

サーマルマネキンを使った防火服の顕熱抵抗測定†

上 野 哲*1 澤 田 晋 一*1

消防士の暑熱ストレスを高める原因の一つに防火服着用による身体からの放熱量の低下が挙げられる。そこで本研究では、熱伝達性が高くなる防火服の条件を探するため、サイズ、材質、作業ズボンの長さを変えて、熱伝達性の指標である顕熱抵抗を運動サーマルマネキンで測定した。サイズは、M, L, LL の 3 種類、材質はメタアラミド、パラアラミド、ザイロンの 3 種類、ズボンは半ズボンと長ズボンの 2 種類を用いた。その際、防火服ばかりでなく、実際の消防士の服装に合わせるために、活動服を着せた上から防火服や手袋、長靴をマネキンに履かせた状態でも測定した。またマネキンの立位静止状態に加え、歩行状態での防火服の顕熱抵抗を測定した。防火服のみの場合は、立位静止状態ではサイズによる顕熱抵抗の有意な差はなく、部位ごとの顕熱抵抗は衣服内の空気層が厚い臀部や体幹部が高かった。歩行時では LL サイズの防火服の顕熱抵抗が有意に小さかった。サイズが大きいため、衣服の内側と外側との空気の入れ替わりが大きくなったためと考えられる。活動服の上から防火服を着せると、防火服のサイズが大きくなるほど顕熱抵抗が高かった。作業ズボンの長さを短くすると、立位静止、歩行状態とも下腿部の顕熱抵抗が減少したが、全顕熱抵抗はほとんど変わらなかった。暑熱ストレスに関して活動服の長ズボンを半ズボンに交換する効果は少なかった。

キーワード: 防火服, 顕熱抵抗, サーマルマネキン, ポンピング効果

1 はじめに

防護服着用時の暑熱ストレスの増加は、労働衛生上の大きな問題となっている¹⁻³⁾。2007 年、米国政府労働衛生専門家会議(ACGIH)は、防護服の暑熱ストレスに関する許容限界値(TLV)を大幅に改訂し⁴⁾、最新の防護服着用時の暑熱ストレスを湿球黒球温度(Wet Bulb Globe Temperature: WBGT)で評価した値を追加した。TLV では、環境 WBGT 値に防護服の WBGT 値を加えた値に対して評価する方法を用いている。防護服を着用することにより高まる暑熱ストレスは消防士に於いて特に高い。消防訓練時の熱中症が多いという報告がある。熱防護性の高い防火服着用による体熱発散の減少、汗の防火服外への放散の減少⁵⁾、暑熱環境での作業による環境から体内への熱の流入、身体的に高負荷な作業による代謝熱の増加等により熱の収支バランスが崩れ、体内蓄熱量が増加するためと考えることが出来る。そのため、深部体温や心拍数が増加し、心血管障害の引き金となる。また、防火服着用で汗の蒸発量が低下するため、暑熱順化により発汗量が増加しても、暑熱ストレスは低減しないとの報告もある⁶⁾。

現在の防火服は、防護性能が高い反面、身体からの放熱量が低下し、消防士の暑熱ストレスを高めてしまう欠点を同時に持つ。消防士の暑熱ストレスを議論するには防火服の熱特性を正確に測る必要がある。サーマルマネキンは等身大の大きさの発熱機能を持つ人形で、衣服を着せることで、衣服の熱伝達性の指標である顕熱抵抗値

を定量的に求めることが可能である。全身が 1 ゾーンの銅でできたマネキンが 1940 年代に最初に作られて以来、幾種類かのマネキンが作られ現在 100 以上のマネキンが世界中に存在する⁷⁾。自動車の室内の快適性や衣服の保温性や透湿性の計測にも用いられている。環境温度、湿度、衣服の条件が同じであれば、放熱に関して繰り返し同じデータがマネキンから得られるため、定量的な実験が可能である。マネキンを使った衣服の温熱特性評価法について、ISO9920⁸⁾、ISO15831⁹⁾、ASTM F1291-05¹⁰⁾、ASTM F2371-05¹¹⁾等の規格があり、研究が進んでいる。また ISO 7730¹²⁾では、マネキンを使って求められた値を基準の中で用いている。

防火服着用時の消防士の暑熱ストレスは、防火服の違いによって、暑熱ストレスが異なる^{13, 14)}ことが報告され、防火服の下に着用する長ズボンを半ズボンに置き換えた場合、軽い運動の時には運動可能時間が延びることが示されている¹⁵⁾。本研究では、消防士の暑熱ストレスを軽減する条件を見つけるため、サイズ、防火服の材質、ズボンの長さの違いによる顕熱抵抗と、立位静止状態と歩行状態による顕熱抵抗を測定した。

2 対象と方法

1) サーマルマネキン

サーマルマネキンは、Measurement Technology Northwest 社の NEWTON を用いた。総体表面積は 1.8m²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。従って、センサー部分は、発汗がない場合ほとんどマネキン表面温度に等しいと考えることができる。発熱線は、ゾーン内の表面温度が均一になるように、温度センサーとは断熱材の膜を隔てた深いところに埋め込ま

† 原稿受付 2008 年 02 月 15 日

† 原稿受理 2008 年 09 月 05 日

*1 (独)労働安全衛生総合研究所国際情報・研究振興センター。

連絡先: 〒214-8585 川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所国際情報・研究振興センター 上野 哲

