

人体の熱負荷量による非定常状態にある屋外温熱環境の 評価に関する研究

○ 杉田浩紀^{*1}、島崎康弘^{*1}、宮田哲志^{*2}、吉田篤正^{*1}

^{*1} 大阪府立大学大学院、^{*2} 大阪府立大学

Study on Evaluation of Thermal Environment under Unsteady State based on Thermal Load of Human Body

Somada Hiroki^{*1}, Shimazaki Yasuhiro^{*1}, Miyata Tetsushi^{*2}, Yoshida Atsumasa^{*1}

^{*1} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

^{*2} Osaka Prefecture University

Abstract

There is increasing concern about the health effects of the severe thermal environment in urban area. Because of these situations, it is important to estimate the thermal comfort for environmental improvements and designs. Several studies have been performed dealing with the increasing problems of worsening thermal environment. However, only few studies have been performed that deal with the theme of unsteady conditions such as in outer space, in motion and so on. Two different experiments were mainly carried out to evaluate the effect of thermal load for thermal sensation vote under unsteady state. One is the experiment under the condition in a step like pattern from the sunshade to the sunshine, and the other is under the condition in walking. These conditions are familiar in everyday life. The authors find out thermal load is effective indicator to predict thermal comfort represented as thermal sensation vote. The new findings could provide fundamental data for the improvement of outdoor living environments.

Keyword

Thermal Load, Thermal Sensation Vote, Subject Experiment, Walk Activity, Metabolism

1 はじめに

近年のヒートアイランド現象に代表される都市の温熱環境の悪化に伴い、都市空間に滞在する人間は不快に感じるだけでなく、熱中症を引き起こす事もあり大きな懸案事項となっている。このため体感温度を下げる事が重要であり、具体的な対策を施した場合どのくらいの改善が見込めるかを予測、評価する必要がある。屋内温熱環境の評価指標はPMV や SET*などが広く利用されているが、これらは屋

外に特有の日射を十分には考慮していないことや熱的平衡状態を仮定しているという理由から屋外空間に用いるには問題があると考えられる。

2 実験概要

著者らはこれまで人体の熱収支に基づく熱負荷量から人体の温冷感を予測する指標を提案してきた¹⁾。暑熱下の熱負荷量を把握するため、本研究では特に非定常における生

理応答を検討するため日射条件をステップ変化させた場合と歩行した場合について被験者実験を実施した。

実験はいずれも大阪府立大学構内にて、実験期間は7～10月の夏季、秋季であった。

3 実験状況

3-1 日陰から日向へ移動した場合（実験①）

測定場所の地表面は草地であり、周辺については日向側は一方に建物があり壁面から約3m付近、日陰側は左右に建物がある陸橋の下であった。測定項目と測定機器をTable1に示す。

水平面全天日射量及び地面からの反射日射量、大気及び地面からの赤外放射量、気温、湿度、風速、皮膚温は1分毎、心拍数は5秒毎、発汗量は1秒毎に記録した。被験者の心理反応である温冷感と快適感にはFig1に示す線形尺度を用いて、5分毎に被験者自身が現在感じる温冷感・快適感に当たるポイントに縦線を記入させた。

Table 1 Measurement item and instrument

Item	Measuring instrument
Air temperature	Assman psychrometer
Relative humidity	Assman psychrometer
Wind velocity	Ultrasonic anemometer
Solar radiation	Short wave radiometer
Infrared radiation	Long wave radiometer
Globe temperature	Globe thermometer
Average skin temperature	Thermo couple of T-type
Heart rate	Heart rate meter

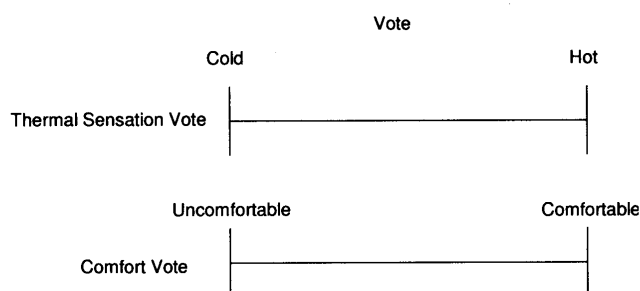


Fig.1 Vote sheet

測定日は7月19日と27日、8月21日と10月5日である。被験者は健康な20歳代前半の男子大学生および院生である。着衣は半袖Tシャツ一枚と長ズボンである。測定手順は実験開始15分前からセンサー類を装着し、30分間測定を行った。30分間の測定の内最初の10分間を日陰で、残りの20分間を日向で行った。日陰から日向への移動は数歩以内のため、代謝量は変化しないものとする。なお、測定中は立位安静であり、日向と日陰は全天日射量で定義した。今回

