

防火衣着用時の快適性の向上に関する研究

安居院 克巳*, 鈴木 照雄**, 鎌形 健司**, 吉村 延雄*

概 要

防火衣は、火災現場で火災から消防隊員の身体を保護してくれるものであり、常に優れた熱防護性が求められてきた。その結果、現在の防火衣は、耐熱性や耐切削性などに優れた性質を持っており、外環境に対して強い耐性を持つ反面、防火衣内は高温多湿で隊員に課せられる身体的負担は大きいものとなっていることから、防火衣の快適性、機能性の向上が期待されている。そこで、現用の防火衣生地到高機能なPBO繊維を混紡することにより、生地を薄くして軽量化を図り、快適性、機能性の向上を図った防火衣を試作した。現用の防火衣と比較して全体で550g軽く、着用調査の結果、高い評価を得ている。

1 はじめに

防火衣は一定の熱防護性能が要求され、快適性については二の次とされてきたため、防火衣着用時の不快感については、改善が遅れがちになっている。本研究では、防火衣着用時の快適性の向上を主眼として、まず防火衣の生地を選定し、国際標準化機構 (ISO)、日本工業規格 (JIS) に基づく物性試験を行い、防火衣を試作し各種実験を行った。

2 防火衣生地を選定

(1) 外衣生地を選択

ア シリコンコーティング

現用の防火衣は、外衣が生生地ではほとんど防水性がないため、透湿防水層に一定の耐水性と、油脂や血液といった液体等を浸透させない性能が要求される。このため、防火衣内の発汗による水蒸気が発散されにくく、熱中症の大きな要因の一つと考えられている。

そこで、透湿防水層をなくす手段として、現用の外衣生地にシリコンコーティングを施した生地を用いて耐水圧試験を行ったが、外衣生地のみでは仕様を満足できず、また通気性は現用よりも劣った。

しかし、将来的にシリコンコーティング技術が発達し、透湿防水層を用いなくても外衣生地で高い防水性能を確保できれば、防火衣の快適性は飛躍的に向上すると考えられる。

イ PBO混紡生地

防火衣は、動きやすくさらに軽量であれば、その分隊員の負担が軽減され、快適性の向上につながることから、検討を重ねた結果、アラミド繊維より高強度で耐熱性に優れたPBO繊維を用いることにより、現用の熱防護性

を維持しながら、より軽く、薄くできると考え高機能なPBO繊維を混紡した生地 (PBO-I、PBO-II) を選択した。

前ア、イのことから比較すると、シリコンコーティングを用いた外衣生地は防火衣には不適と判断して、外衣生地としてPBO-I、PBO-IIを選択した。(それぞれの仕様を表1に示す。)

表1 外衣生地・仕様一覧

試料名	素材仕様			
	生地	組織	質量 [g/m ²]	
現用	メタ系+パラ系芳香族ポリアミド (パラ系ポリアミド混用率は10%以上)	綾織り	290以下	
シリコン	現用生地にシリコンコーティングを施した生地		290以下	
PBO-I	メタ系、パラ系芳香族ポリアミド		混紡率 パラ系30%以上 PBO7%未満	250以下
PBO-II	+PBO繊維		混紡率 パラ系30%以上 PBO7~20%	250以下

※PBO繊維 (ポリパラフェニレンベンジスオキサゾール) 有機系最高レベルの引張強度・弾性率と耐熱性・難燃性を併せ持つスーパー繊維

(2) 內衣生地を選択

ア 透湿防水層

現用のフッ素系多孔質透湿フィルムを用いたものと、曲げ伸ばし時の抵抗感の軽減を図るためニット生地にウレタン系無孔質形状記憶ポリマをラミネート加工したも

* 世田谷消防署 ** 第一研究室

の2種類を使用した。

イ 裏地、透湿防水層・裏地一体生地

上衣の裏地は現用に近い形ではあるが、より、すべりのよい繊維を使用したもの（長繊維・ストライプ）と、さらに軟らかくすべりの良い繊維を使用したもの（長繊維）の2種類を作製した。また、ズボンの內衣としてフィット感を向上させるため、ニット生地を基布とし、透湿防水層と裏地を一体化させたもの（三層構造布）を作製した。（それぞれの仕様を表2に示す。）

