

## 環境湿度と着衣密着度が人体の生理・心理反応に及ぼす影響

栗原浩平<sup>1)</sup>, 戸沼 大<sup>2)</sup>, 濱田靖弘<sup>2)</sup>, 武者亮佑<sup>2)</sup>, 窪田英樹<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>釧路工業高等専門学校, <sup>2)</sup>北海道大学

### Effect of an environmental humidity and a clothing fit on physiological and psychological responses

Kouhei Kuwabara<sup>1)</sup>, Dai Tonuma<sup>2)</sup>, Yasuhiro Hamada<sup>2)</sup>, Ryosuke Musha<sup>2)</sup>, Hideki Kubota<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>National Institute of Technology, <sup>2)</sup>Kushiro College, <sup>2)</sup>Hokkaido University

**Abstract:** This study evaluates the effects of: 1) the clothing fit (CF) for reducing the thermal resistance of clothing especially when the sweat wets it and 2) the relative humidity (RH) on heat loss from body which affects the body temperature. Experiments were conducted with three young male subjects to test the effect of CF of T-shirt of which two sizes were applied for each subject: normal size for individual subject and that of tight (one-rank smaller). A bicycle-ergometer was used with a load to give subject a metabolic rate of 3.8 met. We found that the tight T-shirts gave lower body surface temperature than that of normal. The effect of RH on the body temperature was proved to be small.

**Key words:** subjective experiments, environmental humidity, clothing fit, mean skin temperature, wet clothing

**要旨:** Tシャツの密着度と相対湿度が人体の生理・心理反応に及ぼす影響を被験者実験(3名の男子学生、3.8met自転車エルゴメータ運動)によって評価した。着衣に吸収され残留する汗量および蒸発性能は着衣密着度で有意な差は見られなかったが、標準サイズより密着度の高い小型のTシャツで作業時の体表温が低くなった。密着度が増加すると濡れ部位を含む着衣熱抵抗が減少し、体表温低下の主要因と考えられた。着衣密着度の違いによる着衣の濡れ感に大きな差はなかった。相対湿度の体表温への影響はわずかであった。

**キーワード:** 被験者実験、環境湿度、着衣密着度、体表温、着衣濡れ感

#### 1. はじめに

人口動態統計(厚生労働省, 2014)によると、2008~12年の熱中症による平均死亡者数は865名であり、早急な熱中症対策が必要である。高齢者は自宅、生産年齢層(特に男性)は仕事場、低年齢層は運動中に発症する割合が高く、あらゆる環境・年齢層においても熱中症は起こり得る。衣服は各々で容易に環境適応できる利便性があり、かつ身近な存在であるため、衣服に着目した熱中症対策を行うことが本研究の目的である。熱中症環境保健マニュアル(環境省, 2011)でも熱中症の予防法の一つとして服装の工夫を挙げており、例えば吸汗速乾素材の衣服が推奨されている。しかし、筆者らのこれまでの実験では暑熱ストレス低減効果は綿素材と大差なく、実証実験の重要性を示唆している。

本研究では、まず着衣密着度の熱ストレス低減効果に着目する。着衣の密着度が増すと着衣と皮膚表面との間の空隙が減り、着衣が汗で濡れると布自体の熱抵抗は激減するので、濡れ着衣部の熱抵抗はゼロに近づく。本研究では着衣密着度の熱ストレス低減効果を検証すると共に、着心地感などの心理的影響を調べる。

次に一定温度環境における相対湿度の生理的影響も調べた。日常生活では、蒸し暑いと肌や着衣が汗で濡れて不快を感じるが、湿度が体温等に与える生理的影響に関しては必ずしも明確ではない。既往の暑熱環境評価指標であるWBGT(Wet Bulb Globe Temperature)(Yaglou et al., 1957)は、国内外で熱中症予防の対策として推奨されているが、湿度を過大に評価しており、湿度の生理的影響を検証することが急務である。

