

暑熱障害発症リスクに及ぼす温熱性発汗の個人差の影響

北海道大学 乗原 浩平
(共同研究者) 同 窪田 英樹
同 濱田 靖弘
同 中村 真人

Influence of Individual Difference of Thermal Sweating on Risk of Disorder due to Hot Environment

by

Kouhei Kuwabara, Hideki Kubota,
Yasuhiro Hamada, Makoto Nakamura
*Graduate School of Engineering,
Hokkaido University*

ABSTRACT

The authors have proposed a simple model of predicting mean skin and core temperatures for protecting disorder due to hot indoor and outdoor conditions. The purpose of this paper is to analyze individual variability of human sweating rate and to evaluate a risk of disorder due to humid hot environment using the model based on the individual variability. Nine male subjects carried out a cycle ergometer exercise test in indoor and outdoor environments. Coefficient k_{adp} which was defined as individual properties of thermal sweating in humans was calculated from weight loss by sweating and respiration. The subjects approximately had a normal property of sweating response ($k_{adp} = 0.85 \pm 0.19$; mean \pm SD) against average sweating capacity ($k_{adp} = 1$) in this model. k_{adp} changed over the range from 0.4 to 1.2. The variation of k_{adp} was caused by not only interindividual variability but intraindividual variability. Those who showed half k_{adp} (=

0.5) of average humans existed in approximately 5 %. Equal mean skin temperature lines of 36 degrees C based on the variation of k_{adp} were described using the model on psychrometric chart. As a result, on 50% relative humidity line, air temperature at which mean skin temperature became 36 degrees C was 32.5 and 27.5 degrees C for 1.0 and 0.4 of k_{adp} , respectively. Therefore, it is significant for a risk evaluation of heat disorder to evaluate both respects of physiology such as body temperature and of the event probability.

要 旨

著者らは、屋内外における熱中症等の暑熱障害を予防することを目的として、平均皮膚温・体内温予測モデル（以下、予測モデル）を提案している。本研究は、発汗特性の個人差に着目して、その特性を分析して予測モデルに適用することにより、任意の環境における平均皮膚温・体内温の発現を確率分布の形で表しリスク評価に寄与することを課題としている。

本研究では、屋内外において90～120分間の自転車エルゴメーター運動（代謝量3.8met, 着衣量0.4clo）を行わせる被験者実験を実施した。体重減少から被験者の発汗量を計測して、温熱性の発汗特性を表す係数（個人差係数と仮称） k_{adp} を算出した。本研究に参加した被験者の発汗特性は、予測モデルにおける平均的発汗能（ $k_{adp}=1$ ）と比較して $k_{adp}=0.85$ （ $\pm 0.19SD$ ）であり、おおむね平均的な被験者とみなすことができる。実験の結果、個人差係数 k_{adp} は0.4～1.2の範囲で分布し、個人差のみならず、被験者自身の発汗特性も日により大きく変動することが示された。暑熱障害発症リスクを判定する体温については今後十分な検討を要するが、本研究では平均皮膚温36℃を適用した。この平均皮膚温は、この温度を超える辺りで体内温度が皮膚温とほぼ同じ割合で上昇し始める臨界温度であり、『非常に暑い』と感ずる状態である。予測モデルを用いて、平均皮膚温が36℃となる気温と湿度の組合せを個人差係数 k_{adp}

の変動幅に対応させて算定し、湿り空気線図上に図示した。その結果、例えば相対湿度50%の場合、平均皮膚温が36℃に達する気温は平均的な人（ $k_{adp}=1.0$ ）が32.5℃であるのに対して、 $k_{adp}=0.4$ の人は5℃近くも低温の28℃であることが示された。このことから、暑熱環境の障害発生リスク評価は、体温という生理学的な観点からとその発生確率の両面から評価する必要性のあることが示された。

緒 言

近年の地球温暖化やヒートアイランド現象問題に伴う都市の高温化により、熱中症等の暑熱障害が多発している。屋内外における労働者のみならず、スポーツ中の青少年や室内における暑熱弱者においても暑熱障害を発症しており、この暑熱環境対策は急務といえる。著者らは、人体の生理状態値である平均皮膚表面温度・体内温度（以下、平均皮膚温・体内温）に着目し、無効発汗と着衣の濡れの影響を考慮した新しい発汗に基づく予測モデル^{1,2,3,4,5)}を提案している。この予測生理量を暑熱環境の評価指標として利用することで暑熱障害の防止に役立てることが一つの目的である。

