内部温度によって制御され、皮膚温度は低温度を覚知して発汗抑制要素として機能するが発汗率には無関係、と述べている。これは、安静時と運動時の発汗率を平均皮温に対して示した場合、結果的に発汗率と平均皮温との相関が無くなることを指している。平均皮温が同じでも発汗率が代謝によって異なるのは、代謝によって体内温度が異なることがその理由としており、鼓膜温度が代謝量を問わずに発汗率と密接に関わる生理量であることを提示している。しかし、同じデータを代謝量別に見た場合には、発汗率と平均皮温の間には高い相関があることが明瞭に読み取れる。すなわち、本論文が対象とする椅座時の場合を含めて、任意の代謝量に

* 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

** 室蘭工業大学大学院建設工学専攻 大学院生・工修

*** 大和ハウス工業㈱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

***** 国立環境研究所地域環境研究グループ大気保全研究チーム 総合研究官・工博

Prof., Dept. of Civil Eng. and Arch., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Division of Civil and Environmental Eng., 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.

着目した場合には、発汗率は平均皮温の関数として表現できることを Benzinger が「発汗率と平均皮温は無相関」の論拠とした同じデータが示していることになる。Nadelら²²⁾は、平均皮温が発汗に主要な役割を有することを論じており、結果として、発汗率を体内温度、平均皮温、局所皮膚表面温度の関数で表現した。

上述のように、温熱性の発汗が体内温度と平均皮温の関数であることは明らかである。しかし対象を本論文のように、代謝を固定（椅座状態）して定常状態に限定すれば、発汗率を平均皮温のみの関数で表示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平均皮温と同時に体内温度も上昇するが、このときの平均皮温の中立温度からの偏差と体内温度の中立温度からの偏差とは、氷を摂取するなどの特別の場合を除き、互いに独立ではないことがその理由である。換言すると、体内温度の偏差は平均皮温の偏差の関数として表現することができるので、結果として、体内温度と平均皮温の影響を受ける温熱性の発汗率を、平均皮温の偏差のみの関数として表現することが可能となる。

定常状態に関しては、人が高温環境に移動した場合、速やかに反応して30分から1時間程度でほぼ定常状態と見なしえる状態に達することが知られており^{30), 40)}、温熱環境工学的な観点から発汗領域においては、滞在時間が長い住居や事務室などにおいてはいうまでもなく、定常的な状態の特性が大切であることが理解される。

本論文では、我々が日常的に経験する典型的な温熱環境である住居や事務室などを主な対象として、平均皮温に関しては発汗が始まる温度（約34℃）から36℃前後²¹⁾の範囲を対象として、そこでの定常と見なし得る状態に着目する。しかしながら、これまでに、この平均皮温範囲（約34～36℃）に対して、定常状態における全身からの温熱性発汗率を平均皮温のみの関数で表した例はないようである⁶⁰⁾。

本論文では、まず被験者実験を実施することにより、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直線近似式で示す。ついで、この発汗率と平均皮温との関係を人体と環境との間の熱平衡式に適用して、平均皮温を環境4要素と人体側の2要素の陽関数で表した予測式を提示する。

ここで導き出される平均皮温予測式は、温熱環境を評価する指標としての観点からは、TNMのような生理指標としての側面と、PMVが有する実用的な簡便性を備えている、ということができる。

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 ($p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$) kP_a / K
 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 ($p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$) kP_a
 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_{cl} : 着衣の熱抵抗 clo
 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} : 呼吸による蒸散熱流率 $W / (m^2 \cdot kP_a)$
 k_{max} : 濡れた皮膚表面からの蒸散熱流率 $W / (m^2 \cdot kP_a)$
 $k_{max} = LR / \{0.155 I_{cl} / i_{cl} + 1 / (h_c \cdot f_{cl})\}$
 k_{rc} : 皮膚表面からの熱流率 $W / (m^2 \cdot K)$
 $k_{rc} = 1 / \{0.155 I_{cl} + 1 / (h \cdot f_{cl})\}$
 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_{wmax} : 濡れた皮膚表面からの蒸散率 $W / (m^2 \cdot kP_a)$
 k_{wres} : 呼吸による蒸散率 $g / (h \cdot m^2 \cdot K)$
 k_{wswt} : 温熱性発汗による蒸散率 $g / (h \cdot m^2 \cdot K)$
 H_L : 水の蒸発潜熱 (= 2.43×10^3) 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 : 人体発生熱流密度 (= $q_M - q_{exw} = q_M (1 - \eta)$) 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 : 代謝量密度 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_{swe} : 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_{exw} : 外部仕事率密度 W / m^2
 q_{wdif} : 皮膚表面からの拡散蒸散密度 $g / (h \cdot m^2)$
 q_{wmax} : 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_{wswt} : 温熱性発汗密度 $g / (h \cdot m^2)$
 q_{wb} : 人体の体重減少密度 $g / (h \cdot m^2)$
 R_{cl} : 着衣熱抵抗 (= $0.155 I_{cl}$) $(K \cdot m^2 \cdot h) / W$
 R_{cle} : 着衣の透湿熱抵抗 $(kP_a \cdot m^2 \cdot h) / W$
 R_{dif} : 拡散蒸散に係わる皮膚の透湿熱抵抗 $(kP_a \cdot m^2 \cdot h) / W$
 R_s : 人体の表面熱伝達抵抗 $(K \cdot m^2 \cdot h) / W$
 R_{se} : 人体の表面湿気熱伝達抵抗 $(kP_a \cdot m^2 \cdot h) / W$
 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 (23), (27) 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_{swt} / q_{max}) ND
 η : 外部機械仕事率 (= q_{exw} / q_M) ND

