

微気象観測に基づく人体熱収支解析の試み

Field Observation and Analysis for Estimating Thermal Load on a Human Body

神田 学*、土屋 信夫**

by Manabu KANDA and Nobuo TSUCHIYA

In the outdoor thermal environment, thermal sensations of human are affected by many meteorological conditions. In this study, an attempt is made to provide a tool for systematically analyzing variations of outdoor human energy budget and thermal load as one kind of objective comfort indexes. One example of analysis is presented here and following results are obtained ; (1) The long wave radiation from the ground surface makes much effect to the radiative flux to a human body, and (2) A simple method of estimating the thermal load on a human body using the glove temperature is shown to be useful as for the 15 min averaged value.

Keywords: energy budget, human body, thermal load

1 序論

1.1 はじめに

著者の一人は、夏期の水面・森林等の気候緩和効果に着目して野外観測等を行ってきた(神田ら, 1991¹⁾)。その過程で、気温・湿度は大差ないにもかかわらず、人間の受ける温熱感がかなり異なるような状況を頻繁に経験した。例えば、沖縄のさとうきび畑では(森他, 1992²⁾)、畑の中外で同じ程度の不快指数であったが、畑の中が圧倒的に暑く感じた。言うまでもなく、人間の温感には、気温・湿度の他に周囲の放射や風などの影響を受けている。工学的に気候緩和効果等を論じるには、周囲環境の熱収支解析と同時に、人体の熱収支解析が必要であると考えられる。

1.2 客観的な温感指標とは

一般に、人間の五感微妙なもので、しかも個人差があるから、それを定量化することは難しい。万人共通の実用的な温感指標を作るというのは不可能であろう。しかしながら、その前段階として、人体にかかる負荷量を客観的かつ外的な入力条件として定義することは可能である(図-1参照)。例えば、空腹感を議論する場合には、(摂取量-排せつ量)が人体への負荷量として定義される。同様にして、人間の温感については、顕熱・潜熱・長波放射・受熱量などを差引きした正味の熱負荷量が客観的な指標として定義されよう。もちろん、最終的にはアンケート調査等を用いた被験者実験によって、この客観的物理指標をそれぞれ

* 正会員 工博 山梨大学講師 工学部土木環境工学科

** 学生員 山梨大学 工学部土木環境工学科

(〒400 甲府市武田4丁目3-11)

の個人に合わせた実用的な指標に変換する作業が必要である。しかしながら、熱収支解析を用いた物理的手法のみによって、多くの外的因子を統合してひとつの客観的指標を導出する意義は大きいと考える。

1.3 本研究の目的

人体の熱収支に関しては、快適な住環境づくりの視点から、おもに建築学分野で活発に研究が行われてきている(例えば、Gagge, 1976³⁾)。しかしながら、その多くは、気象因子の変動の少ない静穏な屋内環境を前提としており、屋外環境への応用については、1、2の研究例があるだけで(石井ら, 1988⁴⁾、中村・平岡, 1986⁵⁾)きわめて少ない。それは、微気象把握という大作業が伴うからであろう。本研究の目的は、微気象観測から得られたデーターを基に、人体の熱収支解析によって人体の受ける熱負荷量を推定する方法を提案することである。

2. 人体の熱収支 (熱負荷量の推定原理)

2.1 基礎方程式

人体の皮膚表面および衣服層の単位面積あたりの平均的な熱収支式を式(1)(2)に示す。ただし、衣服層の温度の非定常項は無視し、発汗による水蒸気は衣服でトラップされないものと仮定している。

$$F = -B - E + M \quad (1)$$

$$B = C + r - R \quad (2)$$

ここで、F: 人体の熱負荷量、B: 皮膚→衣服間の顕熱量、E: 皮膚→衣服間および衣服→大気間の潜熱量、M: 人体の代謝量、C: 衣服→大気間の顕熱量、r: 衣服の大気への赤外放射、R: 大気および周囲からの放射量(短波・長波を含む)。単位はいずれも(W/m²)である。上記の各熱輸送量は、以下の式(3)～(8)で表現される。代謝量Mについては、人間の活動量に応じて、一定値を与えることとする。今回は、M=80(W/m²)を仮定した(立位静止時の代謝量に相当)。

