「特殊環境における衣料」特集

高温環境での防火衣の断熱性能

渡 部 勇 市

1. はじめに

人間は高温気体や熱放射にさらされると皮膚が温度上昇し、皮膚温度が44℃に達すると熱痛覚が発生する。さらに皮膚温度が上昇するとついに火傷を負ってしまう、危険な状態になってしまう。高温環境で作業するための人間の衣服としては、溶鉱炉等で熱放射を防ぐ産業用の防護服、石油コンビナート火災からの熱放射を防ぐための耐熱服、建物等の一般火災で消防隊員が着用するための防火衣などがある。

本稿では、特殊な高温火災環境の中で消火、救助活動を行なっている消防隊員が着用する防火衣等を例として取り上げ、高温環境の衣料について述べることにする。

火災時に消防活動している消防隊員への伝熱形態は、火災からの熱放射、熱気流からの対流、高温物体への接触による熱伝導、火災暴露による加熱があり、多様な伝熱形態がある。この中で最も火傷を負う危険性があるのは火炎を浴びてしまうことである。

消防隊員は火炎に接近して消火活動、人命救助活動を行なうが、通常、火炎の中に進入することはない。しかし、倉庫火災などで隊員が火傷を負うという報告¹⁾があるように、隊員が火炎にさらされる事例は、まれにはあるが起きている。隊員は、常に、安全に気を使い、火炎にさらされないよう行動しているが、危険な火災環境では予期せぬ突然の火炎にさらされることも予想される。このような場合でも隊員の安全を確保するために、隊員の火傷をできるだけ少なくするような防火衣が望まれる。

近年、熱に比較的強い耐熱性繊維が開発され、消防隊員用の防護服にも多く用いられるようになってきている。作業服、防火衣の素材は、天然、化学繊維から難燃

処理した天然繊維、耐熱性を高めた化学繊維へほとんど変わりつつある。耐熱性繊維を使用するようになってからは、火災暴露しても着炎しにくくなり、防護服の耐熱性は向上し、消防用の防護服は燃え広がらないことは達成しつつある。

人体の火傷を防ぐのに重要なのは、布地が燃え広がらないことはもちろんであるが、火炎等の高温の熱を防護服の布地で断熱し、火傷を起こさないことが重要になってくる。

そこで、現在使用している防火衣の布地素材の耐熱性について述べると共に、人体の下肢部を模擬した円筒模型を用いた火炎暴露実験から火傷までの耐容時間を求め、布地の厚み、重さによる布地の断熱性の違いについて説明する。

また、等身大のサーマルマネキンに各種タイプの防火衣を着用させ火炎暴露実験を行ない、サーマルマネキンに流入した熱流束を基に隊員の火傷分布の推定を行ない、防火衣の断熱性能についても説明する。

2. 防護服の素材について

現在、消防用防護服として使用している布地の素材および過去に使用された布地、将来に使用されるであろう布地の素材について、布地の耐熱性を表す限界酸素指数LOI、消防法45° 燃焼試験での残炎時間等を表1に示す²⁾。限界酸素指数は繊維が燃焼を維持するために必要な最低限の酸素体積分率である。残炎時間はマイクロバーナーによって60秒または着炎後3秒加熱を行ない、その後の残炎時間である。防火衣の耐熱性としては酸素限界指数、残炎時間でほぼ判断できる。その他に布地の耐熱性を表すものとして熱分解温度、熔融温度、布地の熱による縮み、硬化、常用最高使用温度、零強度温度等がある。

Thermal Insulation of Fire Fighter's Protective Clothing in Hot Environment

筆者紹介 YUICHI WATANABE, Life Safety Section, Fire Research Institute of Japan. 自治省消防庁消防研究所 避難安全研究室長

筆者は、伝熱工学、火災現象を専門とされ、消防用資機材の開発を担当されている。テニスを趣味とされる。

・本稿では防火衣を着用した人体の火災暴露に対する火傷分布等を等身大のサーマルマネキンにより測定し、防火衣の断熱性能評価の最先端を紹介して頂いた。

を比較すると、防火衣の方が約2倍長くなっている。これは、単層防火衣には布地表面にアルミ粉末入りの難燃性の合成ゴムをコーティングしている。二層防火衣は、外地、中地の二層で構成され、外地と中地に空気層ができる。この効果が表れているものと思われる。