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

れている。発熱線の材質は、線膨張率の低いワイヤー (0.0015%/°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にコントローラがあり、制御ソフトからの情報に基づいてコントロールする。パソコン上の制御ソフトで、各ゾーンで表面温度、発熱量の設定が可能である。温度は±0.1°Cの範囲でコントロールが可能であり、単位面積あたりの発熱量は 800Watts/m² まで上げることができるため、本実験で測定に要求される条件を十分満たしている。

体は、アジア人男性の平均の体格である(表 1)。歩行は、両手と両足に棒をつけ、歩行に似た動きが可能である。1 分間に最大 60 歩相当の設定が可能であるため、ヨーロッパのサーマルマネキンの規格である ENV342²⁵⁾ を満たしている。本研究では、このマネキンを用いて立位静止状態と毎分 45 歩の歩行状態で測定した。

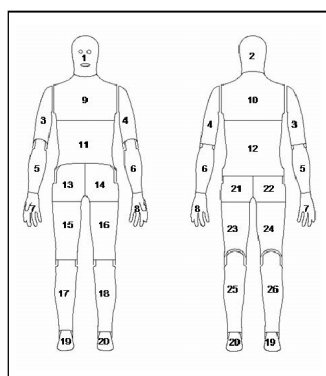


図 1 マネキンの 26 ゾーン

表 1 マネキンのサイズ

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

2) 防火服

測定に用いた防火服は、財団法人日本防災協会から提供された。サイズが異なる基本防火服の 3 種類(M, L, LL), 材質が異なる M サイズの防火服 2 種類(Ye: パラアラミド, Br: ザイロン)の熱伝達性を表す指標である顕熱抵抗を測定した。その他に、活動服を 2 種類(AB: 基本, AS: ストレッチ型)測定した(表 2) (実験 1)。用いた全ての防火服には表面疎水加工が施してある。消防士が消火活動で着用する服装についても測定した。具体的には、AB の基本活動服に防火服を着せ、軍手と長靴をマネキンに装着した(MT, LT, LLT, YeT, BrT)(表 3) (実験 2)。最後に、ゆとり型の防火服(R)と L サイズの現行防火服(L)の内側に基本活動服(AB)の長ズボンと半ズボンをそれぞれ着用した時の顕熱抵抗を測定した(表 4) (実験 3)。

3) 衣服面積因子(f_{cl})の計算

衣服着用時の空気層の顕熱抵抗値を補正するために、衣服着用時の表面積と何も着用しないときの表面積比率(衣服面積因子(f_{cl}))が導入された。衣服を着用していない状態での空気層の顕熱抵抗は、マネキンの表面温度とマネキンへの熱流量から測定可能((8)式参照)であるが、衣服着用時の空気層の顕熱抵抗は、衣服を着ていない状態での空気層の顕熱抵抗値を衣服着用による表面積の増加の割合(f_{cl})で割った値で求められている((7), (10)式参照)。

f_{cl} の測定は、McCullough らの方法¹⁷⁾に少しの変更を

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 (ウエストー 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

表 3 防火服と基本活動服等

服の組み合わせ	
MT	M + 長靴 + 軍手 + AB
LT	L + 長靴 + 軍手 + AB
LLT	LL + 長靴 + 軍手 + AB
YeT	Ye + 長靴 + 軍手 + AB
BrT	Br + 長靴 + 軍手 + AB

表 4 防火服と長さの違うズボン

服の組み合わせ	
TS	T シャツ + 半ズボン (防火服無し)
TL	T シャツ + 長ズボン (防火服無し)
RTS	R + T シャツ + 半ズボン
RTL	R + T シャツ + 長ズボン
LTS	L + T シャツ + 半ズボン
LTL	L + T シャツ + 長ズボン

加えた。マネキンに何も着せないときと、衣服を着せたときで、水平方向の正面、45° の斜め、90° の真横、60° の高さの角度からの正面、45° の斜め、90° の真横の 6 方向からデジタルカメラで写真を撮った(Dimage X50, Konica-Minolta)。それぞれの方向のデジタル画像上の面積を Scion Image で求めた。Scion Image(Scion Corp, Maryland, USA)は、Windows 上で動作する画像解析のフリーソフトウェアであり、医学・生物学等で広く用いられている。

$$f_{clj} = \frac{A_{clj}}{A_{nj}} (j=1 \sim 6) \quad (1)$$

ここで、 A_{nj} は j 方向でのマネキンのみの写真上の面積、 A_{clj} は j 方向での衣服を着せたマネキンの写真上の面積である。写真をとる方向やマネキンまでの距離が写真に

より少し異なるため、写真上の同一の特定点間の長さを縦方向と横方向の二方向についてそれぞれ測定した。デジタル写真上の面積を二つの長さの比の積で割って補正した。それぞれ、6方向についての平均値が f_{cl} なので、

$$f_{cl} = \frac{(f_{cl1} + f_{cl2} + f_{cl3} + f_{cl4} + f_{cl5} + f_{cl6})}{6} \quad (2)$$

