

微気象観測に基づいた屋外における 人体の熱環境解析

神田 学¹・土屋信夫²

¹正会員 工博 山梨大学講師 工学部土木環境工学科(〒400 甲府市武田4-3-11)
²正会員 錦建設技術研究所 東京支社(〒103 中央区日本橋本町4-9-11)

屋外における人体の熱環境を評価するための一手法として、微気象観測データを基に、人体の熱収支解析から熱負荷量を算出する方法とその簡易推定法を提案した。本解析法を、山梨県内で実施した計4ケースの微気象観測データに適用し、その結果、人体熱収支および熱負荷に及ぼす、1)暑熱・寒冷環境の影響、2)コンクリート・植生の影響、3)衣服の影響、について論じた。

Key Words : energy balance, thermal load, human body, field observation

1. 序 論

(1) 屋外における人体の熱環境解析の必要性

人間の温熱感に関する研究は生気象学・建築学において活発に行われているが、その多くは屋内環境を対象としている。これは、我々が日常生活の大半を屋内で過ごすためであるが、一方で、屋外での体感温度予測の要望も高まっている¹⁾。屋外の温熱環境は冷暖房等による調節が効かず、屋内環境に比べ過酷であり、我々が身につけるその日の衣服量とも密接な関係がある。実測によれば²⁾、オフィス街に隣接した公園は、オフィス街より温度が低下し湿度が上昇するため不快指数には有意な差が生じないが、アスファルト路上を歩く時の灼熱感と、そこから一步踏み入った木陰の心地よさとの差は歴然としたものであり、これは言うまでもなく風・放射の影響である。従って、河川・公園・都市構造物等の熱的影響を定量的に評価するうえでも、屋外の微気象と人体を一体とした熱環境解析を行う必要性がある。

(2) 既存の研究

先述した様に、既存の研究は屋内環境を対象としているが、人体の熱収支解析に基礎をおいた理論は風・放射等の影響を考慮しているので屋外環境にも応用できる。人体熱収支解析の基本的発想はソビエトのBudyko³⁾によって与えられている。人体の熱収支に基づく温熱感指標の代表的なものにFanger⁴⁾の

予想平均温冷感(PMV)とGagge⁵⁾の新有効温度($E T^*$)がある。石井ら⁶⁾は屋外の温熱感についてアンケート調査を行い、これらの屋内指標が屋外でも有効であることを示唆している。人体の熱収支を屋外環境に適用した例は少なく、都市キャンピの暑熱環境を対象とした数値解析に限定されており(Burt, et. al.⁷⁾や中村・平岡⁸⁾)、様々な季節・場所における観測値に基づいた人体熱収支の把握が必要である。

(3) 本研究の目的

一般に、人間の温感微妙で、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。しかしながら、人体に出入りする様々な熱の内訳や人体にかかる熱負荷を客観的に把握することは可能であり、多くの外的因子を統合してひとつの客観的指標(熱負荷量)を導出する工学的意義は大きい。本研究の目的は、温感そのものを扱うのではなく、実測データに基づいた人体の熱収支解析により、諸々の外部パラメータ(屋外の微気象条件や衣服の状況)が人体に出入りする熱の内訳にどのような影響を及ぼすかを明らかにしようとするものである。

本研究は、計4ケースの現地観測データに基づき、屋外の人体熱収支に及ぼす、1)暑熱・寒冷気象の影響、2)コンクリートと植生の影響、3)衣服の影響、等を論じたものである。

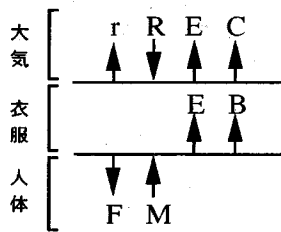


図-1 人体の熱収支概念図

表-1 クロー値

着衣	I_c (クロー)
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

2. 人体の熱収支

(1) 基礎方程式

本解析では、以下の仮定を行っている。

- 1) 屋内の熱収支解析同様、人体を直径15cmの黒球と見なす。その根拠は、受熱放射量の算定でグローブ球温度の情報を利用でき、普及し易い簡易測定法が可能になること(2.(2)参照)、しかも、グローブ温度自体が人間の温熱感とかなり良い対応関係にあり⁹⁾、人体形状との違いは近似的に無視し得ること、が挙げられる。大きな誤差要因としては、人体とグローブのアルベドの違いがある^{*)}。
- 2) 衣服層における熱・水蒸気の非定常項は、実測によれば比較的小さいので⁵⁾無視する。従って、人体-衣服-大気間において、熱フラックス・水蒸気フラックスはそれぞれ連続しなければならない。
- 3) 代謝量(M)は、人間の活動量に依存しており、立位静止時の値(80(W/m²))を仮定する。
- 4) 呼吸熱は神山¹⁰⁾に従い見積もったところ、厳寒期でも代謝量の1割にも満たないので、無視する。

以上の仮定に基づき、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それぞれ式(1),(2)に示す。また、その概念図を図-1に示す。

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

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

ここで、F:人体の熱負荷量、B:皮膚→衣服間の熱輸送量、E:皮膚→衣服間および衣服→大気間の潜熱輸送量、M:人体の代謝量、C:衣服→大気間の顕熱輸送量、r:衣服の大気への赤外放射、R:大気及び周囲からの放射量。単位はいずれも(W/m²)。上記の各熱輸送量は、以下の式(3)~(8)で表される

