

防火衣の熱防護性能に関する検証

加藤 久弥* 荻野 恭久** 宮島 敏光*** 渡邊 茂男*

概要

本検証は、主に火災による甚大な火炎にばく露された場合を想定して、当庁が採用している防火衣の熱防護性能について把握し、消防活動中の火炎ばく露に伴う危険性と、火炎ばく露を予期した対応策について提案することを目的に行なった。

1 はじめに

消防隊員が使用している防火衣は火災現場における劣悪な環境に対応するための様々な研究、開発により飛躍的な性能の向上を遂げている。現在、当庁では、外衣生地には芳香族系アラミド繊維、內衣生地に透湿防水層と断熱層を施したセパレート型の防火衣を採用している。防火衣の総合的な性能は消防隊員を火災の熱から守る「熱防護性能」、着心地・熱感覚・湿度感・柔軟性等の「快適性能」、着易さ・脱ぎ易さ・動き易さ等の「機能性能」の三つの性能から成り立つが、本検証は、これらのうち「熱防護性能」に着目し、主に火災による甚大な火炎にばく露した場合の当庁が採用する防火衣の性能を把握し、消防活動中の火炎ばく露に伴う危険性、火炎ばく露を予期した対応策について提案することを目的に行なったものである。尚、火傷の程度は温度のみならず湿度が深く関わっていることが知られているが、本検証では、放水や発汗に伴う防火衣内外の水分の影響は検討から除外した。

2 検証項目、方法

(1) 火炎にばく露された場合の防火衣の損傷状況と火傷割合についての検証

当庁が採用している防火衣が、火炎にばく露された場合の熱防護性能と当該防火衣を着装している人間が負うと考えられる火傷の程度を把握するため、サーマルマネキン試験機により、火炎によるばく露時間（以下、「ばく露時間」という）と防火衣の損傷状況及び体表面積に対する火傷面積の割合（以下、「火傷割合」という）の関係を検証した。

(2) 防火衣内側の服装の違いによる火炎ばく露時の熱防護性能の比較検証

火炎ばく露時、防火衣（上衣）の内側にシャツと執務服を着用していた場合と、シャツのみを着用していた場合の熱防護性能の差異を比較検証するため、それぞれ

の場合についてサーマルマネキン試験機による火傷割合の測定および火炎防護性測定器を使用した測定を行なった。

(3) 経年使用による防火衣の熱防護性能の変化の検証

経年使用された防火衣（以下、「使用済防火衣」という）と未使用の防火衣（以下、「未使用防火衣」という）それぞれについて、サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の防火衣の損傷状況および火傷割合の差異、火炎防護性測定器による加熱時の挙動の差異およびコーンカロリメーターを使用して一定の輻射熱を照射した時の炭化状況の差異を比較検証し、経年使用による防火衣の熱防護性能の低下の有無を確認した。試験体には、平成13年製の使用済防火衣と未使用防火衣を使用した。

3 実験方法

(1) サーマルマネキン試験機による実験

身長180cmの耐熱処理されたマネキンに防火衣を着衣させた状態で、バーナーで作成した火災時の熱環境下にばく露させ、防火衣の熱防護性能を検証した（写真1、2参照）。



写真1 (左) サーマルマネキン (防火衣着装状態)

写真2 (右) 火炎ばく露状況

サーマルマネキンには熱流束センサーが頭部8個、胴体49個、腕部20個、大腿部27個、脚部18個の合計

122 個取り付けられている。バーナーはプロパンガスを燃料としたもので、マネキンを四方から囲む配置で4基(1基につき2本の接炎バーナーにより構成される)設置されている。このバーナーによりマネキン全身に平均熱流束 80kW/m^2 の火炎を浴びせ、マネキン各部の熱流束センサーからデータ解析装置を介して火傷程度とその面積を算出することで熱防護性能を評価した。

測定データの採取時間は、予備実験により火傷の変化がばく露開始から4分程度で安定することが確認されたため、ばく露開始より5分間とした。

(2) 火炎防護性測定器を使用した実験

試験体である防火衣の生地を $14\text{cm} \times 14\text{cm}$ の正方形に裁断したものを試験片とし、写真3に示す、ISO9151:1995 に基づく試験に使用する火炎防護性測定器を用いて、水平に設置した試験片の表面にガスバーナーで15秒間、 80kW/m^2 の入射熱流束を与えた。試験片の裏面に設置した熱量計により、裏面の温度を測定した。

