

屋外における人体の熱負荷と快適感に関する研究

高村聡^{*1}、吉田篤正^{*2}大阪府立大学大学院^{*1}、大阪府立大学大学院^{*2}Study on Thermal Load and Thermal Comfort of Human Body
in Outdoor EnvironmentSou TAKAMURA^{*1}, Atsumasa YOSHIDA^{*2}^{*1} Graduate School of Osaka Prefecture University (takamura@env.energy.osakafu-u.ac.jp)^{*2} Graduate School of Osaka Prefecture University (ayoshida@energy.osakafu-u.ac.jp)

Abstract; It is becoming important to predict the thermal comfort in outdoors because of the serious thermal environment in urban area in recent years. In the present study, four subjects were made to stay at an open space, and the weather factor and physiology factor were measured. Based on a heat balance, the thermal load of human body is computed from the mean skin temperature and the surrounding environmental factor such as air temperature. In result, it turns out the thermal load goes up to about 200 W/m^2 at the maximum. The correlation between the measured thermal sensation of all subjects and the predicted one from the wettedness and the thermal load is not so high. However, individual thermal sensation can be predicted by these parameters.

1 はじめに

屋内温熱環境を対象とした人体の快適性に関する研究は長年、多くの研究者によって報告され、快適性評価指標としてPMVやSET*などが広く利用されている。一方で近年の都市域における熱環境の悪化を受けて、屋外を対象とした快適性に関する報告も、数例見られるようになった。しかし、人体に関する熱収支を考える際に重要な因子である屋外環境に特有の日射や風の影響、非正常性などを包括した快適性指標は確立されていない。

屋外における人体の熱収支に基づいた研究として、神田ら¹⁾は仮想熱負荷量を提案しているが、皮膚温の恒温性に基づいており実際の状態とは異なる。また、木内²⁾は全国に渡って大規模な実験を行い、体温とぬれ面積率から温度負荷量を求めているが短時間の暴露で非正常性を十分に考慮できていない。

そこで本研究では被験者実験とその実験結果に即した解析を行い、熱収支に基づいた屋外環境に適用できるを温冷感予測指標を提案することを目的とする。

2 屋外被験者実験

2.1 実験概要

実験は2003年7月31日から8月5日にかけて大阪府堺市の2ヶ所で行った。8月3日までの前半は公

園(草地)、それ以降は隣接する小学校校庭(裸地)で行った。公園は面積約 25000 m^2 と広く、地表面には長さ数 cm ～数十 cm の草が伸びていた。小学校校庭もほぼ同面積と見なせる広さで地表面は全く植生のない砂地であった。

測定項目および測定機器をTable 1に示す。水平面全天および地面からの反射日射量、大気および地面からの赤外放射量、気温、地表面温度は1分毎、湿度、風速、血流量は0.1秒毎に、心拍数は5秒毎に測定を行った。気温、風速、湿度の測定高度は 1.5m とし、長短波放射計は 1.0m とした。血流量測定にはレーザードップラー血流計を用い、センサは手中指に取り付けた。平均皮膚温はHardy-DuBoisの7点法を用いて1分毎に測定した。被験者は健康な20歳代の男子学生4名である。Table 2に年齢、体格を示す。実験は午前11時ごろから午後5時ごろまでで三回行い、実験を行わない時間帯は日陰で休息を取らせた。実験開始15分前からセンサを装着し、30分間観測を行った。実験中は立位安静状態とし通常、太陽に正対させ、一部は背面から日射を受ける方角に向けた。着衣は各自の下着、半袖シャツ一枚、長ズボン、靴下、靴である(合計約 0.4clo)。心理反応はASHRAEの提案している評定尺度を直訳したもの³⁾を用いた。定期申告として5分毎に申告させた。さらに個人の判断で感覚が変化したと感じた時点でも随時申告させた。これは、多くの

既存研究では間隔一定で申告させているが、本来、感覚は不規則な間隔で変化し、主観の差異を測り知ろうとする意味において被験者が変化したと感じた時に申告させた方が妥当であると考えたためである。

Table 1: Measured items and instruments

項目	測定機器など
気温	通風乾湿計
地表面温度	熱電対
湿度	通風乾湿計
風速	超音波風速計
全天日射量	日射計
放射収支量	放射収支計
平均皮膚温	サーミスター
血流量	レーザードップラー血流計
心拍数	心拍計
温冷感	質問表 (Fig. 1)
快適感	質問表 (Fig. 1)

Table 2: Age and physique of subjects

	年齢	身長	体重	表面積 ^{注1}
平均	23.5(yrs)	176.0(cm)	66.5(kg)	1.82(m ²)
標準偏差	1.3(yrs)	6.7(cm)	5.8(kg)	0.11(m ²)