ξ : 有効発汗率

ND

3. 実験概要

裸体に近いトランクスだけの服装で、椅子に座った状態で3時間滞在する実験を行った。実験には、隣接する二つの恒温恒温室（準備室と実験室）を用いた（図1）。

実験した室温は3種類（30、33、36℃）、湿度は50%と70%あるいは80%で、静穏環境である（表1）。被験者は6名の健康な青年男子である（表2）。被験者は、まず27.5℃、50%に保たれた準備室で体にサーミスター温度計を添付した後、所定のトランクスだけの服装で椅座安静の状態で1時間滞在する。その後、隣接する実験室に移動し、椅座安静の状態で3時間滞在する。椅子は、通常のパイプ椅子を使用した。

この4時間の間、実験者は5分間隔で皮膚温と環境温度を、15分間隔で体重と鼓膜温を測定する。平均皮膚温は、Hardy・DuBoisの7点法（7部位で各1点測定）^{62), 63)}を採用した。測定器は、サーミスタ温度計（宝産業K722、センサー直径1mm）、鼓膜温度（オムロン耳式体温計 MC-505）、電子天秤（A&D HP-100K、最小表示1g）である。実験は11月9日から11月27日に実施された。

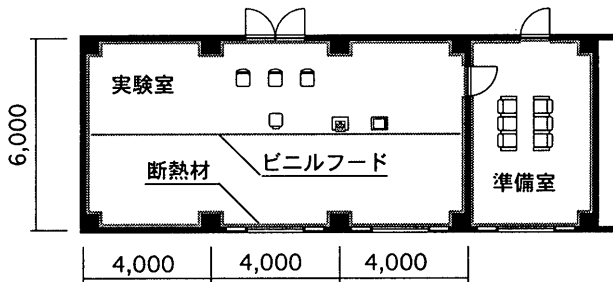


図1 実験室平面図

表1 実験温湿度条件

		相対湿度 [%]		
		50	70	80
気温 [°C]	30	○		○
	33	○	○	
	36	○	○	

表2 被験者

被験者	年齢 [才]	身長 [m]	体重 [kg]	体表面積 [m ²]	出身地
A	22	1.78	64.5	1.80	青森
B	22	1.73	62.7	1.74	岩手
C	21	1.69	62.1	1.71	愛知
D	22	1.76	64.8	1.79	北海道
E	21	1.69	56.4	1.64	広島
F	23	1.84	83.8	2.06	北海道

体表面積(DuBois面積) = 0.202(体重)^{0.425} × (身長)^{0.725} [m²]
 体重 [kg], 身長 [m]

4. 温熱性発汗密度 a_{wswt} (g/h·m²)の算出方法

体重減少 a_{wb} には、呼吸と体表からの水分の流出（蒸発と滴下）、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^{30), 38)}。本論文では、体表からの水分の流出を、拡散によるものと発汗によるものとに分離して、温熱性発汗密度 a_{wswt} を体重減少から次の方法で算定した。

まず、体重減少 a_{wb} を次式で表す。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。

$$a_{wb} = a_{wres} + a_{wdiff} + a_{wswt} \quad [g/h \cdot m^2] \quad (1)$$

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

$$a_{wdiff} = (1 - w_{sw})k_{wdiff}(p_{sk} - p_a) \quad (2)$$

$$\text{ここで、} k_{wdiff} = 1 / \{ (R_{diff} + R_{cle} + R_{se}) k_L \} \quad (3)$$

発汗による濡れ率 w_{sw} は、今回の実験では全て有効発汗^{注2)}とみなして、次式で算定した^{注3)}。

$$w_{sw} = a_{wswt} / a_{wmax} \quad [-] \quad (4)$$

$$\text{ここで、} a_{wmax} = k_{wmax}(p_{sk} - p_a) \quad [g/h \cdot m^2] \quad (5)$$

$$k_{wmax} = 1 / \{ [0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})] k_L \} \quad (6)^{25), 26)}$$

従って、式(1)は下記のようになる。

$$a_{wb} = a_{wres} + [1 - a_{wswt} / \{ k_{wmax}(p_{sk} - p_a) \}] k_{wdiff}(p_{sk} - p_a) + a_{wswt} \quad (7)$$

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

$$a_{wswt} = \{ a_{wb} - a_{wres} - k_{wdiff}(p_{sk} - p_a) \} / (1 - k_{wdiff} / k_{wmax}) \quad (8)$$

