



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	屋外熱環境の人体生理心理反応に関する研究
Author(s)	桑原, 浩平; 長野, 克則; 持田, 徹 他
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . 1-12
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 58-63
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7144
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-12_p58-63.pdf



屋外熱環境の人体生理心理反応に関する研究

○桑原 浩平 (北海道大学) 長野 克則 (北海道大学)
持田 徹 (北海道大学) 嶋倉 一實 (北海道大学)

緒言

屋外において人と環境との間でなされる熱授受と、その結果として生じられる温冷感との関係を把握することは、都市生活者にとって重要なことである。屋外環境において、気温・湿度のみならず日射を含む熱放射や風速が、人体の温冷感に大きな影響を及ぼすことは日常生活から実感できる。これらの要素を考慮した屋外熱環境評価に関する研究は、これまで主に建築環境学の分野において行われてきた。著者ら¹⁾は、屋外環境における平均放射温度を求める際に、日射の影響は無視できないと考え、人体と環境との放射熱授受の式に日射の項を組み込み、新たに日射を考慮した有効放射温度として定義した。しかし、著者らのこれまでの研究は理論検討が中心であった。

そこで本研究では、著者らが定義した有効放射温度 T_{er} が、実際の屋外環境にて適用可能であるか否かをみるために屋外開放空間にて実験を行い、 T_{er} を組み込んだ作用温度・標準作用温度・標準新有効温度 SET^* と人体の生理心理反応との対応を検討した結果を報告する。

1. 記号

本論文で用いられている記号を以下に列挙する。

F_{cl}	: 衣服の有効伝熱効率	[N.D.]
H_d	: 人体への直達日射量	[W/m ²]
H_s	: 人体への天空拡散日射量	[W/m ²]
H_r	: 人体への反射日射量	[W/m ²]
Q_p	: 人体と環境との間の正味の放射熱交換量	[W/m ²]
R	: 人体と環境との間の長波長放射熱交換量	[W/m ²]
STO	: 標準作用温度	[°C]
T_{cl}	: 衣服表面温度	[°C]
T_{er}	: 有効放射温度	[°C]
T_g	: 地表面温度	[°C]
T_{op}	: 作用温度	[°C]
T_{sk}	: 平均皮膚温	[°C]
T_{sky}	: 仮想天空温度	[°C]
U	: 天空率	[N.D.]
V	: 気流速度	[m/s]
f_{cl}	: 衣服面積率	[N.D.]

f_{ef}	: 有効放射面積率	[N.D.]
h	: 総合熱伝達率	[W/(m ² °C)]
h_c	: 対流熱伝達率	[W/(m ² °C)]
h_r	: 放射熱伝達率	[W/(m ² °C)]
ϵ	: 放射率	[N.D.]
σ	: Stefan-Boltzmann 定数 (=5.67×10 ⁻⁸)	[W/(m ² K ⁴)]
ψ	: 人体から見た各面の形態係数	[N.D.]
添字		
cv	: 物体表面	
g	: 地表面	
p	: 人体	
s	: 標準状態	
sky	: 仮想天空面	

2. 日射を考慮した平均放射温度の導出

ここでは著者らが提案した有効放射温度 T_{er} の導出に関して簡単に述べる¹⁾。

屋外環境における人体と環境との間の正味の放射熱交換は、人体からの放熱を正とすると次式で表される。

$$Q_p = R - (H_d + H_s + H_r) \\ = \epsilon_p \sigma \left\{ (T_{sk} + 273)^4 - (T_{er} + 273)^4 \right\} f_{ef} f_{cl} F_{cl} \quad (1)$$

H は人体が受ける日射量を表しており、直達日射・天空拡散日射・地面からの反射日射の3者より成る。また、人体と環境との間の長波長放射熱交換量 R は、地表面からの放射と大気放射、建物など物体表面からの放射に分けられ、次式で表される。

$$R = R_g + R_{sky} + R_{cv} \\ = \epsilon_p \epsilon_g \sigma \left\{ (T_{sk} + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right\} (1 - \psi_{sky} U) f_{ef} f_{cl} F_{cl} \\ + \epsilon_p \epsilon_{sky} \sigma \left\{ (T_{sk} + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right\} \psi_{sky} U f_{ef} f_{cl} F_{cl} \quad (2)$$

