

# 都市空間における人体熱収支と生理心理反応に基づいた体感気候評価の試み

## TRIAL EVALUATION OF SENSATIONAL CLIMATE BASED ON THE HUMAN HEAT BALANCE AND PHYSIOLOGICAL-PSYCHOLOGICAL RESPONSES IN URBAN SPACES

古田隆司\*, 堀越哲美\*\*

*Takashi FURUTA and Tetsumi HORIKOSHI*

The purpose of this paper is to assess the effect of thermal environment on the human physiological and psychological responses based on the human heat balance and a proposed new effective temperature for outdoors in urban spaces including a street canyon and an open space in each season. In summer the human heat balance was not necessarily kept at constant, because excess evaporative cooling by sweating occurred in severe hot environment. However, there was strong correlation between the modified new effective temperature for outdoors and thermal sensation/mean skin temperature. Comfort condition in this experiment agreed with the previous ASHRAE and Shimura's comfort envelopes. Consequently, the thermal environment index can indicate the effect of sensational climate on the human responses in urban spaces.

**Keywords:** urban street canyon, open space, human heat balance, thermal sensation, comfort sensation, new effective temperature

都市街路, 開放空間, 人体熱収支, 温冷感, 快適感, 新有効温度

### 1. はじめに

人間の生活域である街路の両側に建築物の建ち並ぶ空間は、都市を構成する要素であり、人工物の存在する割合が大きく、そこにいる人間は複雑な影響を受ける。一方、都市内には公園や空地・駐車場などの比較的オープンな空間も存在する。これらの場所では、地表面や建物の形態・材料が形成される温熱環境に大きく関わる。これは、従来の都市の景観整備や市街地再生ではあまり問題にされなかった。しかし、都市環境の暑熱化が現実のものとなってきた現在、都市機能の一つとしての人間にとっての温熱環境ないし体感気候の形成は、都市景観の評価に関しても主要な論点であると考えられる。そこで、温熱環境が人体に与える影響の評価法を開発し、それを都市計画へ適用する必要がある。

街路空間の温熱環境については多くの研究<sup>1)~6)</sup>がなされているが、山口ら<sup>1)</sup>やBurtら<sup>2)</sup>の研究は人体の熱環境の形成に主眼が置かれ、人体反応を詳細に捉えていない。中村ら<sup>3)</sup>の研究は人体への熱的負荷の研究である。石井ら<sup>4)</sup>の研究は快適感を主体とした心理的側面に重点が置かれている。梅村ら<sup>5)</sup>の研究は屋外用の温熱指標による評価の試みであるが、心理反応が主体である。屋外用の温熱指標を用いて人体の熱収支と心理生理を共に取り扱った研究は少なく、基礎となるデータの蓄積は重要であると考えられる。鄭ら<sup>6)</sup>は、屋外

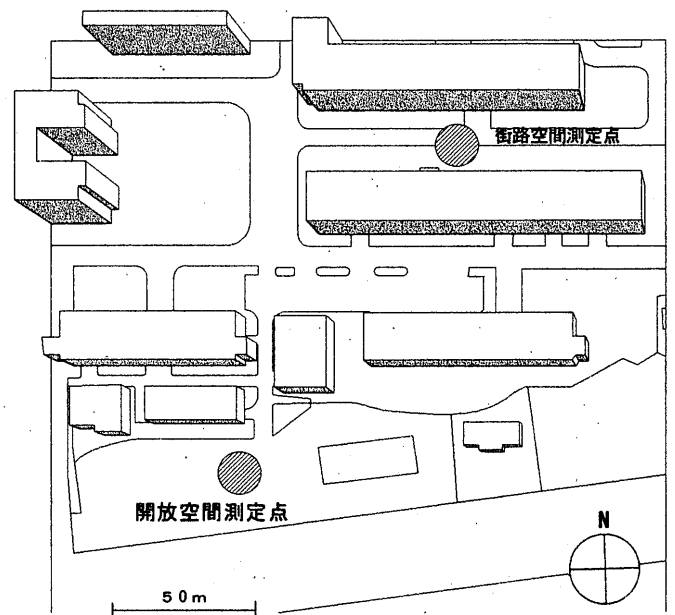


図1 測定地点 (名古屋工業大学構内)

\* 新菱冷熱工業(株) 修士(工学)

\*\* 名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻  
教授・工博

Shinryo Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Environmental Technology & Urban Planning, Graduate School of  
Eng., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