計算には、下記の特性を適用した^{3), 9)}。

$$a_{wres} = k_{wres}(p_{ex} - p_a) = 0.0173 q_M (5.87 - p_a) / k_L \quad (9)^8)$$

$$R_{diff} = 0.328 \quad (10)^8)$$

$$R_{cle} + R_{se} = 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \quad (11)^{25), 26)}$$

$$h_c = 12.1 v^{0.5} \quad (12)^{34)}$$

$$k_{wdiff} / k_{wmax} = k_{diff} / k_{max} = \{ 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \} / \{ 0.328 + 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl}) \} \quad (13)$$

5. 実験結果と考察

図2に鼓膜温度、平均皮温、温熱性発汗密度のそれぞれ時間経過の例を示す。いずれも実験室入室後30分程度でほぼ定常に達していることが判る。以後、定常と見なすことのできる量として入室1時間以降の値の平均値を用いる。実験は、30、33、36℃の順で実施したが、この間の発汗への順応の影響は無視した。

図3は、式(8)に基づいて体重減少密度 a_{wb} から算定した温熱性発汗密度と平均皮温との関係を整理したものである。直線関係が明瞭にでており、その回帰直線は次式で表される。

$$a_{wswt} = k_{wswt}(t_{sk} - t_{sksw}) \\ = 42.7(t_{sk} - 33.8) \quad (14)$$

すなわち、 $k_{wswt} = 42.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$, $t_{sksw} = 33.8 \text{ }^\circ\text{C}$

上式を熱流密度の形で表せば次式のようになる。

$$a_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \\ = 28.8(t_{sk} - 33.8) \quad (15)$$

すなわち、 $k_{swt} = k_{wswt} \cdot k_L = 28.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

図4は、本実験結果と、既往のデータ^{5), 14), 15), 23), 30), 40)}(被験者は男性)から筆者らが式(8)を適用して算定した温熱性発汗密度を比較したもので、実験範囲内では両者間には系統的な差の無いことが読み取れる。特に、川島(被験者3名)⁴⁰⁾とStolwijk(同3名)³⁰⁾の結果は、実験は夏期に行われているが、11月に実施した筆者らの結果とほぼ一致している。Hertzmanら(同22名)¹⁵⁾の結果は、人体10部位の発汗密度のデータから筆者らが面積を考慮して全身の発汗密度を推定したものである。この実験も2/3が夏期に行われている。これらのことから、今回の結果である式(14), (15)は、平均的な特性として利用できるものと考えられる。詳細に観ると引用データの中に上記近似直

