

避難所で使用する物資の燃焼に関する検証

菊地 遼輔*, 大森 俊介**, 細谷 昌右***

概要

避難所物資に潜在する燃焼危険及び避難所居住スペースの安全確保について検討するため、避難所で使用する物資が燃焼した時の受熱側の熱流束等の測定を目的とした実験を実施した。

避難所物資を間仕切、敷物及び掛物に分類し、それぞれの内で最大の熱流束となるサンプルを確認し、居住スペースを再現して燃焼実験をしたところ、火源からの距離 0.5m における熱流束は 14.1kW/m²、距離 1m での熱流束は 8kW/m²であった。このことから、居住スペース間の避難通路幅を 1m 以上確保すると、熱流束の観点からは延焼防止に有効であることが分かった。また、防災製品の使用により最大の熱流束に到達するまでの時間を遅延させられることも分かった。

1 はじめに

近年、日本各地で台風や豪雨による大規模な水害や津波等を伴う震災が頻発している(表1)。これらの災害によって多くの人が家屋の倒壊等の被害に遭い、避難所での生活を余儀なくされている。

東京都防災会議が策定した東京都地域防災計画震災編(令和元年修正)では、東京湾北部地震、多摩直下地震、元禄型関東地震及び立川断層帯地震のうち、東京湾北部地震が発生した場合に避難人数が最大になると予想している。東京湾北部地震では、マグニチュード7.3、最大震度7の地域(0.1%)とともに、震度6強の地域が広範囲(24.4%)に発生し、最大避難者は約339万人にも上る予想である²⁾。このようなことから、避難所が命を守るための施設としての重要性を増していることが分かる。避難所は不特定多数の人々が共同して生活する場であ

り、防火、防犯及び衛生等に係るルールを守ることが安全な避難生活を送るうえで必要である。東日本大震災の教訓を受け災害対策基本法が改正され、平成25年8月に内閣府により策定された「避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針」には、「防火担当責任者の指定、喫煙場所の指定、石油ストーブ等からの出火防止、ゴミ集積場等に放火されないための定期的な巡回警備等の防火対策を図ること。」及び「火災発生時に安全に避難するため、避難所の防火安全に係る遵守事項を避難所の出入り口等に掲示すること。」が防火対策として示されている(図1)。

しかし、当該指針や避難所管理運営の指針(都福祉保健局)等には、避難者の生活する居住スペースを構成する物資(以下「避難所物資」という。)の防火性能等については言及されていない。

表1 最近の水害及び地震被害¹⁾

名称	概要	避難所への避難者数(最大時)
平成29年7月九州北部豪雨	平成29年7月5~6日 朝倉市、東峰市(福岡県)、日田市(大分県)の洪水害、土砂災害等	2000
平成30年7月豪雨	平成30年6月28日~7月8日 西日本豪雨、広島県、愛媛県の土砂災害、倉敷市真備町(岡山県)の洪水害等	28000
令和元年房総半島台風	令和元年9月 台風第15号「ファクサイ」による房総半島を中心とした各地に暴風等による被害	2200
令和元年東日本台風	令和元年10月 台風第19号「ハギビス」による東日本の広範囲での大雨で多数の河川氾濫等の被害	237000
令和2年7月豪雨	令和2年7月3日~31日 熊本豪雨、西日本から東日本の広範囲かつ長期間の大雨により、球磨川(熊本県)等の河川氾濫や土砂災害被害	11000

避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針(内閣府)
①防火担当責任者の指定
②喫煙場所の指定
③石油ストーブ等からの出火防止
④ゴミ集積場等に放火されないための定期的な巡回警備等
⑤避難所の防火安全に係る遵守事項を避難所の出入り口等に掲示
避難所及び応急仮設住宅の防火安全対策の策定について(当庁)
①防火担当責任者の指定
②火気管理の徹底
③消防用設備等の確認
④避難施設等の管理
⑤放火防止対策
⑥自衛消防組織の編成等
⑦在館者への遵守事項の周知徹底

図1 避難所の防火安全対策

例えば、近年、スマートフォン等の小型電気製品が一般に普及し、小型で大量の電気を蓄えることができるリチウムイオン電池が使用され、避難者も居住スペースに持ち込むことが予想される。当庁管内のリチウムイオン