で利用するために、日射や長波長放射を組み入れ、相互反射の影響をも含めた作用温度・標準作用温度について検討し、その妥当性を示したが、新有効温度<sup>15)</sup>や直接的に代謝量を含めた人体の熱収支計測を取り扱っていない。

本研究は、鄭ら<sup>6)</sup>の研究を受けて、都市空間を構成する街路空間と開放空間に形成される温熱環境が、各季節にわたり、人体の生理・心理反応へ与える影響を捉えようとするものである。その中で特に発汗の影響の強い夏季に着目し、人体の経路別熱収支および屋外用温熱指標としての新有効温度を算定し、生理・心理反応との関係が

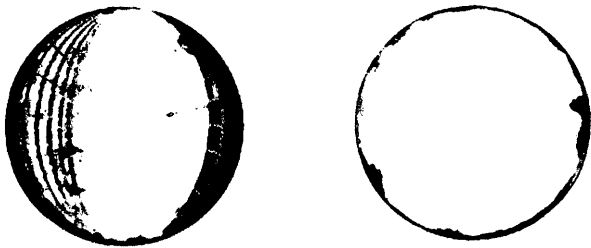


図2 街路空間の天空写真 図3 開放空間の天空写真

表1 環境要素測定項目および測定機器

測定項目	測定機器
乾球温度・湿球温度	アスマン通風乾湿球温度計
グローブ温度	グローブ温度計
風速・風向	ピラム式風向風速計
水平面全日射量	ネオ日射計
構成面表面温度	赤外線熱画像装置、赤外線放射温度計

表2 人体生理反応測定項目および測定機器

測定項目	測定機器	測定位置
舌下温	0.2mmφT型熱電対	口腔内舌下
皮膚温	0.2mmφT型熱電対	Hardy-DuBoisの7点および背・大腿裏・下腿裏
着衣表面温	0.2mmφT型熱電対	Hardy-DuBoisの7点および各部位に対応する着衣表面
頭熱授受量	熱電堆式熱流計	Ramanathanの4点および背・大腿裏・下腿裏
代謝量	エアロモニタ	—
	(ミナト医科学 AE-280S)	
体重減少量	デジタル天秤	—
	(精度 0.001kg)	

熱的快適感

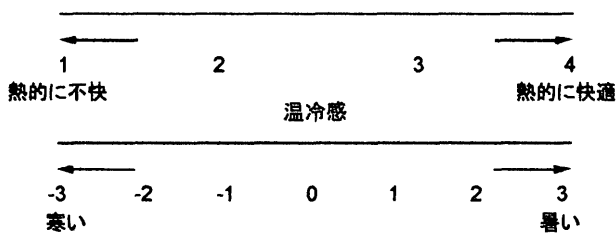


図4 直線評定尺度およびカテゴリー尺度

表3 被験者の身体データ

被験者	測定日	年齢	身長 cm	体重 kg	体表面積 ㎡	出身地
A	1998/7/22	23	175.2	68.4	1.83	岐阜県
	1998/10/31					
	1999/1/6					
B	1998/7/23	24	178.0	71.8	1.88	大阪府
C	1998/8/4	24	171.0	67.8	1.78	福井県

ら、屋外熱環境評価を試みようとするものである。

2. 実験計画

名古屋工業大学構内に、道路の両側に建築物が建つ街路空間と周りに比較的建築物の少ない開放空間を設定し、温熱環境要素測定および被験者を用いた人体生理・心理反応測定を行った。測定場所を図1に示す。正射影魚眼レンズを用いて撮影した街路空間と開放空間の天空写真を図2および図3に示す。街路空間の天空率は57%、開放空間の天空率は89%であった。環境要素測定項目および機器を表1に、人体生理反応測定項目および機器を表2に示す。人体心理反応測定には、図4に示す直線評定尺度及びカテゴリー尺度を用い、直線評定尺度は全長を100と数値換算して処理した。測定は、夏季に3日間(7/22, 7/23, 8/4)、秋季および冬季に各1日間(10/31および1/6)とし朝(9:00~10:30)・昼(14:00~15:30)・夜(夏季19:30~21:00/秋季・冬季19:00~21:30)の時間帯に行った。環境要素・人体反応とも5分毎に測定した。ただし、各温度は監視のため1分間隔で測定した。被験者は前室で約25分間椅座安静後、街路空間へ移動、日射に向かい立位姿勢で15分間曝露した。夜は南向きとした。ふたたび前室で約25分間椅座安静後、開放空間に15分間曝露した。被験者は各日一人とした。7月22日と7月23日の昼は、測定機器の数の問題から、開放空間・街路空間の順で被験者を曝露した。被験者データを表3に示す。着衣は、夏季が白いTシャツ・ジーンズ・トランクス・靴下・靴とし、クロ値は0.67 cloであつ