この長波長放射熱交換量 R と人体に達する日射量 H を式(1)に代入して、 T_{er} について解くと次式が得られる。

$$T_{er} = \sqrt[4]{(1 - \psi U) T_g^4 + \psi U T_{sky}^4 + \frac{H_d + H_s + H_r}{\sigma \epsilon_p f_{ef} f_{cl} F_{cl}}} \quad (3)$$

この有効放射温度 T_{er} を作用温度 T_{op} に組み込み、日射を考慮した作用温度として式(4)を定義する。

$$Top = \frac{hcTa + hrTer}{hc + hr} \quad (4)$$

式(4)における対流熱伝達率 $hc^{2)}$ と放射熱伝達率 hr は次式を用いて計算を行った。

$$hc = 3.36 + 6.86V^{0.92} \quad (5)$$

$$hr = \varepsilon_p \sigma \{ (T_{cl} + 273) + (Ter + 273) \} \times \{ (T_{cl} + 273)^2 + (Ter + 273)^2 \} \quad (6)$$

また、標準の着衣量及び総合熱伝達率を用いて、実験環境を標準状態に換算して比較するために、標準作用温度 STO を採用した。

$$STO = \left(1 - \frac{h \cdot F_{cl}}{h_s \cdot F_{cls}} \right) T_{sk} + \frac{h \cdot F_{cl}}{h_s \cdot F_{cls}} Top \quad (7)$$

最後に作用温度を標準新有効温度 SET^* に組み込むことにより、日射を含む屋外環境における温冷感評価を可能にする。 SET^* は Gagge ら³⁾ の 2-node model に式(3)の有効放射温度を組み込んだプログラムを用いて計算され、皮膚温は実測値ではなく 2-node mode から得られた計算値を用いた。本論文では算出された Top , STO , SET^* を用いて屋外環境の評価を行う。

既存の研究では、屋外環境の平均放射温度を有効放射場や Net Radiation 法を用いて算出しているが、本研究では、直接人体と放射環境との間の熱平衡式から、直達放射のみを考慮した平均放射温度を算出しており、この点が既存の研究と異なる点である。

3. オープンスペースにおける被験者実験

式(3)の有効放射温度 Ter が実際の人の温冷感と対応するのかどうかをみるために、札幌の屋外において被験者実験を行った。実験場所として、ほぼオープンスペースと見なすことの出来る北海道大学工学部屋上を選定した。実験期間及び着衣状態を表-1 に示す。実験衣服の着衣量は佐古井らの式⁴⁾によって求めた。被験者には健康な青年男子 10 名を用い、食

表-1 環境条件

季節	春	夏	秋	冬
月/日	5/19~30	7/26~8/3	8/30~9/3	12/7~14
服装	作業着 長袖 Yシャツ 綿パン	半袖 Yシャツ 綿パン	半袖 Yシャツ 綿パン	半袖 Yシャツ 綿パン トレーナー コート 手袋
clo	1.09	0.71	0.71	1.65
fcl	1.43	1.12	1.12	1.59

*下着・靴下・靴は共通

表-2 測定項目及び機器

環境要素	Instruments
気温	C-C 熱電対 0.3 mm φ
乾球&湿球温度	アスマン乾湿計
グローブ温度	グローブ温度計 75 mm φ
表面温度 (皮膚温含む)	C-C 熱電対 0.3 mm φ
全天日射量	差温式日射計
風速	熱線風速計

表-3 温感スケール

温冷感	快適感
4 : very hot	
3 : hot	3 : uncomfortable
2 : warm	2 : slightly uncomfortable
1 : slightly warm	1 : slightly comfortable
0 : neutral	0 : comfortable
-1 : slightly cool	
-2 : cool	
-3 : cold	