皮膚→衣服

$$B = C_p \rho d U (T_h - T_x) \quad (3)$$

$$= 1 / C_1 I_c (T_h - T_x) \quad (3)'$$

$$E = \epsilon \rho d U (\beta q_h - q_x) \quad (4)$$

$$= \epsilon / C_1 I_c C_p (\beta q_h - q_x) \quad (4)'$$

衣服→大気

$$C = C_p \rho \kappa U (T_x - T_a) \quad (5)$$

$$E = \epsilon \rho \kappa U (q_x - q_a) \quad (6)$$

$$r = \epsilon_x \sigma T_x^4 \quad (7)$$

$$R = \alpha_x (\gamma_1 S_T + \gamma_2 S_D + \gamma_3 \alpha_s S) + \epsilon_x (\gamma_4 L_a + \gamma_5 \epsilon_s L_s) + \sum \gamma_6 \epsilon_1 L_1 \quad (8)$$

ここで、T_a、T_h、T_x: 気温、平均皮膚温度、平均衣服温度(K)、q_a、q_x、q_h: 大気、衣服の比湿、皮膚温度での飽和比湿(g/g)、d: 皮膚→衣服間の物質輸送係数、κ: 衣服→大気間の物質輸送係数、U: 風速(m/s)、σ: ステファンボルツマン定数、ρ: 水蒸気密度(g/m³)、C_p: 空気、水蒸気の定圧比熱(J/g·K)、ε: 水蒸気潜熱(J/g)、S_T、S_D: 水平面直達および散乱短波放射(W/m²)、S: 全天日射(W/m²)、α_s、α_x: 地表面および衣服のアルベド、ε_s、ε_x、ε₁: 地表面、衣服、周囲物質の射出率、L_a、L_s、L₁: 大気、地表面、周囲物質の射出する水平面長波放射量(W/m²)、γ₁、γ₂、γ₃: 直達短波、散乱短波、反射日射に対する人体の形態係数、γ₄、γ₅、γ₆: 大気及び地表面の射出長波に対する人体の形態係数、β: 皮膚表面の湿潤度パラメーターをそれぞれ表す。式(3)'、(4)'中のI_cはクロウ値と呼ばれ、室内の温熱環境解析

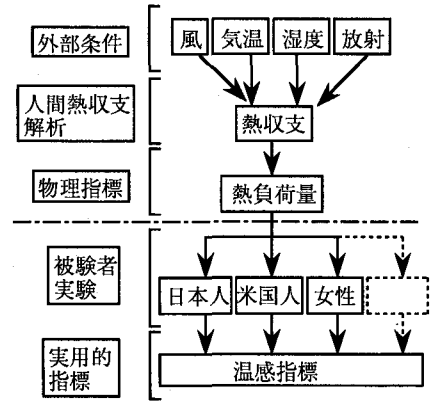


図-1 温感指標の考え方

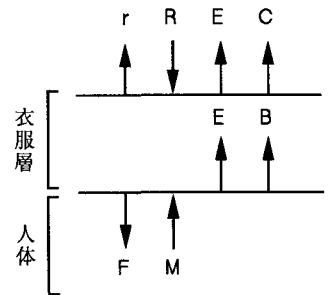


図-2 熱収支概念図

に頻繁に用いられており、衣服層の物質輸送抵抗に相当するパラメーターである。衣服の物質交換係数と同時に外部要因であるはずの風速の影響が丸め込まれて定数として定義されているため好ましくない。しかしながら多くのデータが存在するので今回はこの表記法を利用する。 C_1 は定数で0.015。

水蒸気の連続条件により、式(4)'、(6)から q_x を消去すると合成潜熱抵抗 D を用いて潜熱輸送量は以下のように表せる。

$$E = D (\beta q_h - q_a) \tag{9}$$

$$D = \epsilon \rho \kappa U / (1 + C_1 I_c C_p \rho \kappa U) \tag{10}$$

(a) 形態係数

通常、放射量は水平面フラックスとして測定されるから、受熱体の単位表面積当りの放射量に変換しなくてはならない。その変換関係は放射体と受熱体の幾何学的関係のみに依存し、これを形態係数と呼ぶ。人体や動物を含めた様々な物体の形態係数とその導出法については Monteith(1973)⁶⁾に詳しい。周囲に障害物のない2次元的な水平面上にたずむ人体を想定すると、 $r_1=0.25$ 、 $r_2, r_3, r_4, r_5=0.5$ となる。直達短波の形態係数だけが小さいのは、指向性があるためである。

