都市の街路および開放空間における
熱放射環境が人体に及ぼす影響EFFECT OF THERMAL RADIATION ENVIRONMENT ON THE HUMAN BODY
IN AN URBAN CANYON AND OPEN SPACE

鄭 梈 元*, 堀越哲美**, 梅村茂樹***, 宮本征一****, 水谷章夫*****

Chang Won JEONG, Tetsumi HORIKOSHI, Shigeki UMEMURA,

Seiichi MIYAMOTO and Akio MIZUTANI

The purpose of this paper is to assess the solar radiation load on thermal comfort in outdoor thermal environments. An urban street canyon and an open space were selected as sites for field survey. Outdoor climatic conditions, subject's thermal sensation and skin temperatures were measured on the sites for a few day in summer, autumn and winter.

A modified mean radiant temperature was introduced to indicate the effect of solar radiation and radiation interchange between outdoor objects on the human body. An operative temperature and a standard operative temperature were calculated based on the modified mean radiant temperature. There are high correlation between the operative or standard operative temperature and thermal sensation or mean skin temperature. Those indices, especially the standard operative temperature, are considered to be effective in the outdoor environment.

Keywords : urban canyon, solar radiation, radiation interchange, thermal sensation, operative temperature, standard operative temperature

都市街路, 日射, 相互反射, 温冷感, 作用温度, 標準作用温度

1. はじめに

都市における屋外環境に対し, 熱環境実態の把握や熱環境の形成要因に関しては, 研究されつつあるが, 人体への日射受熱を考慮した体感的な熱環境評価法はまだ確立されていないのが実状であると考えられる。

人体の放射熱受授は蒸発や対流放熱に比べて, 量的には室内よりも屋外でその熱量が大きく, 特に日射の人体への影響が地物での反射も含めて重要である。熱放射が人体に及ぼす影響の表現を行うためには, 屋外環境における日射の影響を含む平均放射温度を求める必要がある。そのため, 日射と長波長の放射の影響を経路別に把握することがまず第一の課題である。

屋外環境における人体の熱収支に関する研究は, 山口ら¹⁾, Burtら²⁾, 中村ら³⁾の数値計算を含めた市街地内の幾何学的特性や材料の違いが人体の熱環境形成に及ぼす効果に関する研究などがあるだけで少ない。体感指標に関しては, 村上ら⁴⁾の研究は適風環境の指標に関するものであり, 中村⁵⁾は表現方法の研究で実測との対応は行っていない。屋外の人体の温熱感覚に関する心理面や行動科学的研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾では, その気象要素が呈示されるだけで指標化はされていない。

次に, 地物間での熱放射の相互反射を考える必要がある。人体を

含んだ熱放射に関する相互反射解析法に関して, 持田ら⁹⁾は Gebhart の Absorption Factor を用いて相互反射を考慮した “ふく射環境の評価法” を提案した。Net Radiation 法¹⁰⁾の結果を利用して平均放射温度を計算する Fanger の方法¹¹⁾があるが, 相互反射計算に人体は組み入れられていない。堀越ら¹²⁾は, 閉空間での熱放射環境の相互反射の解析を行うため, Net Radiation 法を用いて, 人体を含んだ相互反射を考慮した平均放射温度を求めた。さらに, 宮本ら¹³⁾は人体による熱放射の遮蔽の影響についても検討している。しかし, いずれも室内を対象とした研究であり, 屋外を対象とした研究は少ない。

そこで, 本研究では, 都市における建物が道路の両側に建つような街路空間と, ほとんど周囲に地物がない開放空間を取り上げ, 日射量と長波長放射の相互反射の影響を取り入れた人体熱収支に基づく温熱環境指標としての平均放射温度, 作用温度などを導き, それとともに, 被験者を用いた実験を行い, これらの指標と人体心理・生理反応との関係を調べ, 屋外熱放射環境が人体に及ぼす熱的影響を把握することを研究の目的とする。

2. 実験計画

実験は名古屋工業大学構内の建物とアスファルト舗装された道路で構成された街路空間と土の運動場の開放空間の2カ所で行った。

* 名古屋工業大学大学院社会開発工学専攻 大学院生・工修

** 名古屋工業大学社会開発工学科 教授・工博

*** 東邦ガス(株)技術部建築技術グループ 工修

**** 名古屋工業大学社会開発工学科 助手・修士(工学)

***** 名古屋工業大学社会開発工学科 助教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Build. Engineer, Toho Gas Co. Ltd, M. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