後 1 時間以上経過した後、2 名を $SET^* = 25^{\circ}\text{C}$ の環境に 20 分間暴露し、その後、屋外空間に 20 分間暴露した。また同時に、気温・湿度・グローブ温・地表面温・日射量を 1 分間隔で測定し、皮膚表面温は、夏季及び秋季は Hardy-DuBois の 7 点部位を、春季及び冬季は Hardy-DuBois の 12 点部位を計測した。測定項目及び機器を表-2 に示す。実験時刻は、昼 12~13 時頃、夜間は日没後に行われ、夏は 19 時以降、冬は 17 時以降に行われた。また被験者に、表-3 に示す温冷感・快適感覚を全身及び部位毎に 5 分間隔で申告させた。

4. 屋外熱環境における被験者実験結果とその考察

4.1 環境側測定結果

図-1, 2 に、実験日の気象データ及び計算された昼夜別の有効放射温度、作用温度、 SET^* を示す。日射量は、水平面の直達及び天空拡散日射量である。直達日射と天空日射は、宇田川・木村の直散分離の方法⁵⁾を用いて算出した。5/29, 7/26, 28 は昼に二回、5/30 は夜に二回、異なる被験者を用いて実験を行った。有効放射温度 Ter の導出に必要な大気放射量 R_{sky} 及び仮想天空温度 T_{sky} は、下向き大気放射量の推定式を用いて気象データより計算した⁶⁾。また、ほぼオープンスペースでの実験であるため、式(3)中の天空率 U は 1.0、地面と人体の形態係数及び天空と人体との形態係数は共に 0.5 と見なして計算した。図-1 を見ると、直達日射量は夏実験よりも春実験の方が多かった。これは春実験では初夏を思わせるような好天日が続いたことと、夏実験では曇天日が続いた

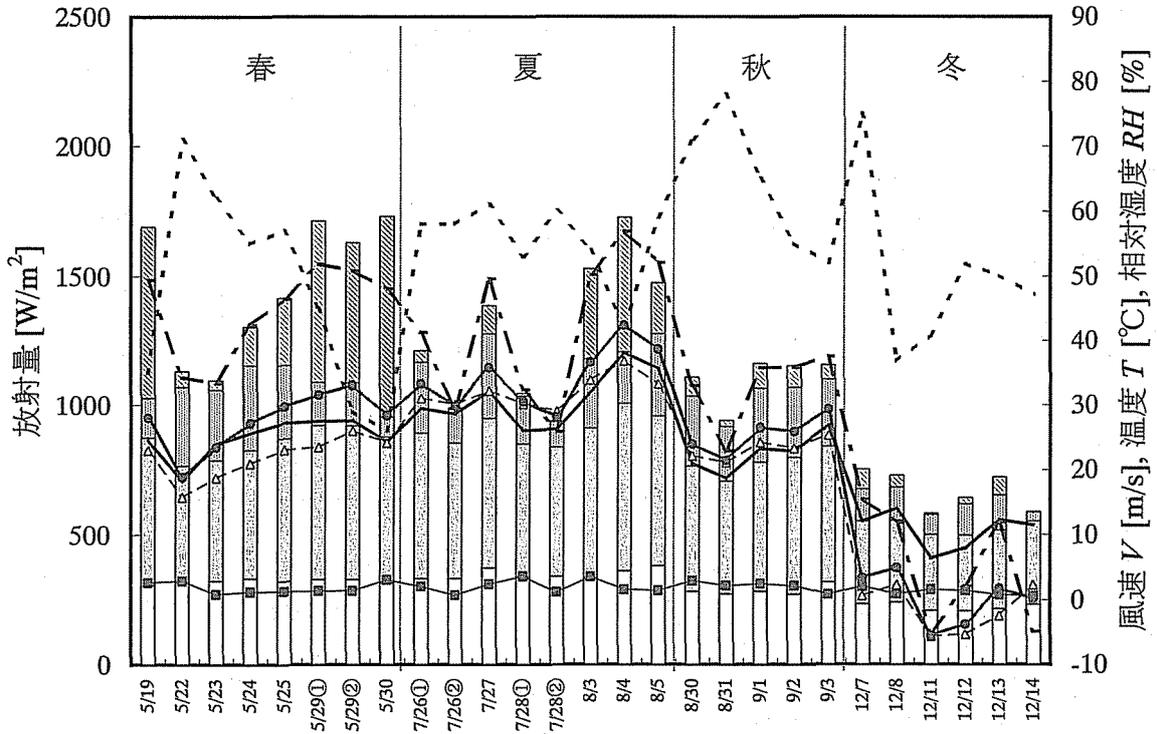
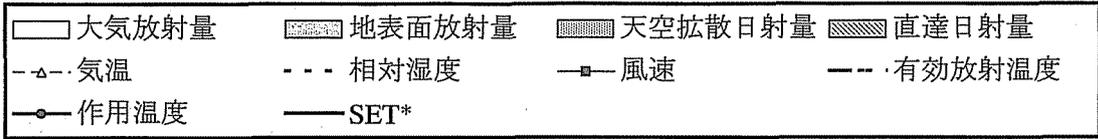