表-1 クロー値

(b) 物質交換係数 (κ , I_c)

衣服-大気間の平均的な物質輸送係数は近似的に式(11)で表される (McAdams, 1954⁷⁾)。先に説明したクロー値の代表的な値を表-1に示す。

$$\kappa = 0.072 (U)^{-0.469} \tag{11}$$

着衣	$I_c(\text{知-})$
裸体	0.0
下着	0.1
夏服	0.3-0.5
春秋服	0.6-1.0
冬服	1.1-2.0

(c) 皮膚表面の湿潤パラメーター (β)

皮膚表面の湿潤度パラメーターは0~1の値をとり、0は完全乾燥時、1は完全湿潤時である。これは、人体の発汗作用と関係しているため、厳密には人体生理学のアプローチを必要とする。本研究では、人体の体温調節をモデル化した Gagge(1976)の2ノードモデルを用いることにする。これにより、 β は人体の平均皮膚表面温度あるいは熱負荷量の一価関数として表せるが、その詳細については複雑なので割愛する。

(d) 基礎方程式の物理的意味

式(1)(2)より、人体の熱負荷量は、式(12)で表せる。

$$F = -E - C - r + R + M \tag{12}$$

暑熱環境に於ける気温(T_a)、水蒸気量(q_a)の増加は不快指数の増加を意味するが、式(12)では顕熱 C 、潜熱 E による人体の放熱の減少を意味し、結果として熱負荷量の増加に反映されている。風速の影響は C 、 E に含まれる。また、 R により地面や周囲から受ける長波放射等の影響が加味されている。

2.2 熱負荷量の推定アルゴリズム

気温(T_a)、湿度(q_a)、風速(U)、直達短波(S_T)、散乱短波(S_D)、反射日射($\alpha_s S$)、上向き・下向き長波放射(L_s, L_a)を測定すると、基礎方程式中の未知変数は、衣服温度(T_x)、皮膚温度(T_h)、熱負荷量(F)の3つとなる。基礎方程式は実質的には式(2)、(12)の2つである。そこで、体温の完全恒温性を仮定し、体表面温度(T_h)を一定値とすれば、 F 、 T_x が式(2)、(12)の収束計算より求まる。今回の解析では、 $T_h=33(^{\circ}\text{C})$ を仮定した。逆に、完全変温性を仮定すれば、 $F=0$ となり、 T_x 、 T_h が求まる。

2.3 熱負荷量の簡易測定法

人体熱負荷量の算定には放射量成分の詳細な測定($S_T, S_D, \alpha_s S, L_s, L_a$)が必要となってしまう、実用的でない。そこで、簡易測定法としてグローブ球温度を利用することを考える。グローブ球の非定常項を無視する($F_g=0$ 、 F_g :グローブへの熱負荷量)とグローブの熱収支は式(13)となる。

$$0 = C_g + r_g - R_g \tag{13}$$

$$r_g = \epsilon_g \sigma T_g^4 \tag{15}$$

$$C_g = C_p \rho \kappa_g U (T_g - T_a) \tag{14}$$

$$R_g = \alpha_g (\gamma_{1g} S_T + \gamma_{2g} S_D + \gamma_{3g} \alpha_s S) + \epsilon_g (\gamma_{4g} L_a + \gamma_{5g} \epsilon_s L_s) + \sum \gamma_{6g} \epsilon_i L_i \tag{16}$$

C_g : グローブ-大気間の顕熱量、 r_g : グローブの大気への赤外放射、 R_g : 大気および周囲からの放射量。単位はいずれも(W/m^2)。 T_g : グローブ温度、 ε_g 、 α_g : グローブの射出率、アルベド。 $\gamma_{1g} \sim \gamma_{6g}$: 各放射成分に対するグローブの形態係数。グローブ温度と風速の2成分が測定されれば、 R_g は式(13)から求まるので測定する必要がない。2次元的な領域では、球と人体の各種形態係数は近似的に等しいと見なすことが出来る。また、衣服の射出率・アルベドをグローブのそれと同じと仮定すると、人体とグローブの放射項はほぼ等しいと見なせる($R \approx R_g$)。従って、煩雑な放射成分を測定することなく、気温(T_a)、湿度(q_a)、風速(U)、グローブ温度(T_g)の計4成分の測定で人体熱負荷量を推定できることになる。

