

防火衣の受熱に関する検証

佐藤 良行*, 徳永 敦司*, 町井 雄一郎*

概 要

本検証は、消火活動における消防隊員の熱傷危険及び防火衣の受熱時の状況を把握することを目的とした。

防火衣等の着装状況を再現したモデル試料を、消防隊員が消火活動時に受けるとされる放射熱にばく露し、受熱後の状況を画像で記録した。また、防火衣等と皮膚との接触面の温度を測定し、放射熱伝達指数 RHTI を分析することで、消火活動における消防隊員の熱傷危険を評価した。その結果、以下のことを確認した。

- (1) フラッシュオーバー等の急激な火炎や放射熱にばく露しなくとも、熱流束が 5 kW/m^2 から 35 kW/m^2 の放射熱を一定の時間受け続けた場合には、熱傷を生じる恐れがある。
- (2) 放射熱を一定の時間受け続けた場合の防火衣の受熱状況は、熱流束が 5 kW/m^2 から 10 kW/m^2 の場合では変化なく、 15 kW/m^2 から 30 kW/m^2 の場合では変色し、 35 kW/m^2 の場合では炭化する。
- (3) 放射熱を一定の時間受け続けた場合の防火衣等と皮膚との接触面の温度は、熱環境から退避した後も、一定の時間上昇し続け、すぐには降下し始めない。

1 はじめに

消火活動において、消防隊員は常に熱傷等の受傷事故の危険性にさらされている。

総務省消防庁で、消火活動時における消防隊員の安全性の向上のため、消防隊員用個人防火装備に求められる機能が検討され、2011 年 5 月に「消防隊員用個人防火装備に係るガイドライン」¹⁾ (以下、「ガイドライン」という) が示された。現在、消防隊員用個人防火装備を導入するには、このガイドラインを参考とし、各消防本部等で仕様について検討している。

防火衣の耐熱性能については、消防隊員がフラッシュオーバー等の急激な火炎や放射熱に短時間ばく露された時に、熱環境から退避するまでの時間を確保するための断熱性を評価対象としている。しかし、火災発生建物内部で活動する際、個人防火装備は常に放射熱を受け続けており、短時間で強い放射熱を受けた場合以外でも、長時間一定の放射熱を受け続けた場合には熱傷を生じる可能性が考えられる。

そこで、消火活動における消防隊員の熱傷危険及び防火衣の受熱時の状況を把握することを目的として、検証を実施した。

2 実験

(1) 実験方法

防火衣等の着装状況を再現したモデル試料 (以下、「モデル試料」という) を、出力を制御した熱源による放射

熱に一定時間ばく露させ、防火衣等と皮膚との接触面の温度を記録する。

(2) 実験装置

IS09151 に基づく火災防護評価試験機 (株式会社大栄科学機器製作所製) を使用し、熱源をボルトスライダにより出力を無段階に変化可能なハロゲンヒーターとした。温度については、データロガー (江藤電気株式会社製、キャダック 21 9201A、9221A)、IS09151 熱量計及び K 熱電対を使用し、サンプリング周期を 1 秒に設定して、記録した。図 1 は、使用した実験装置を示したものである。

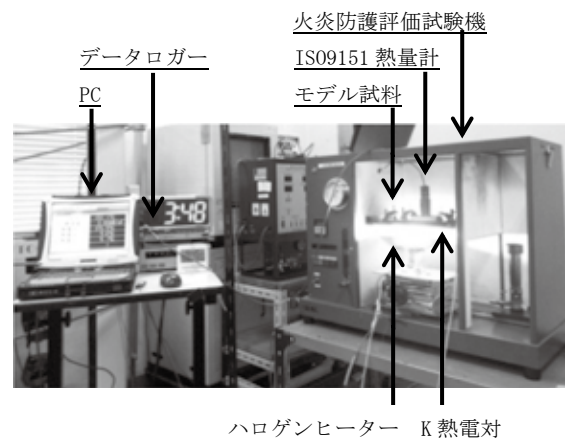


図 1 実験装置

* 装備安全課

(3) モデル試料

モデル試料には、図2に示す当庁で現在使用している特別救助隊員等用防火衣（以下、「防火衣」という）及び救助服を使用した。防火衣を構成する外衣、透湿防水層、裏地及び救助服をそれぞれ15cm四方に切断し、着用した状況となるよう、図3に示すように、外衣、透湿防水層、裏地、救助服の順に密着して重ね合わせてモデル試料とした。モデル試料は、最も危険側である、下着を着用していない部分が受熱した場合、かつ、それぞれの間に空気層がなかった場合を想定した条件とした。