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

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

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

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

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

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

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

$$R = (1 - \alpha_x) (\gamma_1 S_T + \gamma_2 S_D + \gamma_3 \alpha_s S) + \epsilon_x (\gamma_4 L_a + \gamma_5 L_s + \sum \gamma_6 L_i) \quad (8)$$

ここで、 T_a 、 T_b 、 T_x :気温、平均皮膚温度、平均衣服温度(K)、 q_a 、 q_x 、 q_b :大気の比湿、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 の定圧比熱(J/g·K)、 ϵ :水蒸気潜熱(J/g)、 S_T 、 S_D :水平面直達及び散乱短波放射(W/m²)、 S :全日射(W/m²)、 α_s 、 α_x :地表面および衣服のアルベド、 ϵ_x :衣服の射出率、 L_a 、 L_s 、 L_i :大気、地表面、周囲物質の射出する水平面長波放射量(W/m²)、 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 :直達短波、散乱短波、反射日射に対する人体の形態係数、 γ_4 、 γ_5 、 γ_6 :大気、地表面、周囲物質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、をそれぞれ表す。

皮膚-衣服間の熱輸送量(B)は、顕熱・放射熱輸送量の両者を含んでいる。式(3)'、(4)'中の I_c はクロー値と呼ばれ、衣服層の物質輸送抵抗に相当するパラメータである。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や放射熱交換係数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が、多くのデータが存在するのでこの表記法を利用する。 C_1 は定数で0.155。

人体の発汗量(=潜熱輸送量:E)は、土壌や植物面からの蒸発の定式化と同様に β 法¹¹⁾により、顕熱量(C)は、バルク法により定義する。

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。

$$E = D \beta (q_b - q_a) \quad (9)$$

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

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。人体や動物等の様々な物体の形態係数については、Monteith(1973)¹²⁾に詳しい。周囲に障害物のない2次元水平面上の球体を想定すると、 $\gamma_1=0.25$ 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 、 γ_5 、 $\gamma_6=0.5$ 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。

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¹³⁾。また、先に説明したクロー値の代表的な値を表-1に示す。

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

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的アプローチを必要とする。本研究では、簡単のためBurt et al.⁷⁾に倣い、 β は人体の皮膚表面温度あるいは熱負荷量(2、(3)参照)の一価関数として表すことにする。

$$\beta = (T_h - 33)^2 / 16 \quad 33 < T_h < 37 \quad (12.a)$$

$$\beta = (F)^2 / 3600 \quad 0 < F < 60 \quad (12.b)$$

$$\beta = 1 \quad T_h > 37, F > 60 \quad (12.c)$$

$$\beta = 0 \quad T_h < 33, F < 0 \quad (12.d)$$

d) 基礎方程式の物理的意味

式(1),(2)より、熱負荷量は、式(13)で表せる。

$$F = -E - C - r + R + M \quad (13)$$

暑熱環境に於ける気温、水蒸気量の増加は不快指数の増加を意味するが、式(13)では顕熱、潜熱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) 熱負荷量の推定アルゴリズムと簡易測定法

気温、湿度、風速、直達短波、散乱短波、反射日射、上向き・下向き長波放射の計8成分を計測すれば人体の熱負荷が求まるが、放射成分の測定は煩雑・高価で実用的でない。そこで、簡易測定法としてグローブ球温度を利用する。グローブ球の非定常項を無視する($F_g = 0$, F_g :グローブの熱負荷量)とグローブの熱収支は式(14)となる。

$$0 = C_g + r_g - R_g \quad (14)$$

$$C_g = C_p \rho \kappa_g U (T_g - T_a) \quad (15)$$

$$r_g = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad (16)$$

$$R_g = \epsilon_g (\gamma_{4g} L_a + \gamma_{5g} L_s + \sum \gamma_{6g} L_i) + (1 - \alpha_g) (\gamma_{1g} S_T + \gamma_{2g} S_D + \gamma_{3g} \alpha_s S) \quad (17)$$

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/m²). T_g :グローブ温度, κ_g :グローブ→大気間の物質輸送係数, 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、気温、風速の3成分が測定されれば、 R_g は式(14)から求まるので直接測定する必要がない。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⁸⁾、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、湿度、風速、グローブ

温度の計4成分の測定で人体熱負荷量を推定できる。

(3) 外部パラメータを統合した客観指標

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(1),(2)の2つであるから、何らかの仮定を設けないと方程式系は閉じない。

そこで、人体への熱負荷量をゼロ(=常に熱平衡が成立)と仮定すれば、皮膚表面温度が計算できる。これは皮膚の完全変温性を仮定したことに相当する。一方、皮膚温度は変化しないと仮定すれば、見かけ上、熱収支の残差項が生じるわけであり、熱負荷量が計算できる。この場合は、皮膚の完全恒温性を仮定したことになる。上記のどちらかの仮定を設けることにより、式(1),(2)の未知変数は2つとなり、収束計算により解を求めることが出来る。いずれも同じ外部環境の潜在熱負荷量を別の視点から捉えた客観温熱指標である。屋内環境で使われる温感指標のうち、PMV⁴⁾は前者の発想から、ET^{*5)}は後者の発想から導出された指標となっている。

