

予測平均皮膚温による屋外温熱環境評価の試み

正会員○山越健弘\*1 同 朝比奈亮\*1  
同 松尾朋浩\*2 同 浜田博之\*1  
同 窪田英樹\*3

日射 屋外環境 人体平均皮膚温度

1. はじめに

ここ数年、地球温暖化が問題視され、世界各地で異常気象が報じられている。その中で生活している人々へ与える影響を的確に捉えることは、重要と思われる。本論文では、人体の温熱状態に大きい影響を及ぼす日射に焦点を当て、まず、人体の日射受熱量を予測し、ついで、緯度の異なる世界の4都市を例にとり、日射を受けたときの人体平均皮膚温度を平均皮膚温度予測モデル<sup>1)</sup>を用いて予測することにより、屋外温熱環境の評価を試みた。

2. 屋外での人体熱平衡式と平均皮膚温の予測

屋外における周囲環境と人体の熱収支に関して、次の要素を考慮する。すなわち、人体内部発生熱量H、日射受熱量 $Q_{sun}$ 、呼吸による放熱量(呼吸乾性・湿性放熱量 $C_{res}$ 、 $E_{res}$ )及び皮膚表面からの放熱量(不感蒸散放熱量 $E_{dif}$ 、温熱性発汗放熱量<sup>2)</sup> $E_{swt}$ 、運動性発汗放熱量 $E_{swe}$ 、長波長放射・対流放熱量R、C)である。従って、定常状態の人体熱平衡式は、次式で表される。

$$H + Q_{sun} = E_{res} + C_{res} + E_{dif} + E_{swt} + E_{swe} + R + C \quad [W/m^2] \quad (1)$$

これらの各項については、次式で成り立つとする。

- ・呼吸湿性放熱  $E_{res} = k_{eres}(p_{ex} - p_a)$  (2)
- ・呼吸乾性放熱  $C_{res} = k_{eres}(t_{ex} - t_o)$  (3)
- ・不感蒸散放熱  $E_{dif} = k_{dif}(p_{sk} - p_a)$  (4)
- ・温熱性発汗放熱  $E_{swt} = k_{swt}(t_{sk} - t_{skn})$  (5)
- ・運動性発汗放熱  $E_{swe} = k_{swe}(H - 58.14)$  (6)
- ・対流、放射放熱  $R+C = k_{rc}(t_{sk} - t_{top})$  (7)

ここで、 $k_{eres}$ 、 $k_{eres}$ 、 $k_{dif}$ 、 $k_{swt}$ 、 $k_{swe}$ 、 $k_{rc}$  は、各項の係数

- $t_{ex}$  : 呼気温度 [°C]
- $t_o$  : 外気温度 [°C]
- $t_{top}$  : 作用温度 [°C]
- $t_{skn}$  : 中立温感時の平均皮膚温 [°C]
- $p_{ex}$  : 呼気の水蒸気分圧 [kPa]
- $p_a$  : 空気の水蒸気圧 [kPa]
- $p_{sk}$  : 皮膚温  $t_{sk}$  における飽和水蒸気圧  
 $= a_{tsk} t_{sk} + b_{tsk}$  [kPa] (8)

式(1)を平均皮膚温 $t_{sk}$ について解くことにより、気温 $t_o$  [°C]、相対湿度RH [%]、平均放射温度 $t_r$  [°C]、気流速度 $v$  [m/s]、着衣 $I_{cl}$  [clo]、代謝 $Met$  [met]及び人体の日射受熱 $Q_{sun}$ を変数とする次式で表現できる。

$$t_{sk} = (H - E_{res} - C_{res} - \beta) / \alpha + Q_{sun} / \alpha \quad [°C] \quad (9)$$

ここで、血流調節域 ( $t_{sk} < t_{skn}$ ) での $\alpha$ と $\beta$ は、

$$\alpha = k_{dif} a_{tsk} + k_{rc}$$

$$\beta = k_{rc} t_{top} - k_{dif}(b_{tsk} - p_a) - E_{swe}$$

となる。また、発汗調節域 ( $t_{sk} > t_{skn}$ ) では、

$$\alpha = k_{dif} a_{tsk} + k_{rc} + k_{swt}$$

$$\beta = k_{rc} t_{top} - k_{dif}(b_{tsk} - p_a) - E_{swe} - k_{swt} t_{skn}$$

となる。但し、体温調節域を血流調節域と発汗調節域に限定し、震え域を考慮していない。

3. 人体の日射受熱量算定式

日射受熱 $Q_{sun}$ は人体に直接到達する直達日射、天空に散乱されてから到達する天空日射及び道路などから反射して到達する反射日射の三つに分類できる。但し、ここで扱う日射受熱は、場所や路面状況の影響を受けない直達日射のみとする。直達日射受熱量 $Q_{dir}$ は、次式で表す。

