サーマルマネキンの潜熱抵抗測定精度向上及び 防護服の顕熱抵抗測定に関する研究紹介

上 野 哲^{*1}

衣服を構成する生地の物理的性質だけでは、着衣の温熱特性を予測することは不可能であるため、温熱特性の計測には人と同じ形状をしたサーマルマネキンが使われる。現在、環境評価やモデル計算との関連等の広い分野でサーマルマネキンは応用されている。本研究紹介では、労働安全衛生総合研究所の清瀬地区にあるサーマルマネキンを使った2つの研究成果を紹介する。一つは、防火服の暑熱ストレス評価のためにサーマルマネキンを使って行った顕熱抵抗測定した研究である。歩行により顕熱抵抗は減少し、サイズ・材質によって減少の割合は異なった。次は、同サーマルマネキンを使って、スウェットスーツ上の水分蒸発部分における表面温度を正確に測定することで潜熱抵抗測定の高精度化を行い、測定技術を向上させた研究である。マネキンの埋め込み温度センサーで測定した表面温度を使用すると潜熱抵抗が過大評価されることがわかった。

キーワード：サーマルマネキン、衣服、顕熱抵抗、潜熱抵抗

1 サーマルマネキンとは

人は環境に応じた衣服をまとうことで、衣服と皮膚の間に微気候（衣服気候）を形成し環境制御を行っている¹⁾。各衣服の持つ保温性（顕熱抵抗）及び透湿性（潜熱抵抗）はサーマルマネキンを用いて計測することが可能である。サーマルマネキンとは、人と同じ形状のマネキンに発熱ヒーターと温度センサーを埋め込み制御ソフトウェアで表面温度を制御できるように作られた装置である。マネキンはいくつかのゾーンに分割されており、ゾーンごとに発熱量や表面温度が独立して制御できるようになっている。衣服を構成する生地の保温性、透湿性を測定しただけでは、着衣の保温性、透湿性を予測することができない。そのため、人と同形のサーマルマネキンに測定対象の衣服を着せて、人が衣服を着用したのと同じ状況を作って衣服の温熱特性を測定する。衣服の温熱特性の計測を被験者実験ではなくてサーマルマネキンで行う利点は、サーマルマネキンを構成するシェルの厚さが薄いので、定常状態に達するまでの時間が短く、計測が正確で、再現性がよいことである。被験者実験でも計測可能であるが、個人差が大きいこと、同じ個人でも日によって状態が異なること、人だと動くことが避けられないことなど誤差となる要因が多数存在する。被験者実験ではできない環境条件でもサーマルマネキンでは測定できる等利点は大きい。現在では、サーマルマネキンは熱収支の理論計算と組み合わせで用いたり²⁾、温熱環境の評価のために用いたり^{3,4)}、衣服の温熱特性計測以外にも多方面で利用されている。

2 サーマルマネキンの特徴と性能

実験で用いたサーマルマネキン（NEWTON, Measurement Technology Northwest社, シアトル）の特徴及び性能を以下に述べる。マネキンの大きさはアジア人男性

表1 マネキンのサイズ

	長さ (cm)
全高	169
胸囲	91
肩幅	40
ウェスト	75
股下	72
ヒップ	91

図1 マネキンの26ゾーン（参考文献⁵⁾、表1、図1より）

原稿受付 2014年2月14日 (Received date: February 14, 2014)

原稿受理 2015年9月18日 (Accepted date: September 18, 2015)

J-STAGE Advance published date: January 14, 2016

^{*1} (独) 労働安全衛生総合研究所 有害性評価研究グループ

連絡先: 〒224-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1

(独) 労働安全衛生総合研究所 有害性評価研究グループ

上野 哲

E-mail: uenos@h.jniosh.go.jp

doi: 10.2486/josh.JOSH-2015-0008-KE

の平均の体格である(表1)。サーマルマネキンの総体表面積は 1.8m^2 で、26のゾーンから成り立ち(図1)、それぞれ温度センサーと発熱抵抗線が埋め込まれている。