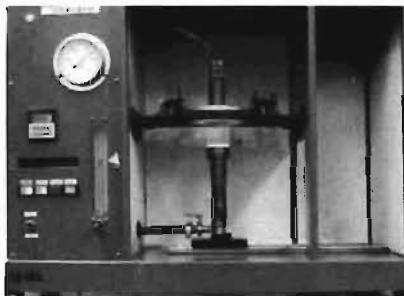


写真3 火炎防護性測定器による実験状況

(3) コーンカロリメーターを使用した防火衣生地表面への輻射熱照射実験

防火衣の生地を $17\text{cm} \times 17\text{cm}$ の正方形に裁断したものを試験片とし、ISO5660 に準拠した試験機(コーンカロリメーター 写真4参照)を使用して試験片に一定の輻射熱を照射し、試験片の炭化状況を観察した。照射する熱流束及び照射時間の2条件を変化させて実験を行ない、それぞれの場合について観察を行なった。



写真4 コーンカロリメーターによる実験状況

4 検証結果と考察

(1) 火炎にばく露された場合の防火衣の損傷状況と火傷割合についての検証結果

図1は、サーマルマネキン試験機によるばく露時間ご

との火傷割合を示した図である。

ばく露時間8秒では火傷割合が25.90%、ばく露時間10秒では40.48%、ばく露時間15秒では68.09%であった。

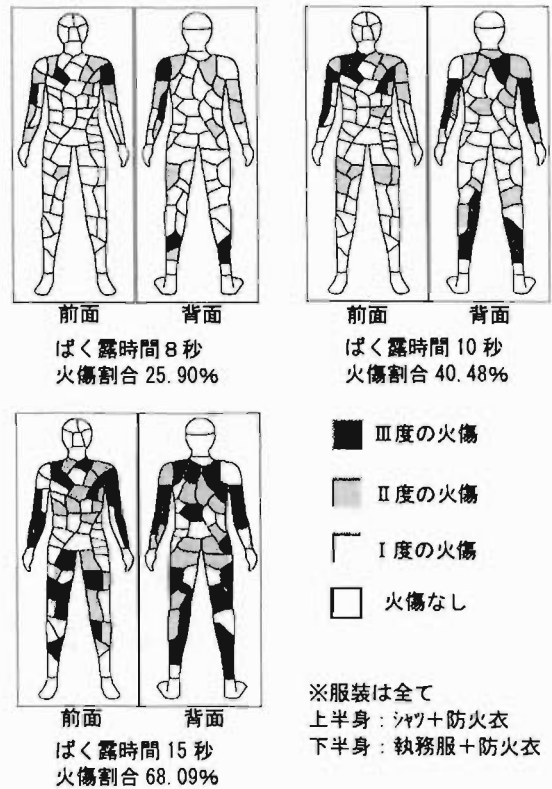


図1 サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の火傷割合測定結果 (ばく露時間別)



写真5 (上) サーマルマネキンに防火衣及び空気呼吸器を装着させた状況

写真6 (下) 火炎ばく露後の写真5のサーマルマネキン

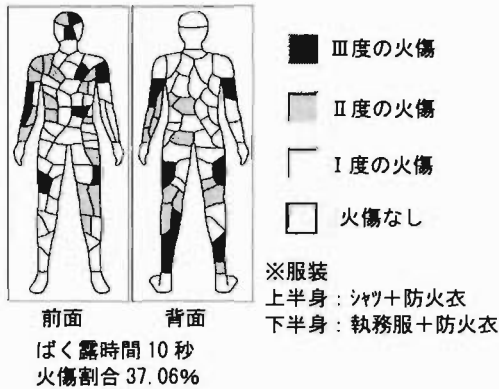


図2 サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の火傷割合測定結果（防火衣、空気呼吸器装着）

さらに、写真5、6に示すように呼吸器等を装着し10秒間のばく露を行ったところ、ばく露開始から5分経過後の火傷割合は、37.06%となった（図2参照）。

尚、防火衣の生地部分については火炎ばく露後の燃焼の継続は観察されなかったが、反射材については熔融・炭化し一部が蒸発するまで燃焼を継続したことから、火傷の程度に悪影響を及ぼすことが考えられる（写真7参照）。