表4 環境要素測定結果及び温熱指標算出結果

		気温 °C		平均放射温度 °C		相対湿度 %		OTn °C		ET'n °C	
		街路	開放	街路	開放	街路	開放	街路	開放	街路	開放
夏季7/22	朝	27.2	27.0	34.6	32.9	64	65	30.7	28.5	30.9	29.6
	昼	31.9	31.0	56.6	72.9	46	43	42.7	46.3	37.5	39.5
	夜	28.5	27.8	29.1	27.1	60	62	28.8	27.6	28.9	27.9
夏季7/23	朝	29.6	30.4	42.5	57.1	60	54	44.9	49.6	38.7	40.0
	昼	33.1	34.6	55.2	73.1	49	41	38.7	43.3	37.3	37.9
	夜	27.4	27.0	28.0	27.4	75	79	22.8	27.1	24.3	28.1
夏季8/4	朝	33.4	33.8	62.1	79.9	56	52	51.6	43.8	44.1	39.2
	昼	36.0	35.2	63.5	67.1	47	44	48.4	44.8	40.5	39.3
	夜	31.5	30.6	30.2	30.9	63	73	31.1	30.6	32.6	32.7
秋季10/31	朝	18.1	21.0	21.0	67.8	78	63		31.0		30.2
	昼	21.7	22.6	25.2	48.9	51	47	24.1	27.4	23.8	26.9
	夜	19.1	17.8	26.7	15.2	54	61	22.8	16.8	16.4	16.4
冬季1/6	朝	4.6	5.3	13.2	22.9	56	52	6.4	3.4	6.4	3.4
	昼	10.6	11.5	17.0	19.7	36	33	15.5	15.7	15.2	15.1
	夜	9.6	8.1	9.6	7.1	54	63	9.6	7.6	8.8	7.3