図2 モデル試料に使用した防火衣及び救助服

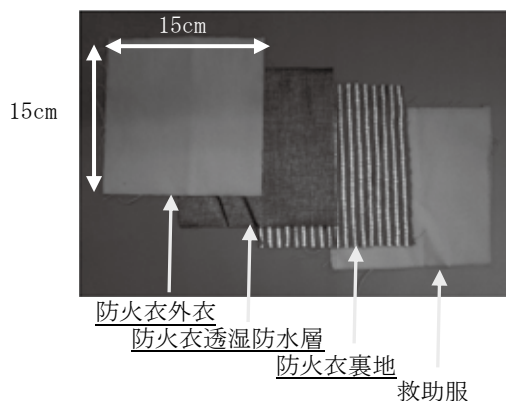


図3 モデル試料の重ね合わせ順序（表面）

(4) 実験条件

ガイドラインでは、消火活動時に受ける熱環境を、温度と熱流束の観点から、表1に示す4つの領域に分けて示している。

表1より、制限を受けない通常の消火活動時の熱環境は、熱流束が1 kW/m²から4 kW/m²程度であることから、ばく露させる熱流束の下限値を5 kW/m²とした。

また、防火衣の熱防護性試験において、熱流束80 kW/m²の火炎にばく露させる熱伝達性試験及び熱流束40 kW/m²の放射熱にばく露させる熱伝達性試験はあるが、それ

以外の熱流束による試験は行われていないことから、ばく露させる熱流束の上限値を35 kW/m²とし、5 kW/m²間隔で変化させた。

モデル試料を放射熱にばく露させる時間については、防火衣の熱防護性試験において、180℃の熱風循環炉に300秒ばく露した時の耐熱性を評価する試験方法があり、本実験では180℃よりもさらに高い温度の熱環境が主となることから、上限値を240秒とし、60秒間隔で変化させた。

表1 消火活動時に受ける熱環境

	環境	雰囲気温度 (℃)	熱流束 (kW/m ²)
①	火災初期及び残火処理時の消火活動に相当する最も低い熱環境	～100 程度	～1
②	制限を受けない通常の消火活動時の熱環境	100～160 程度	1～4
③	火災が拡大した時の熱環境	160～235 程度	4～10
④	火炎に巻き込まれた時及びフラッシュオーバーが発生し、短時間で退避しなければならない高い熱環境	235 程度～	10～

(5) 実験設定

図1の実験装置にモデル試料を設定した状況を図4に示す。実験の手順については、以下のとおりとした。

ア 全熱流束計を用いて、熱源から受ける放射熱流束を測定し、熱源を所定の出力に制御する。

イ 所定の時間、モデル試料を所定の放射熱にばく露し、K 熱電対により、防火衣外衣表面付近の雰囲気温度を測定し、ISO9151 熱量計により、防火衣等と皮膚との接触面の温度として、救助服裏面の温度を測定する。

ウ モデル試料を構成する各試料について、変色、炭化等の状況を画像により、表面及び裏面をそれぞれ記録する。

以上、アからウを、放射熱流束及びばく露させる時間をそれぞれ変えて実験を行った。

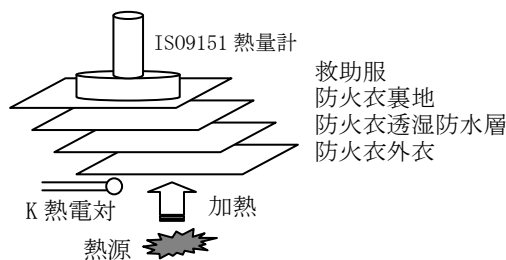


図4 モデル試料の設定状況

3 実験結果

(1) 温度

表2は、K 熱電対で測定した、防火衣外衣表面付近の雰囲気最高温度を示したもので、表3は、ISO9151 熱量計で測定した、救助服裏面の最高温度を示したものである。

表2 防火衣外衣表面付近の雰囲気最高温度 (°C)

熱流束 (kW/m ²)	放射熱にばく露した時間			
	60 秒	120 秒	180 秒	240 秒
35	387.4	410.9	420.1	459.3
30	348.7	370.0	377.2	386.4
25	276.4	288.4	301.4	320.0
20	242.4	260.0	271.8	276.5
15	212.9	224.0	228.1	235.2
10	173.3	179.3	186.0	191.0
5	135.9	139.9	141.1	144.2

表3 救助服裏面の最高温度 (°C)