予測モデルは、主に青年男性を対象とした屋内外の被験者実験（椅座安静、自転車エルゴメーター）で得られた平均的発汗特性を軸にして組み立てられている。当然のことながら発汗能力には個人差があり、暑熱障害のリスクを検討する場合には、発汗能力が平均的な人よりも劣っている個体

を配慮することが大切である。発汗能力の個人差の分布が明らかになれば、予測モデルを用いて任意の環境下における人々の平均皮膚温・体内温の分布を予測することが可能となり、その結果、暑熱障害が発症する確率を予測することが可能となると考えられる。

本研究では、被験者実験を行い、発汗能力の個人差について分析し、予測モデルを用いて個人差の影響と環境との関わりを定量的に把握することを試みる。

1. 方法

1.1 平均皮膚温・体内温予測モデルの概要

本予測モデルでは平均皮膚温 t_{sk} を、下記の式 (1) で示される人体と環境との間の熱平衡式を基にして、環境4要素（気温、湿度、放射、風速）・人体側2要素（着衣量、代謝量）の関数として求める。

$$q_M - q_{wk} - q_{st} = q_{Sres} + q_{Lres} + q_{dif} + q_{sw}\eta_{sw} + q_{rc} \quad (1)$$

ただし、

q_{dif} : 拡散による蒸散熱流密度	[W/m ²]
q_{Lres} : 呼吸による蒸発熱流密度	[W/m ²]
q_M : 代謝密度	[W/m ²]
q_{rc} : 放射・対流による熱流密度	[W/m ²]
q_{Sres} : 呼吸による顕熱流密度	[W/m ²]
q_{st} : 蓄熱密度	[W/m ²]
q_{sw} : 発汗による蒸発熱流密度	[W/m ²]
q_{wk} : 外部仕事	[W/m ²]
η_{sw} : 有効発汗率	[N.D.]

上記各項は以下の式 (2) ~ (5) のように表される。

$$q_{Lres} = 0.0173q_M(5.86 - p_a) \quad (2)$$

$$q_{Sres} = 0.0044q_M(34 - t_a) \quad (3)$$

$$q_{dif} = (1 - w)k_{dif}(p_{sk} - p_a) \quad (4)$$

$$q_{sw} = q_{swe} + q_{swt} \quad (5)$$

$$q_{swe} = 0.42\{(q_M - q_{wk}) - 58.14\} \quad (6)$$

$$q_{swt} = k_{swsk} \cdot k_{adp}(t_{sk} - t_{sksw}) \quad (7)$$

$$t_{sksw} = 34.1 - 0.0275\{(q_M - q_{wk}) - 58.14\} \quad (8)$$

ただし、

k_{adp} : 個体間差、個体内差を表す係数 [N.D.]

(個人差係数と仮称)

k_{dif} : 拡散による蒸散熱流率 [W/(m²·K)]

k_{swsk} : 温熱性発汗係数 (= 28) [W/(m²·K)]

p_a : 気温に対する水蒸気圧 [kPa]

p_{sk} : 平均皮膚温に対する飽和水蒸気圧 [kPa]

q_{swe} : 運動性発汗による蒸発熱流密度 [W/m²]

q_{swt} : 温熱性発汗による蒸発熱流密度 [W/m²]

t_a : 気温 [°C]

t_{sk} : 平均皮膚温 [°C]

t_{sksw} : 温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚温 [W/m²]

w_{sw} : 発汗濡れ率 [N.D.]