注1) 高比良の式 $S = 0.007184 \times H^{0.725} \times W^{0.425}$ より算出
 S : 表面積、 H : 身長 (cm)、 W : 体重 (kg)

2.2 環境測定の結果

Fig. 2に実験期間中の裸地における全天日射量と地表面からの反射日射量および気温と相対湿度を示す。期間中、降水の無い晴天日が続き、連日真夏日であった。測定開始2日前に観測地点で降水があり、日数の経過と共に気温は上昇する傾向であった。このため相対湿度は若干の減少傾向であった。また被験者実験中の平均風速は草地で0.4~1.7(m/s)、裸地で1.6~2.7(m/s)であり比較的裸地での風速が大きい傾向にあった。

2.3 人体への熱負荷

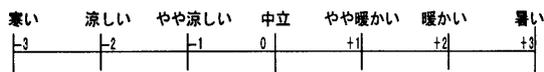
2.3.1 人体に関する熱収支

人体への熱負荷を各熱収支項の残差として式(1)より求める。

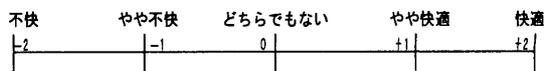
$$F_{load} = M + R_{net} - E - C \quad (1)$$

(i) 代謝量 本実験では立位安静状態を保つため、代謝量 M は80 (W/m²) で一定とした。

【温冷感】



【快適感】



上記スケールに従い、定期申告として5分毎に申告してください。尚、温冷感・快適感ともに小数点第一位まで申告してください。また、感覚が変わったと自覚した場合にも申告して下さい。

Fig 1: Questionnaire of thermal sensation and comfort

(ii) 純放射量 純放射量 R_{net} は直方体 (0.4m×0.2m×1.2m) に模擬化した人体モデルへの正味の放射量として算出した。直達日射、散乱日射の算出には直散分離を用い水平面全天日射量から求めた。また、人体からの放射には実測値の平均皮膚温 \bar{T}_{skin} を用いた。人体モデル鉛直面は無限に長い仮想天空面と地表面との間にあるものと簡略化し、形態係数 $\gamma = 0.5$ とした。

$$R_{net} = (1 - \alpha_h)R_{sh} + R_{ln} - \varepsilon_h \sigma (\bar{T}_{skin}^4 + 273.15) \quad (2)$$

$$R_{sh} = \left(A_t S_{\downarrow} + A_{bt} S_{\uparrow} + A_f (S_T \cos z + \gamma S_D) + \gamma S_D (A_l + A_r + A_{bk}) \right) / A \quad (3)$$

$$R_{ln} = \varepsilon_h \left(A_t L_{\downarrow} + A_{bt} L_{\uparrow} + \gamma (A_f + A_{bk} + A_l + A_r) \times (L_{\downarrow} + L_{\uparrow}) \right) / A \quad (4)$$

(iii) 潜熱損失量 人体からの潜熱損失量 E は発汗蒸発熱 E_{sk} 、不感蒸泄熱 E_{diff} 、呼吸蒸発熱 E_{res} の和として表される。

$$E = E_{sk} + E_{diff} + E_{res} \quad (5)$$

発汗蒸発熱 E_{sk} は深部温 T_{cr} と平均皮膚温 \bar{T}_{skin} の閾値との差から式(6)より推定した⁴⁾。

$$E_{sk} = (371.2(T_{cr} - T_{cr,set}) + 33.6(\bar{T}_{skin} - \bar{T}_{skin,set})) \times 2.0^{(\bar{T}_{skin} - \bar{T}_{skin,set})/10.0} \quad (6)$$

ただしここで用いた深部温は田辺ら⁴⁾の屋外を適用対象とした65分割モデルを長短波放射量を考慮することで屋外用に改良したモデルを用いて算出した値である。呼吸蒸発熱 E_{res} および不感蒸泄熱 E_{diff} は大気比湿 q_{air} 、呼吸比湿 q_{res} 、皮膚表面の飽和比湿 q_{skin} を用いて算出した。