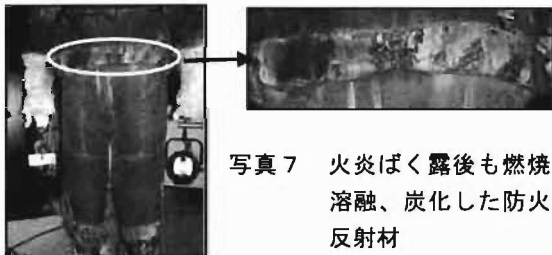


写真7 火炎ばく露後も燃焼し、熔融、炭化した防火衣の反射材

空気呼吸器を装着させて火炎ばく露を行なった実験では、空気呼吸器の背負バンドが収縮又は熔融し、一部は溶断に至った。溶断又は溶断寸前に至った箇所は写真8に示すように腰バンド及び脇バンドの金属との結合部付近で多く確認され、特に腰バンドについては、背負子との結合部で溶断した。

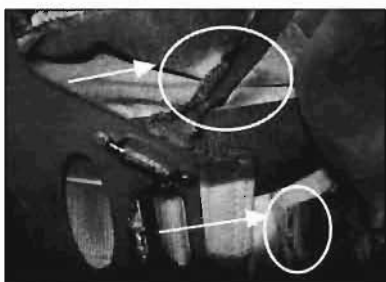


写真8 火炎ばく露により溶断寸前に至った空気呼吸器のバンド

(2) 防火衣内側の服装の違いによる火炎ばく露時の熱防護性能の比較検証結果

ア サーマルマネキン試験機による実験

図3は、防火衣の下に綿100%のシャツと執務服（上

衣：アラミド繊維80%、難燃ポリエステル20%）を着用した場合と綿100%のシャツのみ着用した場合とでサーマルマネキン試験機により、火炎による熱流束を80kW/m²で10秒間のばく露を行ったときの火傷割合を示した図である。

各々のばく露開始から5分経過後までの火傷割合は、シャツと執務服（上衣）を着用した場合は32.43%、シャツのみの場合は40.48%とシャツと執務服（上衣）を着用した場合の方が火傷割合が少なかった。

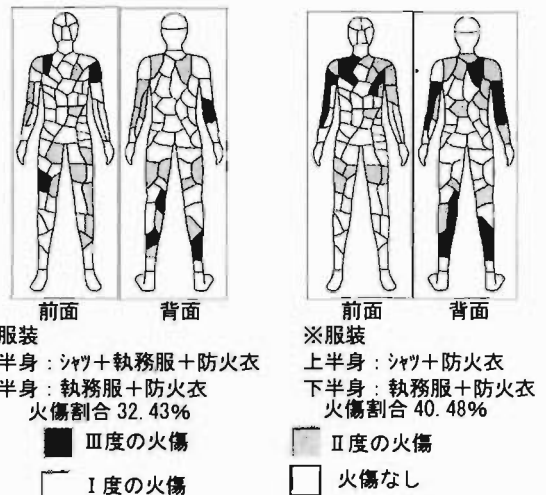


図3 サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の火傷割合測定結果（防火衣内側の服装別）

イ 火炎防護性測定器を使用した実験

防火衣（上衣）生地に執務服（上衣）生地とシャツ生地を合わせたもの及び防火衣（上衣）生地にシャツ生地のみを合わせたものの2種類を試験体として表記実験を行なった。

その結果、図4に示すとおり防火衣生地にシャツ生地と執務服（上衣）生地の両方を加えた場合の最高到達温度は68.1℃、シャツ生地のみを加えた場合は73.5℃となり、防火衣生地にシャツ生地と執務服（上衣）生地の両方を加えた場合はシャツ生地のみを加えた場合と比較して最高到達温度が5.4℃低く、さらに試験体上面（シャツの生地裏面）の温度上昇が緩やかな結果となり、体表面に与える影響が小さいことがわかった。

