

屋外空間における温冷感指標に関する研究

木内 豪*

要旨

本論文では、夏期と冬期の温冷感指標を得るため、いくつかの温冷感指標の適用性について検討を行った。検討対象とした既存の指標は、不快指数、風力冷却指数、新標準有効温度 SET*である。また、体温調節に関する温度情報の統合の概念を適用した温度負荷量 TL と、作用温度と風速を変数とする簡易な式で表される温冷感指数 TSI の 2 つを新たに提案した。これらの指標について夏期及び冬期の屋外空間における温冷感の現地実験結果との対応について比較した結果、夏期は TL と TSI が温冷感との相関が高く、冬期は TSI と SET*が温冷感との相関が高かった。したがって、TSI を用いれば夏期、冬期ともに実測の気象範囲において精度よく簡便に温冷感を推定できることがわかった。提案した指標を用いて気象要因が人間の温冷感に及ぼす影響度合いについて調べ、夏期、冬期における温冷感の気温、風速、湿度への依存特性を示した。

1. はじめに

都市特有の気候現象であるヒートアイランドは、熱帯夜の増加や熱中症の発生などの問題を引き起こし、都市空間における人間の生活を脅かしている。ヒートアイランド対策による気温等の変化が温冷感にどの程度の影響をもたらすかを推定したり、気象予報に際して人間の温冷感も予測するためには、四季を通じて温冷感を推定できる指標が必要となる。一方、人間の温冷感を表す指標についてはこれまでも多くの研究が行われてきたが、限定的な気象条件で利用できるものや屋外への適用性が検証されていないものが多く、街路や開けた場所といった様々な都市屋外空間において、日射、風の条件が場所場所で異なる場合であっても適用できる温冷感指標は確立されていない。そこで、本論文では屋外空間の多様な環境下において夏期と冬期の双方に適用できる温冷感指標として、人体熱収支解析に基づく温度負荷量 TL 並びに風速と作用温度(実際の環境における対流と放射による熱輸送量に等しい熱輸送量となる仮想的な等温環境の温度のこと、

式(3)参照)の関数として表される温冷感指数 TSI の 2 つの指標を提案し、既存の指標とともにその実用性について検証を行った。また、本論文で提案した指標を用いて、都市屋外空間の気温、湿度、風速が温冷感に及ぼす影響度合いを検討した。

2. 屋外空間の温冷感指標の概要

屋内空間における温冷感指標については、ASHRAE (米国暖房・冷房・空気調和学会) の標準となっている新標準有効温度 SET* (Standard New Effective Temperature) や ISO の基準として制定されている PMV (Predicted Mean Vote) が主に用いられている。SET*や PMV は、気温、湿度の他に熱放射や風の影響、人間の着衣状態や作業状態も考慮した物理的、生理的理論に基づく指標であり、熱放射の影響を日射にも拡張すれば原理的には屋外空間への適用が可能であると考えられるが、それぞれの指標が作成されたときの条件に制約がある。SET*は人体の体温調節や熱の授受を人体の深部層と皮膚層の 2 層モデルにより表現した熱平衡方程式に基づく指標であるが、暑い環境下における生理反応(発汗)で実際のものが生じることが指摘されている(持田, 1992)。また、PMV では相対湿度が温冷感覚に与える影響を加味し

* 独立行政法人土木研究所水工研究グループ。

—2000年4月24日受領—

—2001年7月3日受理—

ておらず、その基礎となった実験条件も無風、気温 19.9~27.8°Cの範囲でしかない(西, 1992)。

気象学分野では米国気象局が作成した不快指数 THI や米国で冬期に利用されている風力冷却指数 WCI (Wind Chill Index) がある。不快指数は算定式の簡便さから、我が国でも夏期の気象状況を表す指標として一般に用いられているものの、気温と湿度のみからなる式のため、屋外空間の熱環境の特徴である日射や風の影響が考慮されていない。風力冷却指数は極寒状態において人体から失われる熱量を指標化したものであるが、風速の適用条件が限られており、微風時の放射による冷却が卓越する場合への適用性については検証が必要である。

我が国では、例えば山口・小林(1980)が、建築外部空間2地点で数回実施した熱環境条件の測定と温冷感等の申告実験を行い、作用温度と温冷感との相関性を示している。また、梅村・堀越(1991)は街路空間等3地点を対象に同様の調査を行い、新有効温度と温冷感の相関関係を示している。石井ほか(1988)は、屋外空間2箇所において被験者を用いた温冷感覚に関する申告実験を行い、SET*や Penwarden の快適式の適用性を検討している。鄭ほか(1997)も同様に被験者を用いて、街路空間と開放空間の2箇所で実験を行い、地物間の相互反射の影響を取り入れた温冷感指標を提案しているが、風、湿度に関して限定された気象条件での結果であり、適用範囲に限られる。古田・堀越(2000)も同様の研究を行い、秋、冬も対象に加えて温冷感と温冷感指標の対応を調べている。神田ほかは、SET*と同様に、気象条件、着衣状態、作業状態と人体の生理反応(発汗作用)を考慮した人体の熱収支解析に基づく温冷感指標として仮想熱負荷量 VTL を提案し(神田・土屋, 1995; 神田ほか, 1996a), 屋外空間への適用性について若干の検討を試みている(神田ほか, 1996b)。このように様々な指標が提案されているが、いずれも地点数あるいは被験者数が少なく、温冷指標として広範な気象条件に適用できる指標を確立するまでには至っていない。他方、Brown and Gillespie(1986)は多数の屋外測定データに基づいて彼らの提案する指標と申告値の対応関係を示しているが、気象条件としては気温が12~25°C、風速は最大5 ms⁻¹までの条件であり、我が国のような夏期の暑熱環境にすぐには適用できないと考えられる。

そこで、本研究では夏期と冬期に全国6都市で同一の調査法により得られた多数の温冷感覚データを用い

て温冷感指標の適用性を比較する。比較検討の対象としては、既存の指標の他に、人体の体温調節系と温度情報の統合に関する知見をモデル化した指標(温度負荷量 TL)と、実用性を優先させた簡易指標(温冷感指数 TSI)の2つを提案する。

屋外では放射の影響が温冷感に及ぼす影響が大きいと考えられるため、放射量の測定やモデル化が重要である。人体への入力放射量に形態係数と建物表面温度から算定される赤外放射量と日射量を用いる場合が多いが、本研究ではグローブ温度計と気温、風速の測定値を用いることにより複雑な放射環境にある外部空間での放射量を算定する手法をとる。ここに、グローブ温度とは周囲における気温、放射、風の状態を温度情報として表したもので、通常、球状のVernon式グローブ温度計(黒球温度計)で測定される。