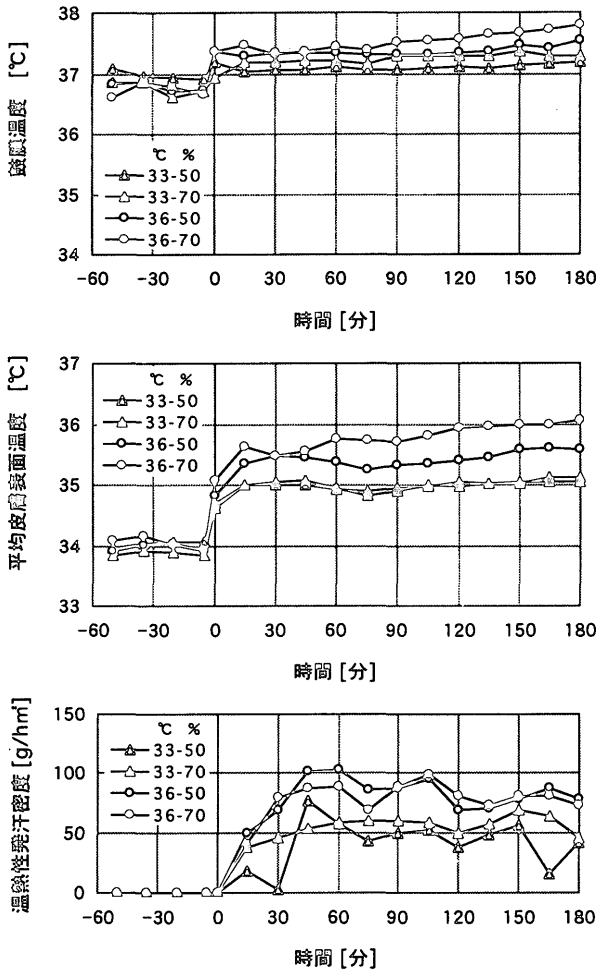


図2 鼓膜温度、平均皮温、温熱性発汗密度の経時変化例

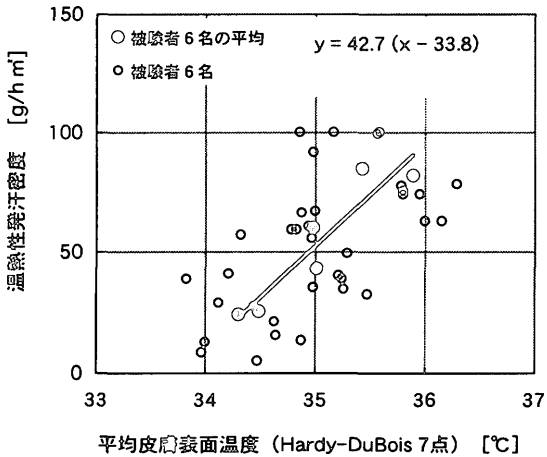


図3 温熱性発汗密度と平均皮温に関する実験結果

線と傾向の異なるものがあるが、これらは個人差、適応差、男女差などの観点から考えたい。すなわち、発汗が始まる平均皮温を、たとえばNielsenの場合約35°C、HardyとCrosbieは34.7°C前後と見なせば、これらの発汗率も平均皮温36°C以下の範囲で直線近似が可能であり、従って、本論文の方法は発汗における個人差などの分析にも利用できるものと考えられる。

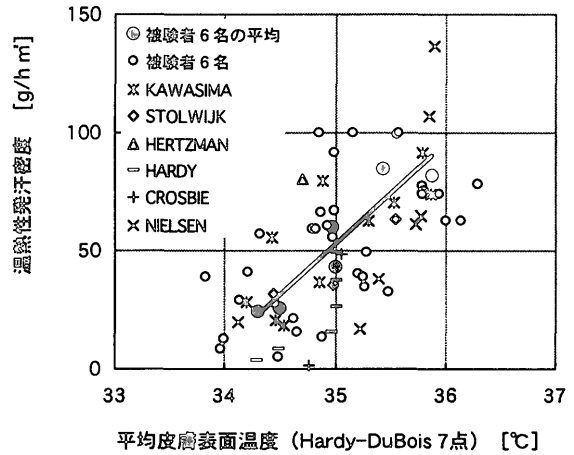


図4 温熱性発汗密度と平均皮温に関する既往の結果との比較

6. 発汗温域における平均皮温の予測 ($t_{sksw} \leq t_{sk} \leq t_{skcr}$)

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⁸⁾に温熱性発汗熱流密度 q_{swt} の項を加え、さらに有効発汗率 ξ を導入して次式のように表される⁴⁷⁾、^{註3)}。

$$q_M(1 - \eta) = q_{sres} + q_{Lres} + q_{dif} + (q_{sve} + q_{swt}) \cdot \xi + q_r + q_c \quad (16)$$

ここで、椅座状態では $\eta = 0$ 、 $q_{sve} = 0$ で、有効発汗率 ξ に関しては、発汗による濡れ率 w_{sw} が最大濡れ率 w_{max} 以下の時 ($w_{sw} \leq w_{max}$) 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。また、 w_{sw} が最大濡れ率 w_{max} を越える時 ($w_{sw} > w_{max}$) は無効発汗 (汗が体の表面で蒸発しないで滴り落ちる) が発生して $\xi < 1$ となる。この範囲では $w_{sw} = w_{max}$ とする¹²⁾。

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。

$$q_r + q_c = k_{rc}(t_{sk} - t_{op}) \quad (17)$$

温熱性発汗熱流密度 q_{swt} に対しては式 (15) を適用する。

q_{dif} は次式のように表される。

$$q_{dif} = (1 - w_{sw}) k_{dif}(p_{sk} - p_a) = (1 - q_{swt} / q_{max}) k_{dif}(p_{sk} - p_a) \quad (18)$$

$$\text{ここで、} q_{max} = k_{max}(p_{sk} - p_a) \quad (19)$$

$$\therefore q_{dif} = k_{dif}(p_{sk} - p_a) - (k_{dif} / k_{max}) k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (20)$$

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 (7章参照) して平均皮温 t_{sk} の一次式で近似する。すなわち、

$$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (21)$$

$$\therefore q_{dif} = k_{dif}(a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) - (k_{dif} / k_{max}) k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (22)$$

これらの式(15), (17), (22)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 (16) から次のように得られる。

$$(t_{sksw} \leq t_{sk} \leq t_{skcr}, w_{sw} \leq w_{max} \text{ のとき}) \\ t_{sk} = [q_M - \{q_{sres} + q_{Lres} + k_{dif}(b_{sk} - p_a) - k_{swt}(1 - k_{dif} / k_{max})t_{sksw} - k_{rc}t_{op}\}] / \{a_{sk} k_{dif} + k_{swt}(1 - k_{dif} / k_{max}) + k_{rc}\} \quad (23)$$

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。

$$w_{sw} = q_{swt} / q_{max} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) / \{k_{max}(p_{sk} - p_a)\} \quad (24)$$

この w_{sw} が w_{max} より大きければ、 $w_{sw}=w_{max}$ として、体表での拡散と発汗による蒸発に関する次式(25)、(26)を式(16)に適用して、平均皮温は式 (27) のように得られる。

$$q_{diff} = (1 - w_{max}) k_{diff} (p_{sk} - p_a) \quad (25)$$

$$q_{swt} \cdot \xi = k_{max} (p_{sk} - p_a) w_{max} \quad (26)$$

($t_{sksw} \leq t_{sk} \leq t_{skcr}$, $w_{sw} > w_{max}$ のとき)

$$t_{sk} = [q_M - \{q_{sres} + q_{Lres} + \{k_{diff} + (k_{max} - k_{diff}) w_{max}\} (b_{sk} - p_a) - k_{rc} t_{op}\}] / [a_{sk} \{k_{diff} + (k_{max} - k_{diff}) w_{max}\} + k_{rc}] \quad (27)$$