また、顕熱抵抗値から経験値として f_{cl} を求める式がISO9920⁸⁾で示されている。

$$f_{cl} = 1.00 + 0.28 \times I_{cl} \quad (3)$$

4) 顕熱抵抗

人工気象室の気温は、マネキンの胸の高さと膝の高さに置かれたセンサーを用い測定した。両者の差は、0.02～0.03℃位でほぼ同じだった。その平均値は、20.6±0.1度で一定に保たれた。湿度はマネキンの臍に相当する高さの位置に置かれたセンサーを用い測定され、51±2%で一定であった。壁の温度は長時間人工気象室を運転していたため、ほぼ室内の温度に等しいと考えられる。人工気象室内では、マネキンの正面から背後に向かって横向きに約0.2m/secの風が吹いていた。また、マネキンの表面温度を34.0度に設定し供給熱量が定常状態に達するまで数時間測定を続けた。測定最後の30分間の供給熱量、表面温度、室内気温の平均値を用いて、顕熱抵抗を求めた。全顕熱抵抗は、パラレルモデル⁹⁾を用いて、各ゾーンの供給熱量、表面温度、表面積から求めた。各ゾーンに供給される熱量を合計して式(4)に代入し、全顕熱抵抗を計算する方法である。一般に、パラレルモデルとシリアルモデルの2種類があるが、シリアルモデルは実際の顕熱抵抗よりも高く評価される傾向があるため、パラレルモデルを用いた。

$$R_t = \frac{(T_i - T_a) \times A}{H} \quad (4)$$

$$I_t = \frac{R_t}{0.155} \quad (5)$$

ここで、

$$T_t = \sum_{i=1}^{26} \frac{T_i \times A_i}{A}, \quad H = \sum_{i=1}^{26} H_i, \quad A = \sum_{i=1}^{26} A_i \quad (6)$$

R_t : 全顕熱抵抗 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

I_t : 全顕熱抵抗 (clo)

T_t : マネキンの平均表面温度 ($^\circ C$)

T_a : 環境温度 ($^\circ C$)

A : マネキン全体の表面積 (m^2)

H : マネキン全体への供給熱 (W)

服だけの有効顕熱抵抗 (I_{cli}) は、

$$I_{cl} = I_t - \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (7)$$

ここで、 I_a は空気層の全顕熱抵抗で、マネキンに何も着せないときに測った全顕熱抵抗値である⁹⁾。服を着せたときの空気層の全顕熱抵抗を求めるためには、衣服の表

面温度、衣服からの熱流量を計測する必要があるが、それらを直接計測することは困難である。そのため(7)式の右辺の第2項での代用が行われる。衣服から外気へ移動する熱量は、単位面積当たりの熱流量に衣服の表面積をかけたものであるため、熱流量が一定であれば、表面積が大きいほど、移動する熱量は大きくなる。空気層の顕熱抵抗は、衣服から外気へ移動する熱量に反比例する((4)式参照)ことから、表面積が大きくなると顕熱抵抗は小さくなるためと(7)、(10)式は解釈できる。しかし、それはあくまで代用であるため、誤差が生じることが予想される。防火服を着せたことで、マネキンの直径が大きくなり、強制対流熱伝達が減少すると、防火服の表面温度がマネキンの表面温度よりも低いため対流が起こりにくくなることで対流による熱伝達が減少する。また、マネキン表面と防火服の放射率が異なることで放射熱伝達に誤差が生じる。この両者の変動が I_a の値に影響を及ぼすため、防火服を着用したときの空気層の全顕熱抵抗は誤差が生じることが予想される。

各ゾーンの顕熱抵抗は、次の式で求めた。

$$R_i = \frac{(T_i - T_a) \times A_i}{H_i} \quad (8)$$

$$I_i = \frac{R_i}{0.155} \quad (9)$$

ここで、

R_i : i番目のゾーンの顕熱抵抗 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$),

I_i : i番目のゾーンの顕熱抵抗 (clo),

T_i : i番目のゾーンの表面温度 ($^\circ C$)

T_a : 環境温度 ($^\circ C$)

A_i : i番目のゾーンの表面積 (m^2)

H_i : i番目のゾーンへの供給熱量 (W)

各ゾーンの有効顕熱抵抗 (I_{cli}) は、

$$I_{cli} = I_i - \frac{I_a}{f_{cli}} \quad (10)$$

ここで、 f_{cli} は各ゾーンの衣服面積因子であり、顔、頭、手、足等の露出している部分は1として、他は(2)式で用いたのと同じ値を使った。また、 I_{ai} はi番目のゾーンの空気層の熱抵抗(clo)で、マネキンに何も着せないときに測った各ゾーンの顕熱抵抗を用いた。

5) 衣服内温度測定

マネキン表面と作業着の間、作業着と防火服の間を、左右の上腕部、背、胸、左右大腿前部、左右下腿前部をそれぞれ1点気温測定した。測定にはLT-ST08-00(グラム社製)、データロガーにはLT-8(グラム社製)を用いた。

3 実験結果

1) 衣服面積比

3種類の現行防火服(M, L, LL)の衣服面積因子を求めた。(2)式から求められる6方向での写真上の面積比の平均値と経験式(3)の値を求めた。(2)式から求められた値は、M, L, LLの順にサイズが大きくなるにつれて大きくなった。(2)式から得られた値と(3)式から得られた値はほぼ等しかった(表5)。