3.3 布地の重さによる断熱性の違い

防護服の布地の重量は、作業性に大きく影響を与えている一つの因子である。作業服および防火衣の布地の重量とⅡ度火傷までの耐容時間の関係を図3に示す。

図3 防火衣布地の重量とⅡ度火傷までの耐容時間

作業服の重量は $0.2 \sim 0.4 \text{ kg/m}^2$ であるが、Ⅱ度火傷までの耐容時間はほぼ布地の重量に比例して大きくなっている。

防火衣の重量は $0.4 \sim 0.8 \text{ kg/m}^2$ であり、布地表面に合成ゴムをコーティングしている、又は布地が二層になっているために作業服に比べ重くなっている。防火衣のⅡ度火傷までの耐容時間は、データのバラツキは大きいがおおむね布地の重量に比例して長くなっている。

防火衣を丸、三角印しの単層防火衣L~R、四角印の二層防火衣SW~VWに分類して図3をみると、同じ重量の布地に対して二層防火衣の方が単層防火衣よりも耐容時間は長くなっている。

単層防火衣は、作業服の重量に対するⅡ度火傷の耐容時間の延長線上よりも下側に位置しており、重量当たりに対する性能は作業服よりも劣っている。これは、単層防火衣は布地と同じ程度の重さ分のアルミ粉末入りの合成ゴムを布地表面にコーティングしているためである。

一方、二層防火衣は表地と中地の間に空気層があるため、単層防火衣よりも重量当たりに対する断熱効果が高い。また、二層防火衣は表地には合成ゴムがコーティングされてなく中地表面に薄くコーティングしてある。二層防火衣は単層防火衣に比べ多くの合成ゴムを使用して

いない。このことから、二層防火衣の方が重量当りに換算して単層防火衣よりも軽くて、火傷に対する断熱性が高い結果が得られたものと考えられる。

4. 火傷分布の推定による防火衣の耐熱限界

防火衣の試験片による火炎暴露試験は多く行なわれている⁴⁻⁶⁾。従来の試験方法では布地素材の断熱性能について比較することは出来るが、防火衣を隊員が着用した場合の身体全体の火傷分布を推定することは出来ない。火炎暴露に対し、隊員の体全体の火傷をできるだけ少なくするような防火衣を開発するためには、サーマルマネキンを用いた火炎暴露実験が必要になる。

そこで、熱流計を80個埋め込んだ等身大のサーマルマネキンに防火衣を着用させ、火炎暴露実験を行ない、Ⅱ度火傷分布について求めたので報告する^{7,8)}。

4.1 サーマルマネキンを用いた防火衣の火炎暴露実験

サーマルマネキンの寸法を図4に示す。このマネキンの体形は、身長178cm、バスト97cm、ウェスト76cm、ヒップ93cm、体重35kgである。このマネキンは肉厚約4mmのアルミ casting alloy (AC3A) で出来ており、マネキンの表面は人間の皮膚の熱定数に近付けるため黒色のシリコンゴムを約2mmの厚みでコーティングしたものである。

サーマルマネキンには、熱流計が図4の○印で示すように約15cm間隔で下肢部に20個、胴体部に40個、上肢部に16個、頭部に4個、前後、左右対称に合計80個埋め込んである。

図4 サーマルマネキン (○印し：熱流計)

今回の火炎暴露実験では、火炎は燃焼皿により下から上昇する拡散火炎を用いた。サーマルマネキンは燃焼皿に垂直に立て、火炎が足から頭に向かって下から流れるように暴露した。これは、階段、ベランダなどに隊員がいる場合に下からの火炎を受けてしまう場合を想定している。その他、サーマルマネキンの上から、横から火炎を受ける場合もあるが今回は下から火炎を受ける場合について実験を行なった。