本報では、Tシャツの密着度と相対湿度に着目して、これらが人体に与える生理的・心理的影響を被験者実験によって定量的に評価することを目的とする。

#### 2. 被験者実験

##### 2.1 被験者実験概要

健康な男子学生3名を被験者として2013年11月に恒温恒湿室で実験を行った。実験概要を表1に示す。実験に使用した吸汗速乾性Tシャツは市販のもので、被験者には体格に対応する標準Tシャツと、1サイズ小さい高密着Tシャツを着用させた。中作業を想定し、自転車エルゴメータにより43.5W/m<sup>2</sup>の負荷をかけた。

表1 被験者実験概要

被験者数 (身長・体重)	3名 (1.76m, 67kg)		
室温	27.5°C	32.5°C	
相対湿度条件	低湿 (35%)	中湿 (45%)	高湿 (55%)
衣服条件	吸汗速乾性Tシャツ	トランクス	作業用ズボン 靴下 靴
吸汗速乾性Tシャツ	標準 (Mサイズ)	高密着 (Sサイズ)	高密着 (Sサイズ)
気流	静穏 (0.2m/s)		
代謝量	3.83met		
外部仕事	0.67met		
着衣量	0.53clo		
Tシャツ素材	ポリエステル100%		
ズボン素材	ポリエステル69% 綿30% その他1%		
実験方法	10分1サイクル (1分立位休息, 9分運動) のエルゴメータ運動 (120分)		
測定項目	体表温 (額・腹部・背中・前腕・手背・大腿・下腿・足背) 血圧 裸体体重 着衣質量 着衣時体重 心拍数 体内温 (鼓膜温度) 胸圍 肩幅 主観申告 (温冷感・総合的不快感・発汗感・気流感・湿度感・着衣濡れ感・ 着衣密着度感・着衣のきつさ感・部位別温冷感・口渇感・運動強度感)		

2.2 実験方法

体表温を測定するため被験者にサーミスタ (LT-8A, Gram) を8部位 (足背, 下腿前面, 大腿前面, 腹, 手背, 前腕, 前額, 背中) に取り付け, その後実験衣 (吸汗速乾性Tシャツ, トランクス, 作業用ズボン, 靴下, 靴) を着用させ, 自転車エルゴメータ運動 (1分間立位休息, 9分間運動で1サイクル) を計12サイクル (120分) 行わせた. 1分間の立位休息時に被験者の着衣時体重を測定し, 主観申告をさせ心理量を測定した. 体表温はHardy-DuBoisの7点法に基づき算出し, 定常と見なすことができる最終30分間の平均値を実測体表温として用いた. 実験開始前, 60分, 120分 (実験終了時) に着衣質量と裸体体重を測定し, 単位時間・単位体表面積あたりに換算した値をそれぞれ着衣質量増加量, 裸体体重減少量とし, さらに裸体体重減少量から呼吸と皮膚からの拡散による蒸散量を引いた値を発汗量とした.

2.3 着衣の密着度CF

着衣の密着度を定量的に評価するために着衣密着度CF (Clothing Fit) を新たに導入した. CFは被験者の人体胸圍 (CHG: Chest Girth) をTシャツの同一位置の服圍 (CLG: Clothing Girth) で除した値  $CF = CHG / CLG$  として定義した. 即ちCFは大きいほど密着度が高い.

2.4 ヒートファクターHF

体温の測定結果を評価するために, 新たな指標ヒートファクターHFを導入した (表2). 定常状態において体内温  $t_{cr}$  が体表温  $t_{sk}$  と並行して上昇する温域 (Kubota et al., 2014) が存在するが ( $t_{cr} = t_{sk} + \Delta t_{sc}$ ,  $\Delta t_{sc} = t_{crn} - t_{skcr}$ ), この温域が始まる臨界体表温  $t_{skcr}$  と中立体表温  $t_{skn}$  の間を4等分して数値で表したのがHFである. HFは温感の尺度 (0: 暑くも寒くもない, 1: やや暖かい, 2: 暖かい, 3: 暑い, 4: 非常に暑い) と概ね対応する. すなわち, (ア)  $t_{skn} < t_{sk} \leq t_{skcr}$ : 体内温一定 ( $t_{crn}$ )

$$HF = \frac{t_{sk} - t_{skn}}{t_{skcr} - t_{skn}} \times 4 \quad (1)$$

また, HFを体内温上昇温域へ敷衍して, 体内温に着目して指標化する.