* 服務監察課 ** 安全技術課 *** 第十消防方面本部

電池に関連する火災は、平成27年に26件だったものが令和2年には104件³⁾と増加の一途をたどっている。リチウムイオン電池から出火し、避難者が持ち込んだ衣類

等の可燃物や避難所物資に延焼すれば、避難者は大きな危険に晒されることとなり、避難所物資の防火安全対策は喫緊の課題であると言える。

また、当庁では東京都地域防災計画の防火安全対策について策定しており、「避難所及び応急仮設住宅の防火安全対策の策定について（平成24年12月18日24予第932号予防部長通知）」に基づき指導を実施しているところである。このなかで、避難経路図の例として「1m幅通路」を記載しているが、例示している「1m幅通路」が避難や火災の延焼防止のために、どの程度有効であるのか明確な根拠は示されていない。

本検証では、これらの課題を受け、避難所物資の有する燃焼危険及び安全な寝床の配置について検討するための実験を実施した。また、検証結果から避難所における防火安全対策の資料等に活用するシミュレーション映像作成についても検討する。

2 避難所実態把握のためのアンケート

検証に先立ち、避難所物資の備蓄状況の実態を把握するため、都内23区及び19市の計42自治体（未回答5自治体含む）にアンケートを実施した。

その結果、毛布、ブルーシート、段ボール、カーテン及びワンタッチテントを備蓄している自治体が多く、防火性能を有する避難所物資を備蓄している自治体は多くないことが分かった（表2）。避難所物資の選定にあたっては防火性能よりも価格が重視される傾向にあり、限られた備蓄スペースに収納できるように苦慮しているとの回答も見られた。これらの備蓄物資を参考に、表3の実験サンプルについて燃焼実験を実施した。表3のポリエステル製のカーテン（防災）（以下「ポリカーテン（防災）」という。）、シャワーカーテン（防災）、段ボール（防災）及び毛布（防災）は、公益財団法人日本防災協会（以下「防災協会」という。）の防災表示がされた防災物品及び防災

表2 避難所アンケート結果

備蓄物資	備蓄自治体数	使用用途と自治体数※1	
毛布	22	敷物11・掛物34	
毛布（防災）	13		
段ボール	13	間仕切 ※2・※3	
ブルーシート	30		
カーテン	13		
カーテン（防災）	7		
ワンタッチテント	17		
ワンタッチテント（防災）	2		
カーベット	12		敷物
カーベット（防災）	1		
エアーマット	11		
アルミマット	10		
災害備蓄マット	9		
災害備蓄マット（防災）	2		
ビニールござ	4		
ビニールござ（防災）	1		
布団セット	3		
寝袋	5		
寝袋（防災）	1		
サブバルブランケット	9	掛物	

※1 備考欄は複数回答可のため備蓄自治体数を上回ることがある。
 ※2 段ボールをベッドとして使用する自治体数は7あった。
 ※3 ブルーシートを敷物として使用する自治体数は26あった。

製品である。災害備蓄マットBは防災製品ではないが、本体の一部に防災協会認定の材料を使用している。

3 検証方法

(1) 避難所物資の燃焼性状

ア 実験サンプル個別の燃焼実験

表3（間仕切、敷物及び掛物）のそれぞれのうちで、最大の放射熱流束（以下「熱流束」という。）となる実験サンプル（以下「最大熱流束サンプル」という。）を特定するため、燃焼実験を実施した。

また、避難通路幅1mの延焼防止等に対する有効性を確認するため、火源からの距離毎（0.5m、1m及び1.5m）に熱流束が最大となる箇所を確認した。

熱流束等の測定のため、黒体スプレー（耐熱温度500℃、放射率0.94）で黒体化したケイ酸カルシウム板10mmに熱流束計及び集熱板付きT型熱電対を高さ及び距離それぞれ0.5m、1m及び1.5mの9点に設置した装置を作成した（図2）。丸で囲まれた数字は測定位置を指す。実験サンプルへの着火にはライターを使用し、着火しない場合にはガストーチを使用した。熱流束等の測定は、各実験サンプルにつき3回ずつ実施した。なお、段ボールは、はじめにWF0.9m高の中しんの向きを縦（以下「フルート縦」という。）又は横（以下「フルート横」という。）に変えて燃焼させ、熱流束の値が大きかった向きで他の高さ及び高さも燃焼させた（図3）。

表3 実験サンプル

間仕切	
名称	材質
綿カーテン	綿
ポリカーテン	ポリエステル
ポリカーテン（防災）	
ワンタッチテント	
シャワーカーテン	塩化ビニル樹脂
シャワーカーテン（防災）	
ブルーシート	ポリエチレン
段ボールBF0.9m高	紙 BF：Bフルート厚さ3mm AF：Aフルート厚さ5mm WF：A+Bフルート厚さ8mm
段ボールBF1.5m高	
段ボールBF1.8m高	
段ボールAF0.9m高	
段ボールAF1.5m高	
段ボールAF1.8m高	
段ボールWF0.9m高	
段ボールWF1.5m高	
段ボールWF1.8m高	
段ボール（防災）	