3. 観測の概要

暑熱・寒冷下の熱環境の特徴、コンクリートと植生域の熱環境の違いを比較検討するため計4ケースの実測を行った。各観測地点・観測日の概況を表-2に示す。測定方法・項目を表-3,4に示す。

4. 解析結果および考察

(1) 簡易測定法の有効性

観測1を例にとり、8成分から推定される人体熱負荷量(F_8)と4成分から推定される人体熱負荷量(F_4)の比較を行う。図-2には3分間平均値の熱負荷量を示す。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。図-3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はかなり良好である。以上より、15分以上の移動平均操作を前提とすれば、グローブ温度を用いた簡易測定法は十分実用的であると考えられる。

我々は、突然吹く一陣の風に特に強い冷涼感を感じたりするが、15分平均値では、そのような外部環境の急激な変化に対する人体の非定常反応を追うことはできない。この点は今後の検討事項としたい。

表-2 観測地点と観測日の概況

	条件	日時	場所	測定点数・高さ
観測 1	コンクリート 暑熱	1993.9.28 9時～16時	山梨大学 屋上	一点 測定高1m
観測 2	コンクリート 寒冷	1994.1.15 9時～9時	同上	一点 測定高1m
観測 3	植生 暑熱	1993.9.28 9時～17時	山梨県勝沼 町の葡萄畑	葡萄棚(1.7m) の上下各一点 測定高2.4m, 1m
観測 4	植生 寒冷	1994.3.15 17時～7時	山梨県御勅 使南公園	松林内と林外各 一点, 測定高1m

表-3 観測方法

観測項目	観測機器	サンプリング'
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	3分
アパード 放射量	日射計	"
散乱日射量	放射收支計	"
地中熱流束	散乱收支計	"
地表面温度	熱流計	"
	白金温度計	"

表-4 各観測地点での観測項目

観測地点 観測項目	1	2	3 棚上	3 棚下	4 林内	4 林外
気温・湿度	○	○	○	○	○	○
風速	○	○	○	○	○	○
グローブ温度	○	○	○	○	○	○
日射量	○	○	○	○	—	—
アパード 放射量	○	○	○	○	—	—
散乱日射量	○	○	○	○	○	○
地中熱流束	—	—	—	○	○	○
地表面温度	—	—	—	—	○	○

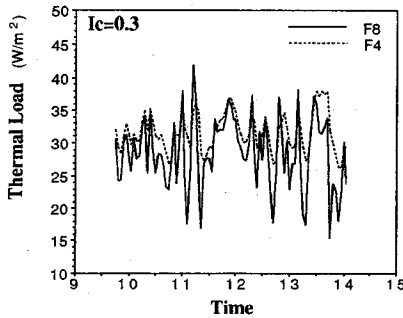


図-2 観測1におけるF4・F8の比較(3分平均)

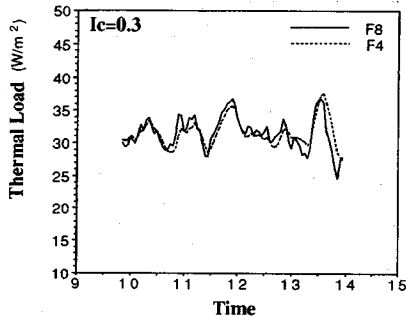


図-3 観測1におけるF4・F8の比較(15分移動平均)

(2) 熱負荷量と皮膚温度の関係

観測1を例に、熱負荷量をゼロと仮定して導出した皮膚温度と、皮膚温度を不変と仮定して導出した熱負荷量の比較を行う。図-4より両者は良好な線形

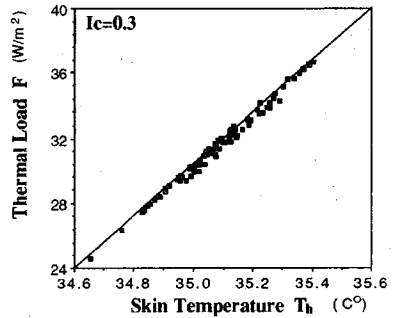


図-4 観測1における熱負荷量・皮膚温度の相関

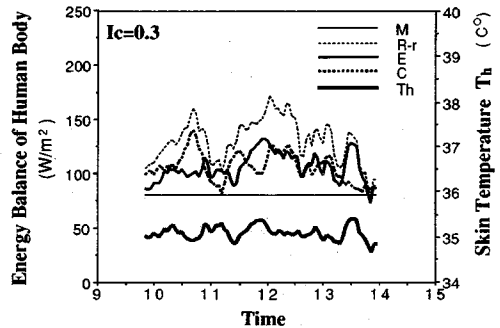


図-5 夏期の大学屋上(観測1)での人体熱収支の内訳熱負荷量を0に仮定した場合, I_c=0.3

関係にある。熱収支解析の内訳を比較してみる(図-5,6)。熱負荷量を算出する場合の潜熱・顕熱輸送量に比べ、皮膚温度を算出する場合の潜熱・顕熱輸送量のほうがわずかに大きくなっている。これは、熱負荷量をゼロとしている分だけ同一の代謝量・受熱放射量に見合う放熱量が大きくなるためである。しかしながら、その点を除けば、各熱収支項の変動パターンやそれらの内訳の違いはほとんど認められない。以上より、客観指標としてどちらを採用しても本質的に大差ないと判断される。以下では熱負荷量を用いた解析で考察を行う。