熱流束 (kW/m ²)	放射熱にばく露した時間			
	60 秒	120 秒	180 秒	240 秒
35	144.7	204.7	296.8	※400 以上
30	102.7	163.6	230.7	278.6
25	86.8	146.6	203.9	230.8
20	75.4	117.8	168.7	216.2
15	63.5	103.9	133.3	148.0
10	48.7	78.8	86.9	113.5
5	38.2	56.4	75.8	86.9

※ 400°C以上の範囲で、測定エラーのため、範囲を示す。

(2) 防火衣等の受熱状況

表4は、各熱流束の放射熱をばく露させた時の、ばく露時間ごとの防火衣外衣の表面及び裏面の受熱状況を示したもので、表5は救助服の表面及び裏面の受熱状況を示したものである。

防火衣外衣について、受熱状況を目視で観察したところ、表4から、熱流束 35 kW/m²で、表面及び裏面ともに、ばく露時間 60 秒、120 秒、180 秒、240 秒のいずれも炭化が認められた。

15 kW/m²、20 kW/m²、25 kW/m²、30 kW/m²で、表面及び裏面ともに、60 秒、120 秒、180 秒、240 秒のいずれも変色が認められた。

5 kW/m²、10 kW/m²で、表面及び裏面ともに、60 秒、120 秒、180 秒、240 秒のいずれも変色は認められなかった。

表4 防火衣外衣の受熱状況

熱流束 (kW/m ²)		放射熱にばく露した時間			
		60 秒	120 秒	180 秒	240 秒
35	表面				
	裏面				
30	表面				
	裏面				
25	表面				
	裏面				
20	表面				
	裏面				
15	表面				
	裏面				
10	表面				
	裏面				
5	表面				
	裏面				

表5 救助服の受熱状況

熱流束 (kW/m ²)		放射熱にばく露した時間			
		60 秒	120 秒	180 秒	240 秒
35	表面	 変色	 変色	 変色	 変色
	裏面	 変色	 変色	 変色	 変色
30	表面	 変色	 変色	 変色	 変色
	裏面	 変色	 変色	 変色	 変色
25	表面	 変色	 変色	 変色	 変色
	裏面	 変色	 変色	 変色	 変色
20	表面	 変色	 変色	 変色	 変色
	裏面	 変化なし	 変色	 変色	 変色
15	表面	 変化なし	 変色	 変色	 変色
	裏面	 変化なし	 変化なし	 変化なし	 変色
10	表面	 変化なし	 変化なし	 変化なし	 変化なし
	裏面	 変化なし	 変化なし	 変化なし	 変化なし
5	表面	 変化なし	 変化なし	 変化なし	 変化なし
	裏面	 変化なし	 変化なし	 変化なし	 変化なし

救助服について、受熱状況を目視で観察したところ、表5から、25 kW/m²、30 kW/m²、35 kW/m²で、表面及び裏面ともに、60 秒、120 秒、180 秒、240 秒のいずれも変

色が認められた。

20 kW/m²で、60 秒では表面のみに変色が認められ、120 秒、180 秒、240 秒では表面及び裏面ともに変色が認められた。

15 kW/m²で、60 秒では表面及び裏面ともに変色は認められないが、120 秒、180 秒では表面のみに変色が認められ、240 秒では表面及び裏面ともに、変色が認められた。

5 kW/m²、10 kW/m²で、表面及び裏面ともに、60 秒、120 秒、180 秒、240 秒のいずれも変色は認められなかった。

(3) 放射熱伝達指数

熱傷危険を評価するため、ISO9151 等の熱伝達性試験で定める、断熱性を評価する指標である放射熱伝達指数 (Radiant Heat Transfer Index (以下、「RHTI」という)) に着目し、分析を行った。

RHTI12 は、初期温度から 12℃上昇するために要する時間 (秒) を示す。これは、人間の皮膚の表面温度が平均 32℃という前提を基にして、皮膚表面温度が 12℃上昇し、皮膚に痛みを感じる温度である 44℃に達するまでに要する時間を示している。

RHTI24 は、初期温度から 24℃上昇するために要する時間 (秒) を示す。これは、同様に、皮膚表面温度が 24℃上昇し、Ⅱ度熱傷を生じる温度である 56℃に達するまでに要する時間を示している。

RHTI24-RHTI12 は、初期温度から 12℃上昇した後、24℃まで上昇するために要する時間 (秒) を示す。これは、皮膚に痛みを感じた後、Ⅱ度熱傷を生じる温度に達するまでに要する時間を示している。

表6は、放射熱伝達指数について、RHTI12、RHTI24、RHTI24-RHTI12、(RHTI24-RHTI12)/RHTI12をそれぞれ分析した結果を示したものである。なお、熱流束 5 kW/m²及び 10 kW/m²の放射熱を 60 秒ばく露した条件では、初期温度から 24℃上昇しなかったため、RHTI24 を分析できないことから、各条件の平均値ではなく、各熱流束を 180 秒ばく露した時の結果から放射熱伝達指数を分析した。