これらの予測式(23)、(27)の適用上限値 t_{skcr} は36℃前後にある^{註1)}が、詳細については別途論じたい。

7. 平均皮温の予測値と実験結果との比較

式(23)で予測される平均皮温と実測値を比較したのが図5である。両者はよく一致しているといえる。平均皮温予測式(23)の計算には下記の特性を適用した^{3), 9)}。

$$q_{sres} = k_{sres} (t_{ex} - t_a) = 0.0014 q_M (34.0 - t_a) \quad (28)^{9)}$$

$$q_{Lres} = k_{Lres} (p_{ex} - p_a) = 0.0173 q_M (5.87 - p_a) \quad (29)^{9)}$$

$$k_{diff} = 1 / (R_{diff} + R_{ck} + R_{se}) = 1 / (0.328 + 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})) \quad (30)^{8), 25), 26)}$$

$$i_{cl} = 0.34 \quad (31)^{20), 3)}, \quad h_c = 12.1 v^{0.5} \quad (32)^{34)}$$

$$a_{sk} = 0.311, \quad b_{sk} = -5.26 \quad (33)$$

(ただし、 $33.5 \leq t_{sk} \leq 36.5^\circ\text{C}$)

$$k_{swt} = 28.8 \quad (34)$$

$$k_{diff} / k_{max} = \{0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} / \{0.328 + 0.155 I_{cl} / (i_{cl} \cdot LR) + 1 / (LR \cdot h_c \cdot f_{cl})\} \quad (35)$$

$$k_{rc} = 1 / (0.155 I_{cl} + 1 / (h_c \cdot f_{cl})) \quad (36)$$

$$t_{sksw} = 33.8, \quad t_{skcr} = 36.0 \quad (37)$$

$$t_{op} = (h_c t_a + h_{rop} t_{rop}) / (h_c + h_{rop}) \quad (38)^{33)}$$

$$h_{rop} = 4 \varepsilon \sigma \{273.2 + (t_a + t_{rop}) / 2\}^3 \cdot f_{eff} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (39)$$

ε :放射率、 σ : Stefan-Boltzmann 定数

$$w_{max} = 0.85 \quad (40)^{12)}$$

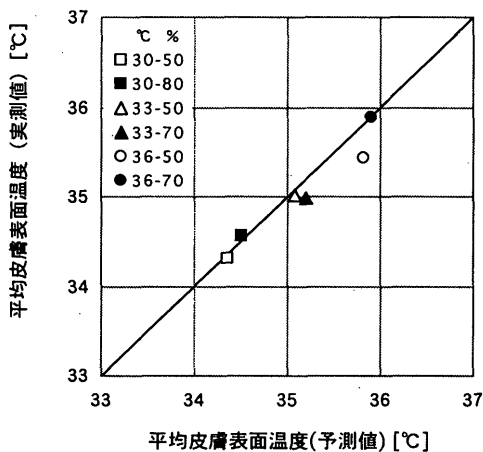


図5 平均皮温の予測値と実測結果との比較

8. 本実験結果・平均皮温予測値とTNM¹²⁾との関係

図6は、GaggeらのTNMに適用されている温熱性発汗密度 q_{wswt}

と平均皮温 t_{sk} との関係と、今回の実験結果(式(14))とを比較したものである。両者は平均皮温が36℃前後まではほぼ一致している。TNM解は1時間後の値を用いており、ほぼ定常とみなし得る。

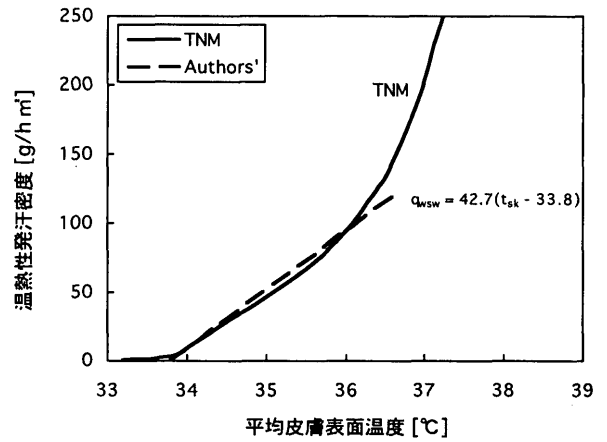


図6 温熱性発汗密度に関する本実験結果とTNM適用値との比較

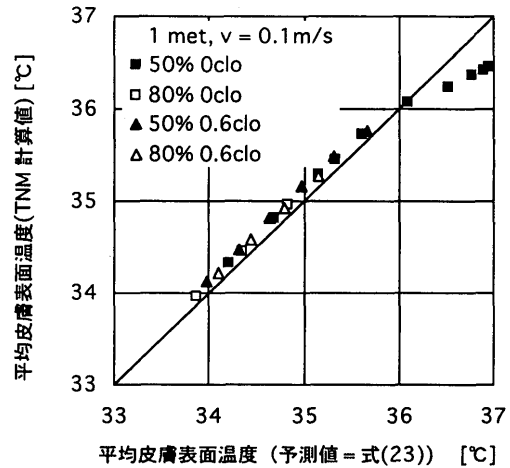


図7 平均皮温予測式(23)による計算値とTNM解との比較(I)