(3) コンクリート上の人体熱収支

a) 暑熱環境

風速、湿度の時間変化を図-7に、気温、グローブ温度、衣服温度の時間変化を図-8に示す。また解析結果として人体の熱収支の内訳を図-6に示されている。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な変動特性を示していることから考えると、今回の実験では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。

人体への入射放射の各成分の内訳を図-9に示す(式(8)参照)。人体のアルベドを0と仮定しているため、短波放射の寄与を多少過大評価している可能性はあるが、それにも関わらず、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。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が、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。

b) 寒冷環境

風速、湿度の時間変化を図-10に、気温、グローブ温度、衣服温度の時間変化を図-11に示す。また人体の熱収支の内訳を図-12に示す。正午前後を除き潜熱はほぼゼロである。これは皮膚表面の β がゼロとなっていることに対応しているが、その結果として、湿度は熱負荷量にほとんど影響を及ぼさない。熱収支各項の微小変動は主に風速変動に対応している。24時間を通じ衣服表面からの顕熱放出量が正味の受熱放射量を上回っているために、人体にかかる熱負荷量は常に負の値を示しており、その傾向は日射のなくなる夜間に特に著しい。

人体への入射放射の各成分の内訳を図-13に示す。最も寄与が大きいのは、暑熱環境下と同様、地面からの上向き長波であり、夜間においても大気放射を陵駕している。これは、日中における建築物への熱の蓄積が夜間に放出しているものと考えられる¹⁵⁾。

4) 衣服の影響

a) 暑熱環境

図-6(クロー値0.3)と図-14(クロー値2.0)の比較より、衣服を厚くすることにより、人体の熱負荷量が増加することが示される。このことは、服を着込めば暑く感じるという常識的な温熱感と一致する。熱収支の時間変化の内訳を比較してみると、クロー値の増加と共に受熱放射量は微減および大気→衣服間の顕熱放出量は微増する一方、蒸発潜熱量の放出が大幅に減少しており、これが熱負荷量を増大させる主要因となっている。

図-15には、異なるクロー値に対する皮膚表面の湿潤パラメータ β の時間変化を示す。クロー値の増加により皮膚表面の湿り度そのものは増加する。従って、式(4)'から明らかなように、衣服抵抗の増加による熱交換効率の低下が効いて、大気中への蒸発潜熱の放出が抑制され、その結果として熱負荷が増加している。熱負荷の増加に対応して皮膚表面はより湿ってくるということになる。暑熱環境下で衣服を着込むと皮膚表面の湿潤度が増すので、あたかも汗をより沢山かいたように錯覚しがちであるが、実際はその逆であることを示している。

図-16は異なるクロー値に対する衣服外表面温度(T_s)の時間変化を示す。 T_s はクロー値と共に増加しているが、その違いは最大でも約5℃である。 T_s の微増は、衣服抵抗の増加により式(3)'における衣服→皮膚間の熱輸送量が減少したためであり、正味の受熱放射量の微減および大気→衣服間の顕熱の増加に対応している。

b) 寒冷環境

図-12(クロー値0.3)と図-17(クロー値2.0)の比較より、衣服を厚くすることにより、人体のマイナスの熱負荷が軽減されることが示される。しかし、その熱収支の内訳は、暑熱環境下の場合と大きく異なる。発汗潜熱量はほぼゼロであり、衣服抵抗の大きい場合の日中に限りわずかな正值を示す。衣服抵抗の増加と共に正味の受熱放射量が増加する一方、衣服→大気間の顕熱量は大幅に減少しており、これがマイナスの熱負荷量を軽減する要因となっている。

図-18は衣服抵抗にともなう β の時間変化を表したものである。日中、衣服抵抗の大きい場合に限り、人体の熱負荷量の増加に対応して β はわずかに正の値をとる。当然の事ながら、寒冷環境下で汗を沢山かくには暑熱環境と異なり、衣服を着込んで熱負荷をあげ、湿潤度 β を高める必要がある。