温度センサーは表面下 0.5mm の所に埋め込まれており、アルミニウムにエポキシを混ぜた薄い層でコーティングされている。発熱線は、温度センサーとは断熱材の膜を隔てた深いところに等しい間隔で埋め込まれてゾーン内の表面温度が均一になるように工夫されている。温度上昇中のサーマルマネキンをサーモグラフで撮影すると、発熱線が埋め込まれた部分の温度が高く、発熱線の間の領域は温度が低い埋め込まれた発熱線の部分を見分けることができる。時間がたって表面温度が均一になると、発熱線をサーモグラフィで見分けることはできなくなる。発熱線の材質は、線膨張率の低いワイヤー($0.0015\%/^{\circ}\text{C}$)であるため、温度による変形が少ない。各ゾーンには、温度や発熱量を制御するためのコントローラがあり、パソコン上の制御ソフトからの情報に基づいて表面温度、発熱量を制御する。表面温度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の範囲で制御が可能であり、単位面積あたりの発熱量は $800\text{W}/\text{m}^2$ まで増やすことができる。マネキンには両手と両足に棒をつけ、その棒がモーターにつながり歩行を模擬した動きが可能である。最大60歩/分の歩行が可能であるため、ヨーロッパのサーマルマネキンの規格であるENV342⁶⁾を満たしている。このサーマルマネキンは、顕熱抵抗の測定基準のASTM F1291⁷⁾及び潜熱抵抗の測定基準であるASTM F2370⁸⁾に沿った測定が可能である。

3 サーマルマネキンを使った顕熱抵抗研究紹介

労働作業において断熱性が高い防護服を着用するだけで暑熱ストレスが高まることがよく知られている⁹⁾。その中で、防火服は最も暑熱ストレスが大きいものの一つであり、訓練時に熱中症になる消防士が多い。消防士が着用する防火服の暑熱ストレスを軽減するためにサイズ、材質が異なる防火服が次世代防火服研究会で作成され、作成された防火服の顕熱抵抗の評価を行った⁵⁾。

サイズが異なる3種類(M, L, LL)の基本防火服とMサイズの2種類(Ye:パラアラミド, Br:ザイロン)の材質の異なる防火服の顕熱抵抗を測定した。そのほか、消防士が消防活動以外の通常の事務作業時に着用する2種類の活動服(AB:基本, AS:ストレッチ型)を測定した(表2)。

立位静止状態と歩行状態(45歩/分)の着衣の顕熱抵抗を示す(図2)。着衣顕熱抵抗の測定は、全ゾーン表面温度 34°C の条件で計測しパラレル法を使って計算した。パラレル法は、表面温度が全ゾーンで同じであるときに有効な計算方法で、以下の式で表される。

$$I_T = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot (T_{sk_i} - T_o)}{\sum_i (\alpha_i \cdot H_i)} = \frac{T_{sk} - T_o}{\sum_i (\alpha_i \cdot H_i)} \quad (1)$$

ここで、 T_{sk_i} : i ゾーンの平均表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 T_o : 環境の

図2 防火服と活動服のみの全顕熱抵抗(参考文献⁵⁾, 図2より)

表2 各防火服のサイズと材質

防火服	サイズ		材質
	上着	ズボン (ウエスト・股下)(cm)	
M	M サイズ	83-70	メタアラミド 90
L	L サイズ	90-70	メタアラミド 90
LL	LL サイズ	98-70	メタアラミド 90
Ye	M サイズ	83-70	パラアラミド
Br	M サイズ	83-70	PBO(ザイロン)
AB (活動服)	L サイズ	83-70	上着(綿 50% + ポリエステル 50%) ズボン(メタアラミド 75%他)
AS (活動服)	同上	83-70	ズボンのみストレッチ型

作用温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 α_i : マネキン全表面積に対する i ゾーンの表面積の割合、 H_i : i ゾーンの熱流束 [W/m^2]。立位静止状態は歩行状態よりいずれのタイプの防火服においても着衣顕熱抵抗は大きかった。立位静止状態では、サイズや材質の違いによる着衣顕熱抵抗の相違はなかった。歩行状態では、LLがLやMと比較して有意に着衣顕熱抵抗が小さかった。

材質では、BrがYeやMより有意に低い顕熱抵抗値となった。活動服のAB, ASは防火服の半分以下の顕熱抵抗値であった(図2)。

部位ごとでは、立位静止状態で臀部、腹部、背部等の衣服内空気層が厚い部分の顕熱抵抗が大きかった(図3)。顔や頭、手や足はマネキンがむき出しになっているため、着衣顕熱抵抗値がゼロになった。歩行状態では、全部位において着衣顕熱抵抗の低下が見られ、体幹部で最も減少した。上着の裾が動くことで防火服の外から空気が流れ込んだと考えられる。臀部でLLサイズが最も歩行時の減少率が大きかったのは、上着の裾とズボンの長い重なりが歩行によってなくなり、上着の裾の部分が臀部の