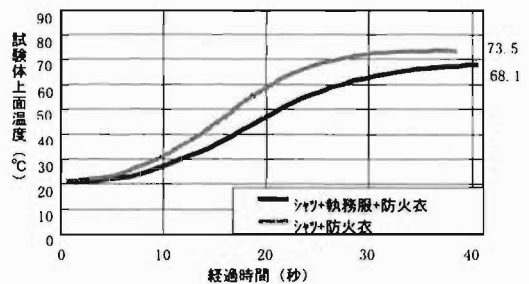


図4 火炎防護性測定機を使用した実験結果（防火衣内側の服装による差異の比較）

これらの結果から、防火衣の下にシャツと執務服（上衣）を着用した場合とシャツのみ着用した場合とでは、シャツと執務服（上衣）を着用した方の火傷の程度が軽くなると考えられる。

(3) 経年使用による防火衣の熱防護性能の変化の検証結果

ア サーマルマネキン試験機による実験

写真9はサーマルマネキン試験機により使用済防火衣を火炎による熱流束 80kW/m²で 10 秒間のばく露を行った時の状況である。写真 10 は、同試験機により未使用防火衣について同様のばく露を行った後の状況である。これら 2 種類の防火衣について損傷状況に大きな差異は認められなかった。

また、ばく露開始から 5 分経過後の両者の火傷割合を比較すると図5に示すとおり、使用済み防火衣の場合は 32.43%、未使用防火衣の場合は 30.87%であった。

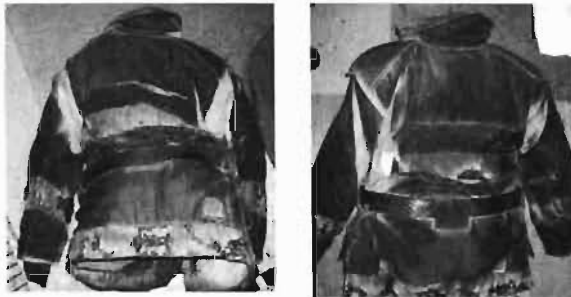


写真9 (左) サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の防火衣の状況 (使用済防火衣)
写真10 (右) サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の防火衣の状況 (未使用防火衣)

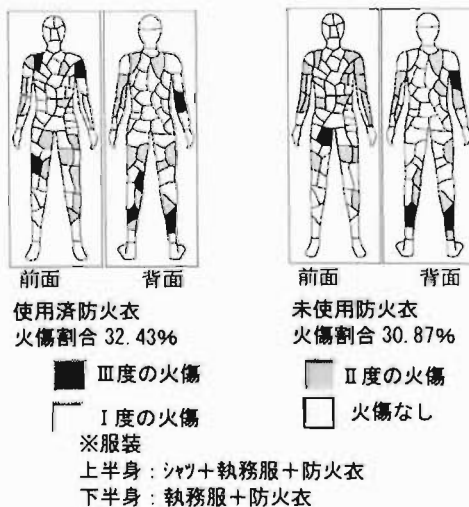


図5 サーマルマネキン試験機による火炎ばく露後の火傷割合測定結果 (使用済、未使用比較)

イ 火炎防護性測定機を使用した実験

平成 13 年製造の使用済防火衣及び未使用防火衣の生地を試験体とし、表記試験を行なった。図6は、各試験

体の経過時間ごとにおける試験体裏面温度を示したグラフである。使用済防火衣の試験体裏面の最高到達温度は 78.2℃、未使用防火衣の場合は 83.8℃と使用済防火衣の試験体裏面の最高到達温度は未使用防火衣の場合と比較して 5.6℃低い結果となった。

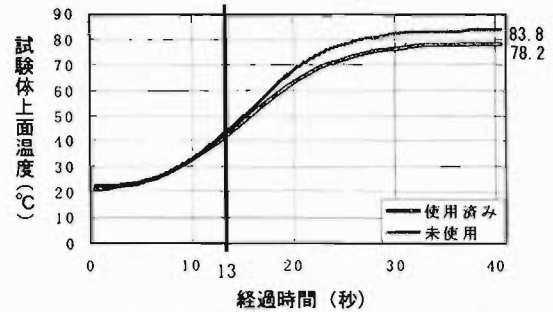


図6 火炎防護性測定機を使用した実験結果 (使用済、未使用による差異の比較)

表1は試験体裏面のばく露前とばく露開始から 13 秒後の温度変化を表したものである。

双方の試験体はばく露開始からばく露 13 秒後までの温度上昇は 24℃を下回っており、当庁の防火衣の仕様書に要求されている熱伝達性能 (火炎防護性能) を満たしていた。