図-19は異なるクロー値に対する衣服外表面温度の時間変化を示したものであるが、衣服外表面温度はクロー値の増加と共に減少しており、その差は最

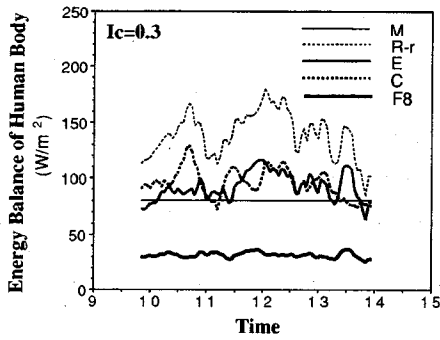


図-6 夏期の大学屋上（観測1）での人体熱収支の内訳
皮膚温度を一定に仮定した場合、 $I_c=0.3$

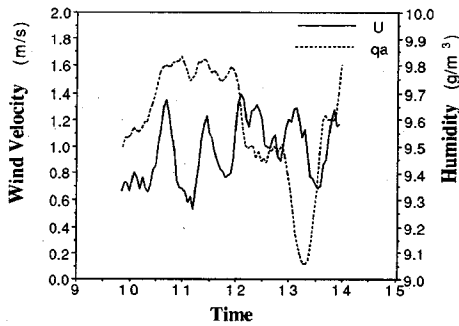


図-7 夏期の大学屋上（観測1）での風速・湿度の時系列

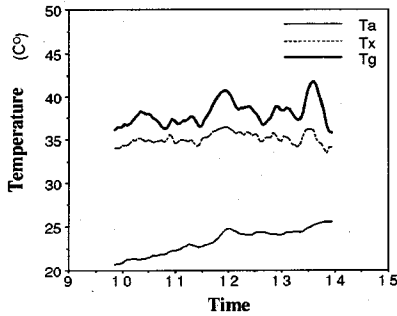


図-8 夏期の大学屋上（観測1）での気温・衣服温度・
グローブ温度の時系列

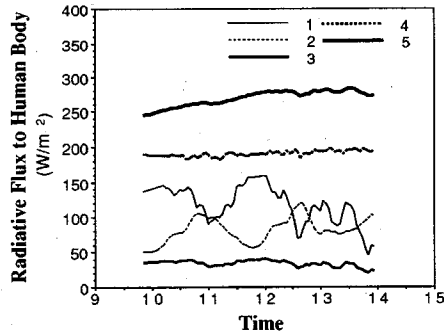


図-9 夏期の大学屋上（観測1）での人体への入射放射量
の内訳, 1: ST, 2: SD, 3: αS , 4: $L \downarrow$, 5: $L \uparrow$