表2 內衣生地・仕様一覧

区分	試料名	素材仕様	
透湿防水層	現用	芳香族ポリアミド100%の生地を基布とし、片面にフッ素系多孔質フィルム加工等を行ったもの	
	形状記憶ポリマ	ポリイミド100%の生地を基布とし、片面に無孔質の形状記憶ポリマをラミネート加工したもの	
裏地	現用	上衣	芳香族ポリアミドを主体とした難燃生地の片面に、ストライプ状の糸を織り込んだもの
		ズボン	芳香族ポリアミドを主体とした難燃生地
	長繊維（ストライプ）	芳香族ポリアミド100%の綾織り生地で横糸は短繊維、縦糸は長繊維としたものに、ストライプ状の糸を織り込んだもの（上衣）	
長繊維	芳香族ポリアミド100%の綾織り生地で横糸は短繊維、縦糸は長繊維としたもの（上衣・ズボン）		
透湿防水層・裏地一体生地	三層構造布	芳香族ポリアミド100%の生地に片面透湿防水加工を施し、その加工面に芳香族ポリアミド100%のニットを貼り合わせた三層構造布（ズボン）	

3 生地の種類物性試験結果

(1) 外衣の物性試験結果

引張、引裂強度においてはシリコンが一番強くなったのは、シリコンが生地に入り込んで、生地の強度を増したためであると考えられる。シリコン以外を比較すると、引張、引裂き強度はPBO-IIが最も高くなった。これは、強靱なPBO繊維を混紡することによって、生地が薄くなっても強度を増すことができたためであると考えられる。

通気性においても、生地を薄くしたPBO繊維混紡の外衣生地が良い結果となった。耐摩耗性については、現用の生地が良い結果となったが、これはPBO繊維混紡生地を使用したことにより、全体の厚さが現用に比べて薄くなっているためだと考えられる。（外衣生地の物性試

験結果を表3に示す。）

表3 外衣の物性試験結果

試験項目		現用	シリコン	PBO-I	PBO-II	当庁仕様
引張強さ [N]	縦	2037	2686	2088	2101	1960以上/50mm
	横	1291	1955	1295	1436	1176以上/50mm
引裂強さ [N]	縦	115	194	122	134	49以上
	横	108	227	138	157	39以上
はっ水性 [点]		100	100	100	100	初期100
通気性 [cc/cm ² ・s]		18.2	測定不能	37.4	33.8	当庁規定なし
耐水圧 [kpa]	(2.3)	5.2				外衣での規程なし
耐摩耗性 [回]	1163		848	966		当庁規定なし

(2) 透湿防水層の引張・引裂強度結果

形状記憶ポリマを使用したものは、現用の透湿防水層と比較すると、強度も弱く、仕様を満足していないが、防火衣として積層状態で使用した場合は、外衣生地と裏地に一定の強度があることからその能力は果たすと考えられるが、さらに強度を上げる改良が必要であると考えられる。（透湿防水層の引張・引裂強度の試験結果を表4に示す。）

表4 透湿防水層の引張・引裂強度

試験項目		現用	形状記憶ポリマ	当庁仕様
引張強さ [N]	縦	399	181	縦横共 196以上/50mm
	横	364	135	
引裂強さ [N]	縦	48	16	縦横共 19.6以上
	横	43	20	

4 試作防火衣の積層構成

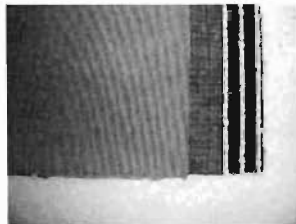
(1) 積層構成

外衣、透湿防水層、裏地の積層構成については、前項3の物性試験結果と次項5(1)の火炎に対する防護性能試験を踏まえ表5のように決定した。

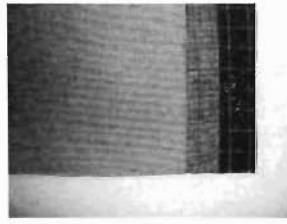
また、各積層の外観を写真1に示す。（試作防火衣の前景を写真2に示す。積層③～⑥の外衣生地は、色相：ネイビーにて撮影）