3. 観測と解析の概要

観測点として周囲の障害物の影響の少ない山梨大学工学部環境棟屋上を選定した。観測日は、1993年9月28日で、移動性高気圧に覆われ晴天であり、甲府の最高気温は25.8℃であった。大学屋上面はコンクリート製である。

観測点に於ける測定項目を表-2に示す。グローブ温度計とは、直径15cmの黒つや消し塗装をした空洞の銅球の中に温度計を入れたものである。放射の影響を考慮した温度計測器である。

表-2 観測項目

観測項目	観測機器	観測間隔
気温・湿度	温湿度計	10秒
風速	三杯式風速計	"
グローブ温度	グローブ温度計	"
日射量	日射計(2)	3分
アルベド	日射計	"
放射量(上下)	放射収支計	"
散乱日射量	散乱日射計	"

4. 観測結果と考察

4.1 人体の熱収支

風速、湿度の時間変化を図-3に、気温、グローブ温度、衣服温度(推定値)の時間変化を図-4に示す。また解析結果として人体の熱収支の内訳を図-5に示す。顕熱と潜熱による放熱が同じ程度の寄与をしている。顕熱は、受熱放射量と風速を合成させたような変動パターンを示しているが、これは受熱放射に対して気温よりも衣服温度が敏感に反応することによる。潜熱量は、湿度よりもむしろ熱負荷量と同様な変動パターンを示しており、熱負荷量に対応した発汗状態(β)に強く依存していることが考えられる。熱負荷量は、30(W/m^2)強の値で、特に支配的な気象要素というのではなく、かなり複合的に決定されているようである。ただし、熱負荷量が潜熱放出のないグローブ温度変化と同様の変動特性を示していることから考えると、湿度の日内変化は熱負荷量にそれほど大きな影響を及ぼしていないと考えられる。

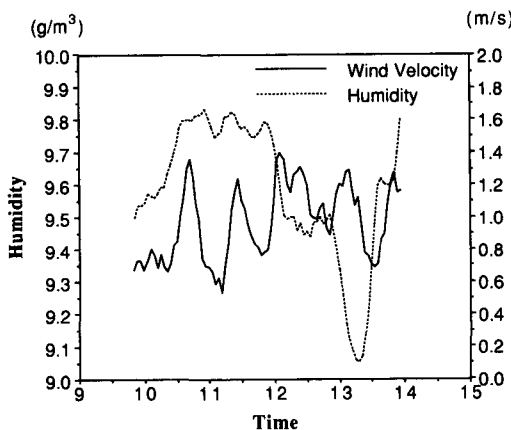


図-3 風速・湿度の時系列(15min平均値)

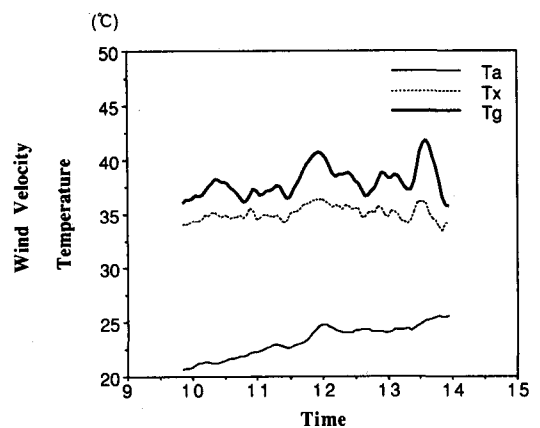


図-4 気温・グローブ温度・衣服温度の時系列(15min平均値)