敷物	
名称	材質
キルトラグ	側生地（表：綿、裏：ポリプロピレン） 詰め物（上側：ポリエステル、下側：ウレタンフォーム）
アルミマット	表面：PETアルミ蒸着フィルム 本体：ポリエチレンフォーム
寝袋	ポリエステル
カーベット	
災害備蓄マットA	
災害備蓄マットB	PET
ブルーシート	ポリエチレン

掛物	
名称	材質
毛布	ポリエステル （平置、2つ折、4つ折、8つ折、丸めの5条件実施）
毛布（防災）	

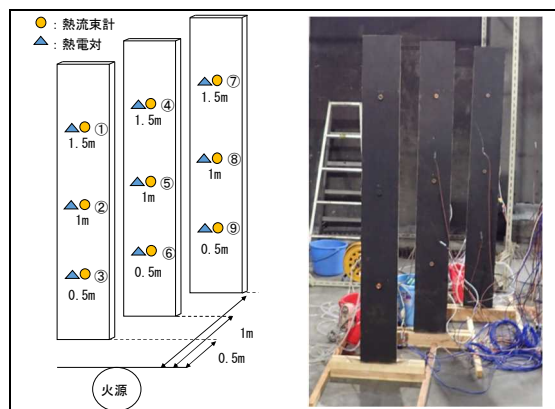


図2 熱流束及び熱電対の設定状況

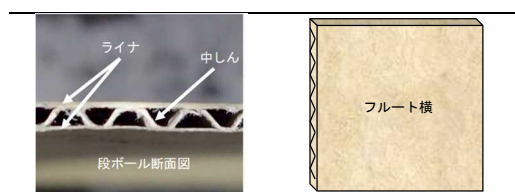


図3 段ボールの構造

イ 避難所居住スペースの再現実験

間仕切、敷物及び掛物それぞれの最大熱流束実験サンプルを組合せ、避難者が持ち込んだ衣類等と仮定したウエス4kg及び衣類4kgの合計8kgの可燃物を設定した寝床（以下「居住スペース」という。）を作成し、前ア同様の測定条件で燃焼実験を実施した。可燃物は、間仕切と接する位置に4kgずつ置きガストーチで点火した。

また、居住スペースの一部を防災製品に替えた燃焼実験により、その延焼防止効果の確認も実施した。

(2) その他の方法による延焼抑制

既に備蓄してある避難所物資が防災製品以外の場合に、その防火安全性を高める方法を模索するための燃焼実験を実施した。実験対象は、前(1)、アの間仕切のうち燃焼したものとし、以下のアからオの処置をして前(1)、アの測定条件で燃焼させた（表4）。

なお、ウからオの処置は段ボールに対してのみ実施した。

表4 実験サンプルに対する処置

間仕切種別	処置方法
綿カーテン	防災処理
ワンタッチテント	不燃処理
シャワーカーテン	生地処理（段ボールのみ）
ブルーシート	アルミ処理（段ボールのみ）
段ボールAF0.9m高	塞ぎ処理（段ボールのみ）

ア 防災薬剤散布

防災薬剤（主成分：ケイ酸ナトリウム）は、防災協会の防災性能試験（使用試験布：綿、処理方法：浸漬法）に適合する溶液を間仕切両面に蓄圧スプレーを用いて散

布し、乾燥させた（以下「防災処理」という。）。

イ 不燃薬剤塗布

不燃薬剤（液型水性ウレタン難燃クリヤー塗料、主成分：1-(2-メトキシ-2-メチルエトキシ)-2-プロパノール、N-メチル-2-ピロリドン）は、不燃材料上に塗布することで不燃材料として国土交通大臣の認定（性能評価）を取得した水性特殊ウレタン系樹脂塗料を間仕切両面にローラーを用いて塗布し、乾燥させた（以下「不燃処理」という。）。