図3 ゾーンごとの防火服と活動服のみの顕熱抵抗 (参考文献⁵⁾, 図3より)

図4 潜熱抵抗測定時のサーマルマネキン、スウェットスーツ及び衣服の断面図

図5 各ゾーンの平均表面温度を計測するための温度センサーの位置決め用の測定

顕熱抵抗に寄与しなくなったからだと考えられる。

4 サーマルマネキンによる潜熱抵抗測定の精度向上の研究紹介

サーマルマネキンを使って潜熱抵抗測定をするときは、マネキン全表面から水が蒸発するように濡れたスウェットスーツで全表面を覆う。通常、表面温度は計測の利便性から通常マネキンの表面近くに埋め込まれたワイヤーセンサーで計測された温度 (T_{shell}) を使うが、表面が濡れた状態では水分が蒸発するスウェットスーツ上の温度 (T_{ws}) が表面温度となる。我々¹⁰⁾ は T_{ws} を表面温度として正確に測定し、潜熱抵抗を正確に求めた。図4に測定時のサーマルマネキンの断面図を模式的に示す。マネキン表面の埋め込み温度センサーからスウェットスーツの上面との間に温度抵抗と熱流移動があれば、次の式により T_{shell} と T_{ws} の間に温度差が生じることになる。

$$T_{shell} - T_{ws} = Q * I_{shell-ws} / A_{Du} > 0 \quad (2)$$

ここで、 Q : 全発熱量 [W], A_{Du} : マネキンの全表面積 [m^2], $I_{shell-ws}$: マネキン埋め込みの表面温度センサー

の位置からスウェットスーツ上面の間の熱抵抗 [$^{\circ}C \cdot m^2 / W$] である。 $I_{shell-ws}$ は予測できないため、直接 T_{ws} の温度を表面温度センサーで測定した。20個のマネキンの各ゾーンに15-24個のサーミスターを配置し、ゾーンの平均表面温度にできるだけ近い温度になるように各ゾーンから4か所サーミスターの位置を選び出した (図5)。実際の測定では、各ゾーン内の選んだ4か所に表面温度センサーを縫いつけ、測定した4つの温度の平均値をゾーンの平均表面温度とした。最初に、裸のマネキンの表面温度を3種類の方法で測定し比較した (図6)。3つの方法は以下の通りである。(方法1): 従来の埋め込み温度センサーでの測定, (方法2): スウェットスーツ上をサーミスターでの測定, (方法3): サーマログラフィー (TVS-700, NEC AVIO, Japan) での測定。方法3では、サーモグラフィーで濡れたスウェットスーツの写真を撮り、その写真から専用解析ソフト (PE professional, NEC Avio, Japan) を使いゾーンごとの二次元面の平均表面温度を求めた。サーミスターの平均表面温度が埋め込みセンサーの温度よりも低いこと、及びサーミスターとサーモグラフィーの温度がほとんど等しいことがわかり、サー

ミスターによる表面温度の計測が正確であることを示した (図6)。次に、表3に示す4種類の衣服の組み合わせで全潜熱抵抗及び表面温度を測定した。実験条件はマネキンの埋め込み温度センサーの温度が34.0°C一定、人工気象室の環境温度は34.0°C、相対湿度は50%とした。その結果、 $T_{\text{shell}}=T_a=34.0^\circ\text{C}>T_{\text{ws}}$ となったため、マネキン内部のヒーターと環境の両側から水分の蒸発面に向かって熱が伝えられることとなる。そのため、蒸発の潜熱に使用される熱量は、(3)式で表される。

$$Q = \sum_{i=1}^{20} [Q_i + (T_0 - T_{\text{ws}_i}) A_i / I_i] \quad (3)$$

ここで、 Q_i : i ゾーンの発熱量 [W], T_{ws_i} : i ゾーンのウェットスーツ上の表面温度 [°C], T_0 : 環境の作用温度 [°C], A_i : i ゾーンの表面積 [m²], I_i : i ゾーンにおける衣服の顕熱抵抗 [°C・m²/W] である。人工気象室は長時間34°Cに保っていたため、放射温度と環境温度は等しく $T_0=T_a$ と見做すことができる。全潜熱抵抗は、 i ゾーンのウェットスーツ上の表面温度 T_{ws_i} をマネキンのゾーンの面積で加重平均した全ウェットスーツ上の平均表面温度 T_{ws} を使い (5) 式で表される。