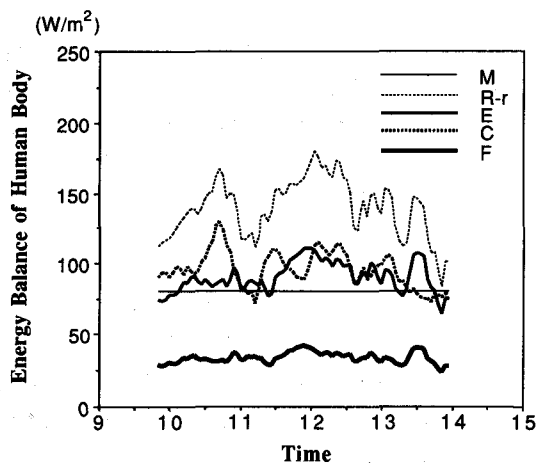


図-5 人間の熱収支の内訳 (15min平均値)

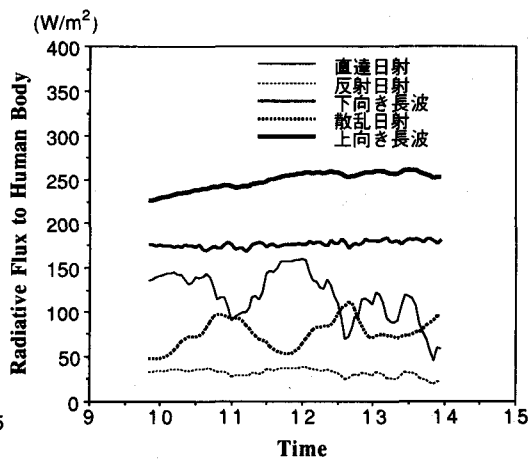


図-6 人体への入射放射量の内訳 (15min平均値)

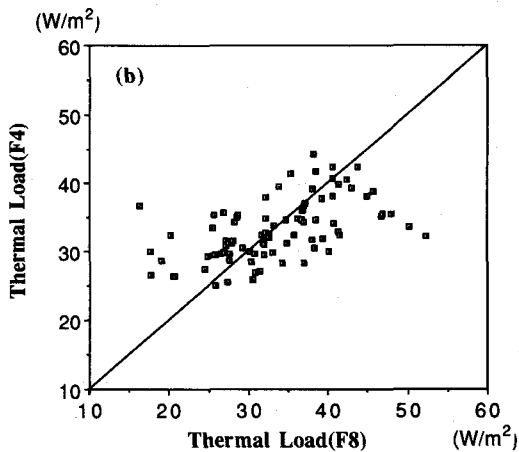
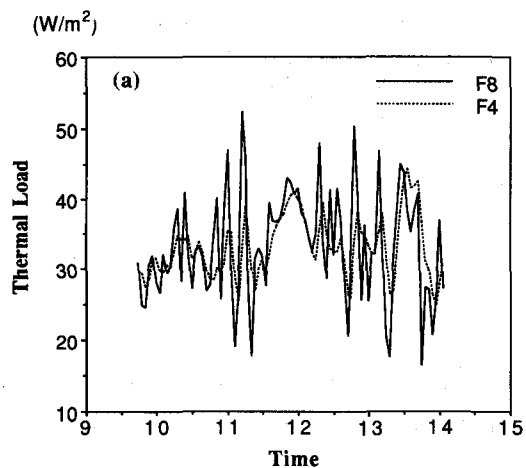


図-7 F4、F8の比較 (3min平均値) (a)時系列 (b)相関

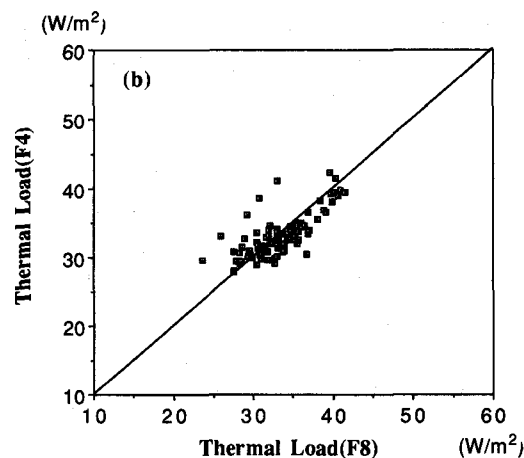
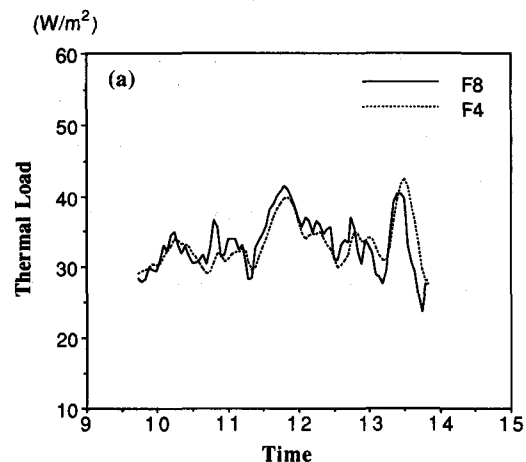


