

**投稿論文(和文)**  
**PAPERS**

# 新しい屋外用温熱感指標の提案

神田学<sup>1</sup>・柳本記一<sup>2</sup>・宇梶正明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学 工学部開発システム工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>正会員 山梨県森林土木コンサルタント (〒400 山梨県巨摩郡敷島町下条227-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 熊谷組技術研究所 環境系研究開発部 (〒300-22 つくば市大字鬼が窪1043)

屋外における実用的な温熱感指標の導出を目的とし、日射・風速・気温・湿度の4成分の気象要因を制御できる人工気象室を用いて、(1)気象測定、(2)人体生理反応測定、(3)温熱感アンケート、の同時計測を行った。その結果、1)代謝量の時間変化は無視し得ること、2)発汗作用が人体熱収支および皮膚温変化に大きな影響を及ぼしていること、3)30分～1時間では発汗条件下にある人体の熱平衡が達成されていないこと、が明らかとなった。実験結果を基に、人体熱収支に基づいた新しい屋外用温熱感指標「仮想熱負荷量 (Virtual Thermal Load)」を提案した。本指標の最も重要な生理パラメーターである皮膚の湿り度( $\beta$ )は、実験結果から仮想熱負荷量の一価関数として同定された。仮想熱負荷量は温熱感ときわめて良い対応関係を示し、本指標の有効性が確かめられた。

**Key Words :** thermal sensation, climate simulator, virtual thermal load, energy balance of human body

## 1. はじめに

### (1) 研究の目的

都市構造物の周辺域への熱的影響や、森林・河川などが有する気候緩和の機構解明など、微気象学的な見地に立った研究が土木工学分野においても活発に行われるようになってきた。その一方で、それらの成果をいかにして定量的な環境評価・計画に結びつけていくか、という視点からの研究も工学上はきわめて重要であろう。その場合、周囲環境の把握のみならず、人間側の反応にまで立ち入ったいわゆる「人間環境工学」的アプローチが不可欠となる。神田・土屋(1995)<sup>1)</sup>は、屋外の実測と人体熱収支を基礎理論とした物理的なアプローチにより、植生やアスファルトなどの土地被覆の違いが人体の温熱環境そのものにどのような影響を及ぼすかを論じた。しかし、そこで用いられた熱収支指標はあくまで物理的に導出された指標であり、実際の人体の温熱感との関係については論じられなかった。また、熱収支解析において用いられる様々な仮定は、屋外環境に比してきわめて平穏な室内環境での生理学的知見をそのまま踏襲したものであり、それらが屋外環境でも成り立つ保証はない。屋外熱環境の評価に人体熱収支解析を導入している研究はいくつかあるが<sup>2)</sup>、いずれも室内の温熱環境指標をそのまま使用しているのが現状である。本研究の目的は、以上を踏まえて、

1) 屋外暑熱環境における人体の温熱生理反応を実験的に把握すること、

- 2) その結果を人体熱収支式に取り入れ、合理的な温熱感指標を導出すること、および
- 3) その指標が実際の温熱感を代表するものであることを確認する、の3点とする。

### (2) 本論文で考える温熱感指標の前提条件

本研究で目指す温熱感指標は、あくまで「環境評価」のためのものである。

#### a) 客観性

工学的使用の見地から、温熱感指標は、測定が容易な気象データのみから導出され得ることが望ましい。人体生理パラメーターは本質的な部分のみにとどめる。

#### b) 空間スケール

屋外の気象環境は本質的に局地性の強いものである。日陰と日向で体感温度は大きく異なる。この点を考慮し、人体スケールに対応できる温熱感指標を目指す。

#### c) 時間スケール

10分～15分程度。通常の気象値(気象庁では10分平均値)に対応した平均的温熱感指標を考える。これ以上長いと気象条件そのものが変化してしまうし、短いと変動成分の非定常性の影響が大きくなる。

## 2. 人工気象室での実験概要

### (1) 人工気象室の概要

使用した人工気象室は、熊谷組技術研究所所有の「人工気象シュミレータ」である。大きさは、水平

10m x 6m x 高さ7m で、内壁は全てステンレス製である。制御できるのは、温度・相対湿度・風速・日射量である。人工気象室内は床面に取り付けられた50cm四方程度の排気口・吸気口を通じて、室外の循環式ダクトとつながっており、このダクト部で人工気象室内に流入する空気の温度および相対湿度を制御する仕組みとなっている。従って、1) 風速ファンを起動しない無風条件下でも、換気に伴うきわめて微弱な循環流(室内風速0.3m/s以下)が存在すること、および2) 壁面の熱放射の影響で、実際の人工気象室内の気温・湿度は流入空気の設定値とは異なる(日射が多い条件の時ほどこの違いは顕著になる)、という2点に留意しておく必要がある。気温は、10~30(°C)、相対湿度は、40~80(%)の範囲で制御可能である。日射装置は、高さ7mの天井に取り付けられており、太陽光のスペクトル特性に極めて近いメタルハライドランプを使用している。0~800(W/m<sup>2</sup>)の範囲での制御が可能である。風速は、直径50cmの風速ファン2台によって0~5(m/s)の範囲で制御される。ファンの風が、人体正面に平行に吹き付けるように人工気象室内にセットされている。

## (2) 実験条件

実験は、2種類行っている。

実験A：被験者の詳細な温熱生理学的データの取得を目的とし、男女それぞれ1名について行った。

実験B：温熱感および生理反応の個人差の影響を平均化することを目的とし、実験Aをやや簡略化した形で、4人の男子学生について行った。

以下、その詳細について述べる。

### a) 実験A概要

被験者は、快適に保たれた控え室で1時間過ごした後、裸体(水着)となり、日射病防止のためのヘルメットを着用して人工気象室に入室し、直ちに、部屋の中央の椅子に着席する。椅子の下には精密電子台秤がセットされ体重変化が測定される。呼吸活動に伴う酸素吸収量・二酸化炭素放出量を計測するためのマスクを装着し、腋下にはコア温度測定用のサーミスタ温度計を挟む。被験者の真正面には風速ファンが、その奥にはサーモグラフィが設置されており、体表面温度および周囲壁面温度の計測が行われる。被験者は、5分おきに被験者アンケートに回答する作業を行う以外は、椅座のまま安静状態を保つ。