本予測モデルにおいては、まず、発汗による蒸発熱流密度 q_{sw} を式 (5) に示すように、運動性発汗 q_{swe} (代謝量の増加に伴う体内温度の上昇に起因すると考えられる) と高温環境下の皮膚温上昇に起因する温熱性発汗 q_{swt} の和で表わしている。大きな特徴は、温熱性発汗密度 q_{swt} を、平均皮膚温の偏差に一次比例するとして式 (7) のように定義していることである^{1,2)}。式 (7) 中の k_{swsk} は平均的発汗能を持つ人の温熱性発汗率であり、 k_{adp} は個体差あるいは個体内の変動を表している。すなわち、平均的な発汗能を持つ人の k_{swsk} として本モデルでは 28W/(m²·K) を適用し、 $k_{adp} = 1$ と定義している^{1,2)}。本研究では、個体間差あるいは個体内差を表す個人差係数 k_{adp} の分布を中心に論ずる。

運動性発汗としては温熱的中立時の発汗密度⁶⁾ (式 (6)), 温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚温 t_{sksw} としては温熱的中立時の平均皮膚温を用いる⁶⁾ (式 (8))。いずれも Fanger による関係式である。

1. 2 個人差係数 k_{adp} の算出法

まず、被験者実験において温熱性発汗は体重減少を基にして計測する。体重減少を人体からの水分損失によるものと仮定して、その蒸発潜熱等量 q_{Loss} と式 (1) 中の湿性放熱との関係は次式で表される。

$$q_{Loss} = q_{Lres} + q_{dif} + q_{swe} + q_{swt} \quad (9)$$

式 (1) に示すように、本研究で用いる予測モデルには有効発汗率 η_{sw} が考慮されている。すなわち、式 (10) で定義される発汗濡れ率 w_{sw} が臨界発汗濡れ率 w_{crit} を超えると無効発汗が始まる。有効発汗濡れ率 w_{eff} は式 (11) で定義され、近似的に式 (12) のように w_{sw} の一次関数で表される³⁾。

$$w_{sw} = \frac{q_{swe} + q_{swt}}{q_{max}} \quad w_{sw} \leq w_{crit} \quad (10)$$

$$w_{eff} = \frac{(q_{swe} + q_{swt})\eta_{sw}}{q_{max}} \quad w_{crit} < w_{eff} \leq 1 \quad (11)$$

$$w_{eff} = a_{dr} w_{sw} + b_{dr} \quad (12)$$

$$\text{ここで、} q_{max} = k_{max} (p_{sk} - p_a) \quad (13)$$

ただし、

a_{dr} : 有効発汗率を発汗濡れ率で近似するときの係数 (= 0.371 運動時) [N.D.]³⁾

b_{dr} : 有効発汗率を発汗濡れ率で近似するときの係数 (= 0.305 運動時) [N.D.]³⁾

k_{max} : 濡れた人体表面からの蒸発熱流率 [W/(m²·kPa)]

q_{max} : 濡れた人体表面からの蒸発熱流密度 [W/m²]

w_{crit} : 無効発汗開始の臨界発汗濡れ率 (= 0.5 運動時) [N.D.]

w_{eff} : 有効濡れ率 [N.D.]

w_{sw} : 発汗濡れ率 [N.D.]

したがって、個人差係数 k_{adp} は式 (4), (7), (10), (11), (12), (13) を用いて次式のように表される。

$$w_{crit} < w_{eff} \leq 1$$

$$k_{adp} = \frac{q_{Loss} - q_{Lres} - (1 - b_{dr})q_{dif} - q_{swe}}{k_{swsk}(t_{sk} - t_{sksw})} \quad (14)$$

$$w_{eff} > 1$$

$$k_{adp} = \frac{q_{Loss} - q_{Lres} - q_{swe}}{k_{swsk}(t_{sk} - t_{sksw})} \quad (15)$$

ただし、

$$q_{dif} = k_{dif}(p_{sk} - p_a) \quad (16)$$

本研究では、式 (14), (15) を用いて評価を行う。以下、 k_{adp} の計算に使用した式を列挙する。

$$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (17)$$

$$k_{dif} = \frac{1}{0.328 + R_{cle} + R_{se}} \quad (18)$$

$$k_{max} = \frac{1}{R_{cle} + R_{se}} \quad (19)$$

$$R_{cle} = \frac{0.155 I_{cl}}{i_{cl} LR} \quad (20)$$

$$R_{se} = \frac{1}{LR h_c (1 + 0.3 I_{cl})} \quad (21)$$

ただし、

I_{cl} : 着衣熱抵抗 [clo]

L_R : ルイスの係数 (= 16.5) [°C/kPa]

R_{cle} : 着衣の湿気伝達抵抗 [(m²·kPa)/W]