$$Q_{dir} = a_{sun} f_{ij} J_{dir} \quad [W/m^2] \quad (10)$$

ここで、

- $a_{sun}$  : 人体の日射吸収率 [-]
- $f_{ij}$  : 直達日射投影面積率  
 $= A_{pl} / A_D$  [-] (11)
- $A_{pl}$  : 直達日射投影面積 [m<sup>2</sup>]
- $A_D$  : 人体表面積 [m<sup>2</sup>]
- $J_{dir}$  : 法線面直達日射量 [W/m<sup>2</sup>]

4. 平均皮膚温を予測する際の条件

①日射受熱量算定条件

法線面直達日射量はBouguerの式<sup>3)</sup>を、姿勢は日向で太陽に向かう立位とし、そのときの直達日射立位投影面積はUnderwoodら<sup>4)</sup>の式を使用した。また、時刻は真太陽時の12時、大気透過率は0.7、人体の日射吸収率は皮膚の色や着衣などによって変化すると考えられるが、ここでは文献<sup>5)</sup>を参考にして0.6とした。

②環境・人体条件

相対湿度は50%、風速は比較的穏やかな日を想定して1m/s、平均放射温度は周囲壁面温や地表面温など地物温の把握は困難なため気温と等しく、代謝は1.2met、着衣量は文献<sup>6)</sup>を参考にして気温に比例した次式とした。

$$I_{cl} = -0.03 t_o + 1.33 \quad [clo] \quad (12)$$

各月の気温、相対湿度については各都市の1日の変動を想定して日最高気温時の月別平年値<sup>7)</sup>を採用した。

Evaluation of Outdoor Climate with Predicted Mean Skin Temperature

YAMAKOSHI Takehiro, KUBOTA Hideki, MATSUO Tomohiro, ASAHINA Ryo, HAMADA Hiroyuki

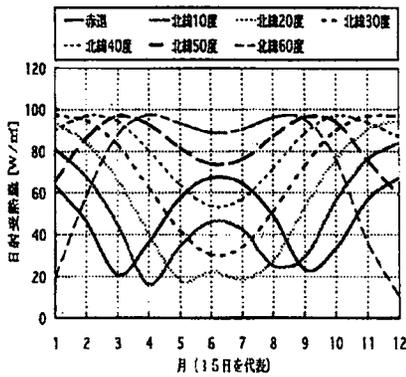


図1 緯度別による日射受熱量の年内変動

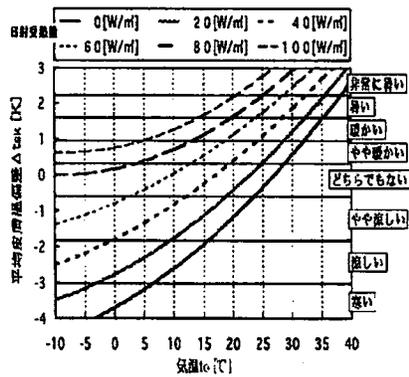
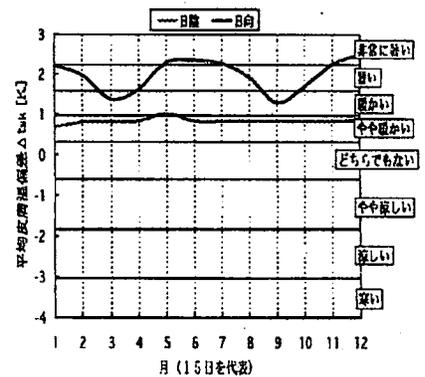
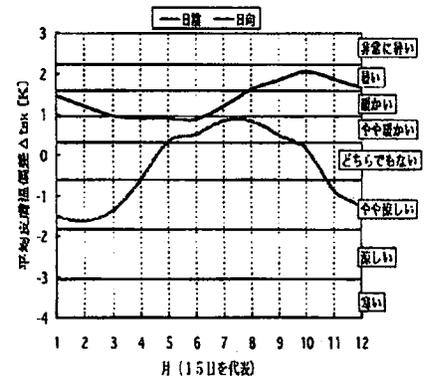