人工気象室内の気象測定項目は、気温・湿度・風速・上向きおよび下向き短波放射・上向きおよび下向き長波放射・黒球温度・白球温度であり、各センサーは被験者の横に置かれた床上高さ1mの三脚にコンパクトにセットされる。

以上の測定項目と測定機器を表-1に示す。また、

アンケート調査内容を表-2に示す。

実験開始後、流入空気の温度・湿度および日射条件を一定値としたままで、風速を20分ごとに、2.0(m/s)→1.2(m/s)→0.0(m/s)と段階的に変えながら、1時間の連続測定を行い、これを1ケースとする。男女各1名に対し、流入空気温度を2段階(30, 27°C)・流入空気湿度を2段階(80, 40%)・日射を3段階(800, 400, 0 W/m<sup>2</sup>)に変えて組み合わせた計12ケースの実験条件を設定し、これを男女それぞれ一名に対して行った。その設定条件一覧を表-3に示す。

### b) 実験B概要

実験Aとの相違点を以下に述べる。

- 1) 男4人が同時に並んで、被験者となる。体重測定、コア温度測定、O<sub>2</sub>およびCO<sub>2</sub>測定は行わず、それ以外は実験Aと同じである(表-1)。
- 2) 1ケースの測定時間は40分で、風速は、20分で2.0(m/s)→0.0(m/s)に切り替える。その他の環境設定条件は、実験Aと同じである(表-3)。

### c) 被験者プロフィール

被験者は、いずれも20代である。他の年齢層については今後の課題としたい。被験者のプロフィールを表-4に示す。表中の人体の表面積AD(m<sup>2</sup>)は、身長H(m)および体重W(kg)から、以下のDuboisの式(1)<sup>3)</sup>を用いて算出した。

$$AD = 0.202 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad (1)$$

## 3. 実測値からの人体熱収支の算定法

### (1) 代謝量の算定

代謝量M(W/m<sup>2</sup>)は、各栄養素の分解熱から理論的に算出可能であり、酸素消費量V<sub>O<sub>2</sub></sub>(l/min)と二酸化炭素産生量V<sub>C<sub>O<sub>2</sub></sub></sub>(l/min)の計測値より、以下の式(2)によって算定される<sup>3)</sup>。

$$M = 351.82 (0.23V_{C_{O_2}} + 0.77V_{O_2}) / AD \quad (2)$$

### (2) 発汗放熱量の算定

精密台秤(解像度1g)の計測値から算出される単位時間当たりの体重の減少量ΔW(g/min)から、ガス交換による減少分Q<sub>100s</sub>(g/min)をさし引いた量が、人体からの総発汗熱量Eに相当する<sup>3)</sup>。

$$Q_{100s} = 0.00155 M AD \quad (3)$$

$$E = C_1 (\Delta W - Q_{100s}) / AD \quad (4)$$

ここで、C<sub>1</sub>は単位換算に伴う定数で、C<sub>1</sub>=40.61。人体からの総発汗熱量E(W/m<sup>2</sup>)は、理論的に皮膚からの発汗蒸発熱E<sub>sk</sub>、皮膚からの不感蒸泄熱E<sub>diff</sub>、

表-1 測定項目一覧

※印：実験Aのみの測定

無印：実験A, B共通の測定

(a) 人工気象室内

測定項目	測定機器	測定時間
気温・湿度	白金式温度	連続
風速	熱線式風速計	連続
上下長波放射	放射収支計	連続
上下短波放射	ネオ日射計	連続
散乱短波放射	遮蔽バンド日射計	連続
壁面温度	サーモグラフィ	5分
黒球温度	グローブ温度計	連続
白球温度	グローブ温度計	連続

(b) 人体生理関係

測定項目	測定機器	測定時間
※体重	精密電子台秤	20秒
※O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> 消費量	ジルコニア・ 赤外線吸収方式	10秒
※体温(腋下)	サーミスタ温度計	1分
皮膚温	サーモグラフィ	5分
アンケート	表2参照	5分

表-2 アンケート内容

(a) 温熱感

1 寒い
2 涼しい
3 やや涼しい
4 暑くも寒くもない
5 やや暖かい
6 暖かい
7 暑い
8 すごく暑い
9 耐え難いほど暑い

(b) 快適感

1 非常に不快
2 不快
3 やや不快
4 やや快適
5 快適

(c) 皮膚の湿り感

1 発汗なし
2 うっすらと汗ばむ
3 普通に汗ばむ
4 体表面が濡れている
5 汗が滴り落ちる

注) 「やや」などの形容詞は、前後の選択肢の中間的な属性を定性的に表すもので、定量的基準はない

表-3 実験の設定条件一覧

実験番号	氏名	温度		湿度		日射 W/m <sup>2</sup>
		設定 °C	実測 °C	設定 % g/m <sup>3</sup>	実測	
caseA1	男a女a	30	(37)	70	(21)	800
caseA2	男a女a	30	(38)	40	(15)	800
caseA3	男a女a	26	(35)	70	(18)	800
caseA4	男a女a	26	(35)	40	(13)	800
caseA5	男a女a	30	(35)	70	(20)	400
caseA6	男a女a	30	(38)	40	(16)	400
caseA7	男a女a	26	(35)	70	(18)	400
caseA8	男a女a	26	(31)	40	(13)	400
caseA9	男a女a	30	(31)	70	(22)	0
caseA10	男a女a	30	(30)	40	(15)	0
caseA11	男a女a	26	(31)	70	(18)	0
caseA12	男a女a	26	(30)	40	(13)	0
caseB1	男abcd	30	(36)	70	(19)	800
caseB2	男abcd	30	(37)	40	(16)	800
caseB3	男abcd	26	(35)	70	(18)	800
caseB4	男abcd	26	(36)	40	(14)	800
caseB5	男abcd	30	(32)	70	(19)	400
caseB6	男abcd	30	(35)	40	(16)	400
caseB7	男abcd	26	(32)	70	(17)	400
caseB8	男abcd	26	(32)	40	(14)	400
caseB9	男abcd	30	(30)	70	(19)	0
caseB10	男abcd	30	(31)	40	(15)	0
caseB11	男abcd	26	(30)	70	(18)	0
caseB12	男abcd	26	(30)	40	(14)	0