R_{se} : 人体の表面湿気伝達抵抗 [(m²·kPa)/W]

a_{sk} : 平均皮膚温における飽和水蒸気圧の線形近似に関わる係数 (= 0.314) [kPa/°C]

b_{sk} : 平均皮膚温における飽和水蒸気圧の線形近似に関わる係数 (= -5.23) [kPa/°C]

h_c : 対流熱伝達率 (= 12.1√v) [W/(m²·°C)]⁷⁾

i_{cl} : 着衣の透湿効率 (= 0.34) [N.D.]

v : 作用風速 [m/s]

被験者実験で得た実測値から個人差係数 k_{adp} を算定する。その分布を基にして予測モデルから任意の環境下におかれた者の平均皮膚温の分布を予

測することにより、当該暑熱環境の暑熱障害発症リスクについて考察する。

1. 3 被験者実験の概要

20代の健康な男子学生9名を用いた被験者実験を行った。被験者には、中等度の作業を2時間行うことを想定し、屋内外にて自転車エルゴメーター運動（約3.8met, 作業負荷43W/m²）を行わせた。皮膚表面温（前額、腹、背、前腕、手甲、大腿前面、下腿前面、足甲）、直腸温、体重減少量、代謝量を測定し、同時に主観評価として暑さ感や運動強度感等を申告させた。皮膚温測定部位・平均皮膚温はHardy-DuBoisの7部位8点に基づいた。また環境側は気温、相対湿度、グローブ温度、日射量等を測定した。作用風速は屋内実験においては静穏状態（0.2m/s）とした。着衣量は裸体時（0.05clo）と屋内着衣（0.4clo）、屋外着衣（0.35clo）の2種類を採用した。表1に被験者属性を、表2に服装、着衣量を示す。

表1 被験者の身体特性

被験者	年齢 [歳]	身長 [m]	体重 [kg]	体表面積 [m ²]	BMI
A	22	1.82	80	2.01	24.2
B	24	1.69	80	1.90	28.0
C	23	1.75	57	1.68	18.6
D	22	1.72	60	1.71	20.3
E	23	1.77	55	1.68	17.6
F	23	1.64	57	1.61	21.2
G	23	1.70	56	1.64	19.4
H	22	1.72	60	1.71	20.3
I	25	1.74	62	1.74	20.5
mean±SD	23±1.0	1.73±0.05	63±9.9	1.74±0.13	21.1±3.2

注) A～Hが屋内、G,Iが屋外実験被験者

表2 被験者の着衣量と服装

	着衣量 [clo]	服装
裸体	0.05	トランクス
屋内着衣	0.4	Tシャツ 作業ズボン トランクス 靴下・作業靴
屋外着衣	0.35	Tシャツ ハーフパンツ トランクス 靴下・運動靴

被験者は皮膚表面温度・直腸温度測定用サーミスタを取り付けた後、裸体時と着衣時の体重、および着衣重量を測定する。そして10分間の自転車エルゴメーター運動（9分運動、1分体重測定・主観申告）を、屋内実験では12サイクルの計120分間、屋外実験では9サイクルの計90分間行った。実験中の被験者への水分補給は行わない。皮膚表面温、直腸温、グローブ温、日射量の測定は10秒間隔、気温、湿度の測定はアスマン通風乾湿計を用い10分間隔で行った。屋外の風速は、超音波風速計を用いて測定した。屋内実験の設定条件を表3に、屋外環境の実測範囲を表4に示す。

表3 屋内実験 設定環境

気温	23～39℃ 裸体時 17～36℃ 着衣時
相対湿度	50%RH
風速	0.2m/s
平均放射温	=気温

表4 屋外実験 設定環境

気温	18～32℃
相対湿度	30～77%RH
風速	0.7～3.6m/s
全天日射量	100～830W/m ²

k_{adp} を算出するために、屋内実験結果においては、気温、湿度は実験120分の平均値を、皮膚表面温度、直腸温度、体重減少量は最終3サイクル（30分間）の平均値を用い、屋外実験結果においては、30～90分の平均値を用いる。

2. 実験結果と考察

2. 1 検証に用いる実測データ

k_{adp} の分布を、暑熱障害発症リスクに関連して評価するにあたり、リスクにあまり関係のない温度域のデータを除いた。検証に用いたのは筆者らが導入した暑熱度指数HF (Heat Factor)⁵⁾ が $2 \leq HF \leq 4$ の温度域のデータである。ここで、HFは、熱的中立状態をHF=0、直腸温度が平均皮膚温に比例して増加し始める臨界状態をHF=4とし