表1 実験概要および測定項目・方法

屋外実験日時	季節	年	測定日(天気)			
	夏季	1995	7/31(快晴)	8/1(快晴)	8/2(晴時々薄雲)	8/3(晴)
	秋季	1995	10/17(晴)	10/18(晴)	10/19(晴時々曇り)	
	冬季	1996	2/6(曇時々晴)	2/7(快晴)	2/8(晴時々薄雲)	
実験時間	街路地点		12:30-13:00	被験者数	7月31日	12名
	運動場		13:30-14:00		8月1日	8名
測定項目	乾球温度	アスマン通風乾湿計	8月2日		10名	
	湿球温度	アスマン通風乾湿計	8月3日		1名	
	風速	ヒラム風向風速計	10月17日		9名	
	水平面全天日射量	日射計	10月18日		9名	
	放射収支量	放射収支計	10月19日		10名	
	グローブ温度	グローブ温度計	2月6日		6名	
	各構成表面温度	赤外線放射温度計	2月7日		11名	
	天空率	立体角放射カメラ	2月8日		10名	
心理量	温冷感		直観評定尺度			
生理量	舌下温、皮膚温	熱電対(T型) 0.2mmφ	Hardy-DuBois 7点			
	着衣温	熱電対(T型) 0.2mmφ	Ramanathan 4点			
	体重減少量	デジタル台秤				
着衣量	季節	CLO値	衣服			
	夏季	0.57	半袖シャツ+ズボン+下着+靴下+靴			
	秋季	0.68	長袖セータ+長袖シャツ+ズボン+下着+靴下+靴			
	冬季	1.14	厚きコートのジャケット+長袖セータ+長袖シャツ+ズボン+下着+靴下+靴

図1 街路空間における測定地点

図2 屋外実験手順

季節別に人体の熱収支に関わる温熱環境要素測定と、温冷感、皮膚温の心理生理反応を測定する実験を行った。実験は1995年7月から1996年2月までの間に、夏季・秋季・冬季から連続した晴または快晴の比較的静穏な各3日～4日を選んで行った。夏季に4日としたのは、装置と被験者の都合によるものである。温熱環境要素と人体反応の測定方法を表1に示す。天空率は、立体角投射法則に基づいて、正射影魚眼レンズを用いた写真法¹⁴⁾により、フィルム面上に投影された円の面積に対する天空部の面積の比の計測より、直接に求めた。温冷感は土川ら¹⁵⁾の直線評定尺度を用い、10分間隔に計測した。各測定開始前と終了後、体重減少量を計測した。平均皮膚温はHardy-DuBoisの7点¹⁶⁾、平均着衣温はRamanathanの4点¹⁷⁾の測定により求めた。着衣は各季節における大学生の平均的な着装状態から選んだ。着衣量はASHARE¹⁸⁾のデータ及びMcCulloughら¹⁹⁾が提示した算出法により求めた。実験の被験者は1回5名から12名の健康な20代の男女大学生について心理反応の測定を行い、被験者の1名について生理的反応の測定も行った。

実験は図2に示すように、被験者をあらかじめ一定な温湿度（通常実現されている条件、夏季：26℃、50±10%、秋季：22℃、50±10%、冬季：20℃、35±5%、静穏気流）の室内で20分間安静にさせ、街路空間へ移動し、日向で太陽に向う立位姿勢で、30分間(12:30-13:00)曝露の後、室内へ戻り20分間安静にさせた。次に開放空間へ移動し、30分間(13:30-14:00)曝露した。

3. 屋外における平均放射温度算出法

本研究では、日射を含む熱放射環境の影響を中心に扱うため、風速が比較的静穏な日を選んだ。また、湿度は季節によって異なるが、一つの季節の実験の中では、おおよそ一定と考えることとした。そこで、本研究では、熱放射環境を対象とする立場から、体感指標として、作用温度²¹⁾および標準作用温度²²⁾を用いることとした。