表5 積層構成

積層構成	区分	外衣		內衣	
		透湿防水層	裏地		
積層①	上衣	現用の組み合わせ			
積層②		PBO-I	現用	長繊維(ストライプ)	
積層③		PBO-II	形状記憶ポリマ	長繊維	
積層④	ズボン	現用の組み合わせ			
積層⑤		PBO-I	三層構造布		
積層⑥		PBO-II	現用	長繊維	



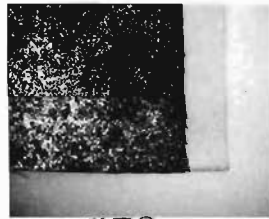
積層① (現用・上衣)



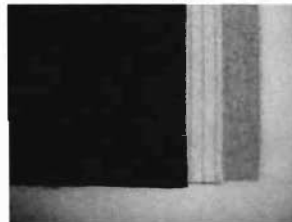
積層④ (現用・ズボン)



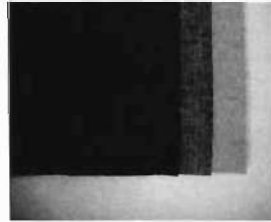
積層②



積層⑤



積層③



積層⑥

写真1 各積層の写真

(2) 試作防火衣の特徴

試作防火衣は2種類を製作した。また、外衣生地の変色具合をみるために色相をゴールドとネイビーの2パターンとした。(主な特徴を表6に外観を写真2に示す。)

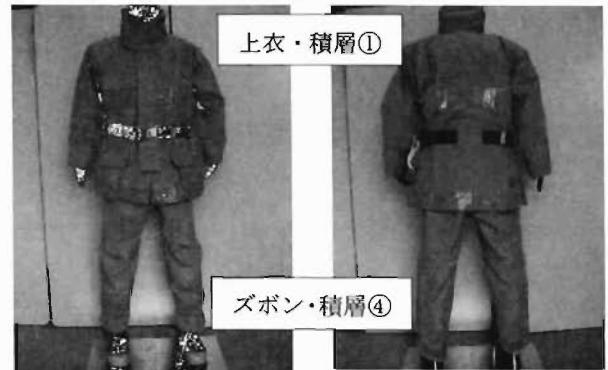
なお、PBO繊維を混紡することによって、現用の防火衣と比較して全体で550g軽く、生地のもさも0.17mm薄くすることが可能となった。

表6 試作防火衣の主な特徴

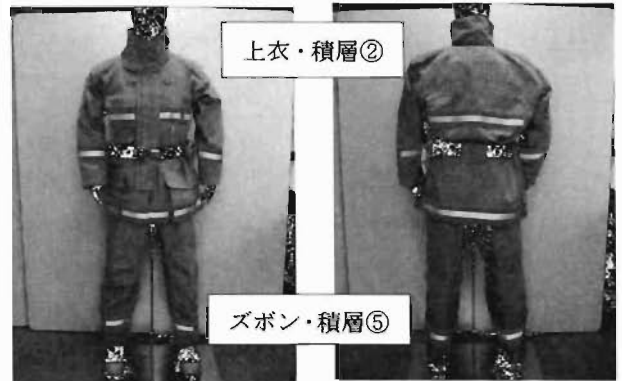
	主な特徴	質量 [g]
防火衣A	現用一般隊員の防火衣	3085

防火衣B (PBO-I)	上衣裏地にすべりの良い素材を使用し、着装感の向上を図った。また、ズボンの透湿防水層と裏地を一体化させ、フィット感の向上を図った。	2535
防火衣C (PBO-II)	上衣の透湿防水層に伸縮性のある素材を使用し、曲げ伸ばし時の抵抗感の軽減を図った。また、上衣・ズボンとも裏地に柔らかく、すべりの良い素材を使用し、着装感や動きやすさの向上を図った。	2580

※ 質量は上衣:L、ズボン:98-70サイズの合計 (安全帯含まず・実測値)



防火衣A (現用防火衣)



防火衣B



防火衣C

写真2 試作防火衣全景

5 火炎及び輻射熱に対する熱防護性能試験

防火衣の生地を薄くし、軽量化を図ったとしても、熱防護性が劣ってしまえば消防隊員の安全は図れない。そこで、ISO（国際標準化機構）の基準に準拠した熱伝達（炎）試験 [ISO 9151] や熱伝達（放射熱）試験 [ISO 6942] を実施した。

