

人体と座具等との接触部の熱特性を考慮した熱環境評価

著者	朝比奈 亮, 竹内 崇, 松尾 朋浩, 真木 学, 山越 健弘, 山崎 大史, 窪田 英樹
雑誌名	学術講演梗概集. D-2, 環境工学II, 熱, 湿気, 温熱感, 自然エネルギー, 気流・換気・排煙, 数値流体, 空気清浄, 暖冷房・空調, 熱源設備, 設備応用 = Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. D-2, Environmental engineering II, Heat, moisture, thermal comfort, natural energy, air flow, ventilation, smoke exhaustion, computational fluid dynamics, indoor air quality heating, cooling and air-conditioning heat and cold sources, piping systems application of building services
巻	1998
ページ	367-368
発行年	1998-07-30
URL	http://hdl.handle.net/2297/14359

暑熱環境における人体内部温度の予測

正会員○窪田英樹*3 同朝比奈亮*1
同松尾朋浩*2 同浜田博之*1
同山越健弘*1

温熱感、人体モデル、平均皮膚表面温度

1. 緒言 この論文は、人体の平均皮膚表面温度予測モデル¹⁾を適用して、暑熱環境における人体の内部温度を皮膚表面温度とのかかわりで予測し環境評価指標として利用しようとするもので、ここでは、人体内部で発生する熱が主に血流で皮膚表面に運ばれ外界へ放熱されることを念頭において、人体内部温度を皮膚表面温度の関数で表現することを試みる。

2. 体温制御域の分類 平均皮温予測モデルの観点から、既に報告¹⁾した3つの皮温域を、体内温度上昇域を加えて、次の4域に再分類する。

- ◇ I域 (震え域) :
- ◇ II域 (血流調節域) :
- ◇ III域 (温熱性発汗域) :

皮膚表面温度が臨界値 t_{skcr} を越えると温熱性発汗が始まる。温熱性発汗 E_{swcr} を次式で表す。

$$E_{swcr} = k_{swcr}(t_{sk} - t_{skcr}) \quad [W/m^2] \quad (1)$$

- ◇ IV域 (体内温度上昇域) :

平均皮膚表面温度がある臨界値 t_{skcr} に達したとき、体内温度 t_{cr} は次式のように平均皮膚表面温度に一次比例して増加する。同時に、その体内温度 t_{cr} の上昇に比例した発汗 E_{swcr} が新たに加わる。

$$t_{cr} = t_{crn} + (t_{sk} - t_{skcr}) \quad (2)$$

$$E_{swcr} = k_{swcr}(t_{cr} - t_{crn}) = k_{swcr}(t_{sk} - t_{skcr}) \quad (3)$$

ここで、 t_{crn} : 中立温感時の体内温度

3. 体内温度上昇に関するモデル 代謝で体の芯部では次式(4)で表される熱が発生し、この熱は式(5)のように、血流 m_{bl} によって体内から表皮へ運ばれる、と仮定する。

$$k_{core}(M - W) \quad (4)$$

$$k_{core}(M - W) - C_{res} - E_{res} = k_{core}M(1 - \eta_w - \eta_{res}) = c_{bl}m_{bl}(t_{cr} - t_{sk}) \quad (5)$$

ここで、 k_{core} : 体芯部での熱発生割合 [-], M : 代謝量 $[W/m^2]$, W : 外部仕事量 $[W/m^2]$, C_{res} , E_{res} : 呼吸による乾性および湿性失熱 $[W/m^2]$

η_w : 外部仕事率 $(=W/M)$, η_{res} : 呼吸による失熱率[-],

$$\eta_{res} = (C_{res} + E_{res}) / (k_{core}M) \quad (6)$$

k_{core} : 体芯部での熱発生割合, c_{bl} : 血液の比熱, m_{bl} : 体内から体表への血流, t_{cr} : 体内温度, t_{sk} : 平均皮膚表面温度

体温調節の第III域では、温熱性発汗と血流量 m_{bl} の増減による調節がなされるが、この血流量の上限値 m_{blc} における臨界条件下 $m_{bl} = m_{blc}$ での平均皮温 t_{skcr} と

体内温度 t_{crn} との差は式 (5) から式のように表される。

$$(t_{crn} - t_{skcr}) = k_{core}M(1 - \eta_w - \eta_{res}) / (c_{bl}m_{blc}) \quad (7)$$

ここで、体内から表皮への血流量 m_{bl} は、心臓の拍出能力 (心拍出量 m_{co}) に比例する、と仮定する。この心拍出量 m_{co} は酸素摂取量 VO_2 に比例し²⁾、酸素摂取量 VO_2 は代謝量に比例する (Nishi)³⁾。結局、次の関係が得られる。

$$m_{blc} \propto M / (0.23RQ + 0.77) \quad (8)$$

この関係を式 (7) に代入すると、

$$t_{crn} - t_{skcr} \equiv \Delta t_{cr} \propto k_{core}(1 - \eta_w - \eta_{res})(0.23RQ + 0.77) \quad (9)$$