たものであり、おおむねHF = 1「やや暖かい」、HF = 2「暖かい」、HF = 3「暑い」、HF = 4「非常に暑い」に対応する。代謝量3.8metの場合、HFに対応する平均皮膚温はおおよそHF = 0, $t_{sk} = 31^{\circ}\text{C}$, HF = 2, $t_{sk} = 33^{\circ}\text{C}$, HF = 4, $t_{sk} = 36^{\circ}\text{C}$ である。

2. 2 平均皮膚温と発汗密度の関係

平均皮膚温と発汗密度の関係を被験者別に図1に示す。図1に示す実線は、 k_{adp} を0.4～1.2の範

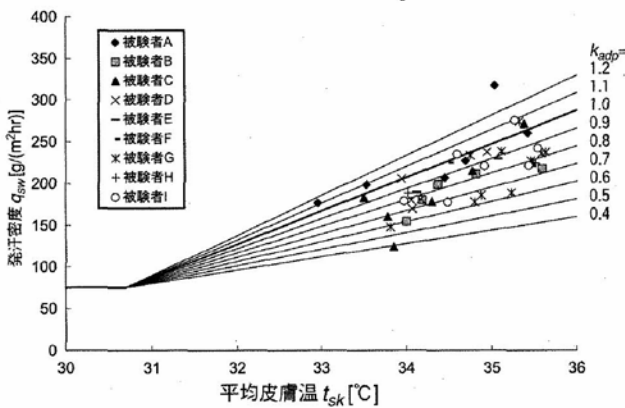


図1 平均皮膚温と発汗密度の関係

囲で変化させた場合の発汗密度を表している。図中のプロットは実験から得られた発汗密度で、 $k_{adp} = 0.4 \sim 1.2$ 程度の間広く分布していることが見て取れる。 $t_{sk} = 34^{\circ}\text{C}$ 付近では $k_{adp} = 0.4 \sim 1.0$, $t_{sk} = 35^{\circ}\text{C}$ 付近では $k_{adp} = 0.6 \sim 1.2$ と温域により分布範囲に若干の差はあるが、今回の分析では無視する。個人間のばらつき（個体間差）のみならず、同被験者であっても k_{adp} が大きく異なる（個体内差）ことから、人の発汗特性は日々変動していることが考えられる。また被験者Gの一部、被験者Iは屋外実験のデータであるが、屋内実験により得られたデータとは系統的な差は見られなかったことから、以降の分析は屋内外の実験データを同一に取り扱うこととする。

2. 3 k_{adp} の度数分布

各被験者の k_{adp} を計算し、ヒストグラム、累積分布を図2に示す。階級は0.1毎に設定し、例と

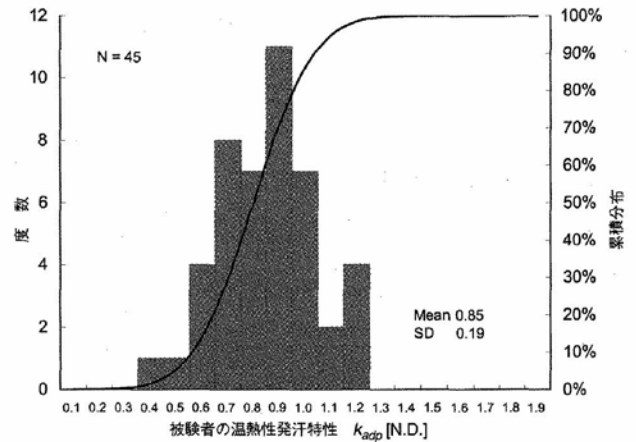


図2 k_{adp} のヒストグラム

して $k_{adp} = 1$ の階級においては $0.95 \leq k_{adp} < 1.05$ となるように分類した。全データ数は45で、平均値は0.85、標準偏差は0.19であった。0.9の階級を境にほぼ正規分布を示す形が見て取れた。窪田ら^{1,2)}が大学生の男性被験者実験と国内外の既往の実験結果を勘案して提案した温熱性発汗係数 $k_{swsk} = 28$ （個人差係数 $k_{adp} = 1.0$ に対応する）と比較して、今回の被験者の平均値 $k_{adp} = 0.85$ は若干低い値ではあるが、おおむね平均的な被験者群といえる。標準偏差0.19の正規分布の場合、下側確率5%に相当する個人差係数 k_{adp} は0.54、下側確率10%に対する k_{adp} は0.61である。低値を示す k_{adp} の確率については、今後サンプル数を増やすことで、さらなる詳細な検討が必要であると考えられる。