屋外における日射と熱放射の相互反射の影響を含んだ平均放射温度を以下のように求めた。計算に際して、次のような仮定を行った。

幾何学的に複雑な建築外部空間に対して、中村²³⁾による空間を多分割して単純モデル化して熱放射解析を行う方法に従い、図3に示すように、街路空間と、上部の半円の天空面に囲まれている空間との間に仮想面を考え、2つの閉空間として分割する。それぞれの閉空間について、半透明体を共有した二つの閉空間とすることにより、解析可能な単純閉空間モデルに還元することができる。

東西方向の街路空間では、図3のように、南北の建物によって天空が区画される。その面を、放射率、反射率、吸収率ともに、0で、透過率1の一面の面と考え、これを仮想天空面、また上部の半円の天空面は、放射率1の視野天空面と呼ぶことにする。したがって、仮想天空面（放射率=吸収率=反射率=0、透過率=1）を共有する、街路空間と、視野天空面（放射率=1）で囲まれる空間の2つの閉空間であると仮定し、半透明面を含む閉空間における熱放射の解析を行う。人体は直方体としてモデル化する。その人体は仮想天空面と、南北の建物と道路の東西に無限に長い三つの面で囲まれていると考える。すなわち2次元空間で取り扱う。また、開放空間は地表面と天空面が無限に平行であると仮定した(図3)。

以上の仮定の下で、以下のように相互反射を考慮し、(a)長波長放射と(b)日射について経路別に算定を行い、最終的に(c)平均放射温度

図3 街路と開放空間における人体放射熱収支の模式図

と作用温度を求めた。

(a) 長波長放射

大気放射 B_{atm} は Brunt の実験式²⁴⁾を用い、地上付近の気温と水蒸気圧より、次式によって求めた。

$$B_{atm} = (0.51 + 0.076\sqrt{e}) \sigma (t_a + 273.15)^4 \quad (1)$$

ただし、

σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($=5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$)

e : 水蒸気圧 [hPa]

t_a : 気温 [$^{\circ}\text{C}$]

仮想天空面への入射放射 Q_{As} は天空の放射率を 1 とし、絶対温度 0 [K] とすれば、反射は考えなくてよいので、

$$Q_{As} = B_{atm} \quad (2)$$

次に、人体と環境との間の放射熱交換量は、Net Radiation 法を用いれば、街路側に対して、次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} -1 & \psi_{1-2}\rho_{L1} & \psi_{1-3}\rho_{L1} & \psi_{1-4}\rho_{L1} & \psi_{1-s}\rho_{LS} \\ \psi_{2-1}\rho_{L2} & -1 & \psi_{2-3}\rho_{L2} & \psi_{2-4}\rho_{L2} & \psi_{2-s}\rho_{LS} \\ \psi_{3-1}\rho_{L3} & \psi_{3-2}\rho_{L3} & -1 & \psi_{3-4}\rho_{L3} & \psi_{3-s}\rho_{LS} \\ \psi_{4-1}\rho_{L4} & \psi_{4-2}\rho_{L4} & \psi_{4-3}\rho_{L4} & -1 & \psi_{4-s}\rho_{LS} \\ \psi_{s-1}\rho_{LS} & \psi_{s-2}\rho_{LS} & \psi_{s-3}\rho_{LS} & \psi_{s-4}\rho_{LS} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{L1} \\ R_{L2} \\ R_{L3} \\ R_{L4} \\ R_{LS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma\epsilon_{L1}T_1^4 \\ -\sigma\epsilon_{L2}T_2^4 \\ -\sigma\epsilon_{L3}T_3^4 \\ -(\sigma\epsilon_{L4}T_4^4 + t_4Q_4) \\ -\sigma\epsilon_{LS}T_s^4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、

ψ_{i-j} : 第 i 構成面より第 j 構成面及び人体への形態係数 [n.d.]

ρ_{Li} : 第 i 構成面の反射率及び人体の反射率 [n.d.]

ϵ_{Li} : 第 i 構成面の放射率及び人体の放射率 [n.d.]

R_{Li} : 第 i 構成面の長波長放射による Radiosity [W/m^2]

T_i : 第 i 構成面の表面温度及び人体の表面温度 [K]

t_4 : 第 4 構成面の透過率 [n.d.]