$$E_{res} = 0.026M(q_{res} - q_{air}) \quad (7)$$

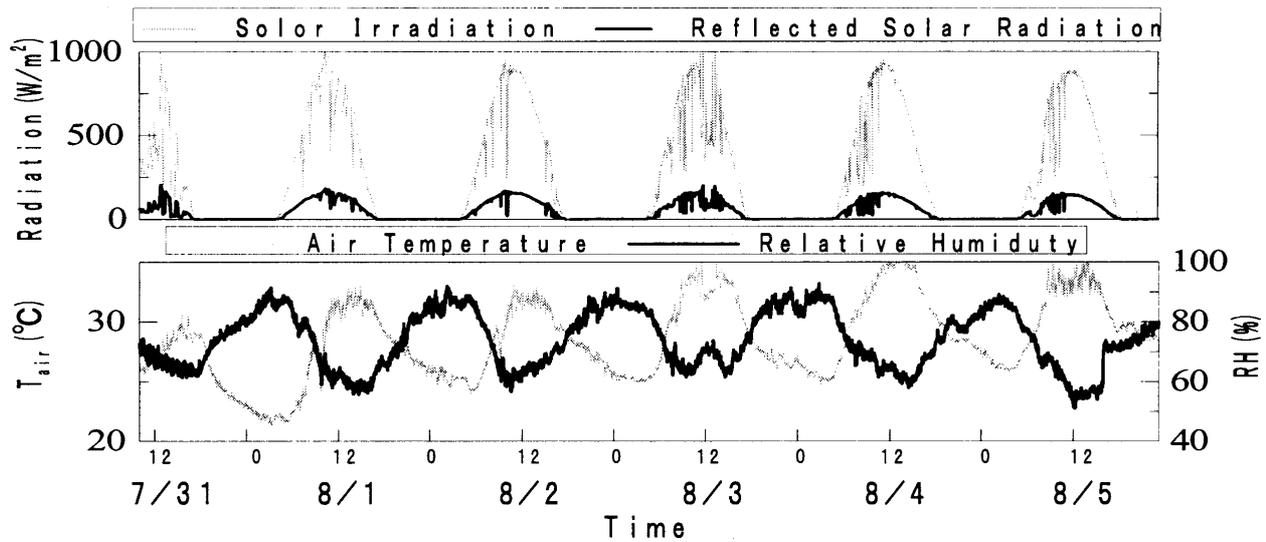


Fig 2: Daily variation of solar radiation,air temperature and humidity

$$E_{diff} = 0.06E_{max} \quad (8)$$

$$E_{max} = \rho l C_h U (q_{skin} - q_{air}) \quad (9)$$

(iv) 顕熱損失量 顕熱損失量 C は皮膚顕熱 C_{skin} と呼気潜熱 C_{res} を用いて算出した。

$$C = C_{skin} + C_{res} \quad (10)$$

$$C_{skin} = C_p \rho C_h U (\bar{T}_{skin} - T_{air}) \quad (11)$$

$$C_{res} = 0.0016M(\bar{T}_{skin} - T_{air}) \quad (12)$$

2.4 温冷感予測

本研究で実施した被験者実験は暑熱環境であったため、発汗状態も温冷感を大きく左右する因子と考え、熱負荷量 F_{load} および最大蒸発熱損失量 E_{max} と発汗蒸発熱損失の比で表す皮膚のぬれ面積率 w の二つを説明変数として回帰分析を行った。被験者全体での重相関係数は 0.46 程度と精度良く予測することができなかった。これは夏期のみの実験であるため申告温冷感に大きな差が出なかったことが原因として考えられる。熱負荷が負となる寒冷環境や中立環境における温冷感との対応は今後の課題としたい。以下では被験者ごとの分析結果について述べる。

Fig. 3 に被験者 B の温冷感予測値と申告値の相関を示す。この被験者の温冷感 TSV は回帰分析の結果得られた推定式を式 (13) に示す。

$$TSV = -0.0649 + 0.00535F_{load} + 1.886w \quad (13)$$

この式による重相関係数は 0.723 であった。この被験者の申告時の特徴として中間申告を許しているにも関

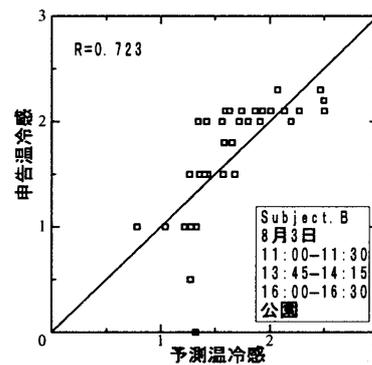


Fig 3: Correlation between estimated and observed thermal sensation(Sub.B at the grass field)

わらず時間経過とともに連続した値ではなく、離散的に申告する傾向があった。そのため他の被験者に比べ推定精度が悪くなったと考えられる。

Fig4 に被験者 C の 3 回の暴露における温冷感申告と推定温冷感の経時変化を示す。各実験において時間の経過と共に上昇傾向にある温冷感申告値に追従して温冷感予測値も上昇しており、定性的には良く表現できている。したがって個人の平均的な温冷感予測可能であると言える。しかし申告の詳細な変化を再現できていない。これは熱負荷の計算の際に風速データを一分間の平均値を与えた結果、変動風の影響を考慮できなかったためと思われる。