図-1 昼間の気象データ

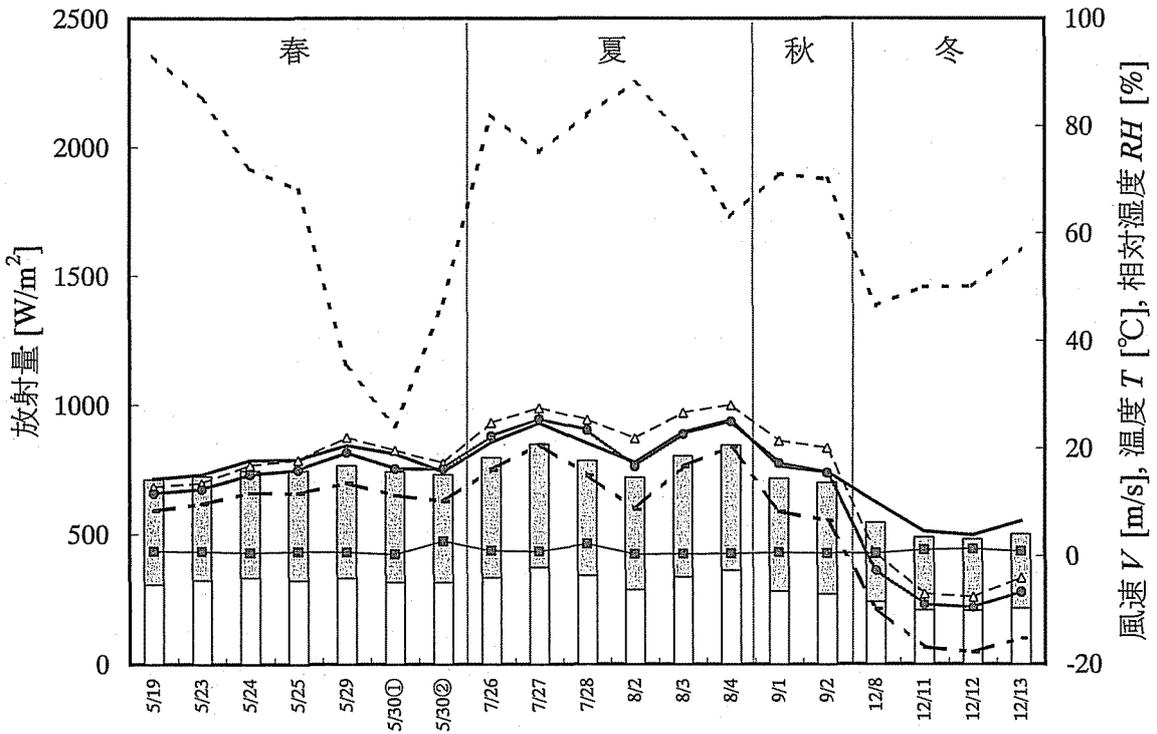


図-2 夜間の気象データ

ためであると考えられる。傾向として、放射量の大きさに準じて T_{op} や T_{er} が推移していることが見て取れる。 SET^* の値より、札幌の屋外では、昼間は春と秋、夜間は夏季が快適であると判断できる。このことは、昼間暑くても夜間には涼しくなるという札幌の夏季の気候を良く表していると言える。冬実験をみると、夜間の気温が -10°C まで低下しており、札幌としては平年より厳しい気象条件であった。 SET^* は、 0°C 付近まで低下しており、屋外で快適に過ごせる範囲を逸脱していると考えられる。昼間に注目すると、わずかな直達日射量で T_{er} は 10°C 程度増加しているものの、 SET^* にはそれ程反映されていない事がわかった。これは冬季の着衣量に起因するものと考えられる。また、昼夜を比較すると、気温と T_{er} の位置関係が逆転していることが見て取れる。これは夜間の放射冷却の影響であると考えられる。

4.2 各種温度と平均皮膚温の関係

図-3に作用温度 T_{op} と平均皮膚温 T_{sk} の関係を示す。季節別の相関よりも全体の相関の方が高くなった。しかし、これは冬季の実験データがあるために相関が高くなっただけであり、春、夏、秋だけで相関をとれば低くなるのは明らかである。 T_{op} のみでは着衣量が標準化されていないため、 T_{op} のみでの T_{sk} の予測は難しいと言える。