各面と面との間の形態係数、直方体と長方形面との形態係数²⁵⁾がすでに求められていることより、本研究では、人体モデルとして直方体 ($0.4\text{m} \times 0.2\text{m} \times 1.2\text{m}$) を用いた。この形態係数と表 2 に示すような反射率、放射率、透過率を用いれば、長波長 Radiosity、長波長平均放射温度 MRTn_{long} が求められる。

表2 各構成面の長波長放射率と日射反射率²⁶⁾

構成面と人体	長波長放射率	日射反射率
北側建物面	0.90	0.40
南側建物面	0.90	0.40
地表面	0.90	0.20
天空	1.00	1.00
人体	0.98	0.29

$$\text{MRTn}_{long} = \sum_{i=1}^5 T_{bi} \psi_{s-i} \quad (4)$$

$$T_{bi} = \sqrt[4]{R_{Li}/\sigma} \quad (5)$$

ただし、

T_{bi} : 第 i 構成及び人体の相当黒体温度 [K]

(b) 日射

地表面へ入射する水平面直達日射量 J_{dn} [W/m^2] と、仮想天空面への入射する拡散日射量 E_{sky} [W/m^2] は全天日射量観測値より、直散分離を行い、求めた。長波長の場合と同様に、日射による人体と環境との間の放射熱交換量を求めた。

$$\begin{bmatrix} -1 & \psi_{1-2}\rho_{S1} & \psi_{1-3}\rho_{S1} & \psi_{1-4}\rho_{S1} & \psi_{1-s}\rho_{SS} \\ \psi_{2-1}\rho_{S2} & -1 & \psi_{2-3}\rho_{S2} & \psi_{2-4}\rho_{S2} & \psi_{2-s}\rho_{SS} \\ \psi_{3-1}\rho_{S3} & \psi_{3-2}\rho_{S3} & -1 & \psi_{3-4}\rho_{S3} & \psi_{3-s}\rho_{SS} \\ \psi_{4-1}\rho_{S4} & \psi_{4-2}\rho_{S4} & \psi_{4-3}\rho_{S4} & -1 & \psi_{4-s}\rho_{SS} \\ \psi_{s-1}\rho_{SS} & \psi_{s-2}\rho_{SS} & \psi_{s-3}\rho_{SS} & \psi_{s-4}\rho_{SS} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{S1} \\ R_{S2} \\ R_{S3} \\ R_{S4} \\ R_{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{S1}J_{vs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{S3}J_{dn} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\rho_2=0$ より、 $R_{S2}=0$

$$R_{S4} = E_{sky} \quad (7)$$

ただし、

ρ_{Si} : 第 i 構成面及び人体の日射反射率 [n.d.]

R_{Si} : 第 i 構成面の日射による Radiosity [W/m^2]

J_{vs} : 南鉛直面での直達日射量 [W/m^2]

J_{dn} : 地表面での水平面直達日射量 [W/m^2]

E_{sky} : 仮想天空面への入射する拡散日射量 [W/m^2]

開放空間に対しては、壁面がないことより、 $\phi_{1-j}=\phi_{2-j}=0$ 、 $T_1=T_2=0$ を用いて、街路と同様に解けば、求められる。

(c) 平均放射温度 MRTn 及び作用温度 OTn

以上より、各構成面からの長波長放射による Radiosity, 日射による Radiosity, そして直接人体に当たる直達日射から、相互反射の影響を入れた人体に対する平均放射温度 MRTn は次式で表せる。

$$\text{MRTn} = \left\{ \left(\sum_{i=1}^5 \alpha_{Li} \phi_{s-1} R_{Li} + \sum_{i=1}^5 \alpha_{Si} \phi_{s-1} R_{Si} + J_{dn} F_p A_s \right) / \sigma \right\}^{1/4} \quad (8)$$

α_{Li} : 第 i 構成面の長波長吸収率 [n.d.]

α_{Si} : 第 i 構成面の短波長吸収率 [n.d.]

A_s : 人体の日射吸収率 [n.d.]

F_p : 人体への直射投射面積率²⁶⁾ [n.d.]