表-4 被験者プロフィール

実験A

氏名	年齢 (歳)	身長 (m)	体重 (Kg)	体表面積 (m <sup>2</sup> )
男a	25	1.71	56	1.65
女a	25	1.49	44	1.35

実験B

氏名	年齢 (歳)	身長 (m)	体重 (Kg)	体表面積 (m <sup>2</sup> )
男a	25	1.71	56	1.65
男b	22	1.76	72	1.87
男c	22	1.68	57	1.64
男d	29	1.71	65	1.76

呼吸蒸発熱 $E_{res}$ の和で表せる(式(5)).

$$E = E_{sk} + E_{diff} + E_{res} \quad (5)$$

このうち、呼気蒸発熱 $E_{res}$ は、呼気の比湿 $q_{res}$ (コア温度 $T_c$ での飽和比湿)と大気比湿 $q_a$ (g/g)の差と代謝量 $M$ の積として式(6)より理論的に算定される<sup>3)</sup>不感蒸泄熱は、皮膚からの可能最大蒸発熱の6%であることが経験的に知られている(式(7))<sup>3)</sup>。皮膚からの可能最大蒸発熱量は地表面蒸発の定式化と同様、皮膚表面の飽和比湿 $q_s$ と大気比湿の差および熱交換係数(式(9))の積として式(8)で表すことにする。以上の式(3)~(9)により皮膚からの発汗蒸発熱 $E_{sk}$ が見積もられる。暑熱環境下では、 $E_{res}$ 、 $E_{diff}$ の寄与は、発汗の1割程度であり<sup>3)</sup>、体重計測による誤差も数%程度であるから、この算定法による $E_{sk}$ の精度は、約1割程度と推定される。

$$E_{res} = 0.026M(q_{res} - q_a) \quad (6)$$

$$E_{diff} = 0.06E_{max} \quad (7)$$

$$E_{max} = \rho \iota C_n U (q_s - q_a) \quad (8)$$

$$C_n = 88.73 U^{-1.531} \quad (9)$$

ここで、 $\rho$ : 空気密度(g/m<sup>3</sup>)、 $\iota$ : 水蒸気潜熱(J/g)  $U$ : 風速(m/s)、を表す。

### (3) 顕熱量の算定

人体から大気への総顕熱輸送量 $C$ は、皮膚顕熱 $C_{sk}$ と、呼吸顕熱 $C_{res}$ の和で表せる(式(10))<sup>3)</sup>。皮膚顕熱は、皮膚温 $T_s$ と気温 $T_a$ の差と熱交換係数(式(9))の積として式(11)で表すことにする。また、呼気顕熱は呼気蒸発熱と同様に、コア温度 $T_c$ と気温の差と代謝量の積として、式(12)で表せる<sup>3)</sup>。 $C_p$ は、定圧比熱(J/g·K)を表す。

$$C = C_{sk} + C_{res} \quad (10)$$

$$C_{sk} = C_p \rho C_n U (T_s - T_a) \quad (11)$$

$$C_{res} = 0.0016M (T_s - T_a) \quad (12)$$

### (4) 純放射量

人体に入射する純放射量 $R_n$ は、式(13)で表せる<sup>4)</sup>。入射短波放射量 $R_s$ および入射長波放射量 $R_L$ は式(14)、(15)を用いて各種放射成分の計測値から求められる。人体の形態係数の算定は、ASHRAEハンドブックによった<sup>5)</sup>。

$$R_n = (1 - \alpha_n)R_s + R_L - \epsilon_n \sigma T_s^4 \quad (13)$$

$$R_s = (\gamma_1 S_T + \gamma_2 S_D + \gamma_3 \alpha_s S) \quad (14)$$

$$R_L = \epsilon_n (\gamma_4 L_a + \gamma_5 L_s + \gamma_6 L_w) \quad (15)$$

$\alpha_n$ 、 $\alpha_s$ : 人体および床面のアルベド( $\alpha_n=0.3$ を仮定)、 $S_T$ 、 $S_D$ 、 $S$ (W/m<sup>2</sup>): 直達短波放射、散乱短波射、全天日射の計測値、 $L_a$ 、 $L_s$ 、 $L_w$ : 天井、床面、壁面からの長波放射の計測値、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$ 、 $\gamma_5$ 、 $\gamma_6$ :  $S_T$ 、 $S_D$ 、 $S$ 、 $L_a$ 、 $L_s$ 、 $L_w$ に対する人体の形態係数。 $\epsilon_n$ : 皮膚の射出率(=0.98を仮定)。

### (5) 蓄熱量の算定

蓄熱項 $F$ (W/m<sup>2</sup>)は、各熱収支項の和の残差から求める。

$$F = M + R_n - E - C \quad (16)$$

## 4. 人体の熱収支の結果

図-1、図-2には、最も厳しい暑熱環境条件にあるcaseA1の人体生理要因の時系列データを示す。ここで、体表面温度とは、サーモグラフィーによって計測された全体表面温度の平均値を示している。

### (1) 人体熱収支の内訳

#### a) 代謝量

男aが50(W/m<sup>2</sup>)、女aが30(W/m<sup>2</sup>)程度でほぼ一定である。図-3は、全ケースの代謝量をまとめたものであるが、代謝量はほぼ一定で、かなりの暑熱環境下にあっても代謝量の変化は無視しうることを示している。