図-8 F4、F8の比較 (15min平均値) (a)時系列 (b)相関

4. 2 人体への入射放射成分の内訳

人体への入射放射（R）の各成分の内訳を図-6に示す（式（8）参照）。入射放射成分の中で最も寄与が大きいのは、地面からの上向き長波（ L_s ）である。このことは、地表面温度が、人体の熱負荷に大きな影響を及ぼすことを意味している（アスファルト上を歩くときわめて暑く感じるのはそのためであろう）。直達短波成分は0.25の形態係数がかかっているためそれほど大きくない。しかしながら、長波成分や散乱成分に比べて時間変動が激しいため、受熱放射量の数分から数時間の変動特性を決めている。雲の通過により直達短波成分の減少が見られるが、散乱短波の増加がそれを補償している。

4. 3 簡易測定法の有効性

2章で述べたように、放射を含む8成分の観測値から推定される人体熱負荷量（F8）と、放射成分の観測値を使わずグローブ球温度の情報を利用して4成分の観測値だけから推定される人体熱負荷量（F4）の比較を行う。図-7(a)(b)には3分間平均値の熱負荷量を示す。この日の熱負荷量は時間変動が激しい。F4の時間変化はF8と傾向的には良く一致しているが、グローブ温度の応答性が鈍いため外部環境の鋭い変化に追従できず、振幅がやや小さくなっている。そのため、F4、F8の相関を見るとややばらつきが大きい。図-8(a)(b)には15分間移動平均値の熱負荷量を示す。変動の激しい時には依然としてF4が数分程度の時間遅れを持つ傾向にあるものの、3分平均の場合に比べて、F4、F8の時系列変化の対応および両者の相関はかなり向上しており、十分実用に足る。通常の気象観測所で行われている気温・湿度・風速測定に加え、安価で簡単なグローブ球温度測定を付け加えるだけで、各所の人体熱負荷量が容易に推定可能である。

結論

- 1) 野外観測値から人体熱負荷量を推定する熱収支解析モデルを構築した。
- 2) 人体への受熱放射量の内、地表面からの放射の影響が相対的に大きいことが示された。
- 3) 15分平均値の人体熱収支解析については、放射成分の詳細な観測を行わなくともグローブ球温度を利用した簡易推定法で十分な精度を持つことが示された

謝辞

本研究は、文部省科学研究費奨励研究(A)05750483の補助を受けた。また、観測測器の多くは建設省土木研究所都市河川研究室の栗城室長・木内研究員の御好意により拝借した。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 神田学・稲垣聡・日野幹雄：夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達機構に関する数値解析による検討、水工学論文集 35、1991。
- 2) 森嶋典、神田学、日野幹雄：大気-植生系の交換メカニズムに関する実測による検討、第47回土木学会年次学術講演会第2部門 pp. 682-683(1992. 9)。
- 3) Gagge, A. P., Nishi, Y., and Nevins, R. G. : The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, ASHRAE Transaction, pp. 234-247, No. 2417, 1976。
- 4) 石井昭夫・片山忠久・塩月義隆・吉水久雄・安部嘉孝：屋外気候環境における快適感に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集、vol. 386, pp. 28-37, 1988。
- 5) 中村泰人・平岡久司：2次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究、日本建築学会計画系論文報告集、vol. 369, pp. 12-21, 1986。
- 6) Monteith, J. L. (1973): Principles of Environmental Physics, Edward Arnold。
- 7) McAdams, W. H. : Heat Transmission, McGraw-Hill Book Co. Inc., 1954。