この式から、臨界点における体内温度と平均皮温の差 Δt_{cr} は、ほぼ k_{core} に比例することが推測される。このことから、皮温 t_{sk} が上昇して t_{skcr} ($=t_{crn} - \Delta t_{cr}$) の値を越えたとき、体内温度 t_{cr} は式 (6) に従い平均皮温より Δt_{cr} 高い値を保つように上昇することが予想される。

$$t_{cr} = t_{sk} + \Delta t_{cr} \quad (10)$$

図.1 は、既往のデータ⁴⁾を用いて直腸温度と平均皮膚表面温度の関係を示したものである。これらのデータから Δt_{cr} は、概略次の関係があることがわかる。

$$\Delta t_{cr} \approx 1.2 + 0.0051(H - 58.14) \quad (11)$$

従って t_{skcr} は、上式と後述する式(20)を式(13)に適用して、次式のように表される。

$$t_{skcr} = t_{crn} - \Delta t_{cr} = 36.0 - 0.0020(H - 58.14) \quad (12)$$

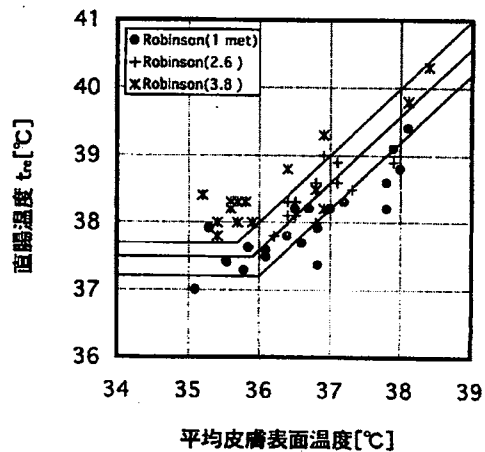


図.1 平均皮膚表面温度と直腸温度(第IV域)

4. 第IV域における温熱性発汗特性 第IV域では皮膚表面温度の上昇に伴う温熱性発汗に加えて、体内温

度の上昇に起因する温熱性発汗が新たに加わる、と考える。すなわち、

$$E_{over} = k_{over}(t_{or} - t_{crit}) \quad (13)$$

$$= k_{over}(t_{sk} - t_{skcr}) \quad (14)$$

この比例係数 k_{over} を、次のように推定する。

代謝が 1 met を越えると、中立温感状態でも発汗することが知られている。

$$E_{over} = 0.42(H - 58.14) \quad [W/m^2] \quad (15)$$

この運動性発汗は、体内温度の増加とかかわりがある、と考えられている。

図2は、代謝と中立温感状態の直腸温度 t_{re} との関係を示したものである。次式で表される。

$$t_{re} = 0.0032(H - 58.14) + 37.2 \quad (16)$$

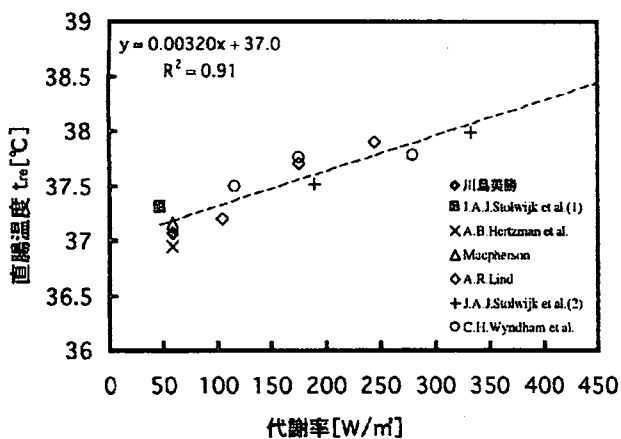


図2 代謝率と直腸温度

式(15)、(16)の両式から、 E_{over} を直腸温度の関数で表すと、次式が得られる。

$$E_{over} = 128.5(t_{re} - 37.2) \quad [W/m^2] \quad (17)$$

ここで、直腸温度を体内温度と置き換えて、体内温度 t_{or} が t_{crit} より上昇することによる発汗は、結局、次式のように表される。

$$E_{over} = 128.5(t_{or} - t_{crit}) \quad (18)$$

5. 平均皮温 t_{sk} と体内温度 t_{or} の予測 平均皮温 t_{sk} は、既に報告した方法¹⁾で予測できる。まず、熱平衡式次のように表される。

$$M(I - \eta) + \Delta M = E_{re} + C_{re} + E_d + E_{sw} + R + C \quad (19)$$

ここで ΔM : 震えによる発熱、 E_d : 皮膚表面からの拡散による蒸発熱 $= k_d(p_{sk} - p_a)$ (20)、 p_{sk} : t_{sk} における飽和水蒸気圧 $\approx k_{p1}t_{sk} + k_{p2}$ [kPa] (21)、 p_a : 周囲空気の水蒸気圧、 E_{sw} : 発汗 ($= E_{swc} + E_{swsk} + E_{swcr}$)、 E_{swc} : 運動性発汗、 E_{swsk} : 平均皮温上昇による温熱性発汗 $= k_{swsk}(t_{sk} - t_{skcr})$ (22)、 E_{swcr} : 体内温度上昇による温熱性発汗 $= k_{swcr}(t_{sk} - t_{skcr})$ (23)