表1 火炎ばく露開始 13 秒後の試験体裏面の温度変化

試験体	火炎ばく露前温度	火炎ばく露 13 秒後温度	温度上昇
平成 13 年製未使用防火衣 (上衣単体)	22.5℃	43.8℃	21.3℃
平成 13 年製使用済防火衣 (上衣単体)	21.3℃	42.3℃	21.0℃

ウ コーンカロリメーターを使用した防火衣生地表面への輻射熱照射実験

平成 13 年製造の使用済防火衣及び未使用防火衣の生地を試験体とし、表記試験を行なった。照射する熱流束は 40kW/m²、80 kW/m²の 2 通り、照射時間は 5 秒、10 秒、15 秒、20 秒、25 秒、30 秒、35 秒、40 秒の 8 通りに変化させて行なった (80 kW/m²は 5 秒、10 秒、15 秒のみ)。

表2は、それぞれの条件における実験後の試験体の表面の状況を示したものである。

使用済防火衣と未使用防火衣の炭化状況に大きな差異は認められなかった。

尚、80kW/m²の熱流束を 10 秒間照射した場合と 60kW/m²の熱流束を 20 秒間照射した場合、及び 40kW/m²の熱流束を 30 秒間照射した場合、それぞれの防火衣生地の損傷状況は同程度であった。

表2 コーンカロリメーターによる輻射熱照射に伴う防火衣生地炭化状況

ばく露 時間	放射熱（熱流束）の大きさ						炭化状況 （損傷状況）
	40kW/m ²		60kW/m ²		80kW/m ²		
	未使用 防火衣	使用済 防火衣	未使用 防火衣	使用済 防火衣	未使用 防火衣	使用済 防火衣	
5秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地がわずかに変色した。 ・80kW/m²のばく露では生地が硬化し、薄黒く変色した。
10秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地がわずかに変色した。 ・80kW/m²のばく露では生地が硬化し、さらに炭化した。
15秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し薄黒く変色した。 ・60kW/m²のばく露では、生地が硬化し黒く炭化した。 ・80kW/m²のばく露では、ばく露中に発火し、生地に多くのひび割れが生じ損傷が著しい。また収縮により破断が生じた。
20秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し薄黒く炭化した。 ・60kW/m²のばく露では、生地が硬化及び黒く炭化した。
25秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し黒く炭化した。 ・60kW/m²のばく露では、生地に数本の太いひび割れが生じ損傷が著しい。また収縮により破断が生じた。
30秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し、黒く炭化した。
35秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し、より激しく黒く炭化し、亀裂が観察された。
40秒							<ul style="list-style-type: none"> ・40kW/m²のばく露では、生地が硬化し、黒く炭化するとともに、数本の亀裂が観察された。

以上ア～ウに記した3種の実験結果を見ると、火傷割合は使用済防火衣の方が1.56%大きい結果となり未使用防火衣に優位な結果となった一方で、火災防護性能測定器による実験では使用済防火衣の方が優位な結果となったが、サーマルマネキン試験機による火災ばく露後の防火衣の損傷状況の比較及びコーンカロリメーターによる放射熱照射実験の結果、両者の間に大きな差異が認められなかったこと、両者とも当庁の仕様書に要求されている火災防護性能を満たしていたことから、6年間（更新期間）使用した防火衣であっても、経年使用による熱防護性能の低下は認められなかったといえる。

(4) 火災にばく露された場合の対応についての考察

図7に示すとおり火災ばく露後の火傷割合の変化は、ばく露直後から増加現象を示し、ばく露開始後約4分(240秒)で一定となる状況を示している。

このことから、火傷をできる限り少なくするためには、移動中の熱を可能な限り速やかに除去することが有効であり、消防活動中に火災にばく露された場合は、ばく露時間の多少にかかわらず、速やかな防火衣の離脱が火傷程度の拡大防止に効果がある。