図-4に SET^* と T_{sk} の関係を示す。 T_{op} に比べて温度幅も狭くなり、 T_{op} よりも SET^* の方が T_{sk} を予測するのに若干改善されたと言える。図を見ると、冬の傾きよりも夏の傾きの方が小さくなっていることがわかる。これは皮膚温の上昇に限界があることを意味しており、 SET^* が大きくなればなるほど傾斜が緩くなることが予想される。本論文では線形近似を行ったが、今後データ数を増やし、より厳密な回帰式を導く必要があると考えられる。

4.3 平均皮膚温と温冷感の関係

図-5に T_{sk} と温冷感の関係を季節別に示す。全体の相関は0.82程度であった。温感が中立となる平均皮膚温は、 $T_{sk}=32\sim 34^{\circ}\text{C}$ 付近となり、一般的な温感中立の皮膚温であると言われる $T_{sk}=33^{\circ}\text{C}$ に相当する結果となった。また、春とそれ以外の季節で回帰直線の傾きが異なっているが、これは春先に平年より暑い日が続いたのに対し、季節の変わり目により、暑さに馴化していない影響が出たと考えられる。

図-6に T_{sk} と温冷感の関係を個人別に示す。二季節以上で実験を行った6名をグラフ化した。個人差はあるものの、相関が0.75~0.95となり高い相関が得られた。また、被験者aは $T_{sk}=31^{\circ}\text{C}$ 付近で温感中