(イ)  $t_{skcr} < t_{sk}$ : 体内温上昇域

表2 ヒートファクターHFの尺度

HF	尺度	HF	尺度
+4	非常に暑い	+6	$t_{cr} = 40^\circ\text{C}$
+3	暑い	+5	$t_{cr} = 38^\circ\text{C}$
+2	暖かい	+4	$t_{cr} = t_{crn}$
+1	やや暖かい		
0	暑くも寒くもない		
-1	やや涼しい		
-2	涼しい		
-3	寒い		
-4	非常に寒い		
体内温一定域		体内温上昇域	

3. 実験結果と考察

3.1 着衣密着度と体表温

図1に, 着衣密着度CF別の相対湿度と体表温の関係を示す. 実測値は相対湿度の区間ごとに被験者の平均値を用いた. 平均CF値は標準Tシャツ0.90, 高密着Tシャツ0.94であった. 体表温は高密着が標準Tシャツより約0.38°C低く, 密着度の高いTシャツの暑熱ストレス低減効果が確認された. 一方, 相対湿度の体表温への影響は小さく, 湿度10%増による体表温増は約0.1°Cであった. 同図に示すように筆者ら (Kubota et al., 2014) の人体熱モデルで予測される特性とほぼ一致し, モデルの有効性が確認できる. 図2において, 同モデルで予測される等体内温線と等WBGT線を比較したが, 特に50%以下で両者は大きく乖離しており, WBGTが湿度を過大に評価することを強く示唆している.

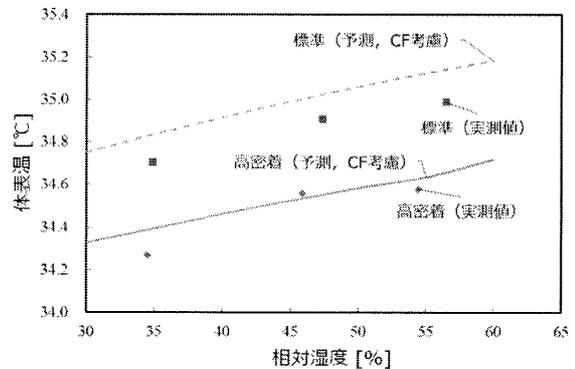


図1 相対湿度と体表温の関係

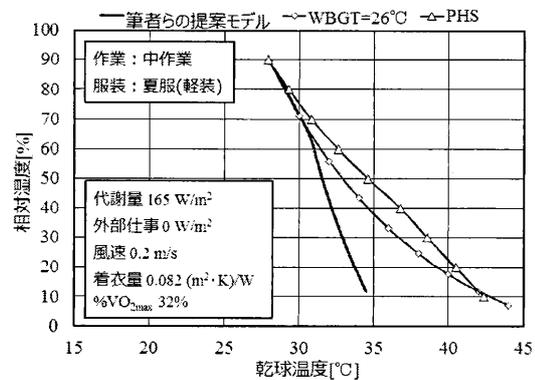


図2 中作業時の許容上限 ( $t_{cr} = 38^\circ\text{C}$ ) と WBGT の比較

実験室温 27.5°Cで得られた体表温を HF で表し、高密着と標準 T シャツに分けて整理した (図 3, 4). 各被験者の体表温は HF(高密着) < HF(標準) で平均値は夫々 HF(高密着)=2.87±0.24, HF(標準)=3.15±0.20 となり個別値で検定した結果において両者に有意差がみられ (p<0.05), HF によっても高密着衣服の暑熱ストレス低減効果が確認された.