図5は、RHTI12、RHTI24、RHTI24-RHTI12 をばく露させた放射熱流束で比較したものである。

表6 放射熱伝達指数の分析結果

熱流束 (kW/m ²)	RHTI12 (秒)	RHTI24 (秒)	RHTI24 -RHTI12 (秒)	(RHTI24 -RHTI12) /RHTI12
35	21	30	9	0.43
30	23	34	11	0.48
25	23	34	11	0.48
20	27	41	14	0.52
15	31	48	17	0.55
10	40	66	26	0.65
5	50	85	35	0.70

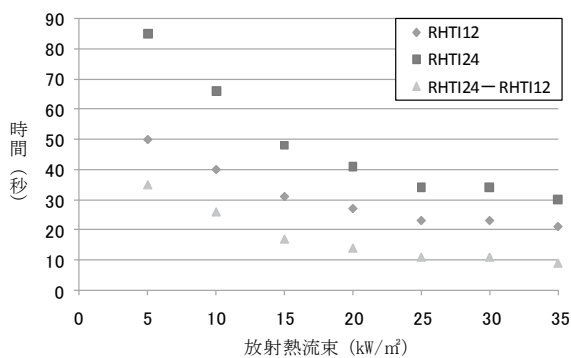


図5 放射熱伝達指数の比較

4 考察

(1) 放射熱伝達指数について

表3及び表6の RHTI24 の分析結果から、熱流束が 5 kW/m² から 35 kW/m² の放射熱をそれぞれ一定の時間受け続けた場合（熱流束 5 kW/m² 及び 10 kW/m² の放射熱を 60 秒ばく露した場合を除く）には、熱傷を生じる恐れがあるといえる。

また、表6及び図5から、RHTI12 と RHTI24-RHTI12 を比較すると、ばく露させた放射熱流束に関係なく、RHTI24-RHTI12 の方が小さい値を示している。例として、RHTI24-RHTI12 は、RHTI12 に対して、熱流束 5 kW/m² の放射熱ばく露では 0.7 倍、熱流束 35kW/m² の放射熱ばく露では 0.43 倍である。

このことから、放射熱を受けてから痛みを感じるまでの時間よりも、痛みを感じてからⅡ度熱傷を生じるまでの時間の方が短いことがわかる。

そのため、放射熱ばく露時に痛みを感じた場合には、すぐに熱環境から退避する必要があるといえる。

(2) 放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要する時間について

どの実験条件においても、放射熱ばく露終了後、救助服裏面温度が上昇し続けたことから、放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要する時間を分析した。

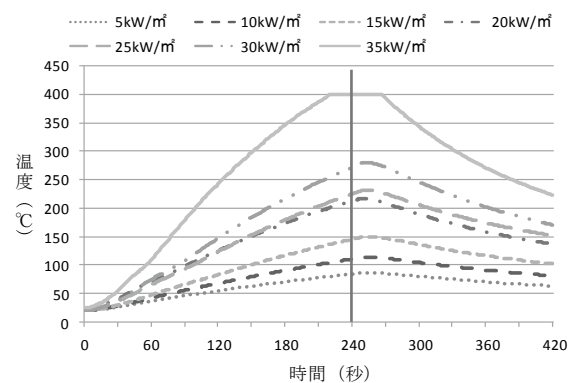
表7は、放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要した時間を示したものである。なお、熱流束 35 kW/m² の放射熱に 240 秒ばく露した時について、放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要した時間の分析値は、400℃以上の範囲における測定エラーのため、分析できなかった。そのため、図6に示す放射熱に 240 秒ばく露時の救助服裏面の温度変化の傾向から外挿して推定値を示した。

図7は、放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要する時間を熱流束ごとにばく露時間で比較したものである。なお、熱流束 35 kW/m² の放射熱に 240 秒ばく露した時の分析値は、推定値を表示した。

表7 放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要した時間（秒）

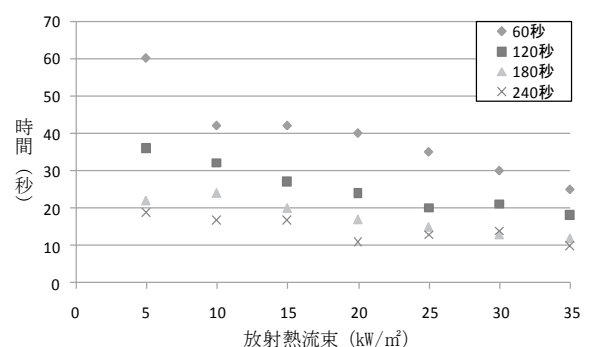
熱流束 (kW/m²)	放射熱ばく露時間			
	60 秒	120 秒	180 秒	240 秒
35	25	18	12	※10 程度
30	30	21	13	14
25	35	20	15	13
20	40	24	17	11
15	42	27	20	17
10	42	32	24	17
5	60	36	22	19