3. 人体の体温調節系の特性に基づく温冷感指標

3.1 新標準有効温度 SET*の計算方法

人体の体温調節系は、環境温度が変化しても、体内部の温度を一定のレベルに維持するように働く。常温付近では、皮膚血流量が変化することにより、体外との熱の授受を調節しているが、これのみで体内温度の制御が不可能になると、発汗やふるえによる体温調節が行われるようになる。Gagge ほか(Gagge *et al.*, 1971; Gagge *et al.*, 1976)はこのような基本的な人体の温熱生理現象を2層モデルとしてモデル化し、新標準有効温度 SET*の算出に用いている。ここでは、この2層モデルを基本に、人体の温度情報の統合に関する知見を用いた温冷感指標(温度負荷量)を示す。

人体の代謝熱量が体深部(体温が恒温的な部分)から体表部(皮膚などの変温的な部分)と衣服を通過して外界へ放出されるとき熱収支は、衣服と体表面の間での熱と水蒸気の流れを定常現象とみなすと次のように表される。

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = H_{cr} = M - C_{res} - E_{res} - W - M_{sk} \quad (1)$$

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = H_{sk} = M_{sk} - E_{sk} - R - C \quad (2)$$

左辺は体深部と体表部の温度変化率を表しており、 C_{cr} : 体深部の熱容量、 C_{sk} : 体表部の熱容量、 T_{cr} , T_{sk} はそれぞれ体深部温度と体表面温度である。熱容量の算出に必要な人体の体表面積には藤本ほか(1968)の式を用いた。一方、右辺は熱流量を表し、 H_{cr} : 体深部へ供給される熱流量、 H_{sk} : 体表部へ供給される熱流

量, M :代謝熱量, C_{res} :呼吸による顕熱輸送量, E_{res} :呼吸気道からの潜熱輸送量, M_{sk} :血流及び体組織による熱伝導量, W :外部に対してなした仕事, E_{sk} :体表面からの蒸発による潜熱輸送量, R :衣服表面から大気と地物への正味放射量, C :衣服表面からの顕熱輸送量である. 熱輸送量はいずれも人体の単位表面積, 単位時間あたりの熱量である. E_{sk} の算出上, 定数 $C_{sw}=200$ ($gm^{-2}h^{-1}$) を与えた (Gagge *et al.*, 1976). C_{res} , E_{res} の算出は Fanger (1972) に従った. 衣服表面から放出される顕熱輸送量 C と正味放射量 R の和は式 (3) で表される.

$$R+C=f_{cl}[h_r(T_{cl}-T_r)+h_c(T_{cl}-T_a)] \\ =f_{cl}h(T_{cl}-T_0) \quad (3)$$

ここに, f_{cl} :被服を着用していることによる体表面積の割増係数 ($f_{cl}=1+0.15I_{clo}$), h_r :人体の放射熱伝達率, h_c :人体の対流熱伝達率, T_{cl} :着衣表面温度, T_r :平均放射温度 (ある点 (人間) に対する天空からの大気放射量, 日射量, 地物からの反射光と赤外放射量の全てを長波放射量に置き換えたときの環境の有効な放射温度, °C), T_a :気温 (°C), I_{clo} :クロー値 (着衣抵抗を表す単位: clo で, $1clo=0.155^\circ C m^2 W^{-1}$), $h=h_r+h_c$, T_0 :作用温度である. 式 (3) で定義される作用温度 T_0 は,

$$T_0=(h_r T_r+h_c T_a)/h \quad (4)$$

で計算される, T_r と T_a の重み付き平均のような温度である.

人体の対流熱伝達率 h_c は姿勢や風速により異なるため, ここでは Nishi and Gagge (1970) の求めた式 (5) を用いる. ただし, 微風条件 ($U<約0.14 ms^{-1}$) では自然対流時の値として $h_c=3.0 Wm^{-2}K^{-1}$ を与える. また, 屋外における放射熱伝達率は式 (6) により与える.

$$h_c=8.6U^{0.531} \quad (5)$$

$$h_r=\frac{A_r}{A_b}\sigma(T_{cl}+T_r+2\times 273.2) \\ [(T_{cl}+273.2)^2+(T_r+273.2)^2] \quad (6)$$

ここで, U :風速 (ms^{-1}), σ :ステファン・ボルツマン定数 ($5.67\times 10^{-8}Wm^{-2}K^{-4}$), A_r/A_b は, 人体の腋下, 脚内面などの互いに向かい合う部分での相互放射の影響をあらわしており, $A_r/A_b=0.8$ とする (堀越ほか,

1978).

本研究では, 屋外における平均放射温度 T_r を算出する手段として, 大気や地物から受ける放射の各成分の値と, 放射の方向と物体表面の形態に依存する形態要因や周囲物体等の配置状態を表わす形態係数を用いて算術的に求める代わりに, グローブ温度から推定する手法を用いる. グローブ温度は周囲における気温, 放射, 風の状態を温度情報として表したもので, 通常, 球状の Vernon 式グローブ温度計 (黒球温度計) で測定する. 平均放射温度 T_r (°C) はグローブ温度 T_g (°C) と周囲の気象条件から次式にしたがって算定する.

$$\epsilon_h\sigma(T_r+273.15)^4=C_g+R_g \quad (7)$$

$$R_g=\epsilon_g\sigma(T_g+273.15)^4 \quad (8)$$

ここに, C_g :グローブの単位表面からの顕熱輸送量, R_g :グローブ表面からの赤外放射量の面積平均値, ϵ_g :グローブ温度計の射出率 (1.0), ϵ_h :着衣の射出率 (0.98) である. 顕熱輸送量 C_g はグローブ温度と気温の差の関数として, Yuge (1960) に基づき, 次式で表す.

$$C_g=h_{cg}(T_g-T_a) \quad (9)$$

$$h_{cg}D/\lambda=2+0.55Re^{0.5}(c_p\mu/\lambda)^{1/3} \\ (10<Re<1.8\times 10^3) \quad (10)$$

$$h_{cg}D/\lambda=2+0.34Re^{0.566}(c_p\mu/\lambda)^{1/3} \\ (1.8\times 10^3<Re<1.5\times 10^5) \quad (11)$$

ここに, Re :レイノルズ数 (UD/ν), D :グローブ温度計の直径 ($=0.15 m$), ν :空気動粘性係数 (m^2s^{-1}), μ :空気の粘性係数 ($Pa\cdot s$), λ :空気の熱伝導率 ($Wm^{-1}K^{-1}$), c_p :空気の定圧比熱 ($JK^{-1}kg^{-1}$) である.