(1) 熱伝達（炎）試験 [ISO 9151]

火炎に対する防護性能（熱伝達指数）は、現用（積層①、④）とPBO繊維混紡積層の結果は同等の結果となった。しかし、火炎暴露後の外衣生地を比較すると、現用生地は硬く炭化し、数回折り曲げると欠落が発生した。一方、PBO繊維混紡生地は火炎暴露後においても、十分な柔軟性を確保し、欠落は発生しなかった。（火炎暴露後の生地の様子を写真3示す。）

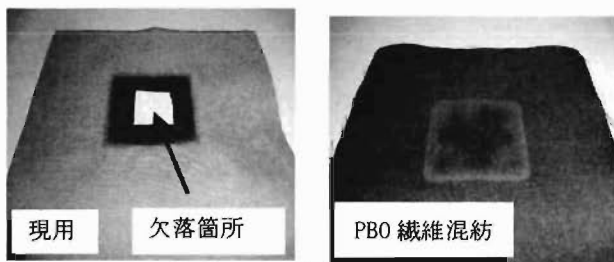


写真3 火炎暴露後の外衣生地を数回折り曲げた状況

(2) 熱伝達（放射熱）試験 [ISO 6942]

放射熱に対する防護性能（熱透過率）については積層③の t_{24} 以外、ISO要求性能を満たしている。積層③については、空気層をより多く確保する等の改良が必要であると考えられる。しかし、放射熱暴露後の現用生地には収縮が認められたが、PBO繊維を混紡した外衣生地には収縮は認められなかった。（火炎及び放射熱に対する防護性能試験結果を表6に、放射熱暴露後の試験片の様子を写真4に示す。）

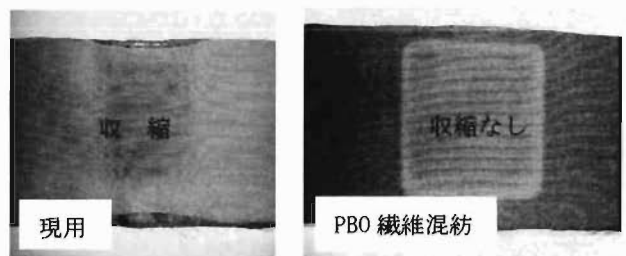


写真4 放射熱暴露後の試験

表6 火炎、放射熱に対する防護性能試験結果

試験項目	上衣			ズボン			当庁仕様	ISO要求性能
	積層① (現用)	積層②	積層③	積層④ (現用)	積層⑤	積層⑥		
ISO 9151 熱伝達指数	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3以上 1.6以下	1.3以上
ISO 6942 t_{24} [S]	19.7	18.1	16.2	20.7	18.1	18.0	/	1.8以上
$t_{24} - t_{12}$ [S]	6.7	6.3	4.9	6.8	5.8	5.5		4以上
熱透過率 [%]	24.8	26.5	33.9	24.5	28.5	30.3		5.0以下

写真4の試験片の収縮率を表7に示す。

表7 放射熱暴露後の外衣生地の収縮状態

外衣生地	収縮率 (%)	
	縦方向	横方向
現用生地	13.8	1.5
PBO混紡生地	0	0

6 熱・水蒸気抵抗測定試験 (トータルトロピ試験)

この試験はASTM F1868-98及びISO11092に基づき、人の肌に見立てた発汗ホットプレート装置を用いて、どれだけの熱が伝わりやすいのか、どれだけ水分(汗)が蒸

発しやすいか等を測定し、「熱抵抗」「等温蒸発抵抗」「標準環境でのトータル熱損失」を求め、生地から防火衣の熱発散性を測定し、快適性能を評価するものである。

熱抵抗は、熱の通り難さを示し、値が大きいほど暑く不快感が大きくなる。等温蒸発抵抗は、水蒸気の通りにくさを示し、値が大きいほど透湿性が悪く、蒸れて不快となる。トータル熱損失は、値が大きいほうが快適性に優れていることを示す。（熱・水蒸気抵抗測定結果を表8に示す。）