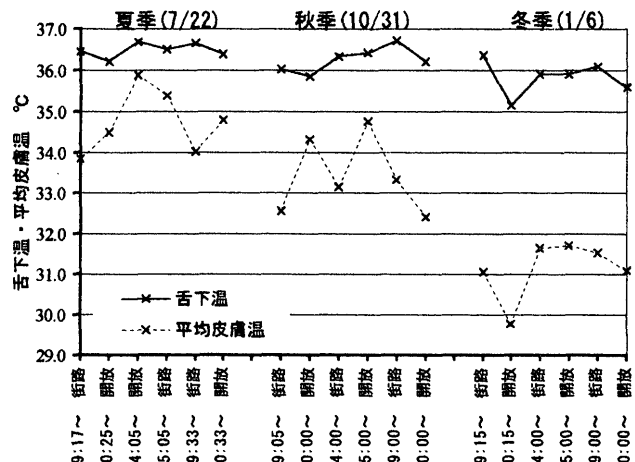


図5 舌下温と平均皮膚温測定結果-各条件への曝露時間は各15分であり、図中には曝露開始時刻を示す

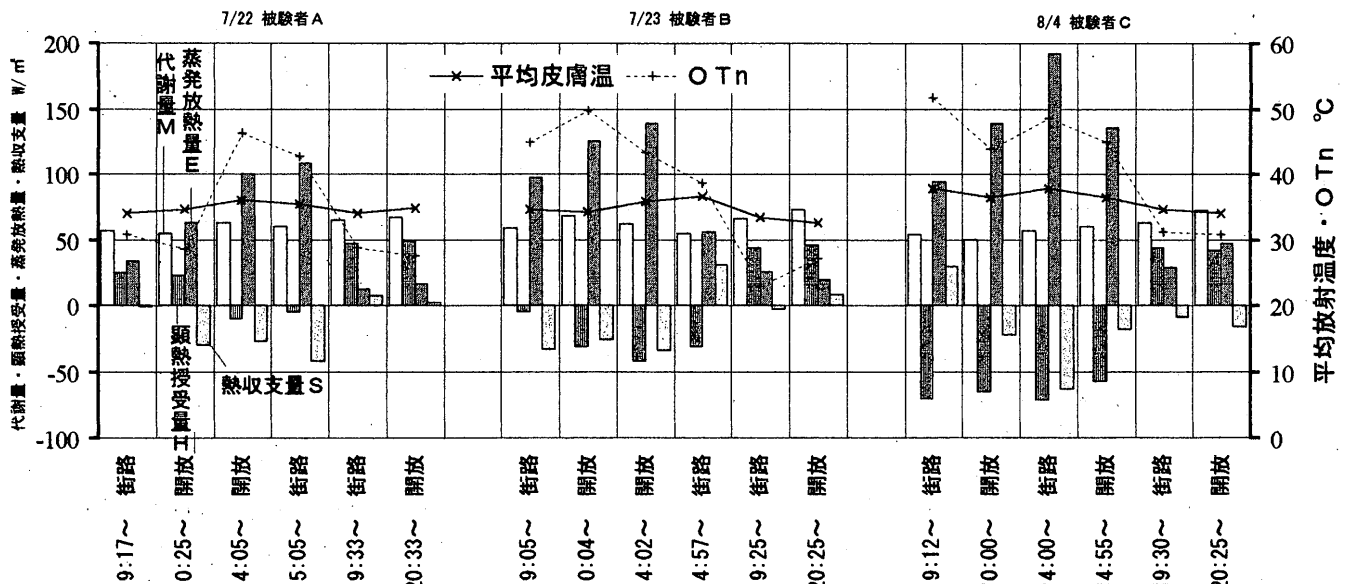


図6 夏季実験における人体熱収支測定結果— 図中では人体熱平衡式  $M=H+E+S$  ( $M$ :代謝量、 $H$ :顕熱授受量、 $E$ :蒸発放熱量、 $S$ :熱収支量)に基づき、代謝量は(+)、顕熱授受量および蒸発放熱量は放熱の場合(+)  
受熱の場合(-)、熱収支量は蓄熱の場合(+)  
冷却の場合(-)で表示される  
各条件への暴露時間は各15分であり、図中には暴露開始時刻を示す

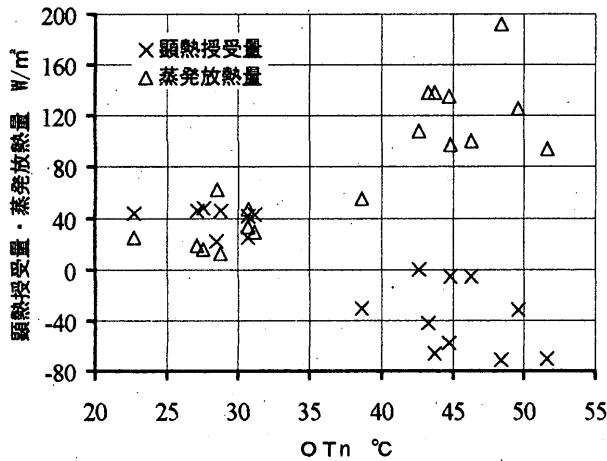


図7 夏季実験におけるOTnと顕熱授受量・蒸発放熱量との関係

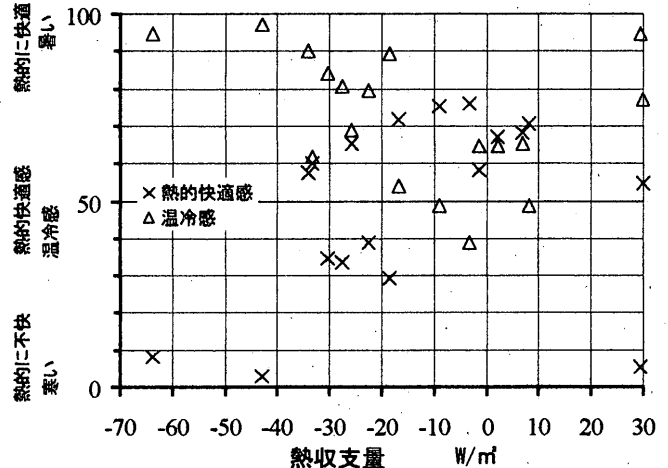


図8 夏季実験における熱収支量と熱的快適感・温冷感との関係

た。秋季が、白い長袖シャツ・Tシャツ・ジーンズ・トランクス・靴下・靴とし、クロ値は0.86 cloであった。冬季が黒いコート・白い長袖シャツ・Tシャツ・ジーンズ・トランクス・靴下・靴とし、クロ値は1.38 cloであった。クロ値の算出は花田<sup>9)</sup>らの式を用いた。表中の体表面積算出には、日本人青年男子を対象とした蔵澄<sup>9)</sup>らの式を用いた。有効放射面積率は0.91<sup>9)</sup>とした。温熱指標としては作用温度OTを鄭<sup>9)</sup>の方法により日射量・大気放射の影響を組み入れた屋外用に修正した作用温度OTnを求め、このOTnと気温・風速・水蒸気圧からET\*<sup>15)</sup>を計算し、それを屋外用の新有効温度ET\*nと定義して用いた。すなわち次式で示される。