人体の基礎代謝量は, 年齢や性別に依存し, また季節変動を示す. 本モデルでは既存のデータ (空気調和衛生工学会, 1987) に基づいて, 基礎代謝量を年齢 y の回帰式 (式 (12), (13)) により算定する. また, 季節的な変動や姿勢によっても変化することから, 中山・入来 (1987a) に従い, 季節に関する補正 (夏期で 5% 減, 冬期で 5% 増) と姿勢に関する補正 (立位では 40% 増) を行った値が実際の代謝量 M (Wm^{-2}) であると仮定する.

$$M = -0.0002y^3 + 0.0267y^2 - 1.288y + 61.9 \quad (12)$$

(男性)

$$M = -0.0002y^3 + 0.0235y^2 - 1.138y + 55.6 \quad (13)$$

(女性)

SET*は式(1)～(4)を用いて計算される熱収支に基づき、湿度50%、風速0.1～0.15 ms⁻¹、着衣量0.6clo、代謝量1.0～1.2 Met (1 Met = 58.2 Wm⁻²)の仮想的環境における作用温度であり、次式により表される。

$$H_{sk} = hF_{cl} (T_{sk} - SET^*) + wL_R h_c F_{cl} (P_{s,sk} - 0.5 P_{s,SET^*}) \quad (14)$$

ここで、 w ：ぬれ面積率(全体表面積に対するぬれている面積の割合)、 $L_R = 2.2 h_c$ 、 $P_{s,sk}$ ：皮膚温度での飽和水蒸気圧、 P_{s,SET^*} ：空気温度がSET*の時の飽和水蒸気圧である。 T_{sk} は式(2)を基本に算出される。

3.2 温度負荷量 TL の提案

暑い、寒いという温冷感覚が生理学的にどこで、どのような情報に基づいて決定されているかについてはまだ十分解明されていない点が多いが、寒暑の感覚は皮膚温度受容器からの生体信号と深部温度受容器などからの信号の統合により高次的に決定されていると考えられている(入来, 1995; 中山・入来, 1987b)。そこで、情報の統合様式として加算的統合を用いた指標(温度負荷量 TL)を次のように定義する。

$$TL = (T_{sk} - T_{sk, set}) + \beta(T_{cr} - T_{cr, set}) \quad (15)$$

ここに、 T_{sk} 、 T_{cr} はそれぞれ式(1)(2)を基本とする体温調節系モデルにより計算される体表面温度と深部温度、 $T_{sk, set}$ (33.7°C)、 $T_{cr, set}$ (36.8°C)はそれぞれ皮膚温度と体深部温度のセットポイント(温熱生理的に中立時の温度)を意味する。無次元の重み係数 β は自律神経系の反応に関するCabanac (1975)の結果に基づき3.0を与える。SET*では実際の気象条件とSET*算出のための標準的な気象条件の双方に対して同じ対流熱伝達率 h_c とぬれ面積率 w を用いて近似しているが、TLはこのような近似を含まない。また、温度情報の統合化に関する生理学的知見をモデル化している点がSET*と異なる。

4. 温冷感指数 TSI の提案

人体熱収支解析によらず、数値プログラムを用いる必要のない簡易な指標としては、前述のように不快指

数、風力冷却指数などがある。いずれも適用できる気象条件は限られており、夏期、冬期の屋外に適用できる簡易な指標は提案されていない。そこで、屋外では放射、風の影響が大きくなることを考慮し、作用温度 T_o と風速 U を用いた次式を温冷感指数 TSI として提案する。

$$TSI = a_1(\sqrt{U} + a_2)(T_b - T_o) + a_3 \quad (16)$$

ここで、風速 U の単位はms⁻¹、 a_1 、 a_2 、 a_3 は実測値に基づき求められる無次元定数(6.3節参照)、 T_b は基準温度(36.8°C)である。作用温度 T_o の算出にあたって、対流熱伝達率 h_c に式(5)を用いる。また、放射熱伝達率は式(6)から求めた夏期と冬期の平均的な値としてそれぞれ $h_r = 6.12$ (Wm⁻²K⁻¹)及び4.81 (Wm⁻²K⁻¹)を用いる。平均放射温度 T_r はグローブ温度の測定値 T_g と式(7)(8)(9)により算定する。

5. 温冷感覚の現地実験

前章までに提案した2つの指標(TLとTSI)を含む各種の指標と実際の温冷感との対応関係を調べるため、第1表に示す6都市内の市街地、水辺空間、沿道、公園、緑陰等の空間を対象に温冷感の申告実験を行い、同時に、指標の算出に必要な気象要素等を計測した。

申告実験と気象要素等の現地実験は夏期晴天日の9時、13時、17時の3回、各回に5～10地点を移動しながら行った。計測した気象要素は、気温、湿度、風速、グローブ温度で、これらの値から人体への入力放射量(平均放射温度 T_r)を推定した。気象要素は1地点あたり5分間計測した後、次の地点に移動し、同様の計測を繰り返した。温度と湿度は日射を遮蔽するステンレス製強制通風管の中に装着されたセンサーで計測した。グローブ温度計はそれぞれの計測地点に予め設置しておいた。各都市の観測時の気象条件を第2、3表に示す。夏期、冬期ともに広範な気象条件となっている。

グローブ温度計の指示値のみから人体のアルベドに対応した入力放射量を正確に推定できないことが指摘され、黒色と白色の1対のグローブ温度計を用いて人体のアルベドを考慮した入力放射推定法が提案されている(神田ほか, 1996a)が、人間の衣服のアルベドを被験者各人毎に定めるのは困難であることや、頭部のアルベドに近い値を与えると考えられる黒色のグローブ温度計を用いることは現在の種々の不確定要因の下では許される手段であると考えた。グローブ温度から

第1表 調査地点の分類

都市名	地点数	観測地点の種類
つくば市	5	駐車場, 水辺, 草地, 樹林
新潟市	9	公園, 駐車場, 水辺, 堤防上, 緑地
大宮市	5	住宅地, 公園, 水辺
名古屋市	7	住宅地, 堤防上, 緑地, 水辺
松山市	10	幹線道路, 緑地, 水辺
大分市	5	緑地, 水辺, 広場, 駐車場

第2表 現地観測時の気象条件 (夏期)

	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (ms ⁻¹)	グローブ温度 (°C)
つくば市	27.1-29.0	63.2-67.2	0.4-2.1	27.9-38.1
大宮市	28.9-32.7	34.7-57.5	0.1-4.6	28.2-41.8
新潟市	27.4-33.0	52.3-69.3	0.2-4.8	28.5-46.4
名古屋市	31.6-37.6	36.0-65.0	0.5-5.6	29.2-54.3
松山市	28.4-33.7	51.1-67.0	0.5-1.9	30.5-51.0
大分市	30.1-35.5	48.0-72.0	0.5-2.5	31.3-49.2