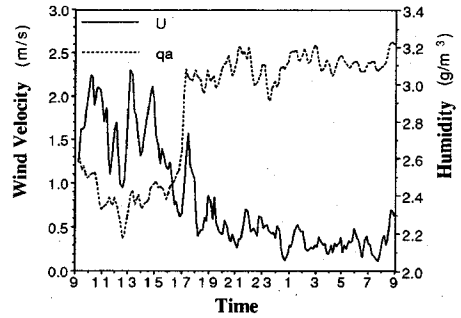


図-10 冬期の大学屋上（観測2）での風速・湿度の時系列

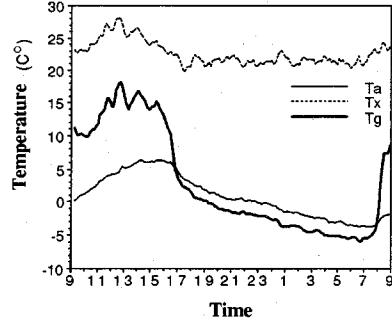


図-11 冬期の大学屋上（観測2）での気温・衣服温度・
グローブ温度の時系列

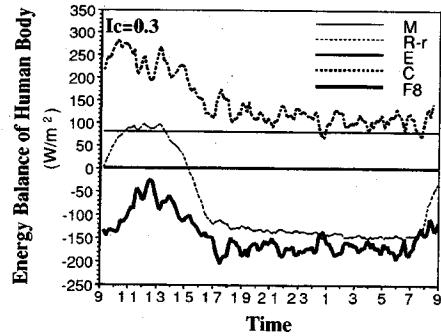


図-12 冬期の大学屋上（観測2）での人体熱収支の内
 $I_c=0.3$

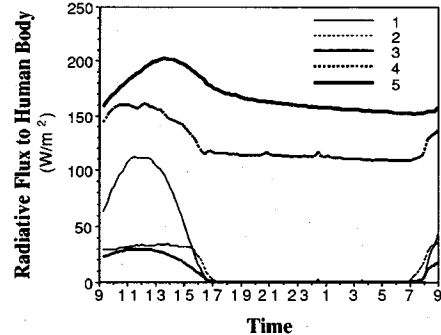


図-13 冬期の大学屋上（観測2）での人体への入射放射
量の内訳, 図中の番号は図-9と同じ

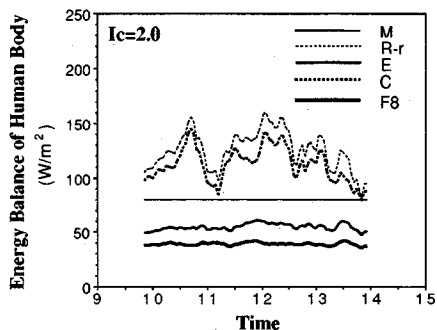


図-14 夏期の大学屋上（観測1）での人体熱収支の内訳， $I_c=2.0$

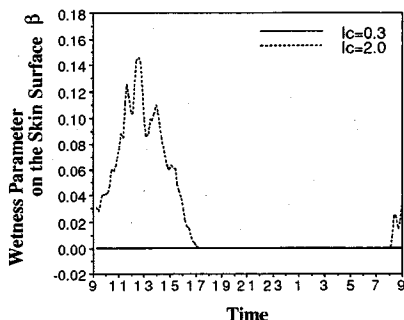


図-18 冬期の大学屋上（観測2）での異なるクロー値に対する皮膚表面の湿潤度パラメータ β の時系列

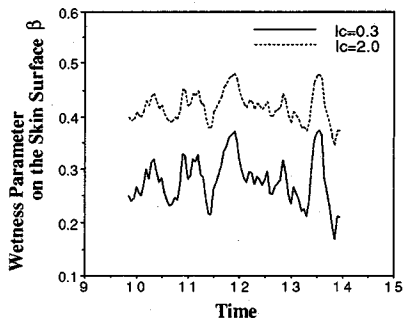


図-15 夏期の大学屋上（観測1）での異なるクロー値に対する皮膚表面の湿潤度パラメータ β の時系列

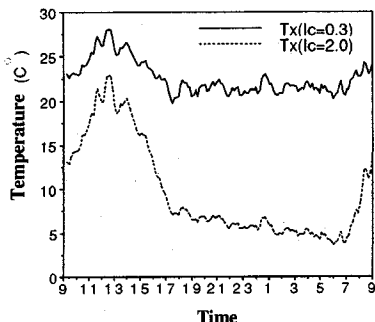


図-19 冬期の大学屋上（観測2）での異なるクロー値に対する衣服外表面温度 T_x の時系列

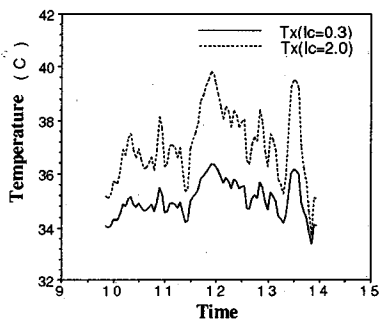


図-16 夏期の大学屋上（観測1）での異なるクロー値に対する衣服外表面温度 T_x の時系列

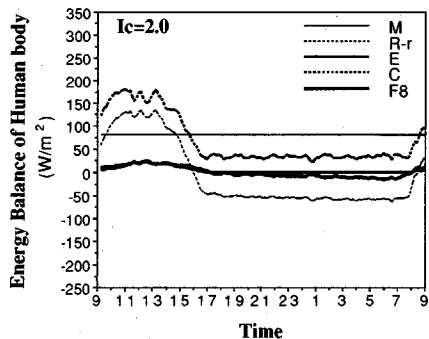


図-17 冬期の大学屋上（観測2）での人体熱収支の内訳， $I_c=2.0$

表-5 クロー値（小→大）の影響の違い

	暑熱環境	寒冷環境
R-r	微減	増加
E	激減	微増
C	増加	激減
F	増加	増加
T_x	増加	減少

大で15℃近くに及ぶ。これは、衣服抵抗の増加により式(3)に於ける皮膚から衣服表面への熱輸送量(B)が減少した事に対応している。すなわち、保温性が高まることにより、人体の受けるマイナスの熱負荷量が軽減される一方、衣服外表面は皮膚からの熱補給をたたれ放射冷却によって温度が激減する。衣服外表面の温度低下に対応して、大気→衣服間の顕熱量は減少、正味の受熱放射量は増加する。

ここで、寒冷環境と暑熱環境それぞれにおける人体熱収支に及ぼす衣服抵抗（クロー値）の影響の違いを表-5にまとめた。クロー値の変化に伴い、暑熱環境では潜熱輸送量が、寒冷環境下では顕熱輸送量が大きな影響を受けること、および両環境下で熱収支各項や衣服外表面温度が逆の増減傾向を示すことに留意しなければならない。