サーマルマネキンを火炎に暴露する為の実験装置を図5に示す。サーマルマネキンは、左端から右端まで

図5 防火衣を着用したサーマルマネキンと火炎暴露実験装置

3.8mを20cm/secの速度でモーターにより動力で移動できるようにになっている。燃焼皿は1.2m角のもので、燃料はn-ヘプタンを使用した。燃焼皿には、水5cmの上にn-ヘプタンを深さ0.19cm(2ℓ)入れた。火炎の高さは、燃料の液面から約3.5mであり、火炎の直径は、サーマルマネキンの腰の部分で約60cm、足底で約90cmである。燃焼時の火炎の最高温度は、900～950℃であった。

本実験でのサーマルマネキンの火炎暴露時間は3秒間、5秒間の2種類とした。火炎暴露時間とは、サーマルマネキンの腰の部分が火炎の輝炎部に進入している時間とした。

4.2 防火衣の供試品

試験に供した防火衣の布地の素材の種類を表2に示す。ここに示す防火衣は現在使用している代表的な3種類である。

表2 実験に用いた防火衣、膝の防水カバーの種類
(*印は、表面にアルミ粉末の入った合成ゴムをコーティングした布地)

防火の衣種類	記号	防火衣			膝の防水カバー		
		素材	厚さ(mm)	重さ(kg)	素材	厚さ(mm)	重さ(kg)
単層防火衣	A	ビニロン 100% (*)	0.45	1.55	ビニロン 100% (*)	0.48	0.98
	B	芳香族ポリアミド 100% (%)	0.80	1.81	ビニロン 100% (*)	0.48	0.98
二層防火衣	C	表地: 芳香族ポリアミド 100%	0.80	2.17	ビニロン 100% (*)	0.48	0.98
		中地: 芳香族ポリアミド 100% (%)	0.24				

単層防火衣 A の布地素材はビニロン、単層防火衣 B の布地素材は芳香族ポリアミドである。二層防火衣 C

は表地、中地共に芳香族ポリアミドである。

サーマルマネキンには下着(パンツ、シャツ)、作業服(ズボン、上着)、防火衣、膝の防水カバーの順に着せた。膝の防水カバーは作業服ズボンの上に着せた。膝の防水カバーは布地素材がビニロンで表面にアルミコーティングしたもので、現在使用しているものである。

4.3 火炎暴露終了後の着炎状況

4.3.1 防火衣

火炎暴露3秒間の実験で、布地素材ビニロンの単層防火衣 A は、裾に着炎したが火炎の高さは5cm以下で急に燃え広がるようなことはなかった。他の単層防火衣 B、二層防火衣 C は火炎暴露3秒間の実験では、着炎するような事はなかった。

火炎暴露時間5秒間の実験では、布地素材ビニロンの単層防火衣 A は右側が全面的に燃え広がった。布地素材芳香族ポリアミドの単層防火衣 B は、火炎の高さが10cm以下であったが裾の内面に着炎した。反射テープを張り付けている二層防火衣 C はこの反射テープが燃えたが、布地は燃えなかった。

4.3.2 膝の防水カバー

布地素材ビニロンの膝の防水カバーは、火炎暴露時間3秒間、火炎暴露時間5秒間では全く着炎しなかった。

火炎暴露5秒間では、膝の防水カバーは着炎しなかったが、同じ素材ビニロンを使用している単層防火衣 A は火炎暴露5秒間で全面的に燃え広がっている。これは、防火衣の裾は燃えやすく、膝の防水カバーは燃えにくいことを示している。膝の防水カバーは、防火衣のような裾がなく布地の表面だけを火炎が接するので、同じ素材を使用している防火衣の裾より着炎しにくかった。

4.4 皮膚温度分布の計算結果

サーマルマネキンに流入する熱流束を基に防火衣、作業服、下着を着用した場合の皮膚下0.1mmの温度上昇を各熱流計の設置位置ごとに一次元半無限固体として差分方法で求めた。皮膚の熱定数は温度によって変わらない、皮膚内では吸熱などがないものとして非定常一次元熱伝導方程式の Explicit 形差分式から計算を行なった。皮膚下0.1mmの温度を求めたのは、Ⅱ度火傷を求める際に必要であるからである。なお、皮膚の初期温度は32℃とし、皮膚の熱伝導率は0.58W/mK、熱容量は4200kJ/m³Kとして計算を行なった。