第3表 現地観測時の気象条件 (冬期)

	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (ms ⁻¹)	グローブ温度 (°C)
大宮市	2.5- 8.7	46.0-54.9	0.5-1.5	7.5-18.3
新潟市	1.6- 4.2	44.0-84.6	0.4-4.3	2.2-25.3
名古屋市	1.3- 7.2	49.0-90.0	0.7-8.7	2.0-22.2
松山市	5.3-11.2	40.4-55.4	0.2-2.6	5.8-23.1
大分市	3.3- 7.3	33.8-54.9	1.2-2.5	4.9-18.4

得られる平均放射温度と気温, 風速, 湿度を用いて温冷感を推定する手法が確立されて, かつ, 黒球の受ける放射量の推定に中村・平岡(1986)や山口・小林(1980)などの研究成果を適用すれば, 気象予報と連動させた温冷感予報も可能になると考えられる.

熱環境が同一でも, 人間の温冷感覚には個人差がある. このような個人差を平均化するため, 1地点当たりの被験者は原則として性別, 年齢層に幅を持たせた10名とし(夏期, つくば市のみ5名), 各自の申告値の平均を各時刻, 各地点における平均的温冷感とした. 地点の種別, 被験者の延べ人数, 年齢構成等を第4表に示す.

屋外空間では, 気象条件が時間的空間的に変化する非正常性を有している. 非正常性は人体の熱的バランスを変え, ひいては温冷感に影響を及ぼすことから, 長時間の暴露は現実的ではない. また, 本研究では多地点を移動するという実験上の制約もあったため, 被験者は, 各地点で5分間程度, 立位・脱帽状態で居た後, 第5表の回答項目及び音環境, 視環境などに関する他の項目(木内, 2000)ごとに6~8段階の選択肢より最も適当と思われるものを選択し, 用紙に記入し

第4表 被験者の年齢・性別構成

年齢	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代
男性	3	7	7	3	4	7	1
女性	1	11	4	3	4	1	0
合計	4	18	11	6	8	8	1

第5表 温冷感覚に関する選択肢

	夏期	冬期
温冷感	発汗感	温冷感
0.極端に暑い	1.全くない	0.極端に寒い
1.非常に暑い	2.ごくわずかにある	1.非常に寒い
2.暑い	3.わずかにある	2.寒い
3.やや暑い	4.ある	3.やや寒い
4.どちらでもない	5.かなりある	4.どちらでもない
5.やや涼しい	6.汗が流れている	5.やや暖かい
6.涼しい		6.暖かい
7.非常に涼しい		7.非常に暖かい

第6表 各種温冷感指標の適用性比較

指標	夏期		冬期	
	相関係数	標準偏差	相関係数	標準偏差
THI	0.421	0.699	-	-
WCI	-	-	0.310	0.371
SET*	0.850	0.425	0.675	0.298
TL	0.867	0.422	0.666	0.325
TSI	0.879	0.414	0.715	0.291

た. また, 温冷感指標の値を算出するにあたって, 温度, 湿度, 風速等には5分間の平均値を用いた.

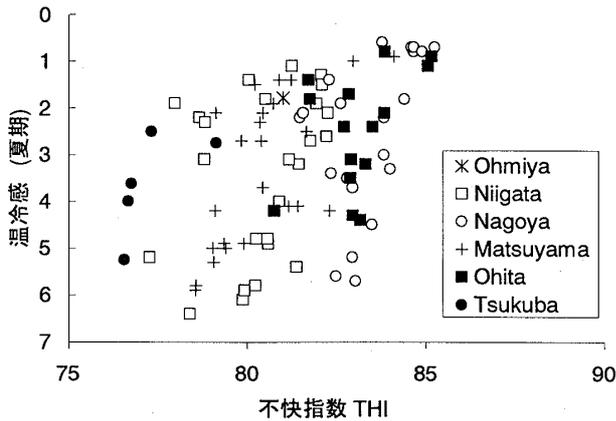
第5表に示す温冷感の選択肢は, 大野ほか(1993)やKuno *et al.*, (1987)を参考に独自に定めたものである. このような尺度を使用した理由としては, 少なくとも日本語の表記においては, 夏期に屋外で「寒い」という感覚表現は滅多に用いられないし, 冬期に屋外で「暑い」という感覚表現も滅多に使用しないことによる. また, 第5表に示す温冷感の選択肢は厳密には順序尺度であるが, 本研究では, 便宜上, 隣接する値に等間隔を想定して間隔尺度として扱うこととし, 6章では各被験者の回答の平均化や相関係数, 標準偏差の算出を行った.

6. 各種温冷感指標と実測の温冷感との関係

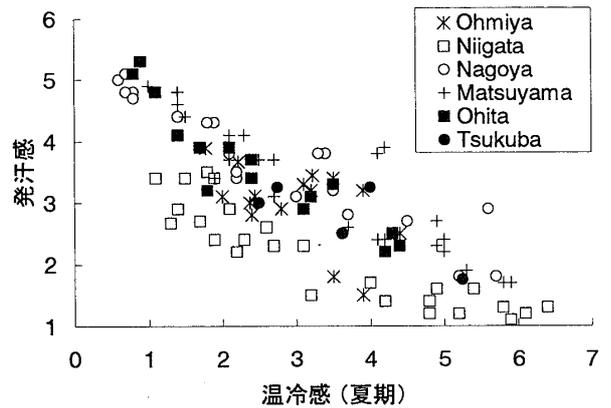
ここでは, SET*, 温度負荷量 TL, 温冷感指数 TSI, 不快指数, 風力冷却指数(計算式は付録参照)を用いて温冷感の申告値との対応関係を比較した.