の実験では日向と日陰の差が全天日射量で6～10倍程度あった。

3-2 歩行した場合（実験②）

測定場所の地表面は、下がアスファルトであった。測定項目と測定機器はTable1と代謝量を測定するための酸素摂取量と機械的仕事量を測定した。水平面全天日射量及び地面からの反射日射量、大気及び地面からの赤外放射量、気温、湿度、風速、皮膚温は1分毎、心拍数と酸素摂取量は0.01秒毎に記録した。被験者の心理反応である温冷感と快適感には実験①と共通である。

測定日は9月26日から28日にかけての3日間であり、被験者については実験①と共通である。測定手順は15分前からセンサー類を装着し、30分間測定を行った。30分間の測定の内最初の10分間を酸素摂取量の測定機器の安定のために立位安静で待機させた、その後10分間を立位安静で測定し最後の10分間で歩行運動をおこなった。歩行運動は約1.5m/sの軽い運動である。

4 人体への熱負荷量

人体の熱負荷量を各熱収支項の残差 F_{load} として式[1]より求める。

$$F_{load} = M - W + R_{net} - E - C \quad [1]$$

M ; 代謝量, W ; 機械的仕事量, R_{net} ; 純放射量

E ; 潜熱損失量, C ; 顕熱損失量 (単位はすべて W/m^2)

(i) 代謝量

本研究では被験者実験において立位安静状態の場合代謝量 M は $80[W/m^2]$ で一定とし、歩行時は測定した酸素摂取量式より求めた²⁾。

$$M = 303 (0.23 R + 0.77) V_{O_2} / A_D \quad [2]$$

R ; 呼吸商, V_{O_2} ; 酸素摂取量(ml/min), A_D ; 体表面積(m^2)
体表面積はDuboisの式を用いている²⁾。

(ii) 純放射量

純放射量 R_{net} は上下からの日射量、赤外放射量による直方体($0.4m \times 0.2m \times 1.2m$)に模擬した人体モデルへの正味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。人体からの放射量の算出には実験値の平均皮膚温 $T_{skin}(K)$ を用いた。

$$R_{net} = (1 - \alpha_h) R_{sh} + \epsilon_h (R_{in} - \sigma T_{skin}^4) \quad [3]$$

$$R_{sh} = (A_i S_{\downarrow} + A_{br} S_{\uparrow} + A_f (S_i \cos z + \gamma S_D) + \gamma S_D (A_i + A_r + A_{bk}) / A \quad [4]$$

$$R_{in} = (A_i L_{\downarrow} + A_{br} L_{\uparrow} + \gamma (A_f + A_{bk} + A_i + A_r) (L_{\downarrow} + L_{\uparrow})) / A \quad [5]$$

R_{sh} : 短波放射量, R_{in} : 長波放射量, A_i : 直方体モデル i 方向面積(m^2), $L_{\uparrow}$: 地表面からの長波放射量, $L_{\downarrow}$: 大気からの長波放射量, $S_{\uparrow}$: 地表面からの反射日射量, $S_{\downarrow}$: 全天日射量, S_{δ} : 散乱日射量, S_{δ} : 直達日射量, Z : 太陽高度(rad), t, b, f, bk, l, r はそれぞれ

直方体モデルの上下前後左右面である。 α_h は人体のアルベド, ε_h は人体の放射率であり本研究ではそれぞれ0.3, 0.98とした。直散分離には宇田川らの方法⁹⁾を用いている。単位は記載のもの以外は W/m^2 である。

(iii) 潜熱損失量, 顕熱損失量

人体からの潜熱損失量 E は発汗蒸発熱と不感蒸泄熱と呼吸蒸発熱の和として表している。発汗蒸発熱はASHRAE⁴⁾に基づき, 血流モデルを用いて深部温度と平均皮膚温から発汗量を算出している。顕熱損失量 C は皮膚顕熱と呼吸顕熱の和として算出した。

5 測定結果および考察

5-1 結果1(実験①)