垂直方向の皮膚下0.1mmの最高皮膚温度を火炎暴露3、5秒間の場合について、それぞれ図6、7に示す。

火炎暴露3秒間の場合、単層防火衣 A、B、二層防火衣共に頭部、単層防火衣 A の大腿部を除いて45℃以下であるため、大部分はⅡ度火傷が起きていないことが分かる⁹⁾。胴体部と脚部の最高皮膚温度を比較すると足部

図6 3秒間火炎暴露における鉛直方向の最大皮膚温度分布の推定

(図中のA, B, Cは表2の記号A, B, Cに相当する)

図7 5秒間火炎暴露における鉛直方向の最大皮膚温度分布の推定

(図中のA, B, Cは表2の記号A, B, Cに相当する)

の方が高い傾向を示している。

火炎暴露5秒間の場合、単層防火衣A, B, 二層防火衣C共に脚部の方が45°Cを越えている。特に、膝カバーがなく作業服だけの大腿部は高い皮膚温度を示した。胴体部は単層防火衣A, Bより二層防火衣Cの皮膚温度は低く、二層防火衣Cは45°C以下でありⅡ度火傷は起きていないことが分かる。

4.5 サーマルマネキンによるⅡ度火傷の推定

4.5.1 消防隊員のⅡ度火傷の進行状況

A. M. Stoll⁹⁾らによって皮膚温度における損傷率が(1)式のように求められている。 Ω は皮膚の損傷の強さを表わしており、 Ω が1に達した時をもって皮膚の壊死としている。前述で計算した皮膚下0.1mmの皮膚温度を(1)式に代入し、 Ω が1になったときをⅡ度火傷とした¹⁰⁾。

$$\frac{d\Omega}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (1)$$

Ω : 損傷の強さ, A: 定数, ΔE : 活性化エネルギー

R: ガス定数, T: 皮膚温度, t: 経過時間

消防隊員のⅡ度火傷の進行状況を(1)式を用いて推定した。火傷面積は80個の熱流計を基にサーマルマネキン全体を80分割し、火傷部位面積の合計で求めた。図8, 9の縦軸の火傷割合とは火炎暴露によって負傷したⅡ度火傷面積のサーマルマネキン全表面積に対する割合である。

Ⅱ度火傷の進行状況を火炎暴露3, 5秒間の場合について、それぞれ図8, 9に示す。

図8 3秒間火炎暴露におけるⅡ度火傷の進行状況の推定

(図中のA, B, Cは表2の記号A, B, Cに相当する)

図9 5秒間火炎暴露におけるⅡ度火傷の進行状況の推定

(図中のA, B, Cは表2の記号A, B, Cに相当する)

火炎暴露3秒間の場合、単層防火衣A, B, 二層防火衣C共にⅡ度火傷割合は5%以下であった。火炎と直接触れてしまう顔面がⅡ度火傷を負っているが、その他は防火衣によりⅡ度火傷を防御している。

火炎暴露5秒間の場合、火炎暴露開始してから180秒後のⅡ度火傷割合は、単層防火衣Aは48%、単層防火衣Bは27%、二層防火衣Cは16%であった。火炎暴露5秒間の場合、火炎暴露中にはまだ火炎からの熱がマネ

キンに達していないので、火炎暴露終了の後から防火衣の残留熱によってⅡ度火傷は進行している。特に、単層防火衣 A は防火衣が燃え広がった為に、Ⅱ度火傷が急激に増大している。火炎暴露を開始してから30秒後に水で消火しているために30秒後以後は火傷割合の進展がやや緩やかになっている。

万一、防火衣が着炎した場合は出来るだけ早く水で消火する必要がある。また、着炎しなくても残留熱が防火衣に溜まっているので出来るだけ早く水で冷却した方が火傷範囲を広げなくてすむ。

Ⅱ度火傷割合30%以上が重症であることを考えると、現在使用している防火衣を着用する場合は、火炎暴露5秒以上は絶対危険であることが分かる。

4.5.2 消防隊員各部の火傷割合の推定

次に、胴体部、上肢部、下肢部、頭部に分けて隊員各部のⅡ度火傷割合の推定値について述べる。

隊員各部のⅡ度火傷割合の推定値を表3に示す。胴体部
表3 サーマルマネキン各部のⅡ度火傷割合の推定
(*印しは、表面にアルミ粉末の入った合成ゴムをコーティングした布地)