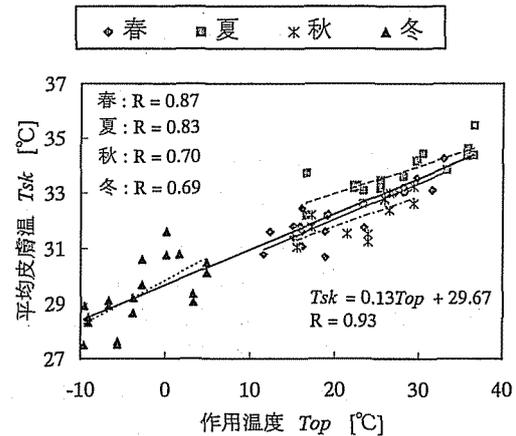


図-3 作用温度と平均皮膚温の関係

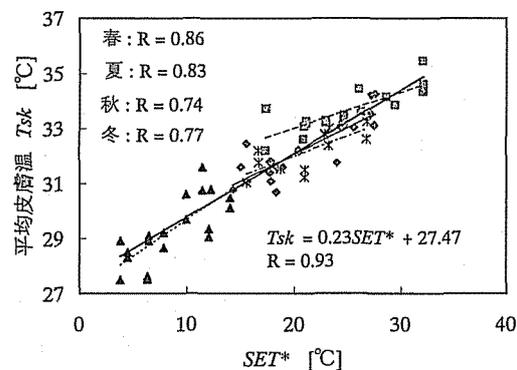


図-4 SET^* と平均皮膚温の関係

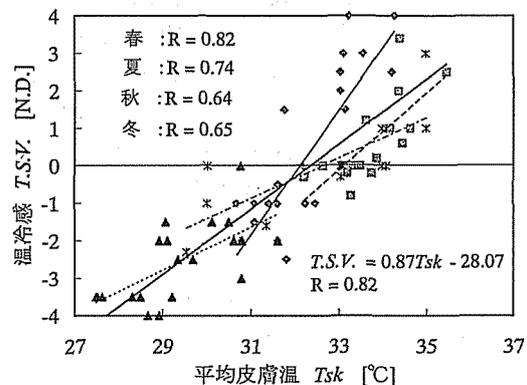


図-5 平均皮膚温と温冷感の関係

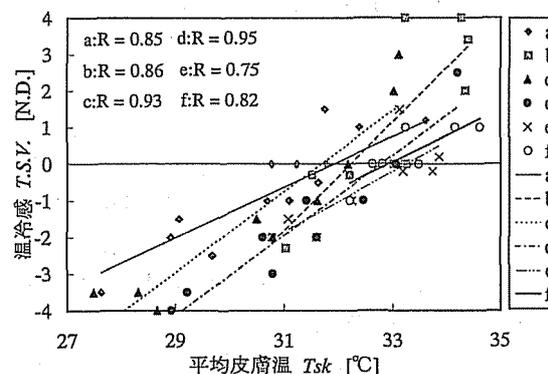


図-6 個人別の平均皮膚温と温冷感の関係

立を示したが、被験者 f は $T_{sk}=33^{\circ}\text{C}$ 付近で温感中立となった。このことから個人により平均皮膚温の温感中立域が異なることが明らかとなった。

4.4 作用温度と温冷感の関係

図-7 に Top と温冷感の関係を示す。環境の4要素のうち、気温・有効放射温度・風速より構成される作用温度は温冷感と良い対応を示し、 $Top=20^{\circ}\text{C}$ 付近で温感中立を示した。しかし、昼夜別の Top と温冷感の関係を示している図-8 は、昼と夜の回帰式の傾きが異なっていることから、着衣と熱伝達率を標準化していない Top による評価が難しいことが見て取れる。また、札幌の夜の屋外は中立から寒い温感を申告していることも見て取れた。

4.5 標準作用温度と温冷感の関係

図-9 に標準作用温度 STO と温冷感の関係を示す。ここでは各季節の実験を等価に比較するために、着衣量と熱伝達率を標準化した標準作用温度を用いて評価を行った。式(7)中の T_{sk} は 2-node model による計算値を用いている。また、実測された T_{sk} も用いて検討を行ったが、実験値の T_{sk} と同様に良い結果が得られた。作用温度に比べて線形近似の傾向が強まり、相関係数は 0.9 とかなり高くなった。標準作用温度の熱的中立域は $STO=21^{\circ}\text{C}$ 近辺となった。

STO と温冷感の関係を昼夜別に示したのが図-10 である。ここでも夜間の温感では中立以下を示しており、最高でも $STO=25^{\circ}\text{C}$ で温感中立であった。また、 STO は Top と比較すると、昼夜別でも線形近似の傾向が強まっており、 Top よりも STO の方が一年を温冷感の評価に有効であると考えられる。一般的な Top は、着衣量と風速が異なる環境では直接比較することが出来ないと言われている。実験結果より、日射を考慮した Top も一般表示の Top と同様に標準化無しでは直接比較出来ないことが見て取れた。以上より、日射を考慮した Top も一般表示の Top と同じ性質を持っているということが明らかにされ、日射を考慮した有効放射温度の有効性が確認された。