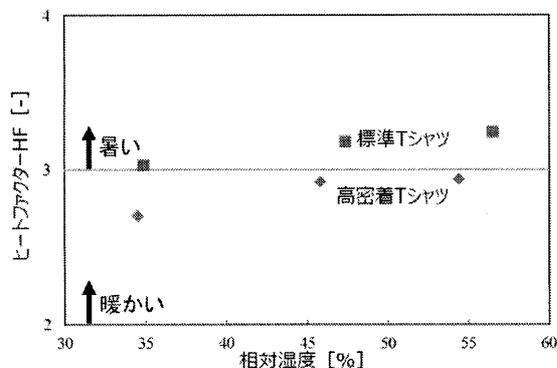


図 3 相対湿度とヒートファクター-HF の関係

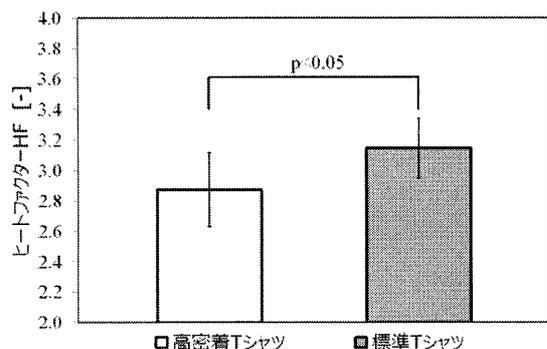


図 4 T シャツ密着度別のヒートファクター

### 3.2 着衣密着度と着衣濡れ部の熱抵抗

高密着 T シャツの体表温低下効果に関わる要因として①着衣に残留する汗量, ②体表面と衣服間の空気層が密着度により異なること, が挙げられる. ①に関して図 5 に着衣残留汗量, すなわち着衣質量増加率 (=着衣質量増加量/発汗量) を無効発汗に対して示した. 無効発汗は乾いた着衣の状態で蒸発できずに体表面に残

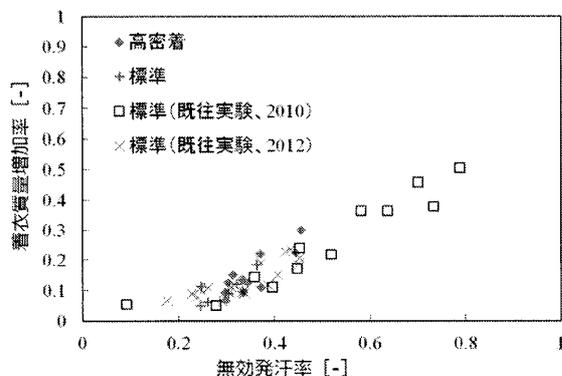


図 5 無効発汗率と着衣重量増加率との関係

留する汗量 (仮定量) であり定量的評価が可能である. 人体熱モデルでは乾燥着衣時の発汗効率  $\eta_{sw}$  を適用し, 無効発汗率  $1-\eta_{sw}$  を求める.

$$\eta_{sw} = (S_w - S_{wdr})/S_w = 0.37 + 0.31/w_v \quad (2)$$

$$w_v = S_w/E_{max,d} \quad (3)$$

ここで,  $S_w$ : 発汗蒸発熱流量 (=発汗量)[W/m<sup>2</sup>],  $S_{wdr}$ : 乾燥着衣時の無効発汗量[W/m<sup>2</sup>],  $E_{max,d}$ : 乾燥着衣時のぬれた皮膚表面での蒸発熱流量[W/m<sup>2</sup>],  $w_v$ : 仮想ぬれ率[-].

図 5 には既往の実験 (谷地, 柴原ら, 2013) より得られた標準吸汗速乾性 T シャツでの実測結果もプロットしてある. これらを含めて高密着と標準 T シャツのそれぞれの回帰直線の有意差検定をした結果, 残留汗量は着衣密着度による有意な差は見られず, 濡れた着衣を通して蒸発する量はほぼ同じであると考えることが出来る. 一方, ②に関して図 6 は, 濡れ着衣部位の熱抵抗  $R_{cl,w}$  を人体モデルより算出し, CF に対して区間ごとに示したものである. ここでは  $R_{cl,w}$  を着衣熱抵抗に対する割合  $g_{cl,w}$  (湿潤着衣熱抵抗率) で表しており, 被験者実験によって得られた実測値から以下の式に基づいて推定した.