$$ET^*n = OTn + W_{i_a} L(p_a - 0.5p_e^*) \quad (1)$$

$w$ :ぬれ面積率  $i_a$ :透湿指標  $p_a$ :水蒸気圧[kPa]  $p_e^*$ :ET\*nでの飽和水蒸気圧[kPa]  
このとき、水平面全日射量からの直散分離は、曾我<sup>10)</sup>の各種直散分離モデルの比較と評価を行った研究成果によって妥当性が高いとされた、Reindl<sup>11)</sup>の推定モデルを用いた。

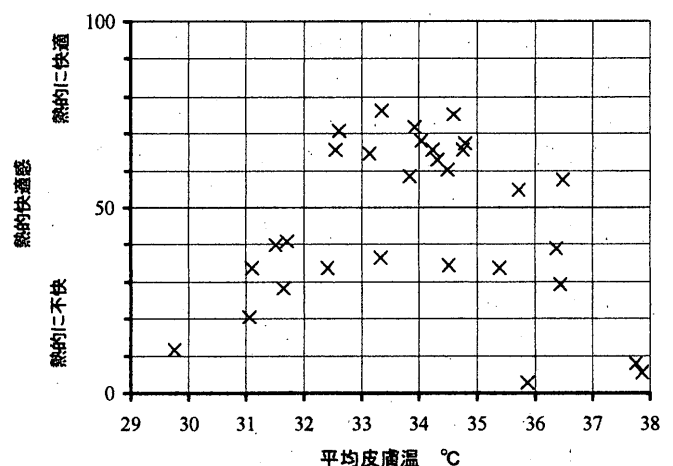


図9 平均皮膚温と熱的快適感との関係

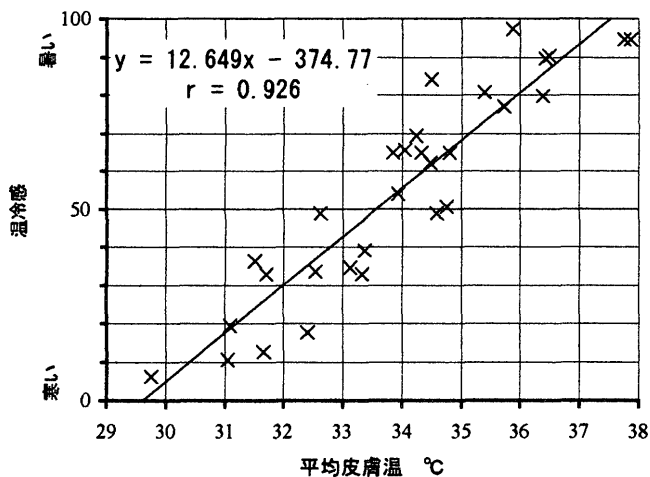


図10 平均皮膚温と温冷感との関係

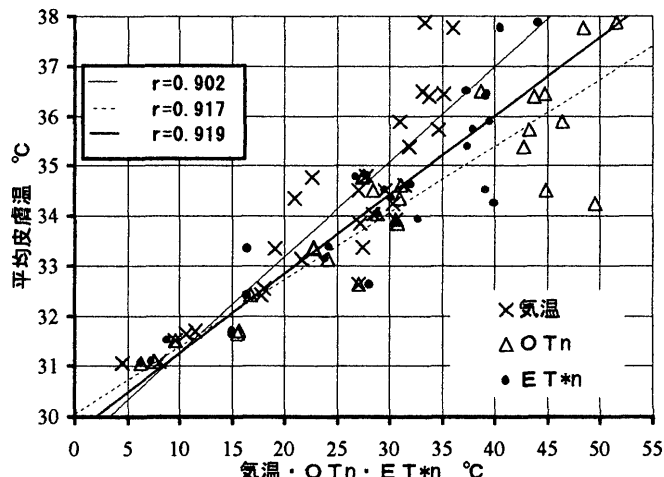


図11 温熱指標と平均皮膚温との関係

3. 結果

3-1 環境要素および人体生理反応測定結果

表4に夏季(7/22, 7/23, 8/4)・秋季(10/31)・冬季(1/6)における被験者曝露時間中の気温・平均放射温度・相対湿度の測定結果および温熱指標OTn・ET\*nの算定結果を示す。これらは、5分間隔に測定した測定時間中の平均値である。秋季の朝・街路空間における温熱指標は、日射量データ欠測のため算出できなかった。