6.1 夏期データによる適用性の検討

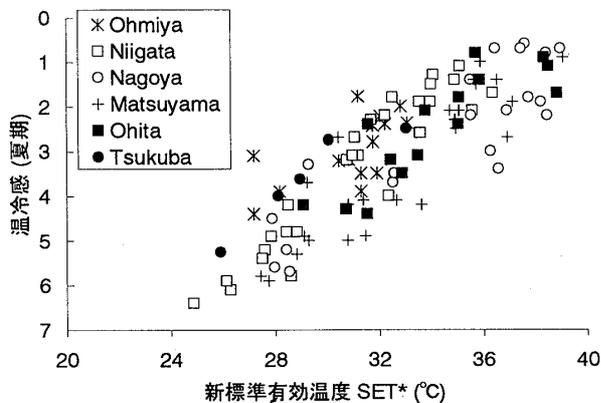
第1図に不快指数と温冷感の申告値の関係を示す. なお, 右上がりのプロットになるように縦軸は反転してある. 両者の関連性は全体としては低く, 気温と湿



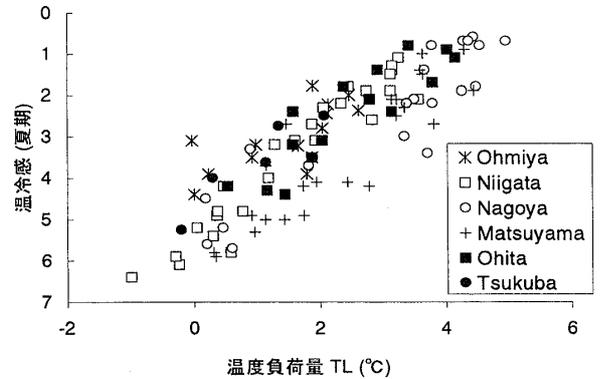
第1図 不快指数 THI と温冷感の関係 (夏期).



第3図 温冷感と発汗感の関係と地域差 (夏期).



第2図 新標準有効温度 SET*と温冷感の関係 (夏期).



第4図 温度負荷量 TL と温冷感の関係 (夏期).

度のみから求まる不快指数の限界が現れている。第2図に体温調節機能や着衣状況といった人体側の条件が加味された SET* と温冷感の申告値の関係を示す。不快指数に較べると両者の相関はかなりよい。ただし、例えば大分市 (■) と新潟市 (□) のデータを比較してみると、人体の環境適応性に基づく地域差のためか、必ずしも同一の直線上にデータがプロットされることがわかる。このような地域特性をみるために、温冷感と発汗感 (第5表参照) の関係を都市別に表したのが第3図である。この図から年平均気温の低い新潟市の場合、発汗の程度が同じでも、他の都市に比べてより暑く感じていることが推論される。他の各種温冷指標と温冷感の関係にも、程度の差はあるものの環境適応性に基づく地域差が含まれていると考えられる。

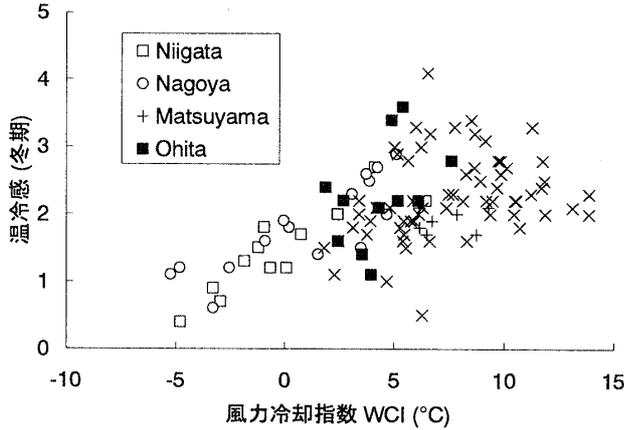
第4図には温度負荷量 TL と温冷感の関係を示す。温冷感との相関性は SET* よりも若干よい程度であった (相関係数で0.017の差, 第6表)。

6.2 冬期データによる適用性の検討

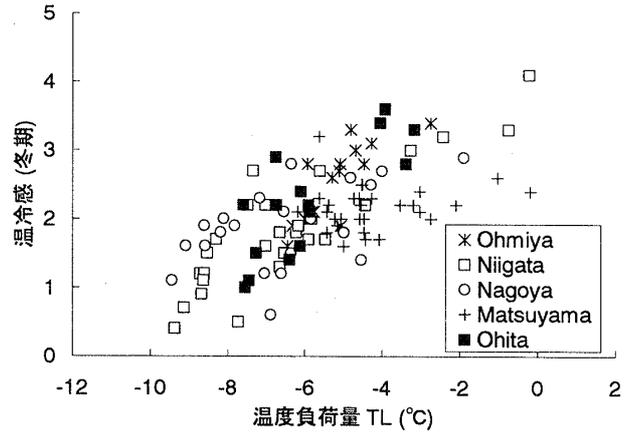
第5図に風力冷却指数 WCI と温冷感の申告値の関係を示す。図中、風速が 1.8ms^{-1} 未満のデータは × で表してある。風力冷却指数は風速と気温のみの関数であるが、WCI が 0°C 程度以下では温冷感と比較的よく対応しており、風速条件を満たせば低温時における温冷感の推定に利用可能である。しかし、風が 1.8ms^{-1} 未満では温冷感との相関がかなり低くなる。これは低風速では放射による冷却が卓越してくるため、風力冷却指数の適用上の限界を示している。

第6図に SET* と温冷感の関係を示す。夏期の場合 (第2図) に較べるとばらつきが大きいものの、両者の間には正の相関関係がみられる。なお、この場合は第5図とは異なり、風速の大小による相関性の違いはみられなかった。第7図には TL と温冷感の関係を示す。TL については、データのばらつきは第6図よりもやや小さい程度である。

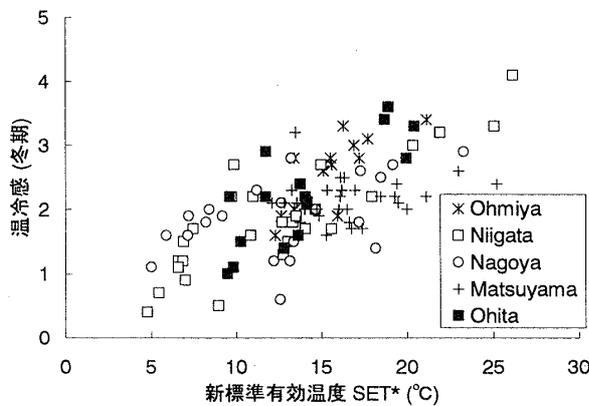
第4図と第7図で TL の等しい幅に対して、温冷感評定値の変化は冬期よりも夏期がかなり大きいことが



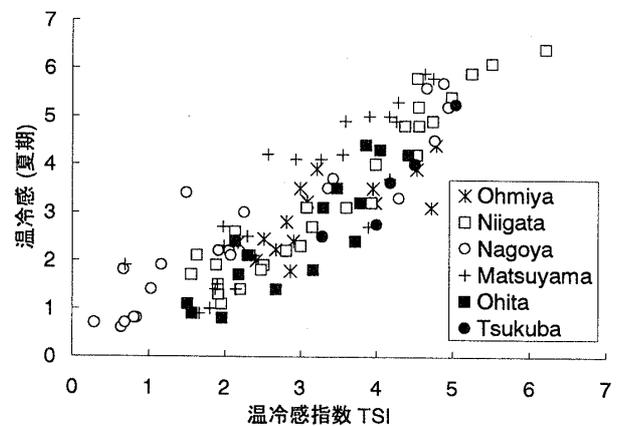
第5図 風力冷却指数 WCI と温冷感の関係 (冬期).
×印は風速が 1.8 ms^{-1} 未満のときを示す.