#### b) 潜熱量

男女ともほぼ150(W/m<sup>2</sup>)程度で、これは380(g/hr)の重量損失に相当する。熱収支項目の中で最大の値を示しており、発汗作用を無視できないことを示している。20分ごとに風速が弱められていくため、潜熱輸送係数は減少しているはずであるが、皮膚の湿度が増しているため、潜熱量としてはほぼ一定である。

#### c) 顕熱量

皮膚温よりも気温が高いため、男女とも顕熱は負の値を示している。特に女aの皮膚温は男aよりも2~4(°C)低いため、顕熱の絶対値も2倍程度大きい。

#### d) 純放射量

純放射量は、日射成分の寄与が効いて正の値を示している。女aの体温のほうが男aよりも低いため体表面からの長波放射が小さく、結果として女性の方が多くの純放射を受けている。

#### e) 蓄熱項

1時間経過後も蓄熱項は50(W/m<sup>2</sup>)程度の値を示しており、熱的平衡が保たれていない。これ以上の時間スケールでは気象条件が変化してくるため、基本的に暑熱環境下にある人体は、熱的非平衡状態にあるものと考えた方が合理的である。

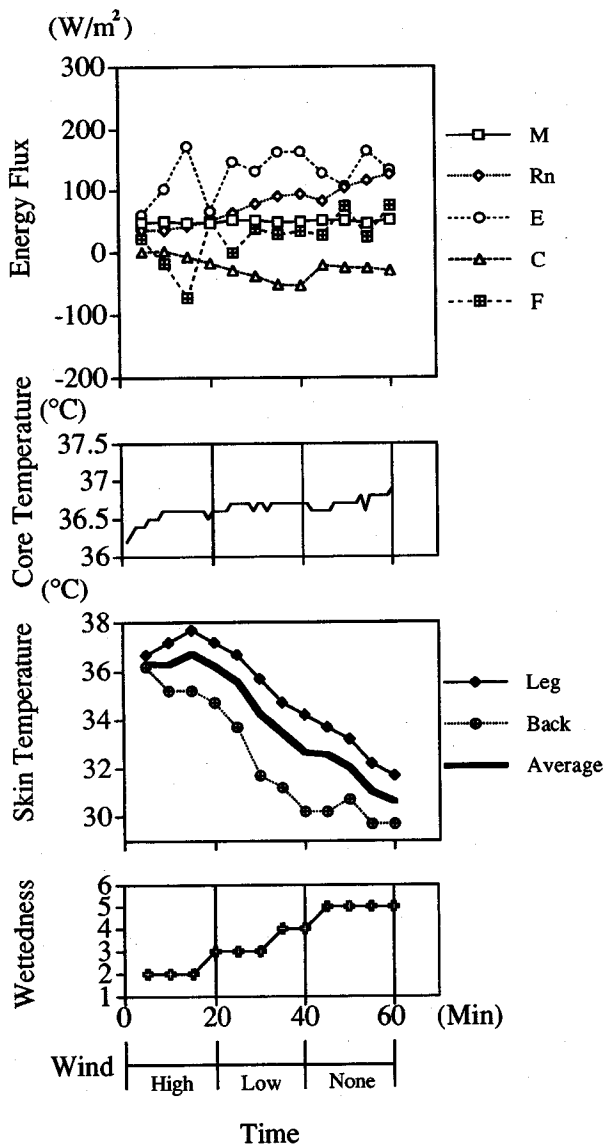


図-1 人体生理データの一例 (男 a)  
実験 case A1 (表-3 参照)

- (a) 人体熱収支の内訳
- (b) 体温 (コア温度)
- (c) 皮膚表面温度 (足, 背中, 全体平均)
- (d) 皮膚の湿り感 (表 2 c 参照)

いずれも横軸は時間で、一番下の風速軸は、  
Highが2(m/s), Lowが1.2(m/s), Noneが0(m/s)  
を意味する。

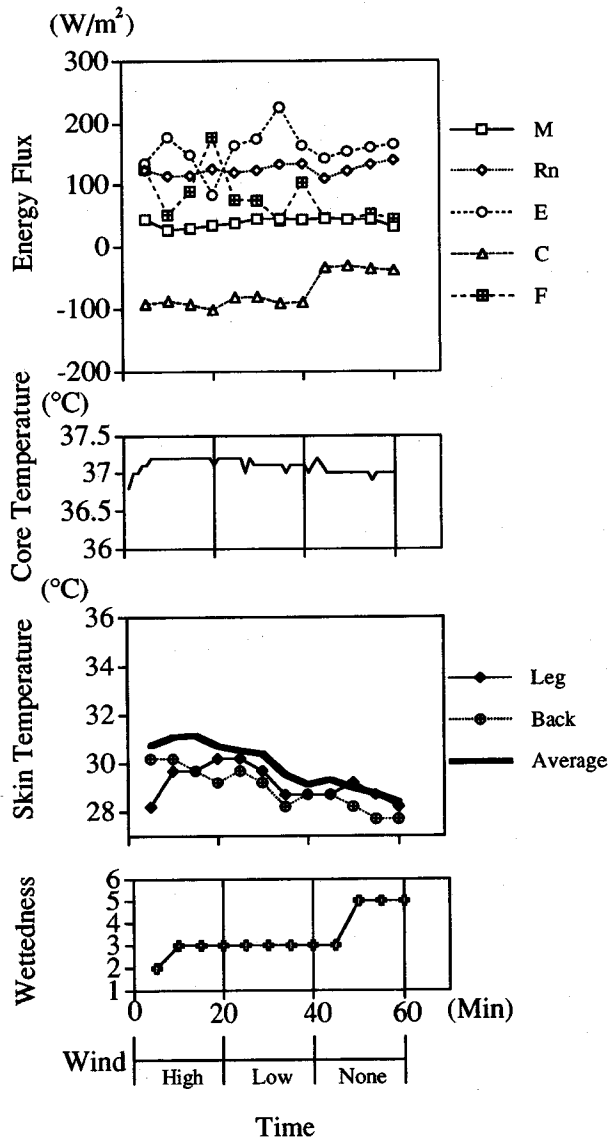


図-2 人体生理データの一例 (女 a)  
その他は、図-1 に同じ

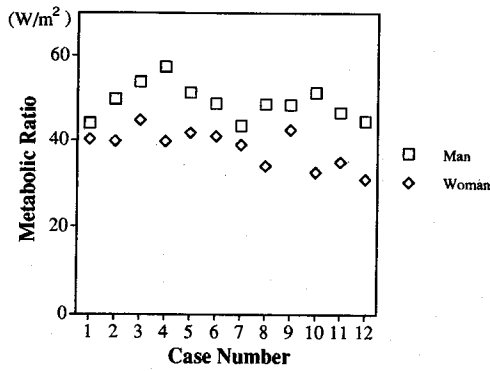


図-3 実験Aの各ケースにおける平均代謝量  
(横軸の実験番号は表-3参照)