2. 4 被験者別 k_{adp} の特性

表5に、データ数が5以上の被験者個人の k_{adp} の最大値、最小値、平均値、標準偏差と被験者Bを除く全員の最大値、最小値、平均値、標準偏差

表5 被験者別 k_{adp} の特性

	max	min	mean	SD	N
被験者A	1.16	0.76	0.86	0.15	6
被験者B	0.74	0.48	0.64	0.10	5
被験者C	1.05	0.40	0.75	0.23	7
被験者D	0.99	0.61	0.78	0.15	5
被験者G	1.19	0.66	0.89	0.18	10
被験者I	1.22	0.79	0.99	0.15	7
被験者Bを除く全員	1.22	0.40	0.88	0.18	40

を示す。

各被験者の平均値 k_{adp} を被験者間で比較すると、最大で0.35程度の差が見られた。ここで平均値の最も低い被験者Bに着目し、被験者Bを除く残りの全データを母集団として、被験者Bが母集団に属するか否かを評価するために、母平均の検定を行った結果、有意水準0.5%で有意差が見られた。

被験者個人の標準偏差は、おおむね0.10~0.18を示したが、被験者Cのように0.23とばらつきの大い結果も見られた。個人差の評価にはこのような特異性のある被験者の扱いが重要になるものと思われる。本研究においては、温熱性発汗特性の個人差のみならず、被験者自身の温熱性発汗特性が大きく変動することが示される結果となった。

3. 平均皮膚温・体内温予測モデルを用いた暑熱障害リスクの検証

3.1 平均皮膚温予測モデルの有効性

本研究で使用する予測モデルには、無効発汗の発生に伴う着衣の濡れが繰り返されており、濡れた部分の着衣の熱抵抗の減少と蒸発の促進による影響が加味されている⁴⁾。予測モデルの有効性を検証するために、図3に屋内被験者実験における平均皮膚温の予測値と実測値の関係を示す。予測値と実測値は±0.5℃の範囲内ではほぼ一致していることから、予測モデルの有効性が示された。

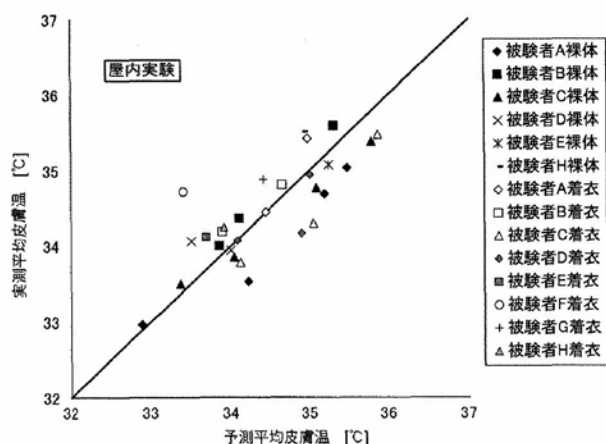


図3 平均皮膚温 予測 vs. 実測

3.2 k_{adp} の分布が平均皮膚温に及ぼす影響
本節では2章で得られた k_{adp} の分布が平均皮膚温に及ぼす影響を評価するために、予測モデルを用いた検証を行う。ここでは暑熱障害発症リスクを判定する体温として平均皮膚温36℃を用いた。おおむねこの皮膚温を境にして体内温度が皮膚温とほぼ同じ割合で上昇する、いわば臨界皮膚温である。