第7図 温度負荷量 TL と温冷感の関係 (冬期).



第6図 新標準有効温度 SET* と温冷感の関係 (冬期).



第8図 温冷感指数 TSI と温冷感の関係 (夏期).

わかる。このことは、排熱削減などのヒートアイランド対策により夏期と冬期で仮に同じ気温低下が生じたとしても、温冷感の変化は夏期の方が大きいことを意味している。

6.3 温冷感指数 TSI の適用性

夏期及び冬期における TSI (式 (16)) と温冷感の申告値との関係を第8図、第9図に示す。TSI の適用に際して、無次元定数 a_1, a_2, a_3 を夏期はそれぞれ0.158, 0.19, 3.59, 冬期はそれぞれ-0.025, 2.0, 4.19とした。これらは、式 (16) で a_1 に係る項と TSI との相関が極大化するように a_2 を定めることにより求めた。

人体熱収支モデルに基づく SET* や TL は作業状態や着衣量の影響を考慮できる反面、体温調節系モデルにより計算される平衡状態の温度 (T_{sk}, T_{cr}) が必要になる。一方、TSI は作業状態は立位、着衣量はそれぞれの季節のごく標準的な状態にしか適用できないという制約はあるものの、申告値との相関が高く、今回の実測範囲で得られた広範な屋外の気象条件に適用でき

ることから、簡単に計算できる実用的な温冷感指標として利用しやすい。

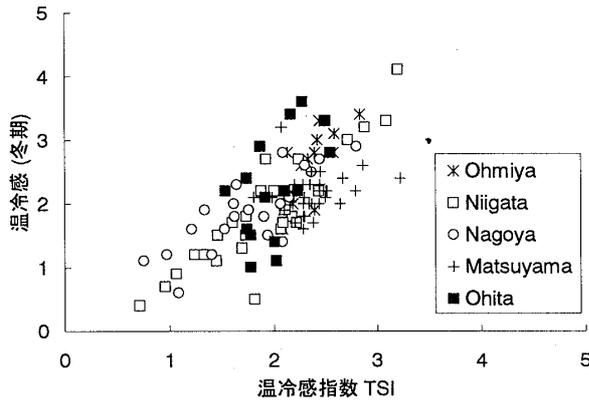
TSI と他の各種温冷感指標の適用性を比較するため、各指標と実際の温冷感覚との間の相関関係及び算定誤差絶対値の標準偏差を第6表に整理した。TSI は夏期、冬期ともに高い相関を示した。冬期の相関が全体的に低い理由として、1つには着衣の個人差が夏より大きいことや着衣量の算定誤差があげられる。

7. 気象条件に対する温冷感の感度分析

7.1 感度分析の概要

温冷感が屋外空間の各気象要素(気温、湿度、風速)の変化にどの程度影響を受けるかを把握するため、温度負荷量 TL を用いて、気象条件に対する温冷感の感度分析を行った。

感度分析に用いる気温、湿度、風速は今回の計測値の範囲内で与えた。ある気象条件で人体が受ける入力放射量は各入力放射に対する球状物体の形態要因を用



第9図 温冷感指数 TSI と温冷感の関係 (冬期).

いて算出した. ここでは快晴の条件とし, 直達日射, 散乱日射, 長波放射に対する球の形態要因はそれぞれ 0.25, 0.5, 0.5 とおく. 日中の全天日射と直達日射は近藤 (1994) により算出する. 日射推定の時間は夏期で 8 月 1 日, 冬期で 2 月 1 日の正午とし, 混濁係数は 0.1 と仮定した. 大気からの長波放射は Yamamoto (1950) から求めた. 住宅地を想定していることから, 地表面はアスファルト舗装とし, 建物壁面からの日射の反射や長波放射は無視した. 地表面からの長波放射の算出に必要な地表面温度は地表面の熱収支式から求めた. この際, Grimmond (1991) の検討から, 地中伝導熱 G と正味放射量 R_n の関係 $G = b_1 R_n + b_2 \partial R_n / \partial t + b_3$ を仮定した. ここで, $b_1 \sim b_3$ は比例定数である. 正味放射量がピークに達する正午付近では $\partial R_n / \partial t$ を省略できる. 定数にはアスファルト舗装に対して Asaeda and Ca (1993) が報告した値 ($b_1 = 0.64$, $b_3 = -43.58$) を用いた. アスファルト舗装面からの短波放射の反射率はアルベドを 0.1 に仮定して求めた.

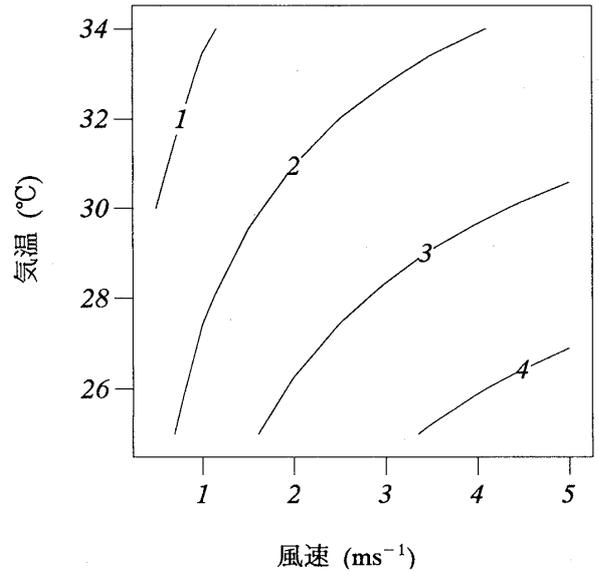
温冷感算定の対象は 40 歳の男性で, 身長 170 cm, 体重 70 kg と仮定した. クロー値 I_{clo} は夏期で 0.6 clo, 冬期で 1.4 clo とした. 温度負荷量 TL の計算結果は第 4 図と第 7 図から求めた次式を用いて温冷感に換算した. ただし, 冬期に対しては, 夏期よりもばらつきが大きいため, 相関性の比較的良好な新潟市のデータのみから作成した次の関係式を用いた.