作用温度 OTn の算定は次式を用いた。

$$\text{OTn} = (h_c T_a + h_r \text{MRTn}) / (h_c + h_r) \quad (9)$$

h_c と h_r については、直方体に対する 2 次元流の対流熱伝達率の実験式²⁷⁾より、人体の横幅に当たる直方体の体表寸法値を与えて導いた人体の対流熱伝達率と、放射熱伝達率は堀越の式²⁰⁾を用いた。

$$h_c = 12.2 V^{0.66} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (10)$$

$$h_r = 5.1 \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (11)$$

ただし、

V : 風速 [m/s]

また、標準の着衣量と総合熱伝達率を用い、実環境を風速 0.1m/s, 着衣 0.6clo の標準状態に換算して等価比較するため、標準作用温度 SOTn を用いることとし、次式で求めた。

$$\text{SOTn} = (1 - (k_s/k_o)) t_{sk} + (k_s/k_o) \text{OTn} \quad (12)$$

$$k_s = h F_{cl} \quad (13)$$

$$k_o = h_s F_{cls} \quad (14)$$

ただし、

h : 総合熱伝達率 [W/m²°C]

F_{cl} : 着衣の伝熱効率 [n.d.]

h_s : 標準総合熱伝達率 [W/m²°C]

F_{cls} : 標準着衣の伝熱効率 [n.d.]

t_{sk} : 平均皮膚温 [°C]

4. 人体の経路別熱収支

人体の経路別放熱量は、山口ら¹⁾の方法に準じて、次式によって求めた。

4.1 対流放熱量 C

対流放熱量は次式を用いた。

$$C = h_c F_{cl} (t_{sk} - t_a) \quad (15)$$

C : 対流(受)放熱量 [W/m²]

4.2 放射放熱量 R

放射放熱量は次式を用いた。

$$R = h_r F_{cl} (t_{sk} - \text{MRTn}) \quad (16)$$

R : 放射(受)放熱量 [W/m²]

4.3 水分蒸発量放熱量 E

人体用台秤を用いて体重減少量 Δm を用いて計算した²²⁾。

$$E = 0.58 \Delta m / A_D \quad (17)$$

$$A_D = 71.84 \times 10^{-4} W^{0.425} H^{0.725} \quad (18)$$

ここで、

E : 水分蒸発放熱量 [W/m²]

Δm : 体重減少量 [g/h]

A_D : Hardy-DuBois の全体表面積²⁸⁾ [m²]

W : 体重 [kg]

H : 身長 [cm]

4.4 呼吸による顕熱放熱量 C_{res}

次式を用いた¹¹⁾。

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - t_a) \quad (19)$$

5. 結果

5.1 各実験日の気象条件

各実験日の気象条件測定結果を表 3 に示す。人体曝露 30 分間の平均である。気温と湿度は一部を除き、季節内では比較的差は小さい。水平面全日射量、平均放射温度 MRTn は全般的に開放空間より街路空間の方が少し高い傾向を示した。風速は夏季に開放空間の方が若干速い。

5.2 人体へ入射する経路別放射熱量

人体へ入射する経路別放射熱量を図 4 に示す。全般的に、同じ実験日であれば拡散日射量と大気放射量が街路より、開放空間の方が大きい。それは主に天空率の差異によるものである。また長波長放射量は、主に地面のみの開放空間より、建物に囲まれている街路の方が高い傾向が見られる。また人体へ入射する各放射量の合計が開放空間より、街路の方が大きい。それに比べて、開放空間では、放射熱が天空に向けて放射される量が多い。

5.3 人体の経路別放熱量

図 5 に人体の放熱式より算出した経路別放熱量を示す。蒸発放熱量は夏、秋、冬の順に小さい。放射放熱量は夏季の場合、負の値、すなわち、受熱となった。秋・冬季では放熱側である。対流放熱量もほぼ同じ傾向が見られる。夏季では、失われる水分蒸発放熱量が多く、熱放射は受熱側になっている。反対に、冬季では、水分蒸発放熱量が少なくなる。顕熱では、放射より対流放熱量が大きい。秋季では、ほぼ夏季と冬季と間の値を示している。