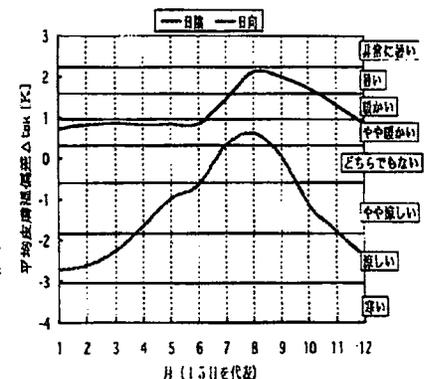
図2 受熱量別による平均皮膚温偏差と気温の関係



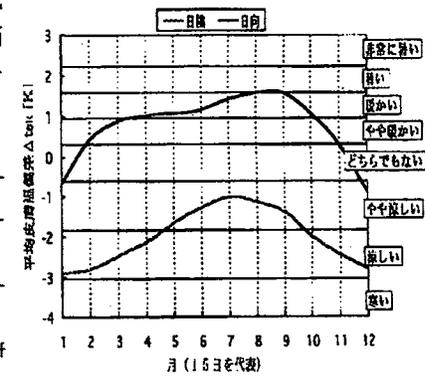
(a) Singapore



(b) Hong Kong



(c) Tokyo



(d) London

図3 日陰と日向による平均皮膚温偏差の年内変動

③平均皮膚温算定条件

式(9)より得られる平均皮膚温は、定常値であるので屋外に滞在する時間を設定し、平均皮膚温を過渡的に取り扱う必要がある。そこで、滞在時間を30分と設定した。暑熱環境 ( $t_{sk} > t_{skn}$ ) では平均皮膚温は30分程度で定常に達するが、寒冷環境 ( $t_{sk} < t_{skn}$ ) ではかなり長い時間を要するので、平均皮膚温降下式<sup>9)</sup>を使用して平均皮膚温を予測することにした。

5. 予測結果

都市の選定は、緯度系列でSingapore(N1.3°)、Hong Kong(N22.3°)、Tokyo(N35.7°)、London(N51.5°)の4都市とした。

図1は12時(真太陽時)における緯度別による日射受熱量の予測結果である。北緯60度付近の地域は春から夏に、北緯30度付近の地域は秋から冬に、赤道付近の地域は6月、12月頃に日射受熱のピークがあるといえる。

図2は、湿度50%における受熱量別による平均皮膚温 $t_{sk}$ と中立平均皮膚温 $t_{skn}$ の差(平均皮膚温偏差 $\Delta t_{sk}$ )を表したものである。例えば、気温20°Cで日射受熱0 W/m<sup>2</sup>(日陰)での温冷感は「やや涼しい」となり、同気温で日射受熱が最大となる100 W/m<sup>2</sup>では「暑い」と感じると予測される。但し、同図に示す全身温感<sup>10)</sup>は当研究室の実験結果によるものである。

図3は、12時(真太陽時)における各都市の日陰と日向による平均皮膚温偏差の予測結果である。この図より、「やや暖かい」から「やや涼しい」までを許容範囲として捉えると、日陰と日向どちらに滞在しても許容範囲に収まる日数の一番多いHong Kongが比較的過ごし易いようである。

6. まとめ

本論文では、日射を考慮した平均皮膚温算定式を提示し、緯度の異なる地域で人体の日射受熱量及び平均皮膚温の予測を行なった。地域の屋外環境を評価する上で人体条件のみならず雨、風、湿度などの気象要因を含めた総合的な分析が、当然の事ながら必要である。

《参考文献》

- 1) 窪田英樹他: 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, pp.758-789, 1995.8
- 2) 窪田英樹他: 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梗概集, pp.715-716, 1998.9
- 3) 斉藤平蔵 著: 建築気候(共立出版), 1991
- 4) C.R.Underwood, et al: The Solar Radiation Area of Man, ERGONOMICS, Vol.9, No.2, pp.155-168, 1966
- 5) 空気調和・衛生工学会 編: 快適な温熱環境のメカニズム(丸善), 1997
- 6) 南野修, 成瀬哲生他: 青年男女を対象とした実際の建物における温熱環境と温冷感・衣服量の調査研究, pp.89-92, 1978.12
- 7) E.A.Pearce, et al: The World Weather Guide (Hutchinson), 1984
- 8) 山越健弘他: 低温室へ移動したときの人体皮膚表面温の降下特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.413-414, 1998.9

\*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 Inst. of Tech., Dr. Eng.