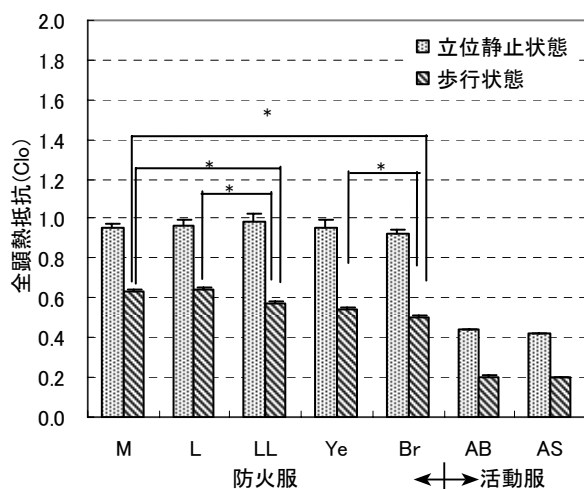


図2 防火服と活動服のみの全顕熱抵抗

* = $p < 0.05$

表5 衣服面積因子

防火服	f_{cl} (画像より求めた実測値)	f_{cl} (I_a , I_{cl} から経験式で求められた値)
M	1.272	1.296
L	1.304	1.299
LL	1.341	1.306

2) 防火服のサイズと材質の相違による顕熱抵抗(実験1)

立位静止状態と歩行状態(45歩/分)の有効顕熱抵抗を示す(図2)。各衣服の測定は3回ずつ行った。立位静止状態は歩行状態よりいずれのタイプの服においても顕熱抵抗は大きかった。立位静止状態を比較すると、サイズや材質の違いによる顕熱抵抗の相違は無かった。歩行状態では、LLがLやMと比較して有意に小さかった。Ye

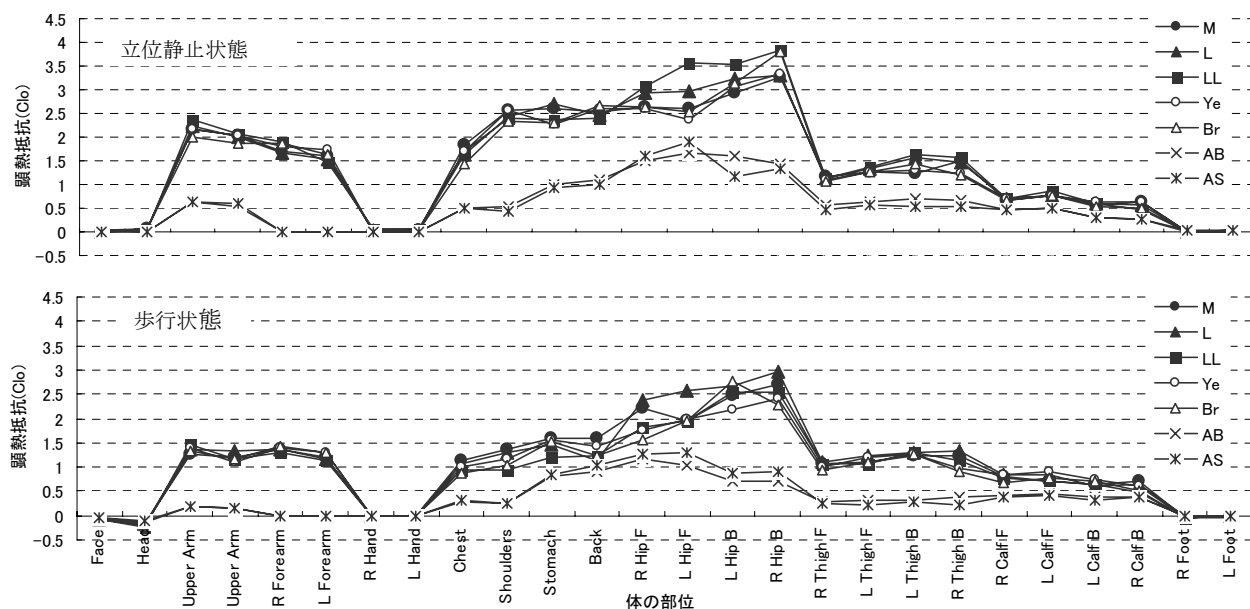


図3 ゾーンごとの防火服と活動服のみの顕熱抵抗

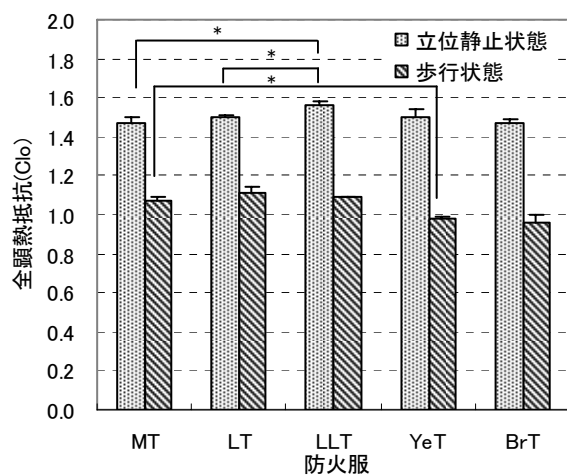


図4 防火服と活動服を重ね着したときの全顕熱抵抗

* = $p < 0.05$

やBrとMを比較すると、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は防火服の半分以上の顕熱抵抗値であった。部位ごとでは、臀部、腹、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、顕熱抵抗値がゼロになった。歩行状態では、全部位において顕熱抵抗の低下が見られた。