$$\text{温冷感} = -0.937 \text{ TL} + 5.053 \quad (17)$$

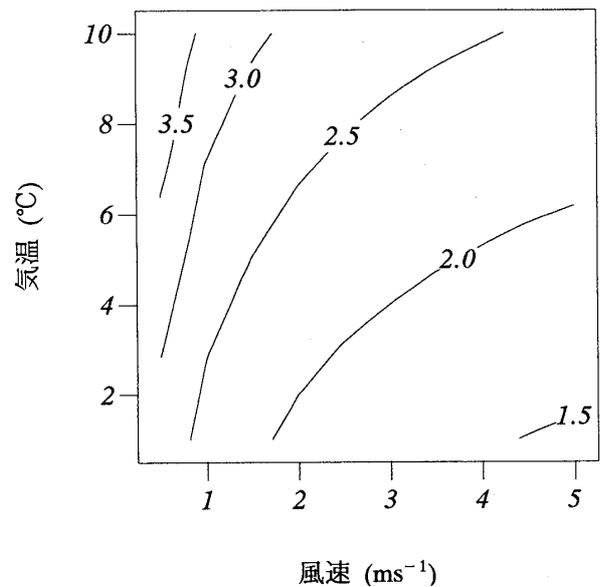
(夏期, 相関係数 = 0.87)

$$\text{温冷感} = 0.319 \text{ TL} + 3.894 \quad (18)$$

(冬期, 相関係数 = 0.87)



第10図 気温と風速の組み合わせによる温冷感の違い(夏期). ただし相対湿度50%のとき.

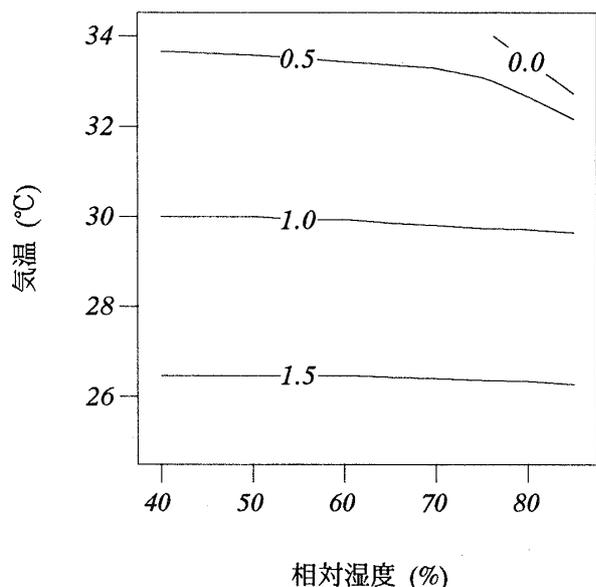


第11図 第10図に同じ, ただし冬期.

7.2 感度分析結果

第10図, 第11図は晴天日の夏期及び冬期の正午を想定し, 気温, 風速を変化させて計算した TL から式 (17), (18) を用いて求めた温冷感の等値線を示したものである. なお, 相対湿度は 50% に固定した. 図中の等値線の特徴は夏期と冬期で類似しているが, 温冷感レベルの等値線間隔が冬期で広い. また, 風速が 1 ms^{-1} 程度以下の微風では, 気温の変化に対する温冷感の変化率は小さいことがわかる.

一方, 第12図は夏期における気温と相対湿度の温冷感に対する感度を示しており, 風速は 0.5 ms^{-1} の一定



第12図 気温と相対湿度の組み合わせによる温冷感の違い(夏期)。ただし風速 0.5 ms^{-1} のとき。

値を与えている。図中右上の高温・高湿の状態を除けば、相対湿度の違いは温冷感にほとんど影響を及ぼさない。冬期についてはここに示さないが、夏期よりもさらに湿度の影響は小さくなる。TSIが湿度を変数として含んでいないにもかかわらず、温冷感の申告値をよく再現できているのも、湿度の影響が小さく、風と放射の影響が大きいからであると考えられる。

8. おわりに

本論文では、夏期と冬期の温冷感指標を得るため、2つの新たな温冷感指標を提示し、既存の指標とともに適用性を検討した。1つはGaggeほかの人体熱収支解析モデルに体温調節に関する温度情報の統合の概念を適用して算出される温度負荷量 TL である。また、もう1つは作用温度と風速の関数で表される温冷感指数 TSI で、熱収支解析モデルを必要としない。

6都市において調査した屋外気象データを用いて算出されるこれらの指標及び既存の指標(不快指数、新標準有効温度 SET*, 風力冷却指数)の値と実際の温冷感の申告結果との対応関係について検討を行い、次の結果を得た。

- 1) 夏期の場合、不快指数は風と放射条件が変化する屋外の温冷感を推定するには不相当である一方、他の指標は温冷感申告値との相関が高い。相関係数で判断すると TL や TSI が夏期の温冷感指標として優れている。

- 2) 冬期の場合、風力冷却指数は風速 1.8 ms^{-1} 以上で温冷感とよい相関が見られた。また、相関係数で判断すると SET* と TSI が冬期の温冷感指標として優れている。
- 3) 人体熱収支の解析によらずに温冷感を簡単に推定できる温冷感指数 TSI は、測定データをもとに求めた定数を与えることによって、夏期、冬期ともに他の指標と同等かそれ以上の精度で温冷感を推定できる。ただし、TSI はグローブ温度の測定値あるいは推定値を必要とする。
- 4) 温度負荷量 TL を用いて気温、湿度、風速の感度分析を行った結果、夏期、冬期ともに微風状態では、人間の温冷感は気温の変化に対して鈍感であることや、風速が小さい(0.5 ms^{-1})状態において、相対湿度の大小は温冷感にあまり影響しないことがわかった。

提案した指標を用いて温冷感の推定を行う場合には、グローブ温度と気温、風速、湿度が必要なため、複雑な屋外の放射環境下におけるグローブ温度は既往の研究成果など別途の検討成果を適用して推定する必要がある。

謝辞

現地実験の実施に当たっては、建設省各地方建設局(当時)のご協力を頂いたとともに、小林裕明氏(前土木研究所都市河川研究室研究員)に手伝って頂いた。ここに記して謝意を表する。

付録

不快指数 THI, 風力冷却指数 WCI はそれぞれ式(A1), (A2) で表すことができる。

$$\text{THI} = 0.81 T_a + 0.01 Rh(0.99 T_a - 14.3) + 46.3 \quad (\text{A1})$$

$$\text{WCI} = 33 + (T_a - 33)(0.55 + 0.417\sqrt{U} - 0.0454 U) \quad (\text{A2})$$

($U \geq 1.79 \text{ ms}^{-1}$, $T_a < 33^\circ\text{C}$)