図6 裸のサーマルマネキンの全潜熱抵抗と表面温度
(A) マネキン埋め込みセンサーを使って計測した場合。(B) 各ゾーン4個の表面温度センサーを平均して計算した場合。(C) 各ゾーン4個の表面温度センサーの最大値で計算した場合。(D) 各ゾーン4個の表面温度センサーの最小値で計算した場合。(E) 各ゾーンの表面温度をサーモグラフィーで測定した平均温度とした場合。(F) 各ゾーンの表面温度をサーモグラフィーの最大温度とした場合。(G) 各ゾーンの表面温度をサーモグラフィーの最低温度とした場合。

$$T_{\text{ws}} = \sum_{i=1}^{20} \frac{A_i}{A_{\text{Du}}} \times T_{\text{ws}_i} \quad (4)$$

$$R_{\text{et}} = \frac{P(T_{\text{ws}}) - P(T_a) \times RH}{Q} \times A_{\text{Du}} \quad (5)$$

ここで、 R_{et} : 全潜熱抵抗 [kPa・m²/W], $P(T_{\text{ws}})$: T_{ws} における飽和蒸気圧 [kPa], $P(T_a)$: T_a における飽和蒸気圧 [kPa], RH : 相対湿度, A_{Du} : マネキンの全表面積 [m²], A_i : i ゾーンの表面積 [m²] である。各部位のウェットスーツ上の平均表面温度 T_{ws} の温度は、(2)式から熱流束と $I_{\text{shell-ws}}$ が求まれば計算できる。そのため、図7に示すように各ブロックで4種類の衣服 (表3) を4種類の状態 (静止状態, 歩行速度0.96km/h, 1.92km/h, 2.88km/h) で測定した平均熱流束と平均表面温度をプロットすることで理論式 (6~11) を導いた。

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{Arm}} (W/m^2) \times 0.0130 (\text{Arm}) \quad (6)$$

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{Trunk}} (W/m^2) \times 0.0089 (\text{Trunk}) \quad (7)$$

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{Hip}} (W/m^2) \times 0.0115 (\text{Hip}) \quad (8)$$

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{Thigh}} (W/m^2) \times 0.0063 (\text{Thigh}) \quad (9)$$

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{Calf}} (W/m^2) \times 0.0071 (\text{Calf}) \quad (10)$$

$$T_{\text{shell}} - T_{\text{ws}} = H_{\text{All}} (W/m^2) \times 0.0092 (\text{All Parts}) \quad (11)$$

ここで、 H_{Arm} , H_{Trunk} , H_{Hip} , H_{Thigh} , H_{Calf} , H_{All} はそれぞれ腕部, 体幹部, 臀部, 下腿部, 下肢部, 全表面の熱流束 [W/m²] である。

図7の各ブロックの回帰直線の切片は、ほぼ34.0°Cである。これは、熱流束が0W/m²で熱の移動がない時は、埋め込み温度センサーの位置で設定した表面温度 (=34.0°C) と濡れたスウェットスーツ上の表面温度が等しいことを示し (2) の理論式に合致している。すなわち、表面温度の実測値が正確だったことを示している。4種類の表面温度 (T_{shell} , T_{ws} , 各ブロックの予測式 (6~10) で計算した温度, 全ゾーンの予測式 (11) で計算した温度) を用いて計算した衣服の全潜熱抵抗を左から図8に示す。 T_{shell} で計算した全潜熱抵抗と T_{ws} で計算した全潜熱抵抗の相対比の差は立位, 歩行 (0.96, 1.92,