4.6 SET^* と温冷感の関係

図-11 に標準新有効温度 SET^* と温冷感の関係を示す。 STO では気温・日射を含む放射温・風速・着衣量まで考慮していたが、湿度に関しては評価から除いていた。そこで、環境側の4要素及び人体側の2要素を加味した SET^* と温冷感の対応を見た。 Top や STO と比較して、 SET^* の温度域は $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 内に収まっており、温冷感の SET^* による回帰線の勾配が、他と比べて大きくなるが見て取れる。温感中立

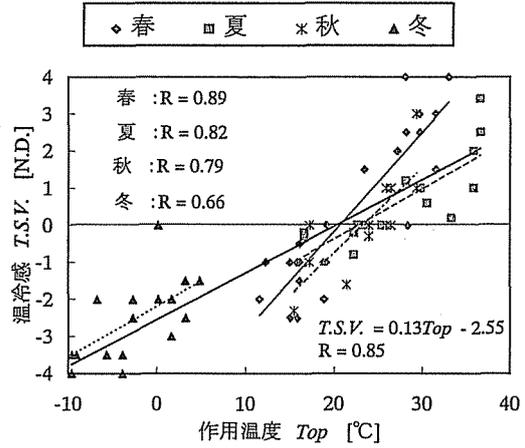


図-7 作用温度と温冷感の関係

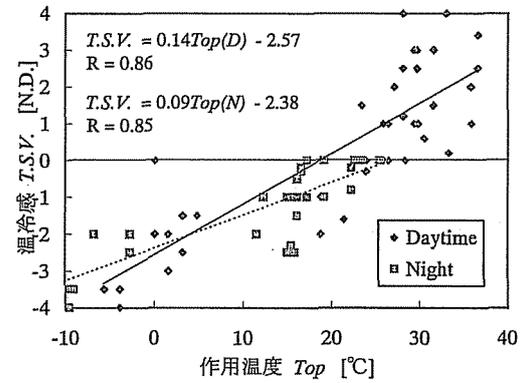


図-8 作用温度と温冷感の関係 (昼夜別)

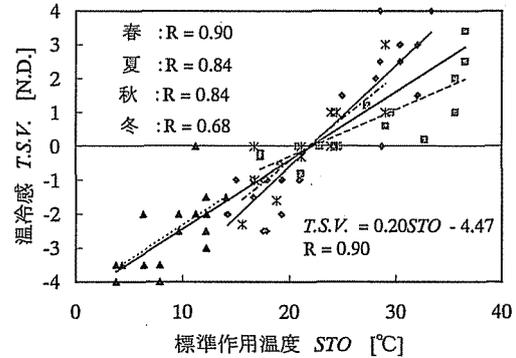


図-9 標準作用温度と温冷感の関係

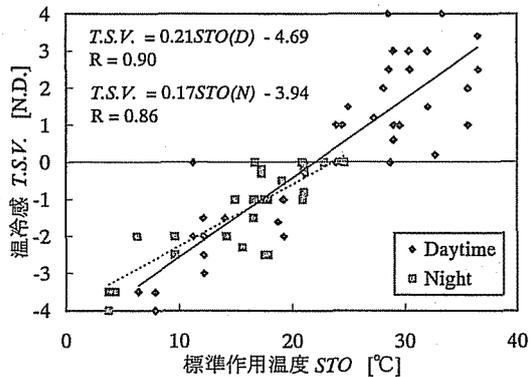


図-10 標準作用温度と温冷感の関係 (昼夜別)

域は $SET^*=18\sim 25^\circ\text{C}$ 付近に集中しており、一般的に熱的中立域と言われる $SET^*=22\sim 25^\circ\text{C}$ よりも若干低温側にシフトしている。相関係数は標準作用温度に比べて若干低いものの、日射を考慮した SET^* は温冷感を評価する上で精度の良い指標と言える。換言すれば札幌のような夏季に湿度の低い地域に於いては、湿度が温冷感にそれほど影響を及ぼしていないと言える。図-12 に昼夜別の SET^* と温冷感の関係を示す。昼夜別の相関と図-12の全体の相関がほぼ変わらないことから、昼夜を問わず一本の回帰式で評価することが可能であることが見て取れる。以上の点より、屋外における体感温の評価法として、日射を考慮した SET^* を用いることの有効性が確認できた。