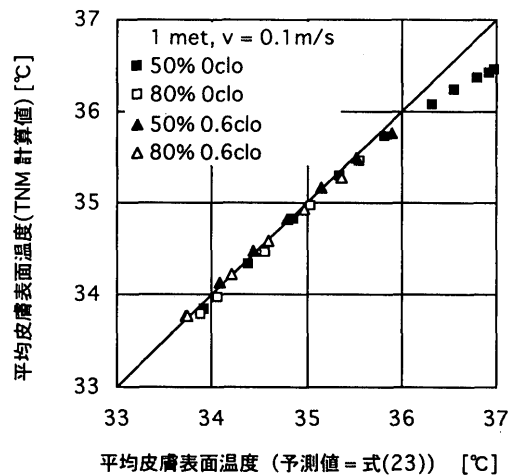


図8 平均皮温予測式(23)による計算値とTNM解との比較(II)
(式(23)にTNM適用値 $h_c=8.6v^{0.53}$, $i_{cl}=0.45$ と温熱性発汗密度の近似式 $q_{wswt} = 36.0 (t_{sk} - 33.7) \text{ [g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})]$ を適用した場合)

図7は筆者らの適用式、すなわち、式(23)に7章に示す特性を適用して算出した平均皮温とTNM解との比較、また、図8はTNMの近似解としての式(23)、すなわち、式(23)にTNMで用いられている諸特性(温熱性発汗密度に関しては筆者らが図6の関係から推定した近似式 $q_{wswt} = 36.0(t_{sk} - 33.7) [g/(m^2 \cdot h \cdot K)]$)を適用して算出した平均皮温とTNM解との比較、である。平均皮温が33.8~36℃の範囲ではほぼ一致しており、式(23)がTNMの近似解($33.8 \leq t_{sk} \leq 36^\circ\text{C}$)でもあることが確認できる。

9. PMV との関係

Fanger⁹⁾によるPMVは、任意の環境状態における熱平衡式に対して、人体の平均皮温と発汗による熱流量に快適時と同じ値を適用したときに生ずる代謝による発生熱流量と呼吸と人体表面からの放熱流量との間の差を L (thermal load: W/m^2)とにおいて、温感(PMV)はこの L に比例するとしたものである。すなわち、

$$PMV = \alpha L \quad (41)$$

ここで、 $\alpha = f(q_M)$

この熱負荷 L は、式(23)を利用すると次式のように表すことができる(ただし、 $t_{sksw} = t_{skn}$ とする)。

$$L = (a_{sk} k_{dif} + k_{swt} + k_{rc})(t_{sk} - t_{skn}) \quad (42)$$

(今回の実験では $t_{skn} = t_{sksw} = 33.8^\circ\text{C}$ であった⁹⁾。)

上式には、PMVと平均皮温との関係が定量的に示されている。この式から L は平均皮温の中立温感平均皮温からの偏差($t_{sk} - t_{skn}$)に比例することが判る。しかし、その比例係数に $k_{rc} (=1/(R_{cl} + R_g))$ が含まれており、同じ平均皮温でも、服装(R_{cl})や風速(R_g)によって L の値、すなわちPMVが異なることを意味している。

10. 結論

男性被験者6名による実験を行い、椅座状態における温熱性発汗密度 $q_{wswt} [g/(h \cdot m^2)]$ と温熱性発汗熱流密度 $q_{swt} [W/m^2]$ を、平均皮温 t_{sk} の発汗開始平均皮温 t_{sksw} からの偏差の一次式で表した。適用範囲は $33.8 \leq t_{sk} \leq 36^\circ\text{C}$ である(ただし、これは男性被験者による結果であり、女性に関しては今後の結果を待たねばならない)。

$$q_{wsw} = k_{wsw}(t_{sk} - t_{sksw})$$

$$= 42.7(t_{sk} - 33.8) \quad g/(h \cdot m^2)$$

すなわち $k_{wsw} = 42.7 \quad g/(h \cdot m^2 \cdot K)$

$$t_{sksw} = 33.8 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$k_{swt} = 28.8 (= k_{wswt} \cdot k_L) \quad W/(m^2 \cdot K)$$

この関係 $q_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{sksw}) [W/m^2]$ 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} を発汗濡れ率の最大値 $w_{max} (=0.85)$ との関係に対応して、次式のように温熱環境4要素と人体側の2要素の陽関数で表した。