表8 熱・水蒸気抵抗測定結果

試験項目	上 衣		
	積層① (現用)	積層②	積層③
熱抵抗 [m ² ・K/W]	0.062	0.061	0.059
蒸発抵抗 [m ² ・k p/W]	0.015	0.0157	0.0210
トータル熱損失 [W/m ²]	330	334	319
試験項目	ズ ボ ン		
	積層④	積層⑤	積層⑥
熱抵抗 [m ² ・K/W]	0.054	0.053	0.056
蒸発抵抗 [m ² ・k p/W]	0.0171	0.0254	0.0169
トータル熱損失 [W/m ²]	310	285	307

上衣・ズボンの区分ごとに比較すると、熱抵抗は各積層ともほぼ同様であった。蒸発抵抗値は、上衣では積層③、ズボンでは積層⑤がやや高くなっているが、これは透湿防水層に使用した生地の影響であると考えられる。トータル熱損失は、蒸発抵抗の影響を受け、積層③、⑤がやや低くなっているが、上衣・ズボンの区分別では、ほぼ同様の結果となった。

外衣の通気性が大幅に改良されたにもかかわらず、各積層とも同様な結果となったことから、生地面から見た防火衣の快適性能は、透湿防水層の影響を強く受けるものと考えられる。

7 サーマルマネキン試験

(1) 試験の概要

サーマルマネキン試験は、1.8mのマネキンに防火衣を着せた後、プロパンガスバーナーにより作り出される火災環境に暴露して、マネキン全身に設置された122個の熱流センサーがとらえた熱流束から、マネキン各部の熱傷の程度及びその範囲などを算出し、防火衣の耐炎性能を評価するものである。

本研究では、3種類の防火衣についてフラッシュオーバー時の熱量(80kW/m²)で5秒間火炎に暴露した。(サーマルマネキン試験の様子を写真5に示す。)



写真5 サーマルマネキン試験

(2) 試験結果

ア 収縮率

火災暴露後の防火衣は収縮を起したが、その結果は防火衣Aが最も大きく、特に上衣全長はワンサイズ程度も収縮を起した。

防火衣B・Cは外衣生地にPBO繊維を混紡したことにより収縮率は小さい結果となった。(火災暴露後の防火衣の収縮率を図1に示す。)

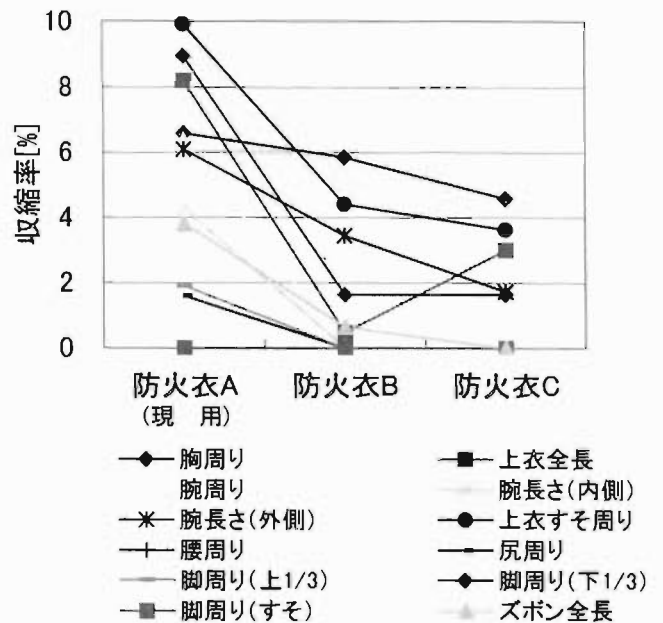


図1 火災暴露後の防火衣の収縮率

イ 耐炎性能

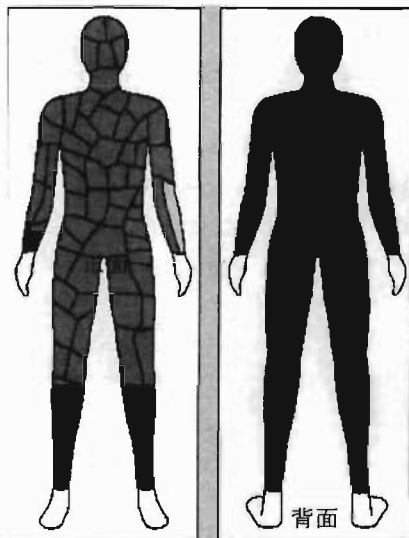
各防火衣着用時の熱傷の部位と程度(手・足先を除く)を図2、熱傷の程度と範囲の詳細(頭部含まず)を表9に示す。(共に暴露後120秒後の結果)