※ 400℃以上の範囲における測定エラーにより、分析不能のため、推定値を示した。



※ 放射熱流束 35 kW/m² の 400℃以上の範囲については、測定エラーのため 400℃で表示した。

図6 放射熱に 240 秒ばく露時の救助服裏面の温度変化



※ 熱流束 35 kW/m² の放射熱に 240 秒ばく露した時の分析値は、推定値を表示した。

図7 放射熱ばく露終了後から温度降下開始までに要した時間の比較

以上のことから、熱環境から退避した後も、防火衣等と皮膚との接触面の温度は、一定の時間上昇し続け、すぐには降下し始めないといえる。

そこで、本実験条件のうち、放射熱ばく露終了後も温度が上昇することで、痛みまたは熱傷を生じる恐れがある場合を抽出し、ばく露終了時と温度降下開始時の温度を表8に示した。

表8 放射熱ばく露終了後に痛みまたは熱傷を生じる恐れがある場合

熱流束 (kW/m ²)	5	10	15
放射熱ばく露時間(秒)	120	60	60
放射熱ばく露終了時の温度(℃)	52.6	40.8	53.5
温度降下開始時の温度(℃)	56.4	48.7	63.5
温度降下開始までに要した時間(秒)	36	42	42

表8から、熱流束10kW/m²の放射熱に60秒ばく露した場合は、ばく露終了時には痛みを生じる温度である44℃に達していないが、ばく露終了後、温度が上昇し続け44℃を超え、痛みを生じる恐れがあることがわかる。

さらに、熱流束5 kW/m²の放射熱に120秒ばく露した場合及び15 kW/m²の放射熱に60秒ばく露した場合は、ばく露終了時にはⅡ度熱傷を生じる温度である56℃に達していないが、ばく露終了後、温度が上昇し続け56℃を超え、Ⅱ度熱傷を生じる恐れがあることがわかる。

このことから、放射熱にばく露し、熱傷を生じる恐れがあると考えられる場合には、熱環境から退避した後、早期に防火衣等の離脱及び身体の冷却を考慮する必要があるといえる。

5 まとめ

本検証から以下のことを確認した。

- (1) フラッシュオーバー等の急激な火炎や放射熱にばく露されなくとも、熱流束が5 kW/m²から35 kW/m²の放射熱を一定の時間受け続けた場合（熱流束5 kW/m²及び10 kW/m²の放射熱を60秒ばく露した場合を除く）には、熱傷を生じる恐れがある。
- (2) 放射熱を一定の時間受け続けた場合の防火衣の受熱状況は、熱流束が5 kW/m²から10 kW/m²の場合では変化なく、15 kW/m²から30 kW/m²の場合では変色し、35kW/m²の場合では炭化する。
- (3) 放射熱を一定の時間受け続けた場合の防火衣等と皮膚との接触面の温度は、熱環境から退避した後も、一定の時間上昇し続け、すぐには降下し始めない。そのため、放射熱にばく露し、熱傷を生じる恐れがあると考えられる場合には、熱環境から退避した後、早期に防火衣等の離脱及び身体の冷却を考慮する必要がある。
- (4) 放射熱を受け始めてから痛みを感じるまでの時間よりも、痛みを感じ始めてからⅡ度熱傷を生じるまでの時

間の方が短い。そのため、放射熱ばく露時に痛みを感じた場合には、すぐに熱環境から退避する必要がある。

6 おわりに

現在、消防隊員用個人防火装備は、フラッシュオーバー等の急激な火炎や放射熱に短時間ばく露されたときに、熱環境から退避するまでの時間を確保するための断熱性を評価対象としている。

本検証では、熱流束が5 kW/m²から35 kW/m²程度の放射熱を一定の時間受熱し続けた場合、熱傷を生じる恐れがあることを確認した。

そこで、今後、本検証で実施した条件よりもさらに低い熱環境である熱流束が1 kW/m²から4 kW/m²程度の放射熱についても、受熱時間との関係で熱傷危険を評価する必要がある。

[参考文献]

- 1) 総務省消防庁：消防隊員用個人防火装備に係るガイドライン、2011年5月