($33.8 \leq t_{sk} \leq 36^\circ\text{C}$, $w_{sw} \leq w_{max}$) のとき

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

($33.8 \leq t_{sk} \leq 36^\circ\text{C}$, $w_{sw} > w_{max}$) のとき

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

また、GaggeらによるTNMの1時間後の値と比較した結果、温熱性発汗密度の特性と、上記予測式から予測される平均皮温がそれぞれ33.8~36℃前後の範囲ではほぼ一致した。このことから、上記の平均皮温予測式は、TNMの1時間後の平均皮温の近似式でもあることが確認された。

また、予測される平均皮温とFangerによるPMVとの関係を定量的に示した。その結果、PMVは平均皮温の中立平均皮温からの偏差に比例すること、しかし、同じ平均皮温でも着衣熱抵抗や風速によってPMV値が異なることを明らかにした。

謝辞 西安信教授(北海道工業大学)にはTNMのプログラムソフトを提供いただいた。感謝いたします。また、データの分析や実験に協力いただいた後藤友邦、竹内崇、遠藤裕輔、岩本昌也、浜田博之、秋山竜也、伊藤亜希彦、徳苺高志、宮下雅之、森原崇、赤上ゆきの、山村由香の諸氏に感謝致します。この一部は伊地知健の修士論文、後藤友邦、赤上ゆきの、山村由香氏ら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。

- 注1) 椅座安静時の場合、平均皮温が36℃程度までは直腸温度の上昇は平均皮温に比べて小さい⁴⁰⁾が、この値を越えると平均皮温とほぼ同じ程度の割合で上昇し発汗率も急増する^{29), 30)}。
 注2) 既往の結果^{63), 64)}を参考にすると、静穏環境で無効発汗が生ずるのは濡れ率が約0.75より大きい場合であり、今回の実験の推定濡れ率は最大で約0.65(36℃、70%)であった。
 注3) 人体が接触する床や椅子が伝熱と蒸発に影響を与えるが、ここでは無視した。

本論文の内容の一部は下記の機会に報告した。

- 窪田英樹: 平均皮膚温に着目した体温調節モデル、日本建築学会大会学術講演会梗概集(北海道)、785-786、1995.8
- Kubota, H., Ijichi, T., Kamata, N., Mean skin temperature as an index of human response to the thermal environment, Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1996.7, Nagoya, JAPAN, 221-226
- 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、81-84、1999.3

参考文献

- Adams, W. C., Thermoregulation during marathon running in cool, moderate, and hot environments, J. of Applied Physiology, Vol.38, No.6, 1030-1037, 1975
- 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, 2668-2674, 1992
- ASHRAE HANDBOOK: FUNDAMENTALS, 1997