これらより、防火衣B・Cの耐炎性能は現用と同等またはそれ以上であった。このことは、通常生地を薄くすれば、耐炎性能はその分落ちるが、PBO繊維を混紡することによって外衣生地を軽く、薄くしても、耐炎性能

を向上することができたためであると考えられる。

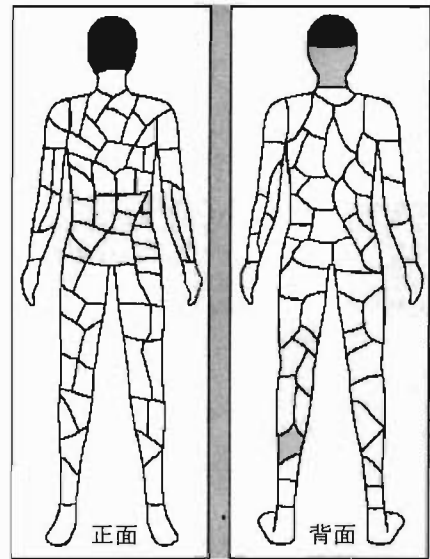
生地試験の輻射熱に対する防護性能は、性能が良い順に防火衣A>防火衣B>防火衣Cであったが、本試験結果の順位をつけると良い順に防火衣C>防火衣B>防火衣Aとなった。この中でも防火衣Cは、熱伝達（放射熱）試験ではISOの要求性能を満足できなかったが、耐炎性能評価では、最も熱傷が少なく、Ⅱ度・Ⅲ度熱傷に至らない結果となった。

■ Ⅲ度熱傷
 ■ Ⅱ度熱傷
 ■ Ⅰ度熱傷

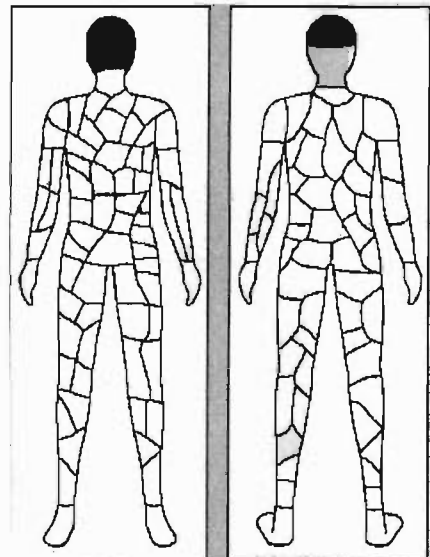


裸マネキン

防火衣A (現用)



防火衣B



防火衣C

図2 熱傷部位と程度

表9 熱傷程度・範囲の詳細

熱傷程度・範囲[%]		I度	Ⅱ度	Ⅲ度	B1
防火衣A (現用)		0.41	1.44	0.0	0.7
防火衣B		0.0	1.05	0.0	0.5
防火衣C		0.89	0.0	0.0	0.0
参考	執務服	0.2	20.7	46.1	56.5
	裸マネキン	0.0	0.84	92.74	93.2

※ 熱傷の範囲は、傷者手掌部面積が1% (全身体表面を100%とする) に相当する。

BI (Burn Index) = 1/2 × Ⅱ度熱傷の範囲 + Ⅲ度熱傷の範囲 (死亡率はBI30以上で50%、70以上で96.8%)

8 試作防火衣の着用感に関する調査結果

(1) 目的

この調査は、防火衣着用時の快適性の向上を図る上で重要な、測定装置では測ることのできない現場隊員の「生の声」「感覚」「気持ち」を収集することを目的とし、着心地感、動きやすさ等について調査した。