ただし、 T_a ($^\circ\text{C}$)は気温、 Rh (%)は相対湿度、 U (ms^{-1})は風速である。

参考文献

- Asaeda, T. and Vu T. C., 1993: The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, Bound.-layer

- Meteor., 65, 159-179.
- Brown, R. D. and T. J. Gillespie, 1986: Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model, *Int. J. Biometeor.*, 30(1), 43-52.
- Cabanac, M., 1975: Temperature regulation, *Ann. Rev. Physiology*, 37, 415-439. [中山昭雄, 入來正躬 編集: 新生理科学体系第22巻, 第4章・体温調節機構, 医学書院] より引用.
- Fanger, P. O., 1972: Thermal comfort, McGraw-Hill, 244pp.
- 藤本薫喜, 渡辺 孟, 坂本 淳, 湯川幸一, 森本和枝, 1968: 日本人の体表面積に関する研究, *日本衛生誌*, 23, 443-450.
- 古田隆司, 堀越哲美, 2000: 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, *日本建築学会計画系論文集*第533号, 45-49.
- Gagge, A. P., J. A. Stolwijk and Y. Nishi, 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions*, 77, 247-262.
- Gagge, A. P., Y. Nishi, and R. G. Nevins, 1976: The role of clothing in meeting FEA conservation guidelines, *ASHRAE Transactions*, 82, Part2, 234-247.
- Grimmond, C. S. B., H. A. Cleugh and T. R. Oke, 1991: An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes, *Atmos. Environ.*, 25B(3), 311-326.
- 堀越哲美, 宮原英雄, 小林陽太郎, 1978: 人体と矩形面との間の形態係数及び人体の有効輻射面積に関する研究, *日本建築学会論文集*, 268, 109-120.
- 入來正躬編集, 1995: 体温調節のしくみ, *人工環境—温熱環境における快適性*, 文光堂, 161-177.
- 石井昭夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉水久雅, 阿部嘉孝, 1988: 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*, (386), 28-37.
- 鄭梶元, 堀越哲美, 梅村茂樹, 宮本征一, 水谷章夫, 1997: 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集*, (493), 77-84.
- 神田 学, 土屋信夫, 1995: 微気象観測に基づいた屋外における人体の熱環境解析, *土木学会論文集*, (509)/II-30, 35-44.
- 神田 学, 柳本記一, 宇梶正明, 1996a: 新しい屋外用温熱感指標の提案, *土木学会論文集*, (545)/II-36, 1-10.
- 神田 学, 木内 豪, 小林裕明, 1996b: 新しい屋外用温熱感指標による熱環境評価—多摩川河川敷における観測を例に, *水工学論文集*, 40, 237-242.
- 木内 豪, 2000: 複合的環境条件における都市空間の快適性評価手法に関する研究, *土木学会論文集*, (664)/VII-17, 31-42.
- 近藤純正編, 1994: 水環境の気象学, 朝倉書店, 86-92.
- Kuno, S., H. Ohno and N. Nakahara, 1987: A two dimensional model expressing thermal sensation in transitional conditions, *ASHRAE Transactions*, 93(2), 396-406.
- (社)空気調和衛生工学会編, 1987: 空気調和衛生工学便覧 I 基礎編, 第3章, I-55, オーム社.
- 持田 徹, 1992: 新有効温度 ET*の成果・特徴と問題点, *日生氣誌*, 29, 135-139.
- 中村泰人, 平岡久司, 1986: 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, *日本建築学会計画系論文報告集*, (369), 12-21.
- 中山昭雄編, 1981a: 温熱生理学, 理工学社, 147.
- 中山昭雄編, 1981b: 温熱生理学, 理工学社, 126.
- 中山昭雄, 入來正躬編集, 1987a: 新生理科学体系第22巻, エネルギー代謝・体温調節の生理学, 第2章・エネルギー代謝, 医学書院, 56-74.
- 中山昭雄, 入來正躬編集, 1987b: 新生理科学体系第22巻, エネルギー代謝・体温調節の生理学, 第4章・体温調節機構, 医学書院, 213-234.
- 中山昭雄, 入來正躬編集, 1987c: 新生理科学体系第22巻, エネルギー代謝・体温調節の生理学, 第3章・体温と調節反応, 医学書院, 102.
- Nishi, Y. and A. P. Gagge, 1970: Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *J. Appl. Physiology*, 29, 830-838.
- 西 安信, 1992: PMVの成果と問題点, *日生氣誌*, 29, 141-146.
- 大野秀夫, 堀越哲美, 久野 覚, 土川忠浩, 松原斎樹, 伊藤尚寛, 1993: 快適環境の科学, 朝倉書店, 190pp.
- 梅村茂樹, 堀越哲美, 1991: 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*, 1485-1486.
- 山口賢次郎, 小林陽太郎, 1980: 建築外部環境と人体との間のふく射熱授受について, *日本生気象学会誌*, 17(1), 49-57.
- Yamamoto, G., 1950: On nocturnal radiation, *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys.* 2, 27-43.
- Yuge, T., 1960: Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, C82, 214-220.

A Study on Thermal Indices for the Outdoor Environment

Tsuyoshi KINOUCHI*

* *Hydraulic Engineering Research Group, Public Works Research Institute,
Minamihara 1-6, Tsukuba 305-8516, Japan.*

E-mail : kinouchi@pwri.go.jp

(Received 24 April 2000 ; Accepted 3 July 2001)

Abstract

This paper aims at obtaining predictive indices of human thermal sensation for the outdoor environment. Two indices are newly suggested : one is named temperature load TL that is derived from the skin and core temperatures estimated from two-nodes model of Gagge et al. (1971), and the other one is temperature sensation index or TSI, which is a regressional function of wind velocity and operative temperature. The applicability of suggested indices, i. e. TL and TSI were tested along with other existing indices such as SET*, the temperature humidity index THI and the wind chill index WCI. The dataset on temperature sensation collected for several cities in Japan were used to see the correlation with thermal indices. For the summer condition, TL and TSI have better correspondence with answered thermal sensation. It was also shown that TSI can be practical measure to estimate temperature sensation for winter as well. Finally, the sensitivity of air temperature, humidity and wind velocity to thermal sensation was investigated using TL-based temperature sensation.



海洋科学の教育と研究のための船舶不足と水産系大学練習船の活用について

日本学術会議海洋科学研究連絡委員会は、廃止されようとしている水産系大学練習船を海洋学教育船へと転換することの必要性を世に訴えることとなった。このための報告書は学術会議のホームページ

<http://www.scj.go.jp/info/pdf/kohyo-18-t961-2.pdf>
に掲載されているので興味ある方はご覧下さい。