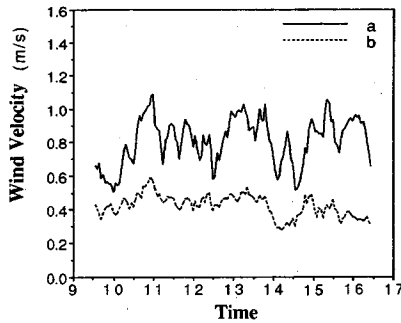


図-20 夏期の葡萄棚上・下(観測3)での風速の時系列
a:棚の上,b:棚の下

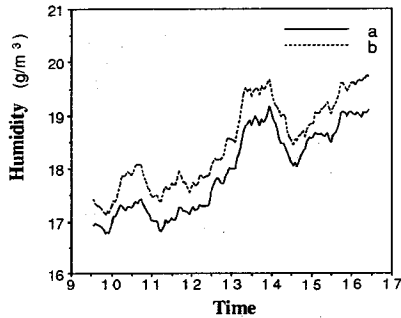


図-21 夏期の葡萄棚上・下(観測3)での湿度の時系列

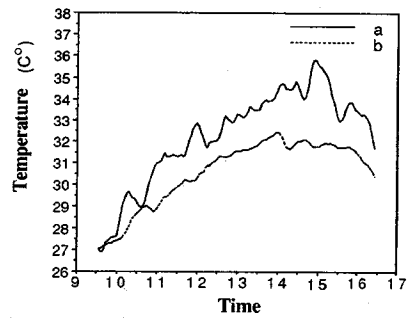


図-22 夏期の葡萄棚上・下(観測3)での温度の時系列

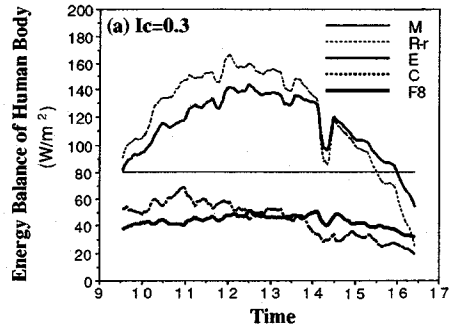


図-23 夏期の葡萄棚上(観測3)での人体熱収支の内訳、
 $I_c=0.3$

(5) 植生域における人体熱収支

a) 暑熱環境

葡萄棚の上・下における風速、湿度、気温の時間変化をそれぞれ図-20, 21, 22に示す。棚下は棚上よりも気温が $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 低く、絶対湿度は $0.5(\text{g}/\text{m}^3)$ 程度高く、風速は6割程度となっており、典型的な植生内外の微気象分布¹⁶⁾となっている。人体の熱収支の内訳を図-23, 24に示す。棚の上下ともに観測1に比べて顕熱よりも潜熱による放熱の寄与が圧倒的に大きい。これは、気温が観測1に比べて 10°C 程度高いため、皮膚温と気温の差が小さくなり、顕熱の寄与が相対的に下がったことによる。また、棚の上下とも熱負荷は正の値をとっているが、棚下の熱負荷の方が小さい。これは、棚下の受熱放射量が棚上の $1/2$ 程度に削減されているためである。棚下では棚上に比べて気温が $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 低いが、風速も小さくなっているため、結果として顕熱による放熱はむしろ棚上より小さくなっている。また、熱負荷量の減少に対応して皮膚の湿潤度が小さくなること、湿度が高いこと、風速が小さいことにより潜熱による放熱も棚下の方が小さくなっている。すなわち、植生内の人体の熱負荷の軽減には受熱放射の削減が決定的に効いており、気温・湿度の寄与は小さい。

b) 寒冷環境

松林内外における風速、湿度、気温、地表面温度の時間変化を図-25, 26, 27, 28に示す。夜間、風速が弱まり放射冷却が進行するが、林内では林外より気温が 1°C ほど、地表面温度は 4°C ほど高くなっており、森林の保温効果が現れている。絶対湿度は林外の方が大きく、風速には顕著な違いが見られない。林内外の人体熱収支をまとめて図-29に示す。林内外とも、顕熱による放熱と体表面からの放射冷却により、人体の熱負荷は負の値を示している。従って、発汗による潜熱はゼロで、湿度変動は人体熱収支に寄与しない。林内での負の熱負荷量は林外に比べて軽減されているが、これは顕熱による放熱が小さいこと、受熱放射量が大きいことの2つによる。顕熱量が小さいのは、風速に顕著な差がないことから、気温が高いためであろう。受熱放射量が大きいのは、植生による下向き長波放射が存在することと地表面温度が高いため上向き長波放射が大きいことによる。林内での人体への入射放射成分の内訳を図-30に示す。コンクリートの場合と異なり、下向きの長波放射量が上向き放射量より大きい。これは、放射冷却によって地表面温度が低下する一方、樹木からの下向き長波放射は供給され続けるためである。