Fig2に7月27日に測定したそれぞれの被験者の熱負荷量の時間経過を示す。Fig3に被験者4の熱負荷量と温冷感の時間経過を示す。Fig4に温冷感と快適感の関係を、Fig5に定常状態における熱負荷量と温冷感の関係を示す。Fig2から、どの被験者においても日向へ移動した10分後以降同じような傾向を見せていることから、ステップ変化においても熱負荷量によって温冷感が予測可能であると言える。Fig3とFig4から、実験日当日は日陰と日向の全天日射量に7倍程度差があったため、熱負荷量にもその傾向が表れ、日陰が日向よりも快適であるということが分かる。

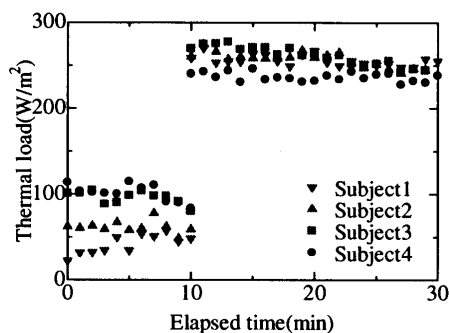


Fig. 2 Thermal load (7/27)

Fig.5 に示されるように定常状態の実験では熱負荷量が $200 W/m^2$ 以上であるとき、平均的に温冷感は2から3の間の値をとる。しかし、Fig6 では日向に移動した後(図中の三角印)において熱負荷量の値が $200 W/m^2$ を超えるとき温冷感は1~2の間で最も多く申告されている。よって今回の実験により夏季において、非定常状態では温冷感は熱負荷量よりも遅れが生じている可能性がある。ただし、この原因としては実験中においても顕著な発汗が見られなかったことや、発汗による潜熱の量も定常状態よりも少なく予測されたことから、日向へ変化した時の発汗の遅れが考えられる。この発汗の遅れにより、熱負荷量が定常状態よりも高く測定されたと考えられる。

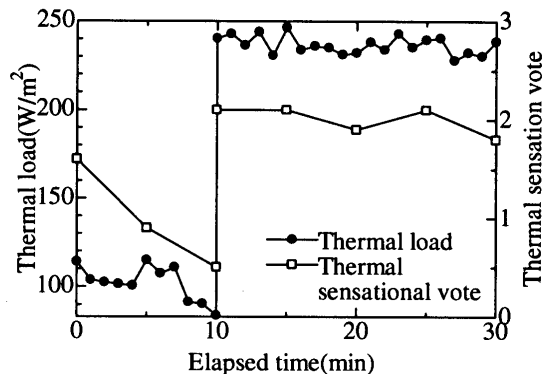


Fig. 3 Thermal load and thermal sensation vote (Subject 4) (7/27)

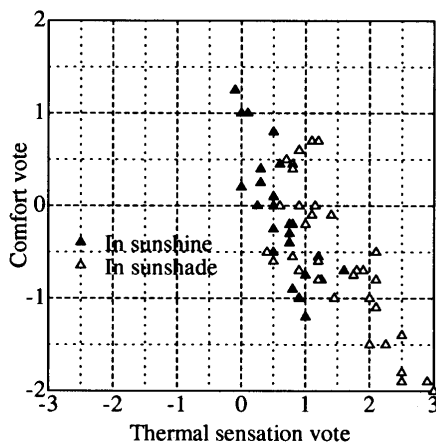


Fig. 4 Relation between thermal sensation vote and comfort vote

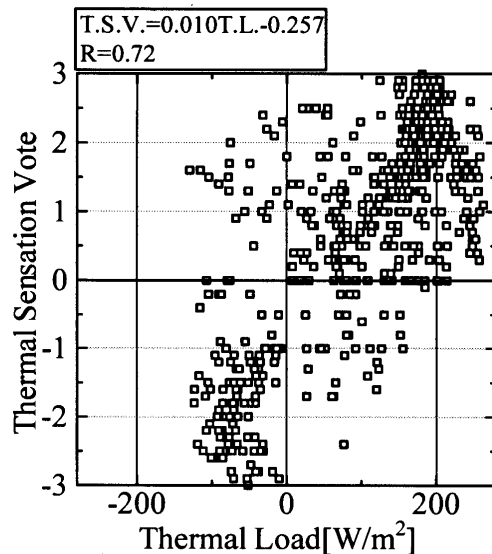


Fig. 5 Relation between thermal load and thermal sensation vote under steady state¹⁾