図5に同一被験者Aによる、夏季(7/22)・秋季(10/31)・冬季(1/6)の各実験における舌下温と平均皮膚温の屋外条件に曝露後10分と15分における測定データの平均値を示す。舌下温は、夏季実験では36.2~36.7℃、秋季実験では36.0~36.7℃、冬季実験では35.1~36.4℃の範囲で変動し、夏季と秋季とではほぼ同等の値を示し、冬季が低い値となった。夏季・秋季・冬季で実験中に舌下温が変動した範囲は異なるが、1日の中で似通った周期的変動がみられた。これは、朝に低く午後遅くに高くなる傾向を示しており、サーカディアンリズムが現れたものと推察される。平均皮膚温も曝露後10分と15分の平均値であり、夏季実験では33.8~35.9℃、秋季実験では32.4~34.8℃、冬季実験では29.8~31.7℃の範囲で実験中に変動した。舌下温と同様の日内変動がみられた。

4. 考察

4-1 人体熱収支

夏季には人体熱収支が条件によって発汗状況が異なり、それに従って蒸発放熱量が大きく変動することが予測されるので、夏季を対象に検討する。図6に夏季(7/22, 7/23, 8/4)に行った被験者3名による経路別人体熱収支と平均皮膚温およびOTnの算定結果を示す。ここでの経路別熱収支は、顕熱授受量・蒸発放熱量は放熱側を(+)/受熱側を(-)、代謝量は(+)/熱収支量は蓄熱を(+)/冷却を(-)として表示してある<sup>10)</sup>。代謝量は朝・昼・夜と時間の経過にしたがい増加する傾向がみられた。これはサーカディアンリズムによる変動が反映されているものと考えられる。日中には顕熱授受量が放熱側の時には小さく、受熱になる場合もあった。夜間は放熱側にあった。受熱側になる場合は、蒸発放熱量は大きくなった。これは、人体の熱平衡を保つために蒸発による放熱が増えたと考えられる。産熱・受熱量と放熱量との差し引きである熱収支量を見ると、顕熱授受量が受熱側の時、蒸発放熱量が過大に大きくなるため、身体冷却となる傾向がみられる。熱平衡維持のため発汗が引き起こされた際に

オーバーシュートが起こったと考えられる。夜間においては、顕熱授受量が放熱側となり蒸発放熱量が小さくなるため、熱収支量は多少の正負はあるが、ほぼ熱平衡を示すものとなった。

図7に夏季(7/22, 7/23, 8/4)におけるOTnと顕熱授受量・蒸発放熱量との関係を示す。OTnが35℃以下のときは、顕熱授受量が22~48W/m<sup>2</sup>で放熱側となり、蒸発放熱量が12~63W/m<sup>2</sup>で小さい値となった。OTnが35℃以上の時は、顕熱授受量が-1~-71W/m<sup>2</sup>で受熱側となり、蒸発放熱量がOTnの上昇とともに増加し、最大で192W/m<sup>2</sup>となった。発汗時に水分が着衣に吸収されることもあるが、着衣は人体側の領域にあるとして着衣からの蒸発がなければ放熱されていないとし、特に非定常状態での水分蓄積による影響は取り扱わなかった。実験中無効発汗は観測されなかった。

図8に夏季(7/22, 7/23, 8/4)における熱収支量と熱的快適感・温冷感との関係を示す。温冷感は熱収支量が0±10W/m<sup>2</sup>程度で、熱的中立に近づくと、それ以外はより暑い側となっている。これは、熱収支量が正で大きい値の蓄熱側では受熱が卓越し、熱収支量が負で大きい値の身体冷却側では、発汗のオーバーシュートが起こっている場合と考えられる。熱的快適感が「快適」側の70以上の値となるのは、温冷感がより中立に近い場合と同様の0±10W/m<sup>2</sup>程度の熱収支量である。過大に冷却され、熱収支量が冷却側に大きくなる時でも温冷感は暑い側を示す。人体の熱収支量は理論的には非定常状態の場合でないといえないので、必ずしも温冷感や快適感と対応はしないと考えられる。