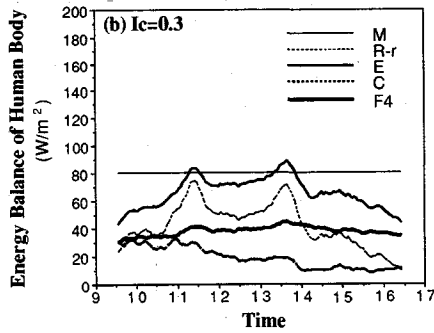


図-24 夏期の葡萄棚下(観測3)での人体熱収支の内訳、
 $I_c=0.3$

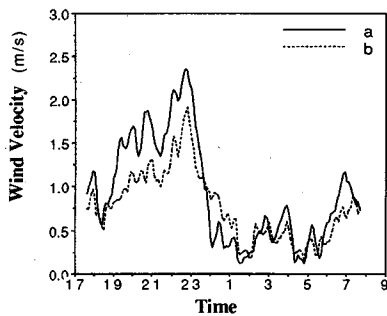


図-25 冬期の松林内外(観測4)での風速の時系列
a:松林内,b:松林外

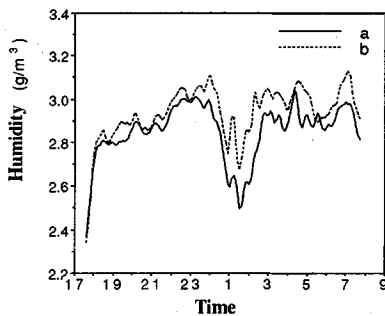


図-26 冬期の松林内外(観測4)での湿度の時系列

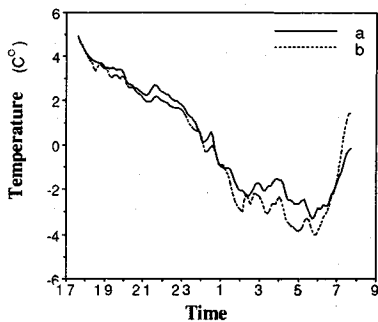


図-27 冬期の松林内外(観測4)での温度の時系列

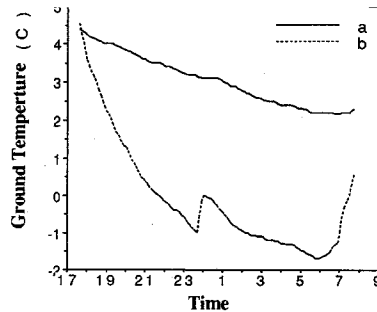


図-28 冬期の松林内外(観測4)での地表面温度の時系列

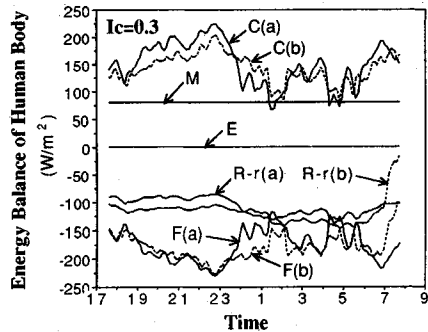


図-29 冬期の松林内外(観測4)での人体熱収支の内訳、
 $I_c=0.3$

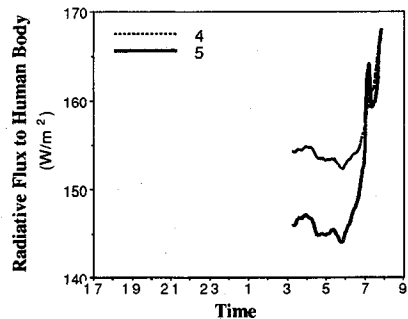


図-30 冬期の松林内外(観測4)での人体への入射放射量の内訳,1:ST,2:SD,3:αS,4:L↓,5:L↑

5. 結論

- 1) グローブ温度は15分より長時間の移動平均値を用いれば、受熱放射量の推定に十分な精度を持つ。
- 2) 熱負荷量と皮膚温度は外部条件を統合した温熱環境の客観指標としてほぼ等価である。
- 3) 暑熱環境条件下のコンクリート上では、受熱放射量が顕熱・潜熱による放熱を上回るため熱負荷量は正の値を示し、その時間変動パターンは風・放射などの影響を複合的に受けている。また、入射放射成分のうち、底面からの長波放射が最も大きい。

4) 寒冷環境条件下のコンクリート上では、潜熱の寄与がほとんどなく、顕熱による放熱が受熱放射を上回るため熱負荷量は負の値を示す。その変動パターンは湿度変動の影響を受けない。入射放射成分のうち底面からの長波放射が最も大きい。

5) 衣服量(クロー値)の増大に対し、暑熱環境では潜熱輸送量が、寒冷環境下では顕熱輸送量が大きな影響を受け、前者は減少、後者は増加する。

6) 暑熱環境下の植生内では、受熱放射量の低下により正の熱負荷が軽減される。風速の減少等により顕熱・潜熱による放熱はむしろ植生内の方が小さい。

7) 寒冷環境条件下の植生内では、受熱放射量の増加と顕熱による放熱の減少の2つの効果により負の熱負荷量が軽減される。また、下向き長波放射成分の方が、地面からの上向き長波放射よりも大きい。

謝辞：本研究は、財団法人不能育英会の研究助成、および文部省科学研究費奨励研究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御好意により拝借した。ここに厚く謝意を表します。

*1) 著者のその後の研究で、1) アルベドの異なるグローブを二つ用いれば、任意のアルベドをもつ物体の受ける受熱放射量が推定可能なこと、2) 人体を黒球と見なす場合、受熱放射量が2割強の過大評価を行うこと、等が明らかになっていることを付記する。

参考文献

- 1) 例えば、気象庁「天気予報に関する首都圏アンケート」、朝日新聞1.29.朝刊、1993。
- 2) 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、第35巻、pp.585-590、1991。

- 3) Budyko, M. I (内嶋・岩切訳)：気候と生命、東京大学出版会、1970。
- 4) Fanger, P. O. : *Thermal comfort*, Danish Technical Press, 1970。
- 5) Gagge, A. P., Nishi, Y., and Nevins, R. G. : The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, *ASHRAE Transactions*, pp.234-247, 1976。
- 6) 石井昭夫、片山忠久、塩月義隆、吉水久雄：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。
- 7) Burt, J. E., O'Rourke, P. A and Terjung, W. H. : The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature, *Int. J. Biometeor.*, Vol.26, pp.3-26, 1982。
- 8) 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。
- 9) Humphreys, M. H. and Nicol, J. F. : An Introduction in to Thermal Office Workers, *J. I. H. V. E.*, Vol.38, p.181, 1970。
- 10) 神山恵三：気象と人間、紀ノ国屋新書、1994。
- 11) 近藤純正：大気境界層の科学、東京堂出版、1982。
- 12) Monteith, J. L. : *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, 1973。
- 13) McAdams, W. H. : *Heat Transmission*, McGraw-Hill Book Co. Inc., 1954。
- 14) 片山忠久、塩月義隆、増田正一：放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集、Vol.381、pp.20-6、1986。
- 15) 浅枝隆、藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について、水文・水資源学会誌、Vol.5、No.4、pp.3-7、1992。
- 16) 神田学、日野幹雄：大気-土壌-植生系モデルによる数値シミュレーション、水文・水資源学会誌、Vol.3、No.3、pp.37-46、1990。

(1994.3.31 受付)

FIELD OBSERVATIONS AND ANALYSIS ON ENERGY BALANCE OF HUMAN BODY IN OUTDOOR ENVIRONMENTS

Manabu KANDA and Nobuo TSUCHIYA

In this study, an attempt is made to provide a tool for estimating energy balance and thermal load of human body as one of thermal comfort indexes in outdoor environments. This method is applied to four sets of meteorological field observation data. The characteristics of each component of human energy balance are examined in the following view points :

- 1) seasonal effect(summer and winter), 2) effect of ground cover (concrete and vegetation) and 3) effect of clothes.