3 まとめ

本研究では熱負荷が温冷感を説明できるとの観点から温冷感のみを取り扱った。快適感については今後検討したい。

被験者実験の結果から (i) 熱負荷とぬれ面積率から平均的な温冷感予測が可能である (ii) しかし短時間の暴露中の温冷感の変化を推定するには平均風では限界があるという事を示した。

地表面の差異による温冷感への影響や人体と太陽の位置関係による違い、温冷感、快適感と血流量など生理反応量との関係、暑熱環境以外での適用は今後の課題である。

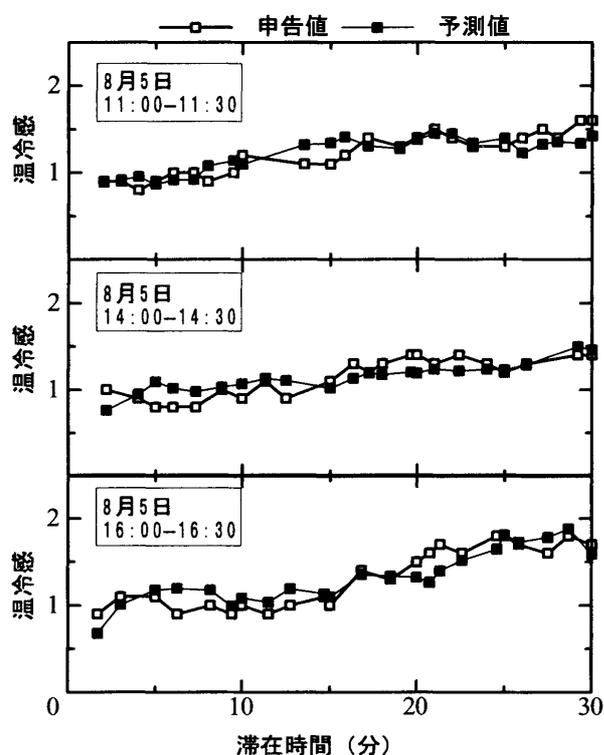


Fig 4: Change of estimated and observed thermal sensation with time(Sub.C at bare ground)

謝辞

暑い中、快くご協力していただいた被験者の方々、気象測定に関して助言、ご協力いただいた大阪大学の鳴海大典先生、ならびに国土環境株式会社の皆様にて感謝の意を表します。

主な記号

- A_i : 部位表面積 [m^2]
- C : 顕熱損失量 [W/m^2]
- C_h : 熱交換係数 [$N.D.$]

- C_p : 定圧比熱 [$J/g \cdot k$]
 - E : 潜熱損失量 [W/m^2]
 - F_{load} : 熱負荷量 [W/m^2]
 - L_{\uparrow} : 地表面からの長波放射 [W/m^2]
 - L_{\downarrow} : 大気からの長波放射 [W/m^2]
 - M : 代謝量 [W/m^2]
 - R_{net} : 純放射量 [W/m^2]
 - R_{sh} : 人体に入射する短波放射量 [W/m^2]
 - R_{ln} : 人体に入射する長波放射量 [W/m^2]
 - S_{\uparrow} : 地表面からの反射日射量 [W/m^2]
 - S_{\downarrow} : 全天日射量 [W/m^2]
 - S_D : 散乱日射 [W/m^2]
 - S_T : 直達日射 [W/m^2]
 - T_{air} : 気温 [$^{\circ}C$]
 - T_{cr} : 核心温 [$^{\circ}C$]
 - $T_{cr,set}$: 核心温閾値 [$^{\circ}C$]
 - U : 風速 [m/s]
 - \bar{T}_{skin} : 平均皮膚温 [$^{\circ}C$]
 - \bar{T}_{skin} : 平均皮膚温閾値 [$^{\circ}C$]
 - l : 水蒸気潜熱 [J/g]
 - q : 比湿 [g/g]
 - z : 太陽高度 [rad]
 - α : アルベド [$N.D.$]
 - γ : 人体の天空、地表面に対する形態係数 [$N.D.$]
 - ϵ : 放射率 [$N.D.$]
 - ρ : 空気密度 [g/m^3]
 - σ : ステファン・ボルツマン定数 [$W/(m^2 K^4)$]
- 添字
- air: 大気
 - res: 呼気
 - skin: 皮膚表面
- t, bt, f, bk, l, r : 直方体モデルの上下前後左右面

参考文献

- [1] 神田学ほか”微気象観測に基づいた屋外における人体の熱環境解析” 土木学会論文集 509(2),35-44(1996).
- [2] 木内豪”屋外空間における温冷感指標に関する研究” 天気 48(9),661-670(2001).
- [3] (社) 空気調和・衛生工学会”快適な温熱環境のメカニズム”,p61(1997)
- [4] 田辺新一ほか”温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究”, 日本建築学会計画系論文集 541,9-16(2001).