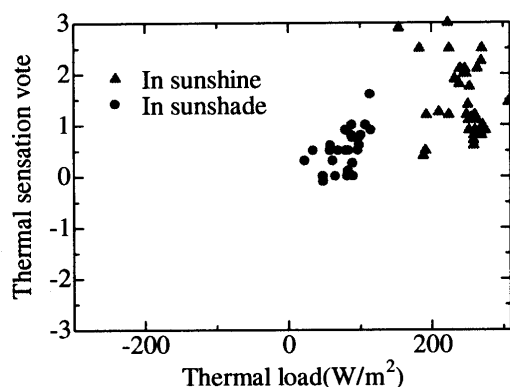


Fig. 6 Relation between thermal load and thermal sensation vote under change step like

5-2 結果2(実験②)

Fig7 に測定した酸素摂取量と心拍数の時間経過を示す。酸素摂取量と心拍数には高い相関があるという研究が報告されている⁵⁾、本研究では測定器装着への被験者の負担や屋外の測定による心的負担により、心拍数の測定に影響があらわれたことが考えられる、酸素摂取量と心拍数の間にはある一定の相関関係を示しているといえる。

次に、Fig8 に被験者実験における熱負荷量と代謝量の時間経過を示す。Fig8 より、歩行時の方が立位安静時より熱負荷量が高い、このことにより、熱負荷量が代謝量の増加に符号していることが分かる。測定時の天候は安定していて、全天日射量は平均 250 W/m² でほぼ一定であった。また、このときに測定された機械的仕事量は約 30W/m² でほぼ一定であった。なお Fig7, Fig8 とも測定データの安定のために実験開始後 10 分間のデータは考察の対象とはしていない。

6 結論

人体の感覚である温冷感⁶⁾は非定常状態において本研究の提案する熱負荷量によって予測が可能であると思われる。ただし、非定常下における温冷感には遅れが生じている可能性があり、また発汗の遅れが熱負荷量に影響していることが原因である可能性も示唆された。よって、非定常状態において温冷感を正確に予測するためには、熱負荷量の遅れを解明する必要がある。熱負荷量の遅れを解明するためには、非定常状態に移行してから定常状態に至るまでの生理量の変化を把握する必要がある。

7 謝辞

本研究にあたり、快くご協力いただいた被験者の方々、また、測定装置を貸していただいた大阪府立大学の清水教永先生に感謝いたします。

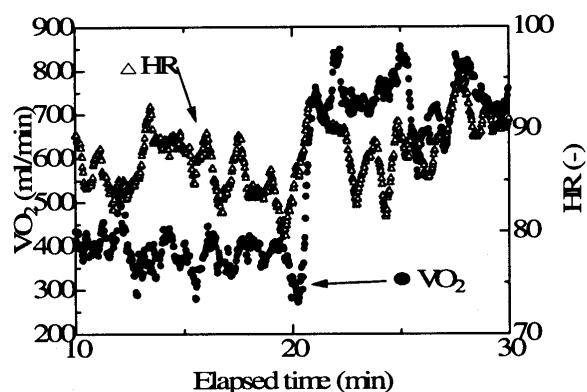


Fig. 7 Oxygen uptake and heart rate vs. time

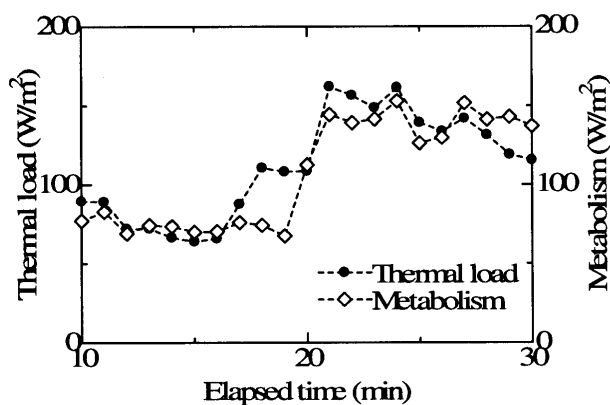


Fig. 8 Thermal load and metabolism vs. time

[参考文献]

- 1) Yoshida, A. and Sugioka, M., "Evaluation of thermal environment in Outdoor Space in Consideration of Human Comfort", Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Environment System, Tokyo, Japan, 2005, pp. 93-96
- 2) 温熱生理学 (中山昭雄編) 理工学社 (1981)
- 3) 宇田川ら, 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定 日本建築学会論文報告集 267, 83-90 (1978)
- 4) ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 8 (2001)
- 5) Tsubouchi et al, A Study on Estimation of Energy Consumption per Day through Heart Rate, Osaka Research Journal Physical Education No. 24, 30-38, (1986)