防火衣の種類	記号	防火衣の素材	火炎暴露時間 (sec)	マネキン全体のⅡ度火傷割合 (%)	マネキン各部のⅡ度火傷割合 (%)			
					胴体部	上肢部	下肢部	頭部
単層防火衣	A	ビニロン 100% (*)	3	5	1	0	2	2
			5	48	7	13	20	8
	B	芳香族ポリアミド 100% (*)	3	3	0	0	0	3
			5	27	5	0	17	5
二層防火衣	C	表地：芳香族ポリアミド 100% (*)	3	5	0	0	0	5
		中地：芳香族ポリアミド 100% (*)	5	16	0	0	8	8

部、上肢部に比較して下肢部が最も高い火傷割合を示している。これは、胴体部、上肢部は防火衣、作業服、下着と計3枚になっているが、下肢部は最近ズボン下をはかないので膝カバー、作業服の計2枚であるからである。特に、膝カバーの届いていない大腿部は作業服だけになり最も弱い所である。下肢部は全体の35%を占め、下肢部だけでも重症30%ラインを越えてしまうことを考えると、もう少し下肢部の防熱性能を考える必要があると思われる。このことは消防隊員の火炎暴露事例調査¹⁾からも指摘されていることである。しかし、下肢部は動き回る際に最も関係のある膝の関節がある。下肢部の防熱性能を高めるには、膝の関節の動きを妨げないよう工夫が必要である。

5. おわりに

防火衣を着用した消防隊員の火炎暴露に対する安全性を考えると、現在使用している防火衣でも3秒の火炎暴露に対して胴体部、上肢部、下肢部は安全である。しかし、現在使用しているしころ付きヘルメットでは、同上の条件下では顔面が火炎と触れた場合には、火傷となってしまうので、3秒の火炎暴露に対して隊員の安全性を確保するには顔面の防熱対策を施す必要がある。

一方、断熱性能の他に消防隊員が着用する防火衣は、衣服としての作業性、着心地等も重要な要素である。今後、消防隊員用の防火衣は、断熱性能の他に作業性、着心地も考慮に入れながら総合的に検討していく必要がある。

引用文献

- 1) 新興海陸運輸倉庫爆燃火災調査会：“新興海陸運輸倉庫爆燃火災に関する調査報告書”，東京消防庁，p.75 (1977)
- 2) 日本防災協会：“ISO 燃焼試験方法による繊維製品の防炎性評価に関する調査研究報告書”，昭和63年2月
- 3) 渡部勇市：“円筒模型による消防用防護服の火炎暴露実験 第2報 淀み点における防火衣の防熱効果”，消防研究所報告，No.63，p.25 (1987)
- 4) B. V. Holcombe: “The Heat Related Properties of Protective Clothing Fabrics”, *Fire Safety Journal*, No. 6, p. 156 (1983)
- 5) L. Benisek: “Evaluation of Zipro Wool and Other Fabrics”, *Fire and Materials*, No. 3, p. 156 (1979)
- 6) 横山久摩他：“防火衣の改良について (第4報)”，消防科学研究所報告，No.63，p.25 (1985)
- 7) 渡部勇市：“サーマルマネキンを用いた防火衣の火炎暴露実験 (その1) 防火衣の受熱するエネルギー分布の推定”，消防研究所報告，No.66，p.1 (1988)
- 8) 渡部勇市：“サーマルマネキンを用いた防火衣の火炎暴露実験 (その2) 燃焼状況，流入熱流束および火傷分布の推定”，消防研究所報告，No.66，p.9 (1988)
- 9) Stoll, A. M.: “Relation between Pain and Tissue Damage due to Thermal Radiation”, *J. Appl. Physiol.*, Vol. 14, p. 373 (1959)
- 10) Stoll, A. M.: “Heat Transfer through Fabrics as Related to Thermal Injury”, *Transactions New York Academy of Sciences*, p. 649 (1970)

(平成元年5月1日受理)