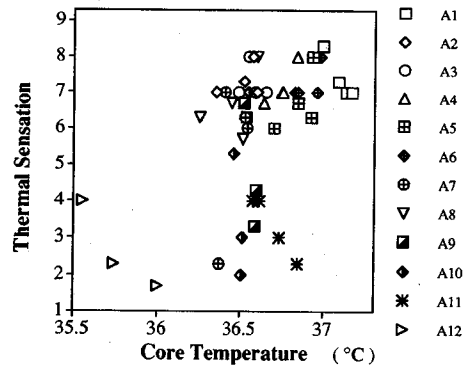


図-5 コア温度と温熱感の対応関係  
(実験A全データ)

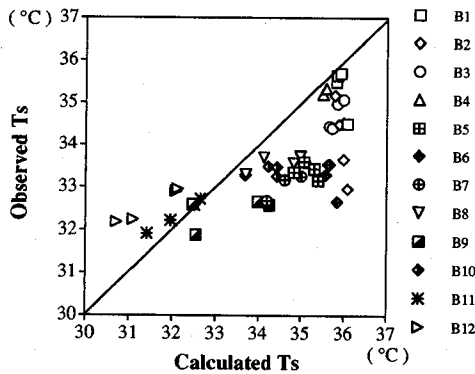


図-4 皮膚温の計算値と実測値の比較  
(実験B全データの4人分の平均値)

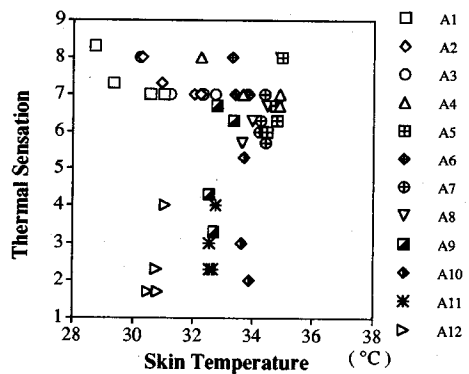


図-6 皮膚温度と温熱感の対応関係  
(実験A全データ)

## (2) 体表面温度および体温

### a) コア温度

体温は、初期の10分間で顕著な増加傾向がみられるもの、全体的に変化が小さく、恒温性が顕著である

### b) 体表面温度

体表面温度の変化はコア温度に比べて非常に大きい。実験開始10分程まで皮膚温は上昇しているが、その後急激に低下している。これは、皮膚の湿り度と関係しており、皮膚のほとんど湿っていない初期段階では、皮膚温は上昇するが、発汗にともなう皮膚の湿り度の増加とともに、皮膚温度は低下する。男女の違いとして、1)女aの方が体表面温度の変化が小さいこと、また2)平均皮膚温よりも足の温度が低い(いわゆる女性の冷え性)といった局所的な皮膚温分布の違い、などが上げられる。しかし、モデル化の上で本質的な違いではない。

### c) 従来の皮膚温モデルの適合性

人体の熱的平衡を前提とした従来の生理学的モデル

では、皮膚温の上昇によって発汗作用や皮膚の湿り度の増加を説明しており、本実験の結果と全く逆である。

この違いは、人体が本質的に熱的非平衡状態にあることに起因している。図-4には、熱的平衡を仮定して得られた皮膚温の計算値(2ノードモデル<sup>6)</sup>使用)と、実測で得られた皮膚温を比較してものである。計算値が34(°C)を越える発汗条件下では、いずれも実測の皮膚温の方が低温となっており、発汗フィードバックが作用している熱的非平衡状態を反映した結果となっている。

### d) 温熱感との対応関係

図-5は、コア温度と温熱感の対応関係を示したものである。コア温度は恒温性の傾向があり(36.5°C程度)、弱い暑熱環境(温熱指標6以下)では温熱感と全く相関が無く、強い暑熱環境(温熱指標6以上)では若干の相関はあるものの、指標としては温度変化の感度が鈍すぎる。皮膚温と温熱感の対応関係を示したのが図-6である。一つの皮膚温に対して温熱感発汗のない場合(温熱指標6以下)とある場合(温熱指

標6以上)とで2価性を示している。以上より、コア温度、体表面温度を、温熱感の直接的な指標にすることは難しいと言える。また、そのような複雑な皮膚温・コア温度の予測を前提とした温熱感指標のモデル化は得策ではないと言える。

## 5. 新しい屋外用温熱感指標の理論的枠組み

### (1) 本研究で提案する「仮想熱負荷量」の定義

暑熱環境下の人体熱収支上の最大のポイントは、1) 熱的非平衡状態にあること、2) 発汗によるフィードバックが働いていること、の2点である。この点を踏まえ新しい屋外用温熱感指標として「仮想熱負荷量 (Virtual Thermal Load = VTL)」を以下のように定義する。『人体のコア温度、表面温度とも全く変化しないと仮定した (絶対恒温性の仮定) 場合の、人体の受ける仮想的な熱負荷量 ( $W/m^2$ )。』その際、皮膚の湿り度 ( $\beta$ ) は仮想熱負荷の関数として表し、発汗によるフィードバックを考える。もちろん、実際には人体のコア温度および皮膚温度は変化していくので真の貯熱項 ( $F$ ) と仮想熱負荷 (VTL) は異となる。