図4は、 $k_{adp} = 0.4 \sim 1.2$ まで変化させた場合に関して、 $t_{sk} = 36℃$ となる等平均皮膚温線を湿り空気線図上に示したものである。図において相対湿度50%に着目すると、平均皮膚温が36℃となる気温は平均的な人 ($k_{adp} = 1.0$) の場合には気温32.5℃であるのに対して、今回の被験者実験の最小値 $k_{adp} = 0.4$ (発現確率1.6%) の場合には27.5℃程度である。このことは、平均的人体 $k_{adp} = 1.0$ に基づいて評価した環境温度よりも5℃も低い温度において、確率は小さいものの同様のリスクが存在することを意味している。なお $k_{adp} = 0.4$ の人が気温32.5℃の環境にいた場合、

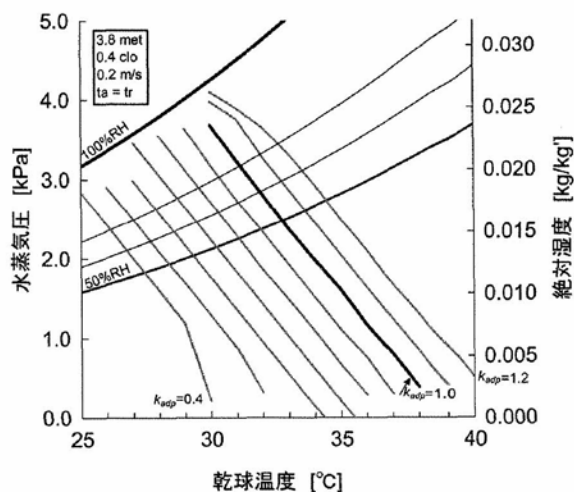


図4 $k_{adp} = 0.4 \sim 1.2$ とした場合の $t_{sk} = 36℃$ の等平均皮膚温線

平均皮膚温は38.7℃に達する。

今回の実験では、個体間差と同程度の個体内差が観測された。このことから、今後、熱中症等による高温の障害リスク評価を行う際には、単に弱者対策という個体間差の観点からだけでなく、

個体内差の観点にも留意する必要があることが確認された。

結 言

屋内外における被験者実験より、体重減少量と平均皮膚温を実測し、予測モデルを援用して被験者の温熱性発汗量を算出し、「個人差係数 k_{adp} 」の形で整理した。その結果、温熱性発汗に関わる個人差係数は、平均値 $k_{adp} = 1$ を中心として0.4～1.2倍の範囲に分布した。この個人差が暑熱リスクに与える影響を見るために、著者らの体温予測モデルを用いて、暑熱障害発症リスク判定体温（本研究では平均皮膚温 36°C を適用した）に達する環境条件を湿り空気線図上に示した。その結果、リスク判定体温に達する環境温度は、平均的人体（ $k_{adp} = 1$ ）と被験者の最低値 $k_{adp} = 0.4$ の場合では 5°C 近い差の存在することが明らかとなった。

暑熱障害を低減させるためには、個人差特性を把握した上で、暑熱環境のリスクを確率の形で表現することが望ましい。今後、被験者の発汗特性に関する個人差係数に関わるデータを蓄積すると同時に、被験者自身の発汗特性が変化する要因を知る必要があると考えられ、今後の検討課題といえる。

謝 辞

本研究に対し助成賜りました（財）石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝申し上げます。また本研究の遂行に当たり多大なるご協力を賜りました。北海道大学大学院工学研究科修士課程の

文 献

- 1) 松尾朋浩, 窪田英樹ら, 運動時の温熱性発汗特性と平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会計画系論文集, 526, 107-113 (1999)
- 2) 窪田英樹, 松尾朋浩ら, 温熱性発汗特性を考慮した椅座時の平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会計画系論文集, 532, 79-85 (2000)
- 3) 窪田英樹ら, 暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会計画系論文集, 575, 83-89 (2004)
- 4) 窪田英樹ら, 工場における局所冷房環境の評価(第2報) 着衣の濡れを考慮した平均皮膚温予測モデルと作業環境評価, 平成16年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1795-1798 (2004)
- 5) 窪田英樹ら, 暑熱環境における人体内部温度の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 367-368 (1999)
- 6) Fanger, P. O., Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation, *ASHRAE Trans.*, 73 (II) . III4.1-20 (1967)
- 7) Winslow, C. -E., Gagge, A. P., and Herrington, B. P., The influence of air movement upon heat loss from the clothed human body, *J. Physiol.*, 127, 505-518 (1939)