3) 活動服の上に防火服を着たときの顕熱抵抗(実験2)

衣服の有効顕熱抵抗(図4)では立位静止状態が歩行状態より大きかった。活動服の上にLLサイズの防火服を着用した場合(LLT)、立位静止状態ではLサイズやMサイズよりも全顕熱抵抗が大きかった。歩行状態では、YeがMサイズよりも有意に顕熱抵抗は小さかった。部位別立位静止状態と歩行状態の顕熱抵抗値を示す(図5)。臀部、腹、背部の顕熱抵抗が大きかった。手と足には、軍手と編み

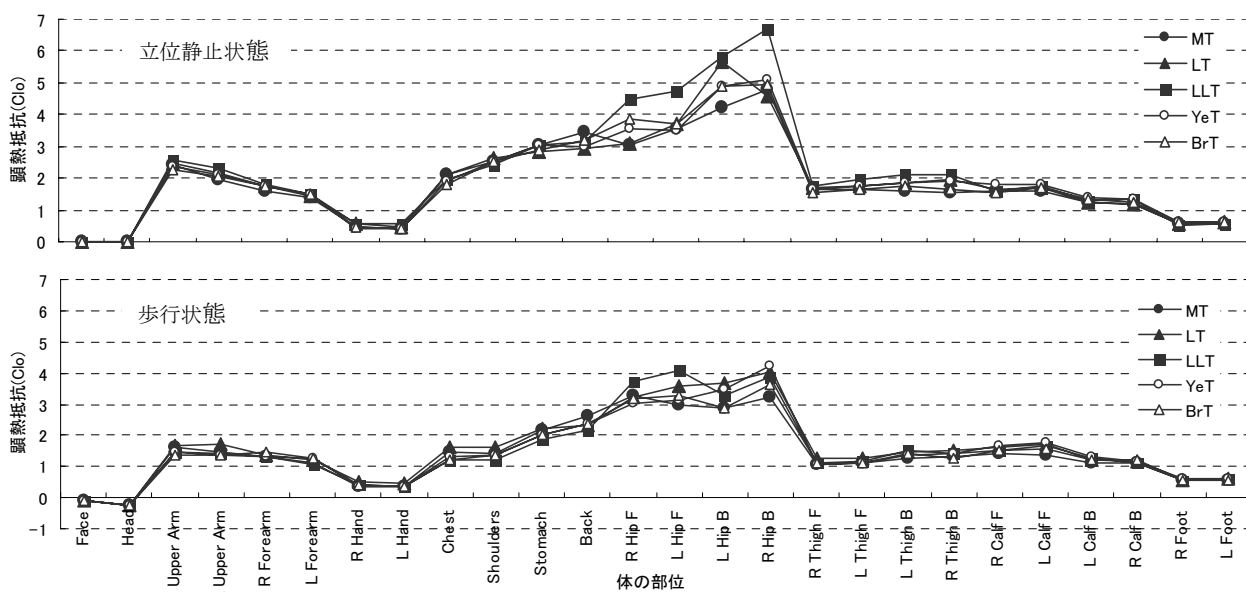


図5 ゾーンごとの防火服と活動服の重ね着での顕熱抵抗

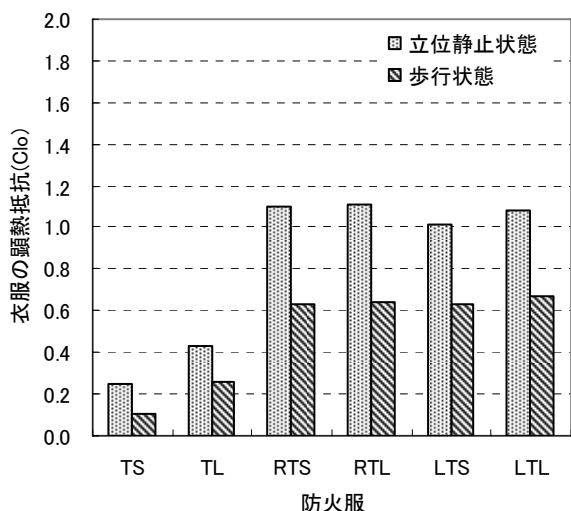


図6 活動服の上から防火服を着用したときの顕熱抵抗

上げブーツを履かせているため、顕熱抵抗は0ではなかった。空気層が厚い臀部では、LLサイズを重ね着したものが他のサイズの防火服よりも、大きな値を示した。歩行状態は立位静止状態よりも手と足以外では顕熱抵抗が低くなった。

4) 防火服の内側に着る作業ズボンの長さに関する実験(実験3)

表4の衣服の組み合わせで、衣服の有効顕熱抵抗を測定した(図6)。活動服のみの場合は、立位静止状態でも歩行状態でも、長ズボンの方が半ズボンよりも全顕熱抵抗は大きかった。ゆとり型の防火服を、その上から着たときは長ズボンと半ズボンの間で顕熱抵抗の差は殆ど無かった。Lサイズの防火服を着たときは、長ズボンを着た方が半ズボンよりも大きめであった。