$$E_{max,w} = J_1 E_{max,d} - J_2 q_{rc,d} \quad (4)$$

$$J_1 = \frac{k_s + k_{cl,w}}{a_{sk} k_{s,e} + k_s + k_{cl,w}} \frac{k_{s,e}}{k_{max,d}} \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{a_{sk} k_{s,e}}{a_{sk} k_{s,e} + k_s + k_{cl,w}} \frac{k_s}{k_{rc,d}} \quad (6)$$

$$k_{cl,w} = 1/(0.155 I_{cl} \cdot g_{cl,w}) \quad (7)$$

$$g_{cl,w} = R_{cl,w}/R_{cl,d} \quad (8)$$

ここで,  $E_{max,w}$ : 湿潤着衣からの蒸発熱流量[W/m<sup>2</sup>],  $E_{max,d}$ : 乾燥着衣からの蒸発熱流量[W/m<sup>2</sup>],  $q_{rc,d}$ : 乾燥着衣からの顕熱流量[W/m<sup>2</sup>],  $k_s$ : 衣服表面からの顕熱流率[W/(m<sup>2</sup>·K)],  $k_{cl,w}$ : 湿潤着衣の熱移動係数[W/(m<sup>2</sup>·K)],  $k_{s,e}$ : 衣服表面からの蒸発熱移動係数[W/(m<sup>2</sup>·kPa)],  $k_{max,d}$ : 衣服表面からの顕熱流率蒸発熱移動係数[W/(m<sup>2</sup>·kPa)],  $k_{rc,d}$ : 乾燥着衣の熱貫流率[W/(m<sup>2</sup>·K)],  $I_{cl}$ : クロ値[clo],  $g_{cl,w}$ : 湿潤着衣熱抵抗率 [-],  $R_{cl,w}$ : 湿潤着衣の熱抵抗[W/(m<sup>2</sup>·K)],  $R_{cl,d}$ : 乾燥着衣の熱抵抗[W/(m<sup>2</sup>·K)].

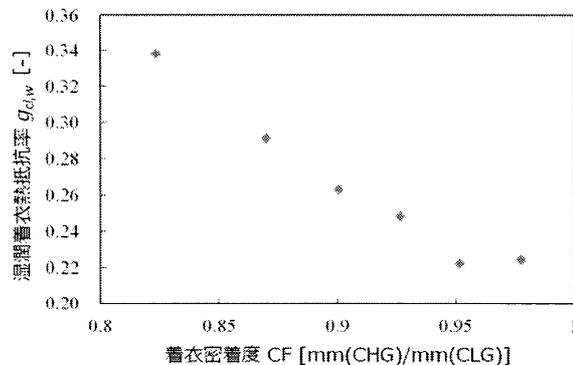


図 6 着衣密着度と湿潤着衣熱抵抗率との関係

$g_{cl,w}$  は CF に逆比例していて高密着 T シャツ (狭い空気層) のほうが標準 T シャツ (厚い空気層) より  $g_{cl,w}$

は小さいことを示している。すなわち、密着度が増加することによる皮膚・着衣間の空隙減少が着衣濡れ部位の熱抵抗減少と密接に関わっていることが確認され、このことが体表温低下の大きな要因と考えられる。

### 3.3 着衣密着度と発汗抑制

着衣密着度が発汗に影響を及ぼす可能性がある。人体の発汗調節機能として胸部など皮膚の圧迫による皮膚血管拡張を抑制することによって発汗量が減少することが報告されている(平田ら, 2002)。今回用いた衣服の密着度強度が仮に発汗抑制が生ずるのであれば熱中症対策として密着という要素は逆効果になる。図7は着衣密着度 CF と発汗係数  $k_{swsk}$  (人体の発汗能に関する個人差係数) との関係(区間平均)を示したものである。 $k_{swsk}$  は CF の影響を受けていないことを示して、今回用いた衣服の密着強度では発汗抑制がないと考えられる。発汗係数は以下の式を用いて算出した。

$$k_{swsk} = \frac{S_{wR}}{t_{sk} - t_{sksw}} \quad (9)$$

$k_{swsk}$ : 発汗係数[W/(m<sup>2</sup>・K)],  $S_{wR}$ : 温熱性発汗[W/m<sup>2</sup>],  
 $t_{sk}$ : 体表温[°C],  $t_{sksw}$ : 温熱性発汗が開始する臨界体表温[°C]