### (2) 既存の温熱指標のレビュー

既存の主な温熱感指標を表-5にまとめた。人体の熱的非平衡性と発汗フィードバックに留意してみると、以下のような問題点が上げられる。

- 1) 不快指数: 完全な経験則である。
- 2) SET\* (Gagge, et al. 1976<sup>6)</sup>): 人体の熱収支に基づいた理論だが、熱的平衡性を仮定している。そのため発汗モデルとしてきわめて複雑な2ノードモデルを用いている。
- 3) PMV (Fanger, 1970<sup>7)</sup>): 人体の熱収支に立脚しており、熱負荷量的な考えを導入しているが、肝心な発汗によるフィードバック作用が考慮されていないため、暑熱環境解析に向かない。

### (2) 仮想熱負荷の算定手順

仮想熱負荷量は式(17)より導かれる。

$$VTL = M + R_n - C - E \quad (17)$$

#### a) 人体温度の仮定

人体温度は熱的中立時の平均的な値を仮定する (具体的には  $T_s = 33^\circ C$ ,  $T_c = 36.5^\circ C$ )

#### b) 代謝量の仮定

人工気象室の実験結果より代謝量は静止状態を仮定すればほぼ一定と見なせる。以降、一般的な静止椅座時の代謝量  $50 (W/m^2)$  を用いることとする。

### c) $R_n$ の算定～簡易測定法の提案

$R_n$ は厳密には、各種放射計測値を用い式(13)~(15)より求められるが、実用的でない。神田・土屋(1994)は、グローブ温度を用いた簡易 $R_n$ 測定法を提案しているが、人体のアルベドの補正が困難であった。そこで、黒グローブに加えアルベドの異なる白グローブ温

表-5 既存の温熱指標と仮想熱負荷量

	理論	熱的状态	発汗モデル	結果
不快指数	経験則	-----	-----	図9a
SET*	熱収支	平衡	2ノード	図9b
PMV	熱収支	非平衡	なし	図9c
VTL	熱収支	非平衡	$\beta$ モデル	図9d

度を用いて、任意のアルベドをもつ物体の純放射推定法を提案する。グローブ球の熱収支は、蓄熱 $F$ 、潜熱 $E$ 、代謝 $M$ が無視でき、純放射量 $R_n$ と顕熱輸送量 $C$ が釣り合った状態であることから、それぞれ式(18)~(23)となる。

$$R_{nw} = C_w \quad (18)$$

$$R_{nb} = C_b \quad (19)$$

$$R_{nw} = (1 - \alpha_w) R_s + R_L - \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (20)$$

$$R_{nb} = (1 - \alpha_b) R_s + R_L - \varepsilon_b \sigma T_b^4 \quad (21)$$

$$C_w = C_p \rho C_h U (T_w - T_a) \quad (22)$$

$$C_b = C_p \rho C_h U (T_b - T_a) \quad (23)$$

ここで、下付添え字 $w$ ,  $b$ は白・黒グローブを意味する。グローブのアルベド ( $\alpha_w$ ,  $\alpha_b$ ) およびグローブの射出率 ( $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_b$ ) は予め同定しておく必要があり、ここではそれぞれ以下ようになった。

$$\alpha_w = 0.45, \alpha_b = 0.01, \varepsilon_w = 0.997, \varepsilon_b = 1.0$$

風速 ( $U$ ) ・気温 ( $T_a$ ) ・グローブ温度 ( $T_w, T_b$ ) は計測値であるから式(18)~(23)の実質的な未知変数は、入射短波放射  $R_s$ , 入射長波放射  $R_L$  の2つとなり、連立方程式の解として求まる。グローブと人体の形態係数が異なるため、グローブと人体への入射放射量は厳密には異なるが、形態係数の影響はアルベドの影響に比してきわめて小さいことがわかっているため、近似的に等しいと見なせる。従って、式(14), (15)を直接計測しなくても人体に入射する $R_s, R_L$ が推定されることになる。以上のようにして求められた $R_s, R_L$ を式(13)に代入すれば、人体の受ける純放射量が推定される。このようにして推定された人体への入射放射量と、放射成分の測定から式(13)~(15)により厳密に計測された入射放射量を図-7に比較する。両者はきわ



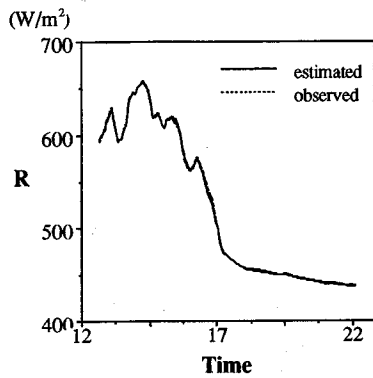


図-7 人体への入射放射量の厳密測定値と簡易測定値の比較  
(データは屋外のものを使用<sup>1)</sup>)

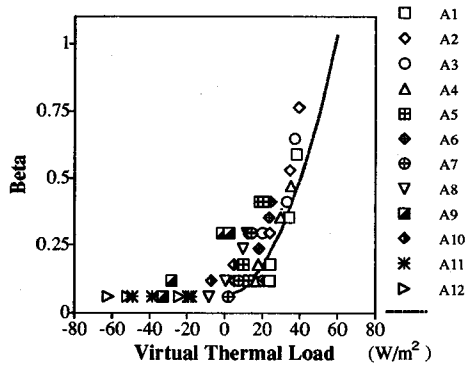


図-8 皮膚湿り度 ( $\beta$ ) と仮想熱負荷量の関係  
(実験A全データ)