5.4 皮膚温・舌下温の時間変動

舌下温と平均皮膚温の時間変動を図 6 に示す。平均皮膚温は冬季が 34°C 以下の値を示した反面、夏季と秋季はほぼ 34°C から 37.5°C

表 3 各実験日の気象条件測定結果

実験場所	実験日	気温[°C]	絶対湿度[g/kg]	風速[m/s]	平均放射温度[°C]	全日射量[W/m ²]
街路空間	7月31日	36.0	14.9	0.7	49.9	652
	8月1日	35.8	13.4	0.7	53.0	814
	8月2日	34.9	16.3	0.9	51.8	757
	8月3日	36.0	14.9	1.3	54.1	660
	10月17日	25.9	7.1	0.9	35.0	611
	10月18日	25.8	9.8	0.4	34.1	487
	10月19日	23.4	8.4	0.8	29.4	273
	2月6日	2.5	3.0	1.7	8.8	283
	2月7日	6.0	2.4	1.2	12.9	476
	2月8日	6.7	2.8	0.5	11.3	374
運動場	7月31日	35.5	15.5	1.5	39.3	608
	8月1日	35.7	14.5	1.2	41.0	720
	8月2日	34.8	16.5	1.3	40.1	608
	8月3日	35.7	14.8	1.6	44.2	708
	10月17日	26.1	7.3	1.2	23.3	496
	10月18日	25.8	9.3	0.6	22.1	438
	10月19日	23.7	8.2	1.1	24.7	339
	2月6日	2.7	2.7	1.8	-2.7	329
	2月7日	7.0	2.3	2.1	4.2	482
	2月8日	7.6	2.6	0.8	4.9	482

図4 人体へ入射する経路別放射熱量

図5 人体の各経路別放熱量 (放熱を正とする)

図6 舌下温と平均皮膚温の時間的変動

図7 曝露開始時を基準とした平均皮膚温の時間的変動

図8 温冷感の時間的変動

の間の値を示している。また、冬季の平均皮膚温は街路空間より開放空間の方が低い傾向が見られ、平均放射温度と対応している。特に冬季の2月6日の舌下温が街路と開放空間両方とも、33℃前後の低い値を示している。

図7に曝露開始時を基準とした平均皮膚温の時間的変動を示す。夏季と秋季の場合、曝露開始から緩やかな下降傾向を示したが、冬季の場合はその変化度が小さい。街路では、夏季より秋季の方が皮膚温の降下度が大いだが、開放空間では夏季の降下度が大い。

5.5 温冷感の時間的変動

図8に温冷感の時間的変動を示す。なお、直線尺度は、寒いの極限を0、暑いの極限を100の任意尺度として数値を表示した。街路、開放空間両方とも、夏季の温冷感は全般的に熱的中性（暑くも寒くもない）より暑い側である。夏季は温冷感が実験開始後、徐々に上昇する反面、冬季は下降する傾向を示した。

6. 考察

6.1 人体熱授受

人体へ入射する経路別各放射量の合計と長波長放射量が開放空間より、街路の方が大きいのは、街路空間の構成材料及び幾何学的特性による再放射及び相互反射の影響が出たものと考えられる。

図9 平均皮膚温と温冷感との関係

6.2 平均皮膚温・舌下温

冬季の場合、平均皮膚温が変化しないのは、寒冷適応して末梢部皮膚温が低いレベルにあったので、屋外で曝露されても、それ以上の低下が見られず、むしろ場合によっては、日射により上昇したものもあると推察される。夏季の平均皮膚温の低下は人体の発汗による生理的な調節の結果であると考えられる。冬季に舌下温が低いのは、屋外では外部の影響を受けやすく、もはや体内温を表している

図10 作用温度と平均皮膚温との関係

図11 標準作用温度と平均皮膚温との関係

図12 作用温度と温冷感との関係

図13 標準作用温度と温冷感との関係

とは言えないものと考えられる。

6.3 平均皮膚温と温冷感

平均皮膚温と温冷感申告との関係を図9に示す。平均皮膚温が低いほど寒い側、高いほど暑い側となる。33℃から34.7℃の平均皮膚温の時、温冷感申告が熱的中立の申告値を示している。夏季と秋季を比べると、平均皮膚温が同じ範囲にあっても、夏季は暑い側の申告傾向を示し、心理的な面でも季節による差があると考えられる。