表3 潜熱抵抗の測定に用いた衣服の組み合わせ

	夏ビジネス スーツ(SB)	作業服 (WC)	ニッカポッカ (Ni)	Tyvek Model III (Dupont)(Ty)
着衣	1. ジャケット 2. 長ズボン 3. シャツ 4. ネクタイ	1. 作業服上下	1. ジャケット 2. ニッカポッカ	1. Tyvek Softwear Model III
共通部 分	1. 下着(半袖シャツ、パンツ) 2. 手袋 3. 安全靴 4. 靴下	1. 下着(半袖シャツ、パンツ) 2. 手袋 3. 安全靴 4. 靴下	1. 下着(半袖シャツ、パンツ) 2. 手袋 3. 安全靴 4. 靴下	1. 下着(半袖シャツ、パンツ) 2. 手袋 3. 安全靴 4. 靴下

図7 各部位ごとの平均熱流束と平均皮膚温度との関連
4種類の服、4種類の条件で測定した場合のデータをすべてプロットした。

図8 作業服(表3)の立位、歩行状態での全潜熱抵抗

2.88 km/h) でそれぞれ 8.4, 10.4, 12.3, 14.5% でありマネキンからの放熱量が多いほど表面温度補正が重要であることがわかった。

一度理論式を求めれば、発熱量からスウェットスーツ上の表面温度を求めることができる。表面温度を直接測定することなく、潜熱抵抗を求めることが可能となった。

5 まとめ

ここではサーマルマネキンを使って我々が行った消防服の顕熱抵抗測定と着衣潜熱抵抗測定の高精度化による測定技術向上についての2件の研究紹介を行った。夏季の熱中症による業務上の災害を防止するには、作業服がもたらす暑熱負担⁹⁾を軽減することは重要な対策の一つである。今後サーマルマネキンを使った作業服や防護服の温熱特性の測定がますます重要となってくると思われる。

ここで紹介した二つの研究以外にも、我々はフットマネキンを使った靴の保温性の測定^{11, 12)}、ヘッドマネキンを使った安全ヘルメットの通気性に関する研究¹³⁾、全身マネキンを使った身体冷却用クールベストの冷却能力に関する研究¹⁴⁾を行い、業務上の温熱に関するストレスをやわらげるための研究を行っている。

文 献

- 1) 田村照子. 衣服と気候. 成山堂. 2013.
- 2) Tanabe S, Kobayashi K, Nakano J, Ozeki Y, Konishi M. Evaluation of thermal comfort using combined multimode thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). Energy Build. 2002; 34: 637-646.

- 3) 田辺新一. 居住環境の快適性研究動向—サーマルマネキンと人体モデル—. 特集サーマルマネキン最前線, 空気調和衛生工学. 2010; 84: 3-9.
- 4) 郡逸平. 自動車室内の温熱環境評価法の標準化. 特集サーマルマネキン最前線, 空気調和衛生工学. 2010; 84: 31-41.
- 5) 上野哲, 澤田晋一. サーマルマネキンを使った防火服の顕熱抵抗測定. 労働安全衛生研究. 2008; 1: 189-196.
- 6) ENV342. European Prestandard product specification (protection against cold)
- 7) ASTM. ASTM F1291 standard method for measuring the thermal insulation of clothing using a heated manikin. Annual Book of ASTM standards. Vol. 11.03, Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. 2005.
- 8) ASTM. ASTM F2370 standard method for measuring the evaporative resistance of clothing using a sweating manikin. Vol. 11.03, Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. 2005.
- 9) Taylor NA. Challenges to temperature regulation when working in hot environments. Ind. Health 2006; 331-344.
- 10) Ueno S, Sawada S. Correction of the evaporative resistance of clothing by the temperature of skin fabric on a sweating and walking thermal manikin. Text. Res. J. 2012; 82: 1143-1156.
- 11) Ueno S, Kuklane K, Holmer I, Sawada S. Thermal resistance of occupational footwear used in Japan. ICB2008. Proceedings CD-ROM Cloth-P07 12th. 2008.
- 12) Kuklane K, Ueno S, Sawada S, Holmer I. Testing cold protection according to EN ISO 20344: Is there any professional footwear that does not pass? Ann. Occup. Hyg. 2009; 53: 63-68.
- 13) 上野哲, 澤田晋一. 発汗型ヘッドマネキンを用いた作業用安全ヘルメットの通気性に関する研究. 第50回日本労働衛生工学会, 第31回作業環境測定研究発表会抄録集. 2010; 194-195.
- 14) Ueno S, Sawada S. Estimation of cooling effect of ice packs by thermal manikin. Proceedings of 12th International Conference on Environmental Ergonomics, Slovenia. 2007; pp. 447-450.