めて良い一致を示しており、簡易推定法の有効性が示される。

#### d) 顕熱の算定

風速、温度の実測値を用いて、式(10)~(12)によりCを算定することができる。

#### e) 潜熱の算定~皮膚の湿り度 ( $\beta$ ) のモデル化

式(5)で表せる潜熱Eのうち、 $E_{diff}$ 、 $E_{res}$ は式(6)、(7)により推定可能であるが、皮膚からの発汗蒸発量  $E_{sk}$  を気象データから推定する必要がある。ここでは、土壌面蒸発等で用いられる  $\beta$  法を応用して、式(24)のように定式化する。

$$E_{sk} = \beta \rho \iota C_n U (q_s - q_a) \quad (24)$$

ここで、 $\beta$  は皮膚の湿り度を意味する唯一の人体生理依存パラメーターであり、人体生理反応のモデル化はこの  $\beta$  に全て集約されていると良い。そこで、実験Aの電子天秤による発汗データから逆算された  $\beta$  と仮想熱負荷量の対応関係を図-8に示す(男女ともまとめて掲載)。仮想熱負荷と皮膚の湿り度はほぼ一価関係で表せる(式(25a)、(25b))。すなわち、仮想熱負荷量に対応して皮膚の湿り度が決定されている。

$$\beta = 0.94 (VTL/60)^2 + 0.06 \quad VTL > 0 \quad (25a)$$

$$\beta = 0.06 \quad VTL < 0 \quad (25b)$$

#### f) 収束計算

式(17)中のEの算定において、 $\beta$  がVTLに依存しているため、収束計算が必要である。

#### g) 衣服の影響を考慮する場合

簡単のため、裸体時を想定して解説行ってきた。衣服の影響は、熱・水蒸気交換係数に衣服抵抗を導入す

ることにより容易に拡張可能である(神田・土屋、1995<sup>1)</sup> 参照)。

## 6. 温熱感指標としての仮想熱負荷量の妥当性

前章で得られた仮想熱負荷量と体感アンケートとの対応関係を調べる。使用するデータは  $\beta$  の同定に用いなかった実験Bの結果であり、5分間隔データを15分平均とし、また4人分の実験結果の平均値を用いて整理を行った。

### (1) 温熱感指標

図-9には、各種温熱感指標と実験Bにおける温熱感アンケートとの対応関係を示す。経験則である不快指数だけが他の指標と比べ最もばらつきが大きい。同じ気温・湿度条件は同一の不快指数を与えるが、実際には日射条件等がかなり温熱感に効いていることによる。

それに対して、既存のSET\*、PMVは、比較的温熱感との対応が良い。これは、人体熱収支に基づき、気温・湿度以外に日射・風速等が総合的に考慮されているためである。しかしながら、その対応関係は線形ではなく、暑熱状態が顕著になってくる温熱感6近傍を境に、温熱感に対する指標の感度が鈍る。SET\*では、人体が熱的に平衡になった最終状態を仮定しているため、暑熱環境での熱指標が実際の体感温度よりも高めに算定されるものと思われる。一方、PMVでは熱的非平衡性を考慮しているものの、発汗によるフィードバックプロセスが考慮されていないため、暑熱環境下ではやはり熱負荷を実際の体感温度より過大に評価する。

本研究で提案する仮想熱負荷量は、温熱感との対応関係がもっと良く、しかも線形関係が保持されている。

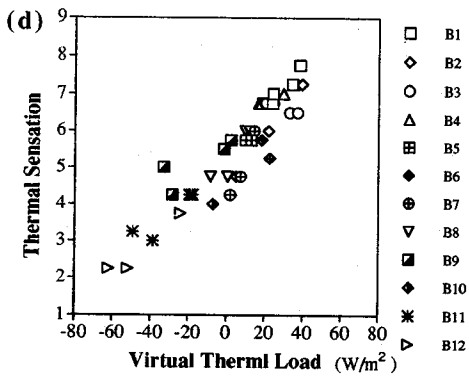
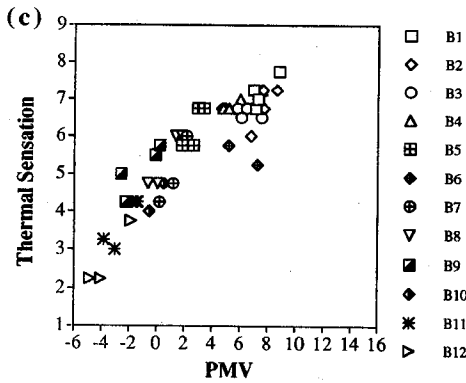
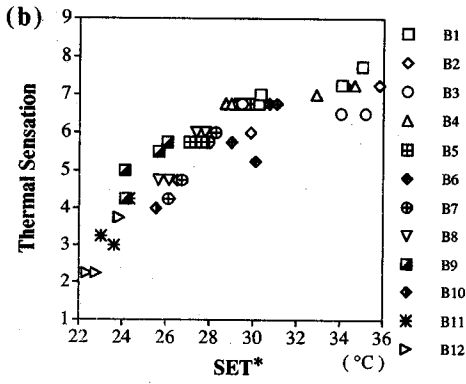
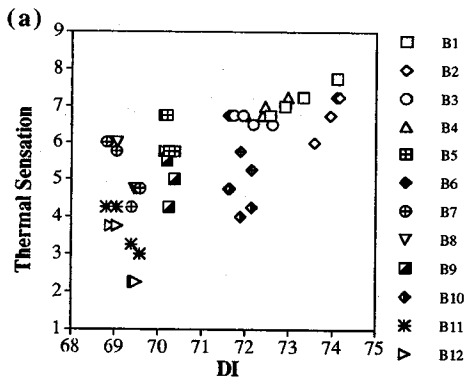