半ズボンの上にR型防火服、L型防火服を着た場合と長ズボンの上にR型防火服、L型防火服を着た場合、ズボンの内側と外側の温度を左右の大腿と下腿で測定した

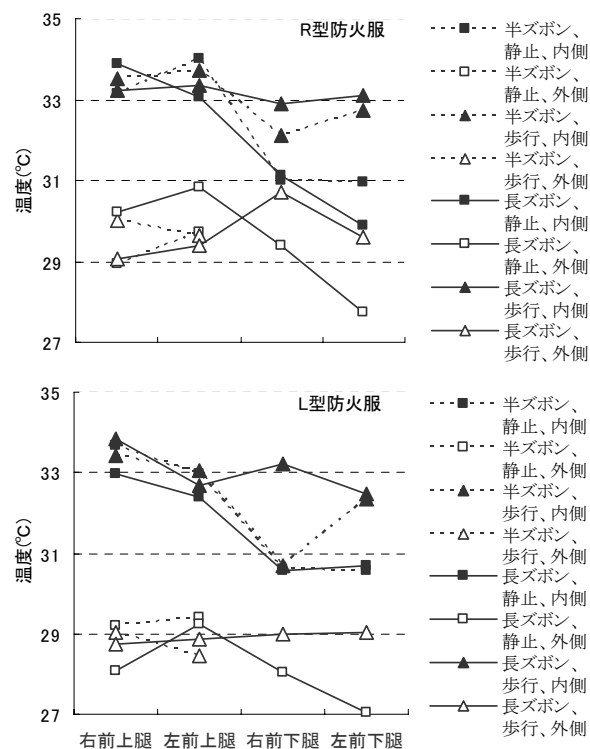


図7 大腿部と下腿部での作業ズボンの内側と外側の空気温度

(図7). 両ズボンとも、ズボンの内側が外側より温度が高かった。また、長ズボンと半ズボンは衣服内の温度は殆ど差がなかった。

4 考察

消防士の暑熱ストレス増加原因の一つに防火服の内側から外側への低い熱伝達性が考えられる。それを定量的に評価するため、防火服の顕熱抵抗を測定した。立位静止状態では、サイズの違いによる顕熱抵抗に差は無かったが、

歩行状態では LL サイズが M、L サイズより顕熱抵抗は有意に小さかった。また、ザイロンの方がパラアミドより、顕熱抵抗が小さかった。活動服の上に防火服を着用した場合、立位静止状態で、LL サイズが M、L サイズよりも顕熱抵抗は大きかった。また、防火服の内側に半ズボンを着用した場合と長ズボンを着用した場合の比較では、顕熱抵抗や衣服内の温度に大きな差は無かった。

防火服のサイズが大きくなると、マネキンの写真から求められる防火服の表面積は大きくなり、衣服内の空気層の厚さは大きくなったと推測される。空気層は断熱効果が高いため、空気層が厚いと顕熱抵抗が大きくなると予想される。しかし、図 2 の結果では、サイズが大きくなっても、立位静止状態の顕熱抵抗は増加しなかった。一つの理由として、空気層が厚くなり過ぎて衣服内で空気の対流が起き、熱循環が大きくなったためだと考えることができる。そのため、マネキンから衣服への熱伝達が大きくなり、空気層の断熱効果を打ち消したと考えることが出来る。もう一つの理由は、サイズが大きくなると襟首や袖の口が大きくなるため、衣服内の暖かい空気が外に逃げやすくなると考えられる。衣服内で暖められた空気は、衣服の上方に移動し、襟首から外に出ると考えられる(煙突効果)。防火服の内側に活動服を着用した場合、衣服内空気の移動が作業着により少なくなり、熱の移動が抑えられたため、空気層の断熱効果が現れ、サイズが大きくなるにつれて、顕熱抵抗が大きくなったと考えられる(図 4)。また、サイズが大きければ、上着の裾がズボンと重なる部分が大きくなる。そのことが、臀部の顕熱抵抗が大きいことに寄与していると考えられる(図 3)。

歩行状態では、マネキンが動くことにより衣服内の暖められた空気が外に逃げやすくなる(ポンピング効果)¹⁸⁾ことで、熱が外に逃げやすくなり顕熱抵抗が下がったと考えられる(図 2)。立位静止時には防火服を通しての空気の循環は少ないため、歩行による空気循環量の増加は大きな意味がある。空気循環の変化率と全顕熱抵抗の変化率には比例関係にあるという報告があるため¹⁹⁾、サイズが大きくなるにつれて衣服が動く量が大きくなり、循環する空気の量も多くなって熱の循環が盛んになったと考えられる(図 2)。Harvenith ら²⁰⁾は、ガストレース法で衣服内の空気循環量を測り、仕事用のズボンにポロシャツとセーターの上にレインコートを着て、0.9 m/sec で歩いた場合、約 50 リットル/分だったという報告している。本実験では外気が 20℃であり、衣服内温度を 32℃として空気の比熱から循環した空気量を計算すると、マネキンの 1W の発熱量が空気の循環量 4 リットル/分に対応する。これは、マネキンの歩行状態と静止状態の発熱量の差が全て空気の循環量の差に起因すると考えたときの値であるので、実際の空気循環量はこれよりも小さいと考えられるが得られた値は Harvenith らの実験結果²⁰⁾と近かった(表 6)。防火服のサイズが大きくなると発熱量の差から求められた空気の循環量は大きくなった(表 6)。衣服内に汗をかけた状態では、湿度 100% 近くになった