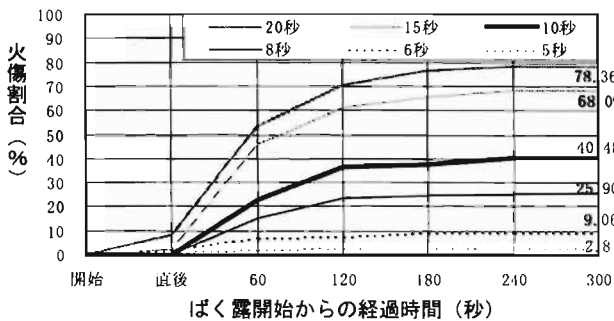


図7 ばく露時間別の、ばく露開始からの経過時間に対する火傷割合の変化

(5) 火災にばく露された場合の限界についての考察

表3は、火傷による重症度の判断基準である。これによると、体表面積に対するⅢ度の火傷割合が2%以上になると中等症に該当し、入院治療を要することとなる。サーマルマネキン試験機を使用した実験で火災によるばく露時間が6秒では、ばく露後そのまま放置すると、表4に示すとおりⅢ度火傷が1.56%となり2%に近い火傷割合となった。

表3 火傷の深さと広さによる重症度の判断

	Ⅱ度面積	Ⅲ度面積
軽症（外来通院治療）	成人 15%未満・小児 10%未満	2%未満
中等症（入院治療）	成人 15～30%未満・小児 10～20%未満	2～10%未満
重症（ICU管理・専門施設）	成人 30%以上・小児 20%未満	10%以上

救急隊員標準テキスト、救急隊員用教本作成委員会、ヘルス出版、2003. 10. 10, p204より

一方、ばく露時間5秒では0.87%であった。従って、80kW/m²で5秒を超えて火災にばく露された

場合には、軽症では収まらないおそれがあるといえる。

表4 ばく露時間と火傷割合の関係(上半身:シャツ(綿100%)+防火衣、下半身:第2種執務服+防火衣、呼吸器なし)

	ばく露時間					
	5秒	6秒	8秒	10秒	15秒	20秒
Ⅲ度火傷面積	0.87	1.56	5.61	14.59	35.75	60.41
Ⅱ度火傷面積	1.94	6.20	15.82	22.04	28.50	17.03
Ⅰ度火傷面積	0.00	1.30	4.47	3.85	3.84	0.92
合計面積	2.81	9.06	25.9	40.48	68.09	78.36
火傷なし面積	97.19	90.94	74.1	59.92	31.91	21.64
Ⅱ度+Ⅲ度面積	2.81	7.76	21.43	36.63	64.25	77.44

6 まとめ

(1) 火災にばく露された場合の火傷割合について

サーマルマネキン試験機を使用した今回の火災ばく露実験によれば、平均80kW/m²の熱流束の火災に8秒間ばく露されると火傷割合は25.90%、同じく10秒間では40.48%、15秒間では68.09%であった。

(2) 執務服(上衣)を着用した場合の火傷割合の変化等

防火衣の下にシャツと執務服(上衣)を着用した場合とシャツのみ着用した場合とでは、シャツと執務服(上衣)を着用した方が火傷割合が低かった。

(3) 経年使用による熱防護性能の低下の有無

今回試験体として使用した防火衣は平成13年製で6年経過したものであったが、当庁仕様書に要求されている熱伝達性能(火災防護性能)を満たしていたことなどから、経年使用による熱防護性能の低下は認められなかった。

(4) 火災にばく露された場合の対応

火災ばく露による防火衣の熱が身体に向けて移動することが、火傷に大きく影響することから、火災にばく露された場合は、ばく露時間の多少にかかわらず、速やかな防火衣の離脱が火傷程度の拡大防止に効果があることがわかった。

(5) 火災にばく露された場合の限界

現行の防火衣では80kW/m²で5秒を超えて火災にばく露された場合には、軽症の範囲では収まらないおそれがあることがわかった。

(6) 反射材の燃焼及び空気呼吸器のバンドの溶断

サーマルマネキン試験機による火災ばく露実験では、防火衣に取り付けられている反射材が火災ばく露後も燃焼を継続し、また、空気呼吸器のバンドは収縮又は溶断し、一部は溶断に至った。

[参考文献]

救急隊員標準テキスト 救急隊員用教本作成委員会 ヘルス出版

Verification of thermal protection performance of protective clothing

Hisaya KATO*, Yasuhisa OGINO**, Toshimitsu MIYAJIMA***, Shigeo WATANABE*

Abstract

This verification is conducted to determine thermal protection performance of the protective clothing employed by the Tokyo Fire Department in case of exposure to intense flames primarily from a fire, and also to make proposals concerning risks associated with exposure to flames during firefighting and countermeasures in anticipation of exposure to flames.