図-9 温熱感と各温熱感指標の対応関係 (実験B)  
 (a) 不快指数 (b) SET\*  
 (c) PMV (d) VTL

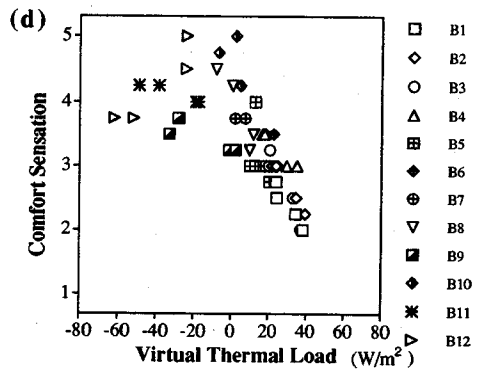
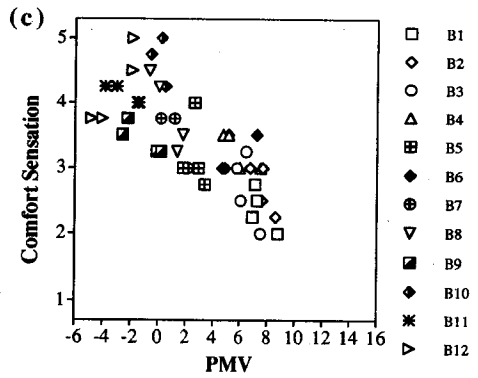
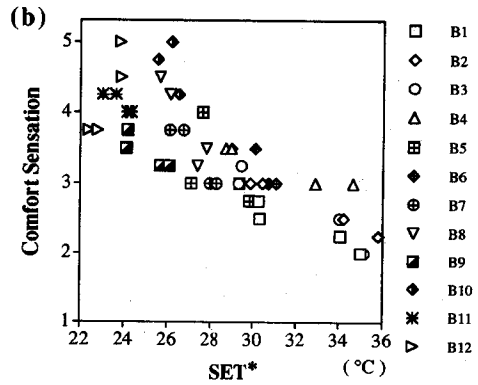
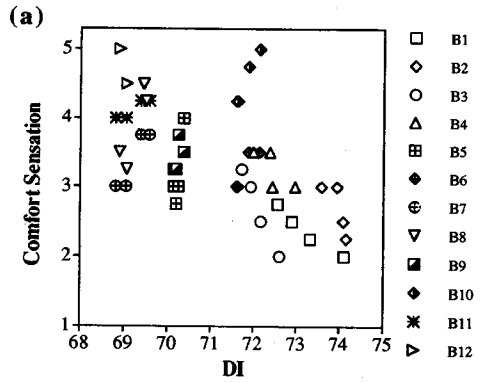


図-10 快適感と各温熱感指標の対応関係 (実験B)  
 (a) 不快指数 (b) SET\*  
 (c) PMV (d) VTL

その関係は、以下のように表せる。

$$\text{温熱感指数} = a \text{VTL} + b \quad (26)$$

ここで、温熱感指数とは表-2の温熱感の値を意味し、 $a$ 、 $b$ は定数である ( $a=0.057$ ,  $b=5.57$ )。このように熱的非平衡性と発汗フィードバックを考慮したことにより、VTLは暑熱環境条件に使える温熱感指標となっている。VTLが熱量の次元を持つこと、しかも実際の温熱感と線形性を有することは環境評価等に利用する上できわめて実用的な指標であるといえる。

## (2) 快適感指標

快適感とは、温熱感のみならず様々な人体感覚の影響を受けているため指標化することが難しいと考えられている。図-10には、各種温熱感指標と実験Bにおける快適感アンケートの対応関係を示す。全般的傾向として温熱感指標と快適感の適合性は良いとは言えず、特に不快指数の適合性が悪い。特筆すべきは、快適指数3以上の快適条件下では、温熱感指標と快適性の適合性が悪い反面、快適性が3以下の不快条件下では、温熱感指標が比較的良く対応しており、特にVTLは快適性との明確な線形関係が認められる点である。

このことより、温熱指数6 (=暖かい) を越えるような暑熱発汗状態においては、温熱感が不快感の支配的な要因になっていることが想像される。一方、温熱指数5~2程度の領域では、温熱感が不快感を与えないため、気象因子以外の別のファクターが快適性の支配要因となっている可能性が考えられる。

## 7. 結論

- 1) 代謝量は気象因子に依存せず一定と見なせる。
- 2) 発汗によるフィードバックにより皮膚表面温度は低下する。
- 3) 屋外の暑熱環境下での人体は、基本的に熱的非平衡状態として扱う必要がある。
- 4) 以上の実験結果を踏まえ、新しい屋外用温熱感指標として「仮想熱負荷量」を提案した。また、その簡易測定法を提案した。
- 5) 上記仮想熱負荷量が温熱感指標としてきわめて有効であることを示した。

**謝辞:** 本研究は、文部省科学研究費一般研究Cおよび河川環境管理財団の補助を受けて行われたものである。ここに謝意を記す。

## 参考文献

- 1) 神田学, 土屋信夫: 微気象観測に基づいた屋外における人体の温熱環境解析, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 35-44, 1995.
- 2) 例えば, 宇多孝明, 小俣篤, 浅対淳: 海岸の温熱環境と快適性の関係および海岸の空間規模の評価法に関する研究, 土木研究所資料, No. 2939, 1991.
- 3) 中山昭雄: 温熱生理学, 理工学者, 1981
- 4) Monteith, P. J. : *Principles of Environmental Physics*, 1973.
- 5) *ASHRAE Handbook, Fundamentals*, 1989.
- 6) Gagge, A. P., Nishi, Y. and Nevins, R. G. : The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, *ASHRAE Transaction*, pp. 234-247, 1976.
- 7) Fanger, P. O. : *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, 1970.

(1995. 8. 31受付)

## NEW THERMAL SENSATION INDEX FOR OUTDOOR ENVIRONMENT

Manabu KANDA, Norikazu YANAGIMOTO and Masaaki UKAJI

Laboratory experiments were performed in a climate simulator, in which temperature, humidity, wind and insolation can be controlled, to investigate human physiological response and thermal comfort. The experimental results show that 1) variation of metabolic ratio with meteorological conditions can be ignorable, 2) sensible heat from body make much effect to decrease skin temperature, and 3) thermal situation of human body is unsteady. Based on these experimental results, Virtual Thermal Load is proposed as a new thermal sensation index for outdoor human environment. The only one physiological parameter ' $\beta$ ' is formulated as a function of VTL. VTL agrees very well with thermal sensation.