6.4 作用温度及び標準作用温度と皮膚温

図10に曝露30分後の作用温度 OTn と皮膚温との関係を示す。作用温度 OTn の上昇に従って平均皮膚温も上昇する傾向が見られるとともに、両者の間には高い相関関係が認められる。図11に示すように、標準作用温度 SOTn を用いても、皮膚温との相関はよく、作用温度 OTn とはあまり変わらない。しかし、標準作用温度 SOTn を用いると、同じ条件でも示される温度範囲が広くなることにより体感に近い値で表示できていると考えられる。

6.5 作用温度及び標準作用温度と温冷感

作用温度 OTn と温冷感との関係を図12に示す。全般的に、皮膚温の場合と同様に、作用温度 OTn が上昇するに従い、温冷感も上昇する。熱的中性を示す作用温度 OTn は回帰式より20℃である。図13に標準作用温度 SOTn と温冷感との関係を示す。熱的中性の標準作用温度 SOTn は回帰式より24℃である。作用温度 OTn に比べ、相関係数は若干小さくなるが、実際気温の対応から考えても妥当な値であ

る。また、作用温度 OTn では、熱的中性値(温冷感50付近)のプロットが9℃と24～30℃にあったものが、標準作用温度 SOTn を用いると16～30℃にプロットされ、温冷感との対応性はよりよくなると考えられる。日射と相互反射を考慮した平均放射温度 MRTn から算定した作用温度 OTn・標準作用温度 SOTn とともに皮膚温と温冷感との間に高い相関関係が見られたが、作用温度 OTn に比べ、標準作用温度 SOTn は日射のある屋外熱放射環境に対してより有効な指標であり、屋外での熱環境評価の指標として適用可能性が高いと考えられる。

図12、13の温冷感のバラツキについては、屋外環境は比較的安定した室内環境と比べ、変動を伴った複雑な影響が出たもので、被験者の相互間の違いも観察された。また、加藤ら²⁹⁾の指摘のように、視覚的な影響など、屋外では温冷感のような単なる熱的作用に対する心理反応だけではなく、視覚など他の作用要因の影響が含まれていて、それらの影響もあると考えられる。

7. まとめ

本研究では、街路・開放空間の熱環境に対して、相互反射の影響を考慮した Net Radiation 法による日射量と長波長放射の相互反射を取り入れた平均放射温度 MRTn を導き、作用温度 OTn、標準作用温度 SOTn を求め、立位姿勢の人体に及ぼす屋外熱環境の影響に関する実験を行い、次のような結果が得られた。

人体へ入射する各経路別放射量の合計と長波長放射量は、街路空間が開放空間より、大きかった。

夏季には、人体からの水分蒸発放熱量が多く、熱放射は受熱側になっているのに対して、冬季には、水分蒸発放熱量が少なくなり、放射より対流放熱が大きい。

冬季には曝露時間中平均皮膚温が変化せず、夏季と秋季には平均皮膚温は1～3℃低下した。

平均皮膚温は33℃から35℃の時、温冷感申告が熱的中性に近い申告値を示した。

日射と相互反射を考慮した平均放射温度 MRTn から算定した作用温度 OTn・標準作用温度 SOTn と、温冷感・平均皮膚温とは高い相関を示している。熱的中性の時の標準作用温度 SOTn は回帰式より24℃であった。また、標準作用温度 SOTn と温冷感との関係のプロットの状況を考慮すると、この日射と相互反射を考慮した標準作用温度 SOTn は、屋外での熱環境評価の指標として適用可能性が高いものと考えられる。今後は湿度、着衣の影響、さらに日影でのデータなど、多くの基礎資料の集積が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり御協力いただきました被験者の方々、ならびに実験実施に御尽力下さいました当時の名古屋工業大学社会開発工学科卒論生、及び大学院生の方々に感謝の意を表します。また、気候測定に際しご協力いただいた岐阜工業高等専門学校の土川忠浩先生、豊田工業高等専門学校の垣鍔直先生に感謝の意を表します。