4-2 温熱指標と人体生理・心理反応との関係

図9に夏季・秋季・冬季実験により得られた平均皮膚温と熱的快適感との関係を示す。平均皮膚温が32.5~35.0℃付近の範囲では、熱的快適感が高くなり、平均皮膚温が34℃付近から38℃の範囲では、平均皮膚温の上昇とともに熱的快適感が低くなる傾向がみられた。最も高い熱的快適感を示す平均皮膚温は33.3℃であった。

図10に夏季・秋季・冬季実験により得られた平均皮膚温と温冷感との関係を示す。平均皮膚温が上昇するにしたがい温冷感が「寒い」側から「暑い」側へ移行する。平均皮膚温と温冷感の関係には強い相関がみられた。回帰直線から求めた熱的中立の平均皮膚温は33.6℃となった。これは、熱的快適感が「快適な」および温冷感が「暑くも寒くもない」を共に示す堀越ら<sup>12)</sup>による室内実験での結果における平均皮膚温33.5~34.0℃付近とほぼ一致する。

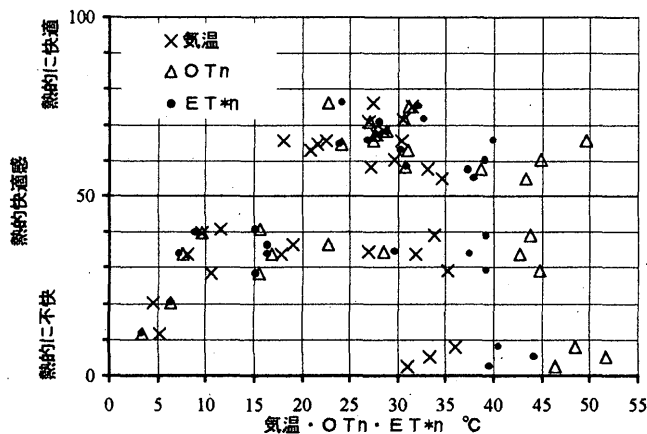


図12 温熱指標と熱的快適感との関係

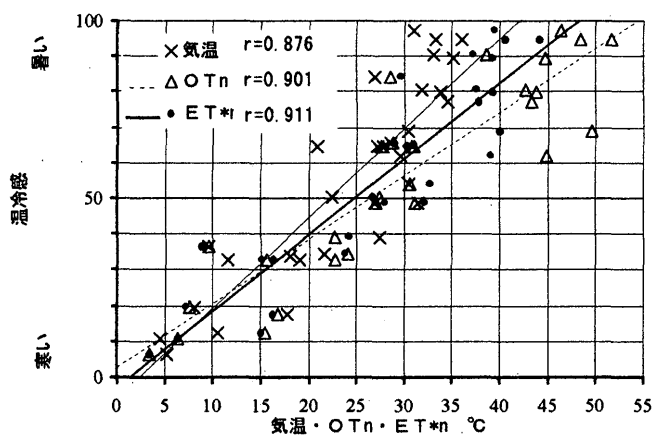


図13 温熱指標と温冷感との関係

図11に夏季・秋季・冬季実験により得られた温熱指標と平均皮膚温との関係を示す。温熱指標が上昇するにしたがい平均皮膚温が上昇する傾向がみられる。気温、OTn、ET\*n、共に平均皮膚温とは強い相関を持つが、ET\*nと平均皮膚温との相関係数をもっとも大きい0.919となった。本実験における熱的中立となる平均皮膚温33.6℃を示す各温熱指標は、回帰式より気温では22.2℃、OTnでは26.4℃、ET\*nでは24.8℃となった。

図12に温熱指標と熱的快適感との関係を示す。熱的快適感が「快適」側70以上となる場合に各温熱指標がとる範囲は、気温が27.0～31.5℃、OTnが22.8～31.1℃、ET\*nが24.3～32.7℃と広い範囲になった。等しい快適感でも、各指標により示す温度が高温側では差が大きくなる。日射量など気温以外の要素が組み込まれるためであり、日射量が多くなる場合には(指標が高温側になる場合)当然ながらその差が大きくなるものと考えられる。OTnは40℃以上で快適感との対応はよくない。気温30℃以下の場合、発汗の影響が少ないのでOTnとET\*nの差は小さいと考えられる。