結言

屋外環境の温冷感評価を可能にするために温冷感評価実験を行い、日射を考慮した有効放射温度が適用可能か否かの検討を行った。得られた結果を以下に列挙する。

- I. 屋外における人体の平均皮膚温と温冷感の対応を見たところ、被験者全体ではそれ程高い相関は得られなかったが、個人別には非常に高い相関が得られた。
- II. 日射を考慮した有効放射温度を含む作用温度では、屋外環境の評価の難しさが見て取れたが、着衣と熱伝達率を標準化した標準作用温度を用いることで改善された。
- III. IIの結果より、着衣量や風速が異なる環境では直接比較できない一般表示の作用温度と同様の傾向を、日射を考慮した作用温度も有していることが明らかにされ、日射を考慮した有効放射温度の有効性が確認された。
- IV. 日射を考慮した有効放射温度を含む SET^* で温感評価を行った結果、人体の温冷感と良い一致を示し、日射を考慮した SET^* の有効性が確認された。

謝辞 本研究に当たり、北海道大学工学部環境工学科卒論生丹羽俊夫君、並びに被験者の方々に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表す。

引用文献

- 1) Mochida, T., K. Nagano, K. Yamauchi, K. Naohara, R. Konishi and K. Kuwabara: Evaluation of Thermal Sensation in Outdoor Environment, Proceedings of the Second International Conference on

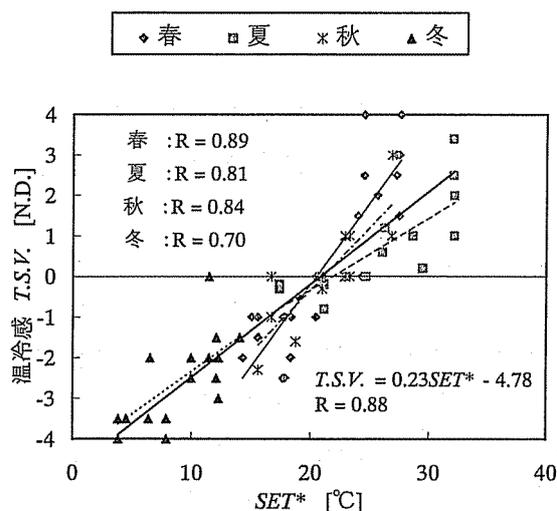


図-11 SET^* と温冷感の関係

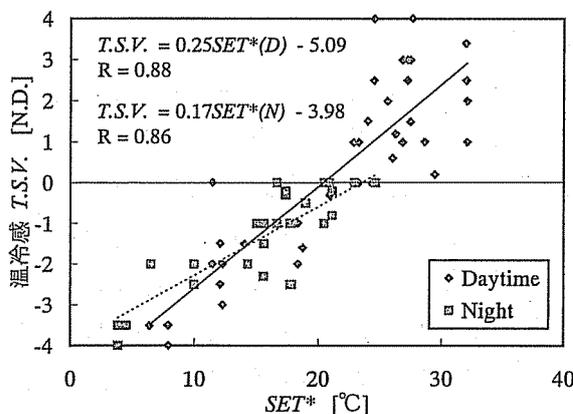


図-12 SET^* と温冷感の関係 (昼夜別)

Human-Environment System, pp.57-60, 1998

- 2) 桑原浩平, 持田徹, 近藤基, 松永和彦: サーマルマネキンを用いた中風速域における人体対流熱伝達率の測定, 人間と生活環境, 第8巻第1・2号, pp.27-32, 2001
- 3) Gagge A. P., Fobelets, A. P. and Berglund, L. G.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions Vol. 92, pp.709-731, 1986
- 4) 佐古井智紀, 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實: 衣服の保温性能に関する基礎的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, NO.77, pp.95-107, 2000
- 5) 宇田川光弘・木村健一: 水平面全天日射量観測地よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 第267号, pp.83-90, 1978
- 6) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, p.90, 1998.