引用文献

- 山口賢次郎・小林陽太郎：建築外部環境と人体との間のふく射熱授受について、日本生気象学会雑誌, 17(1), pp.49-57, 1980
- Burt, J.E., O'Rourke, P.A. & Terjung, W.H.: The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature, I. Modeling Considerations, International Journal of Biometeor, Vol.26, pp.3-23, 1982
- 中村泰人・平岡久司：二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, 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp.109-117, 1978
- 村上周三・森川泰成：気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究, 日平均風速と日平均気温に基づく適風, 非適風環境の設定, 日本建築学会論文報告集, 第358号, pp. 9-17, 1985
- 中村泰人：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会論文報告集, 第376号, pp.29-35, 1987
- 石井昭夫・片山忠久・塩月義隆・吉水久雅・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, 日本建築学会論文報告集, 第386号, pp. 28-37, 1988
- 梅村茂樹・堀越哲美：都市キャビティ空間における熱放射と体感気候に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1485-1486, 1991
- 広川美子：夏季の室内環境の居住性が戸外での生活行動に与える影響について, 室内の居住性を補完する住棟周辺外部空間の居住機能その1, 日本建築学会論文報告集, 第356号, pp.13-23, 1985
- 持田 徹・射場本勘市郎：熱ふく射効果の評価法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 2, pp.47-54, 1976
- Siegel, R. & Howell, J.R.: "Thermal radiation heat transfer" 8-3. Net-radiation Method, p.238, McGraw-Hill, 1972
- Fanger, P.O.: "Thermal Comfort", Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- 堀越哲美・小林陽太郎：相互反射の影響を加えた平均ふく射温度について, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.129-133, 1976
- 宮本征一・鄭 玲・梅村茂樹・土川忠浩・堀越哲美：室内空間における相互反射を考慮した人体を含む熱放射環境の評価法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.409-412, 1992
- 堀越哲美・宮原英男・小林陽太郎：人体と矩形面との間の形態係数及び人体の有効放射面積に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp. 109-117, 1978
- 土川忠浩・堀越哲美・小林陽太郎：温冷感・快適感の評定尺度構成について, 温熱環境評価方法の研究史(5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 813-814, 1990
- Hardy, J.D. & DuBois, E.F.: The technic of measuring radiation and convection, Journal of Nutrition, Vol.5, No.5, pp.461-415, 1937
- Ramanathan, N.L.: A new weighting system for mean surface temperature of the human body, Journal of Applied Physiology, 19, pp.531-533, 1964
- ASHRAE: "ASHRAE Handbook Fundamentals", ASHRAE, Atlanta, 1993
- McCullough, E.A., Jones, B.W. & Tamura, T.: A data base for determining the evaporative resistance of clothing, ASHRAE Transactions 95 (2), pp.316-328, 1989
- 堀越哲美：建築空間における熱ふく射を中心とした温熱環境条件の人体影響評価方法の研究, 東京工業大学学位論文, 1978
- Gagge, A.P., Rapp, G.M. & Hardy, J.D.: The effective radiant field and operative temperature necessary for comfort with radiant heating, ASHRAE Transactions Vol.73 Part I. pp.I. 2.1-I. 2.9, 1967
- 西 安信：人体と環境との熱交換, "温熱生理学"(中山昭雄編), pp.33-72, 理工学社, 1981
- 中村泰人：放射伝達問題の閉空間問題モデル化の理論, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.439-440, 1975
- 山本義一：大気ふく射, 空気調和・衛生工学, Vol.38, pp.1-19, 1964
- Horikoshi, T. & Kobayashi, Y.: Configuration factors between a rectangular solid as a model of the human body and rectangular planes, for evaluation of the influence of thermal radiation on the human body, I. Calculation of configuration factors for the rectangular solids, Transactions of A.I.J., No.253, pp.91-102, 1977
- Underwood, C.R., Ward, E.J.: The Solar Radiation Area of Man, Ergonomics, Vol.9, No.2, pp.155-168, 1966
- Kutateladze, S.S., Borishanskii, V.M.: "A concise encyclopedia of heat transfer" (Translated by Arthur, J.B.), Pergamon Press, 1966
- D.DuBois, E.F.DuBois: Clinical calorimetry tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known, Archives of Internal Medicine, Vol.17, No.6, pp.863-871, 1916
- 加藤伯彦・堀越哲美・伊藤文恵・石垣秀圭：都市部における建築外部空間での熱環境及び視環境の実測調査, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1081-1084, 1990

(1996年3月10日原稿受理, 1996年10月30日採用決定)