4. Benzinger, T. H., Heat regulation Homeostasis of central temperature in man, *Physiological reviews*, Vol.49, No.4, 671-759, Oct. 1969,
5. Crosbie, R. J., Hardy, J.D., Fessenden: Electrical analog simulation of temperature regulation in man, In 「Temperature: Its measurement and control in science and industry」, Vol.3: 627_675, New York., 1958
6. 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, 770-777, 1979
7. 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, 583-588, 1999
8. Fanger, P. O., Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation, *ASHRAE Trans*, Vol.73Part II . p. III 4.1- III 4.20, 1967
9. Fanger, P. O., *Thermal Comfort*, McGraw-Hill, New York, 1972
10. Frye, A. J., Kamon, E., Sweating efficiency in acclimated men and women exercising in humid and dry heat, *J. Appl. Physiol. Respiratory Environmental and Exercise Physiol.*, Vol.54, No.4, pp.972-977, 1983
11. 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). 247-262, 1971
12. 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. 709-731, 1986
13. 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, 1240-1249, 1997
14. Hardy, J. D., et al., Differences between men and women in their response to heat and cold, *Proc.Natl Acad.Sci.U.S.A.*26: 389-398, 1940
15. Hertzman, A. B., Randall, W.C., Peiss, C.N., Seckendorf, R., Regional rates of evaporation from the skin at various environmental temperatures, *J.Appl. Physiol.*, Vol.5, No.4, 153-161, 1952
16. Lind, A. R., Determination of environmental limits for everyday industrial work, *Industrial Medicine and Surgery*, 29, 515-518, 1960
17. Lind, A. R., Bass, D. E., Optimal exposure time for development of acclimatization to heat, *Fed. Proc.*, 22(3), 704-708, 1963
18. Lind, A. R., A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work, *J. Appl. Physiol.*, 18(1), 51-56, 1963
19. Ljungberg, A., Enander, A., Holmer, I., Evaluation of heat stress during sedentary work, *Scan. J. Work Environment & Health*, 5, 23-30, 1979
20. McClough, E. A., Jones, B. W., Tamura, T., A data base for determining the evaporative resistance of clothing, *ASHRAE Trans.*, Vol. 95(2), 316-328, 1989
21. McIntyre, D. A., *Indoor Climate*, Applied Science Publishers LTD, 1980
22. Nadel, E.R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A. J., Importance of skin temperature in the regulation of sweating, *J. Appl. Physiol.*, Vol.31, No.1, 80-87, July 1971
23. Nielsen, B., Thermal regulation in rest and exercise, *Acta Physiologica Scandinavia Supplimentum* 323, 1969
24. Nielsen, B., Nielsen, M., Influence of passive and active heating on the temperature regulation of man, *Acta Physiol. Scan.*, 64, 323-331, 1965
25. Nishi, Y., Gagge, A. P., Moisture permeation of clothing - a factor governing thermal equilibrium and comfort, *AHRAE Trans.*, Vol.76, Part1, 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, Part2A, 85-101, 1984
27. Ohara, K., Okuda, N., Takaba, S., Thermoregulatory responses to heat and exercise in Japanese and Caucasians, *Int. J. Biometeor.*, Vol.19, No.2, 99-107, 1975
28. 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, 365-375, 1996
29. Robinson, S., Turrell, E. S., Gerking, S. D., Physiologically equivalent conditions of air temperature and humidity, *Am. J. Physiol.*, 143, 21- 32, 1945
30. Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D., Partial calorimetric studies of responses of man to thermal transients, *J. Appl. Physiol.* Vol.21, No.3, 967-977, 1966
31. Stolwijk, J. A. J., Saltin, B., Gagge, A. P., Physiological factors associated with sweating during exercise, *Aerospace Medicine*, 39, 1101-1105, 1968
32. Torii, M., Yamasaki, M., Tsuzuki, S., Sasaki, T., Whole body sweat rate during exercise in the heat environment, *J. Human Ergol.*, 12, 99-102, 1983
33. 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, 1-22, 1937
34. 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, 505-518, 1939
35. 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一、*空気調和・衛生工学会論文集*, No.48, 21-29, 1991
36. 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一、*空気調和・衛生工学会論文集*, No.55, 99-108, 1993
37. 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, 129-136, 1988
38. 平田耕造、運動による生理反応と着衣、*人間工学*, Vol.30, No.3 131-135, 1994
39. 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, 13-19, 1986
40. 川島美勝：人間—熱環境系編集委員会編：「人間-熱環境系」, 44-46, 日刊工業新聞社, 1989
41. 垣鍔直、勝浦哲夫、局所発汗量の同時測定と局所蒸発熱伝達率の算出法、*日本建築学会計画系論文集*, No.464, 65-70, 1994
42. 久野 寧：汗の話、*光生館*, 1981
43. 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, 135-144, 1987
44. 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, 163, 1992
45. 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, 107-115, 1999
46. 森本武利、吉村寿人、日本の発汗学の歴史、*労働の科学*, Vol.40, No.8, 5-8, 1985
47. 松尾朋浩、窪田英樹、真木学、伊地知健、鎌田紀彦、若松伸司、運動時の温熱性発汗特性と平均皮膚表面温度の予測、*日本建築学会計画系論文集*, No.526, 107-113, 1999.12
48. 中山昭雄、体温とその調節、*中外医学双書*, 1970
49. 中山昭雄編、*温熱生理学*、理工学社、1981
50. 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
51. 西安信、PMVの成果と問題点、*日本生気象学会雑誌*, Vol.29, No.3, 164, 1992
52. 人間—環境系編集委員会、*人間—環境系(上)*、人間と技術者, 1972
53. 大西範和、小川徳雄他、冷環境下の運動鍛錬に伴う発汗増進機序、*愛知医科大学医学会雑誌*, Vol.14, No.4, 663-669, 1986
54. 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, 377-389, 1980
55. 小川徳雄、発汗活動に影響する中枢性および末梢性要因、*日本生理誌*, 48, 1-13, 1986
56. 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*, 31-34, 1993
57. 小川徳雄、運動と発汗、*体力科学*, 45, 289-300, 1996
58. 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、*愛知医大医学会雑誌*, Vol.14, No.4, 653-661, 1986
59. 佐藤方彦監修、*人間工学標準数値式便覧*、技法堂出版、1992
60. 田尻幸吉著、*活動のエネルギー代謝*、労働科学研究所、1974
61. 横山真太郎、*生体内熱移動現象*、北大図書刊行会、1993
62. Hardy, J. D., Dubois, E. F., The technic of measuring radiation and convection, *Journal of Nutrition*, Vol.15, No.5, 461-475, 1938
63. Mitchel, D., Wyndham, C. H., Comparison of weighting formula for calculating mean skin temperature, *J. Appl. Physiol.*, Vol.26, No.5, 616-622, 1969
64. Berglund, L. G., Gonzalez, R. R. Evaporation of sweat from sedentary man in humid environments, *J. Appl. Physiol.* Vol. 42, No.5, 767-772, 1977
65. Candas, V., Libert, J. P., Vogt, J. J., Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating, *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 46(3), 522-528, 1979
66. Gonzalez, R.R., Berglund, L. G., Gagge, A. P., Indices of thermoregulatory strain for moderate exercise in the heat, *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 44(6) : 889-899, 1978

(1999年8月30日原稿受理, 2000年1月28日採用決定)