表 6 歩行時と静止時の発熱量差

防火服	歩行時と静止時のマネキンの発熱量差(W)	発熱量差から求まる空気の循環量(l/min)
M	14.5	58.0
L	14.7	58.8
LL	20.3	81.2
MT	9.4	37.6
LT	11.4	45.6
LLT	13.4	53.6

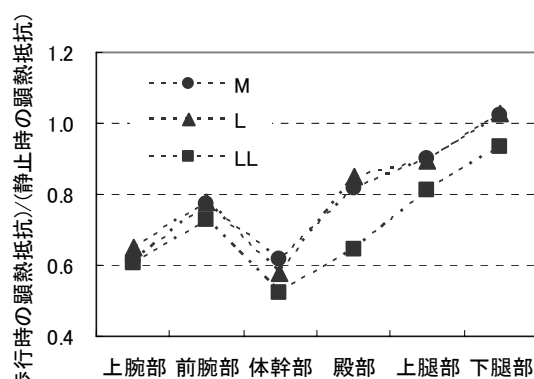


図 8 部位ごとの歩行時と静止時の顕熱抵抗の比

衣服内の空気が外気と入れ替わるので水の蒸発が促進され、空気だけの場合より放熱量が多くなる。より現実的に近づけるためには、マネキンの湿性実験が必要である。実験条件では、外気の温度が 20℃の設定であるが、火事場等の気温が高いところでは、防火服内に高温の空気が流れ込み、消防士の暑熱ストレスは高まる危険性がある。

部分ごとの顕熱抵抗を歩行時と静止時とで比較すると、体幹部では最も減少した(図 8)。上着の裾が動くことで体の外から空気が流れ込んだと考えられる。殿部で 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無くなり、上着の裾の部分が殿部の顕熱抵抗に寄与しなくなったからではないかと考えることが出来る。

日本の消防士は長ズボンを着用するが、暑熱ストレスを軽減するために、半ズボンに変更する試みが海外でなされている。防火服の内側に長ズボンを着用した時と、半ズボンを着用した時を比較すると、下腿部の顕熱抵抗で静止時が 10%、歩行時が 18%減少した(図 9)。この減少率は、期待よりは小さく、防火服全体の顕熱抵抗ではほとんど差が無かった(図 6)。そのことから、消防士の暑熱ストレスを軽減する効果としては少ないのではないかと考えられる。長ズボンと半ズボンを比較した消防士を対象とした被験者実験¹⁴⁾によると、重作業時に作業継続可能時間には差はなかったが、軽度の作業を行っている時には作業継続可能時間が 10~15%程長くなった。本実験が示す少しの顕熱抵抗の減少が寄与している可能性がある。しかし、長ズボンにおいては、火傷を防ぐ効果があるため²¹⁾、半ズボンへの転換が望ましいと一概に言え

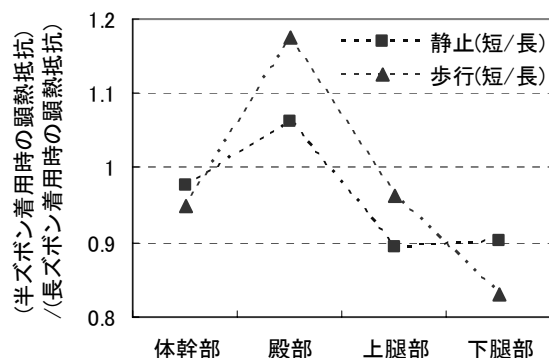


図9 部位ごとの防火服と作業服のみの顕熱抵抗

ない。

防火服着用時の暑熱ストレスを軽減するには、他に冷媒等を用いて積極的に身体から吸熱する方法が用いられている²²⁾。図9の臀部における半ズボン着用時の防火服の熱抵抗が長ズボンより大きかったのは、半ズボンの方が長ズボンより臀部近くで空気の出入りが少なかったのではないかと考えられる。又は、ズボンのマネキンへの着せ方の若干の相違が影響したのかと推測される。

以上防火服着用時の快適性の向上という観点から研究を行ったが、防火服の主な役割は、火災現場で外界からの暑熱に対して人を守ることであるので、熱防護性が高いことが第一の条件となる。防護性に関しては一定のレベルを維持したまま、快適性を上げることが必要である。

5 まとめ

防火服着用による暑熱ストレスを軽減するために、防火服のサイズ、材質、防火服の内に着用する作業着のズボンの長さに関する顕熱抵抗測定をサーマルマネキンで行った。立位静止状態ではサイズによる顕熱抵抗の差はなかったが、歩行時ではLLサイズの防火服の顕熱抵抗が最も低かった。防火服の内側に着用する作業ズボンを短くすると、立位静止、歩行状態とも下腿部の顕熱抵抗が減少したが、全顕熱抵抗ではほとんど変化がなかった。