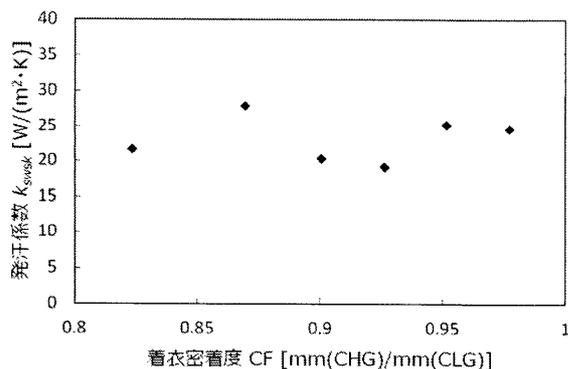


図7 着衣密着度と発汗係数との関係

### 3.4 着衣密着度と着衣の濡れ感

図8に、着心地にかかわる着衣の濡れ感とCFとの関係を相対湿度の区間ごとに示した(「全く濡れていない」を0, 「非常に濡れている」を1として表示)。相対湿度が50%程度までは標準Tシャツの濡れ感がより小さく55%では同程度となったが両者に大きな差は無いことがわかるため、着衣の濡れからくる着心地は相対湿度および着衣の密着度によってあまり左右されない。

## 4. まとめ

熱ストレス低減を目的として着衣(Tシャツ)の密着度と環境湿度に着目した被験者実験を行った。

- 1) 中作業時の体表温は、標準Tシャツ(体格に適合したサイズ)より高密着(標準より1サイズ小さいサイズ)の方が低くなった。ヒートファクターを用いても高密着Tシャツの効果が確認された。
- 2) 着衣密着度CF値が増加すると着衣濡れ部位の熱抵抗が減少するため、体表温低下の主要因と考え

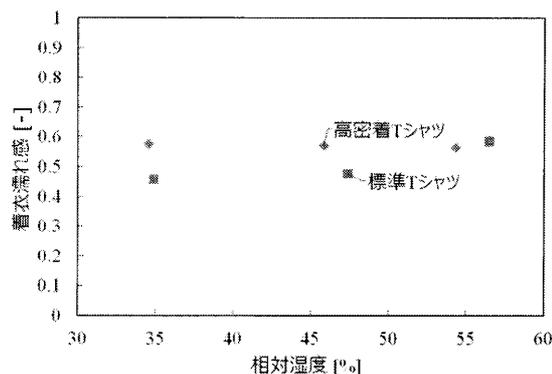


図8 着衣濡れ感と相対湿度との関係

られた。

- 3) 相対湿度が体表温へ与える影響はわずかであった。WBGTが湿度影響を過大に評価していることが示唆された。
- 4) 着衣に吸収され残留する汗量および蒸発性能は着衣密着度で有意な差は見られなかった。
- 5) 着衣密着度の違いによる「着衣の濡れ感」に大きな差は見られなかった。

標準よりもサイズの大きいシャツの方が、通気性が高まり熱抵抗は減少するという考え方もある。今後の課題としたい。

**謝辞** 本研究は、科研費補助金(25420620)に依ったことを付記する。

## 5. 参考文献

厚生労働省大臣官房統計情報部: 人口動態調査, 1997-2012, 政府統計の総合窓口(e-stat), <http://www.e-stat.go.jp/>

環境省熱中症情報: 熱中症環境保健マニュアル, 2011年5月改訂版, [http://www.env.go.jp/chemi/heat\\_stroke/](http://www.env.go.jp/chemi/heat_stroke/)

C. P. Yaglou and D. Minard. 1957. Control of Heat Casualties at Military Training Centers. *American Medical Association Archives of Industrial Health*. 16:302/316.

H. Kubota, K. Kuwabara and Y. Hamada. 2014. The development and initial validation of a virtual dripping sweat rate and a clothing wetness ratio for use in predictive heat strain models. *International Journal of Biometeorology*. 58(6):1339-1353.

谷地誠, 栗原浩平, 窪田英樹, 2013, 衣服のぬれ特性と波長別日射特性を考慮した平均皮膚温・体内温予測モデルによる暑熱環境評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第47回学術講演会論文集, 163/166.

平田耕造, 井上芳光, 近藤徳彦編, 2002, 体温—運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因—, 27/52, 63/88, ナップ

### <連絡先>

栗原浩平  
 北海道釧路市大楽毛西2丁目32-1  
 釧路工業高等専門学校建築学科  
[kuwabara@archi.kushiro-ct.ac.jp](mailto:kuwabara@archi.kushiro-ct.ac.jp)