R : 放射による放熱、 C : 対流による放熱

$$R + C = k_{rc}(t_{sk} - t_o) \quad (24)$$

$$\text{ここで、} k_{rc} = f_{cl} / [0.18I_{cl} + 1 / (f_{eff} \cdot h_r + h_c)] \quad (25)$$

t_o : 作用温度 $= (h_c t_o + f_{eff} \cdot h_r t_r) / (h_c + f_{eff} \cdot h_r)$ 、 h_c : 対流熱伝達率、 h_r : 放射熱伝達率、 t_o : 気温、 t_r : 平均放射温度、 f_{eff} : 有効放射面積率

上記の熱平衡式から平均皮膚温度 t_{sk} を解析的に得ることができる(次の5項に t_{sk} を含む: E_d 、 E_{over} 、 ΔM 、 R 、 C)。結局、第III、IV域の体温調節域における平均皮膚温度は、それぞれ次のように表される。ただし、

$$H = M(I - \eta)$$

$$\begin{aligned} \text{第III域: } t_{skcr} \leq t_{sk} \leq t_{sksw} \\ t_{sk} = [H - \{E_{re} + C_{re} + k_d(k_{p2} - p_a) + E_{over} \\ - k_{rc}t_o - k_{swsk}t_{sksw}\}] / (k_{rc} + k_d k_{p1} + k_{swsk}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{第IV域: } t_{sk} > t_{skcr} \\ t_{sk} = [H - \{E_{re} + C_{re} + k_d(k_{p2} - p_a) + E_{over} \\ + k_{swsk}(t_{skcr} - t_{sksw}) \\ - k_{rc}t_o - k_{swcr}t_{skcr}\}] / (k_{rc} + k_d k_{p1} + k_{swcr}) \end{aligned} \quad (27)$$

結局、本論文の対象とする第IV域における体内温度 t_{or} は、式(27)で得られる t_{sk} を用いて次式で表される。

$$t_{or} = t_{sk} + \Delta t_{cs} \quad (28)$$

6. 全身温感予測への適用 体内温度が上昇し始める平均皮温の臨界温度 $t_{skcr} = t_{crit} - \Delta t_{cs}$ が「非常に暑い」にほぼ対応している。この臨界平均皮温 t_{skcr} と中立温感平均皮温 t_{skn} との間を4等分して、平均皮温を温感レベルに対応させる。すなわち、

$$\Delta t_{nth} \equiv t_{skcr} - t_{skn} = t_{crit} - \Delta t_{cs} - t_{skn} \quad (35)$$

として、 t_{skn} : 「中立」、 $t_{skn} + 1/4 \Delta t_{nth}$: 「やや暖かい」

$t_{skn} + 2/4 \Delta t_{nth}$: 「暖かい」、 $t_{skn} + 3/4 \Delta t_{nth}$: 「暑い」

$t_{skn} + \Delta t_{nth}$ ($= t_{skcr} = t_{crit} - \Delta t_{cs}$): 「非常に暑い」

7. 結言 平均皮膚表面温度 t_{sk} に着目したモデルを適用して、体内温度 t_{or} を推定する式を提案した。すなわち、平均皮温 t_{sk} が $t_{skcr} = t_{crit} - \Delta t_{cs}$ に達したとき、体内温度は $t_{or} = t_{sk} + \Delta t_{cs}$ のように、平均皮温と共に上昇する。ここで、

$$t_{skcr}: \text{体内温度 } t_{or} \text{ が上昇し始める臨界平均皮温、} \\ = 36.0 - 0.0020(H - 58.14)$$

$$t_{crit}: \text{中立時の体内温度} (= 0.0032H + 37.2),$$

$$\Delta t_{cs} = 1.2 + 0.0052(H - 58.14) (= t_{crit} - t_{skcr})$$

また、全身温感を、平均皮温 t_{sk} の中立平均皮温 t_{skn} からの偏差 $\Delta t_{sk} = t_{sk} - t_{skn}$ と臨界平均皮温 t_{skcr} と中立平均皮温との差 $\Delta t_{nth} = t_{skcr} - t_{skn}$ の比 $\Delta t_{sk} / \Delta t_{nth}$ と対応させた。

文献

- 1) 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梗概集、1995.8, p.785-789
- 2) 池上晴夫、運動処方、朝倉書店、p.67
- 3) ASHRAE HANDBOOK '96, FUNDAMENTAS, p.8.7
- 4) Robinson, Sid, et al., Physiologically equivalent conditions air temperature and humidity, Am. J. Physiol., 143,21, 1945

*1 室蘭工業大学大学院修士課程

*2 室蘭工業大学大学院博士課程 工学

*3 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 教授・工博

Graduate Student, Muroran Inst. of Tech.

Graduate Student, Muroran Inst. of Tech. M. Eng.

Prof., Dept. of Civil Eng. & Architecture, Muroran Ins. of Tech., Dr. Eng.