謝 辞

本研究は、消防防災科学技術研究推進制度に基づく次世代防火服委員会(研究代表者：小川孝裕、委員長：柊原裕)プロジェクトの1つとして行われた。使用した防火服は上記委員会で新たに開発された物を用いた。九州大学大学院芸術工学研究院の柊原裕教授には研究を進める上で貴重なご意見をいただいた。文化女子大学大学院生活環境学研究科の田村照子教授、丸田直美助教教授には、マネキンを使った測定に関して多大なる助言をいただいた。

文 献

- 1) Bernard TE. Heat stress and protective clothing: an emerging approach from the United States. *Ann Occup Hyg* 1999; 43: 321-7.
- 2) Hanson MA. Development of a draft British standard: the assessment of heat strain for workers wearing personal protective equipment. *Ann Occup Hyg* 1999; 43: 309-19.
- 3) Holmer I. Protective clothing in hot environments. *Ind Health* 2006; 44: 404-13.
- 4) ACGIH. Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices (Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists). 2007.
- 5) Lotens WA, van de Linde FJ, Havenith G. Effects of condensation in clothing on heat transfer. *Ergonomics* 1995; 38: 1114-31.
- 6) Saat M, Sirisinghe RG, Singh R, Tochiara Y. Decay of heat acclimation during exercise in cold and exposure to cold environment. *Eur J Appl Physiol* 2005; 95: 313-20.
- 7) Holmer I. Thermal manikin history and applications. *Eur J Appl Physiol* 2004; 92: 614-8.
- 8) ISO 9920. Ergonomics of the thermal environment—Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. International Organization for Standardization. 2007.
- 9) ISO 15831. Clothing — Physiological effects — Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin. International Organization for Standardization. 2004.
- 10) ASTM F 1291-05. Standard test method for measuring the thermal insulation of clothing using a heated manikin. ASTM International. 2005.
- 11) ASTM F 2370-05. Standard test method for measuring the evaporative resistance of clothing using a sweating manikin. ASTM International. 2005.
- 12) ISO7730. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization. 2005.
- 13) Ftaiti F, Duflot JC, Nicol C, Grelot L. Tympanic temperature and heart rate changes in firefighters during treadmill runs performed with different fireproof jackets. *Ergonomics* 2001; 44: 502-12.
- 14) Smith DL, Petruzzello SJ. Selected physiological and psychological responses to live-fire drills in different configurations of firefighting gear. *Ergonomics* 1998; 41: 1141-54.
- 15) McLellan TM, Selkirk GA. Heat stress while wearing long pants or shorts under firefighting protective clothing. *Ergonomics* 2004; 47: 75-90.
- 16) EN1342. European Prestandard product specification (protection against cold)

- 17) McCullough EA, Jones BW. A comprehensive data base for estimating clothing insulation. Institute Environ. research 1984; IER technical report 84-01.
- 18) Olesen B, Slivinska E, Madsen T, Fanger PO. Effect of body posture and activity on the insulation of clothing. Measurement by a movable thermal manikin. ASHRAE Transactions 1982; 32:791-805.
- 19) Bouskill LM, Havenith LM, Kuklane K, Parsons KC, Withey WR. Relationship between clothing ventilation and thermal insulation. AIHA J 2002; 63: 262-8.
- 20) Havenith G, Heus R, Lotens W. Clothing ventilation, vapour resistance and permeability index: changes due to posture, movement and wind. Ergonomics 1990; 33: 989-1005.
- 21) 箭内英治, 試作消防隊員用防火服の耐炎・耐熱, 快適性能. 次世代防火服の開発に関する研究報告書(3)・平成 18 年度「消防防災科学技術研究推進制度」, 財団法人 日本防災協会. 2007 : 9-33.
- 22) Flouris AD, Cheung SS. Design and Control Optimization of Microclimate Liquid Cooling Systems Underneath Protective Clothing. Annals of Biomedical Engineering, 2006; 34: 359-7.

Measurement of the Thermal Resistance of Firefighters' Protective Clothing using a Movable Thermal Manikin[†]

by

Satoru UENO, Shin-ichi SAWADA

The low heat transfer through firefighters' protective clothing (FPC) to the exterior is thought to be one of the contributing factors to heat stress in firefighters. In order to describe the heat transfer characteristics of FPC, we measured the thermal resistance (TR) of FPC quantitatively by using a movable thermal manikin. To estimate the effect of clothing size on TR, we used M, L, and LL sizes of protective clothing. To simulate the clothing that the firefighters wear at work, we put work clothing (WC) under the FPC, and placed gloves and long boots on the manikin. We also estimated the effect of the length of WC trousers on the overall clothing TR. When the manikin was standing still, the size of the FPC did not affect the overall thermal resistance. When the manikin was walking, however, the LL FPC proved to have less thermal resistance than either the L or M size, presumably because a larger amount of air moved into and out of the LL FPC. When wearing FPC over WC, the larger sizes had a larger TR when standing still. Wearing short trousers under the FPC had little effect on the overall TR and, since wearing long trousers under the FPC was reported to reduce burning on the legs, the change from long trousers to short trousers did not seem to be beneficial.

Key Words: firefighter's clothing, protective clothing, thermal manikin, pumping effect

International Center for Research Promotion and Informatics, National Institute of Occupational safety and Health, Japan (JNIOSH)