図13に夏季・秋季・冬季実験により得られた温熱指標と温冷感との関係を示す。気温、OTn、ET\*nは、温冷感と強い相関を示した。ET\*nとの相関係数が最も大きく0.911であった。回帰式より求めた温冷感が熱的中立50を示す時、各温熱指標の示す値は、気温が22.2℃、OTnが26.4℃、ET\*nが24.8℃となった。これは、ASHRAEの快適域13)のET\*24～26℃と、日本人を対象とした志村らの至適域14)のET\*24.5～27.6℃と共に一致する。

## 5. まとめ

南北に建物がある東西方向にはしる街路空間と周囲に比較的建物の少ない開放空間を実験対象地として設定し、夏季・秋季・冬季の各季節の朝・昼・夜において、被験者を用いた人体生理・心理反応測定を行った。夏季には人体の熱収支を測定した。人体の放熱と受熱のバランスを表わす熱収支量が0 W/m<sup>2</sup>付近になれば、温冷感は熱的中立付近、熱的快適感は「快適」側となった。しかし、熱収支量が正または負の側で大きくなると必ずしも心理反応と対応しない。

温熱指標である屋外用に修正した作用温度と新有効温度と人体心理・生理反応との関係を考察した。その結果、修正した温熱指標と人体の平均皮膚温及び温冷感・快適感とはよい対応関係を示した。熱的中立である時の修正した新有効温度は回帰分析により24.8℃であり、室内用のASHRAEの快適範囲と志村らの至適域に含まれた。また、その時の平均皮膚温は、回帰分析で33.6℃となり、堀越らの室内実験での結果とも一致した。屋外用に修正した新有効温度は、室内から屋外までの熱環境を、その1種類の温熱指標で評価できる可能性を持つことを示唆していると考えられる。

注) 図6に示した熱平衡式の正負に一致させて表示している。

### 引用文献

- 1) 山口賢次郎・小林陽太郎：建築外部環境と人体との間の輻射熱授受に関する実験的研究，日本生気象学会雑誌，17(1)，pp.49-57，1980
- 2) Burt, J. E., P. A. O' Rourke & W. H. Terjung: The Relative Influence of Urban Climate on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperature II. Man in an Urban Environment, International Journal of Biometeorology, Vol. 26, No. 1, pp. 25-35, 1982
- 3) 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364号，pp.12-21, 1985
- 4) 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
- 5) 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会梗概集，pp.1485-1486, 1991
- 6) 鄭相元・堀越哲美・梅村茂樹・宮本征一・水谷章夫：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，日本建築学会計画系論文報告集，第493号，pp.77-84, 1997
- 7) 花田嘉代子・三平和雄・佐藤由美：男性下着類の熱抵抗の計測に関する研究，繊維製品消費科学会誌，Vol. 24, No. 8, pp.31-37, 1983
- 8) 藏澄美仁・堀越哲美・土川忠浩・松原斎樹：日本人の体表面積に関する研究，日本生気象学会雑誌，31(1)，pp.5-29, 1994
- 9) 土川忠浩・小林陽太郎・堀越哲美・三輪恵美・藏澄美仁・平山慶太郎：実測による人体の有効放射面積および人体と矩形面との間の形態係数に関する研究 - 青年男子に対する裸体・着衣，立位・椅座の場合 -，日本建築学会計画系論文報告集，第388号，pp.48-59, 1978
- 10) 曾我和宏・赤坂 裕・二宮秀典：全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価，日本建築学会計画系論文報告集，第512号，pp.17-24, 1998
- 11) D. T. Reindl, W. A. Beckman, J. A. Duffie: Diffuse fractions correlations, Solar Energy, Vol. 45, No. 1, pp. 1-7, 1990
- 12) 堀越哲美・南野 脩・磯田憲生・小林陽太郎：人工気候室内における温熱条件と人体側条件の人体影響に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第229号，pp.129-139, 1975
- 13) ASHRAE: ASHRAE Standard, Thermal Environmental Condition for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE 55-1992, 1992
- 14) 志村欣一・堀越哲美・山岸明浩：日本人を対象とした室内湿度条件の至適域に関する実験的研究 - 夏季至適域の提案 -，日本建築学会計画系論文報告集，第480号，pp.15-24, 1996
- 15) ASHRAE: ASHRAE Handbook, Fundamentals, p. 8.6, ASHRAE, 1997

(1999年6月10日原稿受理，2000年2月17日採用決定)