(2) 調査期間

平成17年2月の延べ8日間実施

(3) 調査方法

調査期間中、消防隊員に2種類の防火衣（防火衣B、C）を着装して消防活動訓練を行ってもらい、訓練終了後、アンケート調査を実施した。

アンケート内容は、現用防火衣を基準点「0」として、「-2、-1、0、1、2」の5段階で評価してもらうことにした。（表10）

また、防火衣に対する先入観をなくすために、仕様や特徴については事前に示さなかった。

表10 評価内容

	評価					
	-2	-1	0	+1	+2	
フィットしていない						フィットしている
圧迫感がある						圧迫感がない
動きにくい (活動しにくい)						動きやすい (活動しやすい)
脚を曲げ伸ばしに くい						脚を曲げ伸ばしや すい
重い						軽い
厚い						薄い
硬い						しなやか
着心地がゴワゴワ する						着心地がゴワゴワ しない
着にくい						着やすい
脱ぎにくい						脱ぎやすい
通気性があるよ うに感じない						通気性があるよ うに感じる
楽に感じない						楽に感じる
疲労感を感じる						疲労感を感じない
総合的評価(悪い)						総合的評価(良い)



写真6 試作防火衣を着用しての訓練

(4) 調査結果

ア 現用（防火衣A）と比較した防火衣B、防火衣Cの回答は共にプラス側の意見が多く、特に動きやすさ（活動のしやすさ）や腕・脚の曲げ伸ばしやすさで高い評価を得た。防火衣Cは着やすさでも高い評価を得ている。
イ 通気性に関しては、防火衣Cは生地試験におけるトータル熱損失が現用防火衣より若干劣ってはいるが、通気性があるように感じるとの回答が多かった。これは、防火衣の着心地や動きやすさが隊員の感じる快適性に影響を与えると考えられる。

ウ 全体的を見ると、防火衣B、Cは共に現用の防火衣よりも軽く、しなやかで非常に動きやすく、腕や脚が曲げ伸ばしやすいと、高い評価を得た。特に、內衣がすべりやすい素材を用いた防火衣Cは汗をかいても非常に動きやすいと、防火衣Bよりも高い評価を得ている。

9 まとめ

防火衣の快適性は、防火衣内の熱（発汗による水蒸気）をうまく外に発散させることが、ポイントである。透湿防水層は外からの水分等の浸入を遮断し、防火衣内で生ずる身体の熱・汗等を発散するという機能を持っているが、消防活動の激しい動きの中で生ずる身体の熱、汗は十分な発散が間に合わず、透湿防水層の能力も限界がある。

そこで、本研究で行った外衣生地にはPBO繊維を混紡し、熱防護性能は現用防火衣と同等のレベルの防火衣を試作して検証を行った結果、軽くしなやかで、內衣にすべりの良い素材を用いた防火衣は着用時の執務服との摩擦も少なく消防活動において動きやすく、隊員の身体的負担を軽減でき、PBO繊維を混紡することが、着用時の快適性の向上につながる要因のひとつであることがわかった。

[参考文献]

- 1) 東京消防庁消防科学研究所：フラッシュオーバーに関する研究報告書、平成8年3月
- 2) 救急救命士教育研究会：救急救命士標準テキスト改訂第六版（へるす出版）
- 3) 箭内英治ら：日本の消防隊員用防火服の性能基準とサーマルマネキンによる消防隊員用防火服の耐炎性能（第4回消防研究所シンポジウム講義集）

A STUDY FOR IMPROVING THE COMFORT OF WEARING PROTECTIVE CLOTHING FOR FIRE FIGHTING

Katsumi AGUI*, Teruo SUZUKI**, Kenji KAMAGATA**, Nobuo YOSHIMURA*

Abstract

The protective clothing for fire fighting protects the body its the wearer from fire at a fire scene, and an excellent heat-resistance has always been required. As a result, the clothing currently in use has an excellent resistance to heat and cuts and an excellent tolerance for an outside environment. Meanwhile, since the inside of the clothing becomes high in terms of temperature and humidity and a wear's physical burden may develop large, the improvement of the wearing comfort of the protective clothing and its functionality is expected. We conducted a trial production for lightness, improved comfort and functionality by mixing high performance PBO fiber. It is 550g lighter on the whole compared with the current protective clothing, and the clothing was appraised highly as the result of actual wearing.