ウ 防災生地貼付

防災協会の防災表示のされた生地を使用し、段ボール両面を隙間なく覆うように設定し、両端をクリップで固定した（以下「生地処理」という。）。

エ アルミホイル貼付

段ボール両面を表面に隙間ができないようアルミホイルを巻き、両端をクリップで固定した（以下「アルミ処理」という。）。

オ フルート塞ぎ

フルート横の状態、段ボールの両端にガムテープを張り、フルートを塞いだ（以下「塞ぎ処理」という。）。

4 検証結果

(1) 避難所物資の燃焼性状

ア 実験サンプル個別の燃焼実験

燃焼実験の結果一覧を表5に、燃焼した実験サンプルについてはその状況を図4に示す。燃焼回数はライター又はガストーチで着火し、燃焼が継続したものを計上した。表5に示す最大熱流束は、3回実施した燃焼実験で測定された最大値である。

なお、最大熱流束0.5kW/m²未満の実験サンプルについては、ノイズのピークで最大熱流束のピークが判別できないため、最大熱流束到達時間は求めなかった。

(ア) 間仕切

段ボールWF厚さ8mm（以下「WF」という。）0.9m高の中しんの向きによる燃焼比較の結果は、フルート縦で1.8kW/m²、フルート横で2.3kW/m²となり、フルート横の熱流束が0.5kW/m²高かったため、他の厚み及び高さもフルート横の状態、段ボールの両端にガムテープを張り、フルートを塞いだ（以下「塞ぎ処理」という。）。

間仕切の中では、WF1.8m高が最大熱流束となった。熱流束は、測定位置①9kW/m²、⑥3.9kW/m²及び⑨1.6kW/m²で、最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は161±22秒であった。ケイ酸カルシウム板表面最大温度は108.2℃（上昇温度73.8℃）であった。段ボール各種及び綿製のカーテン（以下「綿カーテン」という。）は、着火後、勢い良く燃焼した。ポリエステル製のカーテン（以下「ポリカーテン」という。）は、着火後、小さな火炎と液滴を生じながら暫く燃焼したが、自然鎮火した。ワンタッチテント及びブルーシートは、小さな火炎と液滴を生じながら燃焼が継続した。シャワーカーテンは、着火後、溶融しながら激しく燃焼した。ポリカーテン（防災）、シャワーカーテン（防災）、段ボ

ール（防災）は、溶融又は炭化するも燃焼は継続しなかった。

(イ) 敷物

敷物の中では、キルトラグが最大の熱流束となった。熱流束は、測定位置③0.18kW/m²、⑤0.06kW/m²及び⑧0.03kW/m²で、ケイ酸カルシウム板表面最大温度は34.1℃（上昇温度7.9℃）であった。キルトラグ及び災害備蓄マットBは、火勢が弱いものの燃焼が継続した。アルミマット、寝袋、カーペット及びブルーシートは、着火したのもあったが、火勢が弱く燃焼が継続しなかった。災害備蓄マットAは、ライター又はガストーチの炎で溶融し、燃焼は継続しなかった。

(ウ) 掛物

掛物の中では、丸めた毛布が最大の熱流束となった。測定位置③0.93kW/m²、⑥0.4kW/m²及び⑨0.1kW/m²で、最

大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は345±54秒であった。ケイ酸カルシウム板表面最大温度は40.4℃（上昇温度9.8℃）であった。毛布及び毛布（防災）のうちで、毛布の8つ折りは燃焼したが、それ以外は、燃焼は継続しなかった。

表5 実験サンプルの燃焼結果

間仕切						
	燃焼回数	最大熱流束位置	熱流束平均 (kW/m ²)	最大熱流束 (kW/m ²)	最大熱流束到達時間 (秒)	最大温度 (上昇温度) (°C)
綿カーテン	3/3	①	2.9±0.3	3.2	78±15	45.7 (15.9)
ポリカーテン	0/3	-	-	-	-	-
ポリカーテン(防災)	0/3	-	-	-	-	-
ワンタッチテント	3/3	③	0.13±0.01	0.13	-	20 (2.2)
シャワーカーテン	3/3	③	3.6±1.6	5.4	43±8	33.9 (12)
シャワーカーテン(防災)	0/3	-	-	-	-	-
ブルーシート	②	②	0.09±0.02	0.11	-	22.1 (2.7)
段ボールBF0.9m高	②	②	2.1±0.3	2.4	85±20	40.7 (23.3)
段ボールBF1.5m高	②	②	4.4±0.4	4.8	95±7	80.5 (47.1)
段ボールBF1.8m高	②	②	5.4±0.3	5.8	110±2	78.9 (43.3)
段ボールAF0.9m高	③	③	1.6±0.2	1.7	97±5	38.8 (25.5)
段ボールAF1.5m高	3/3	②	2.4±1.1	3.5	152±52	56.4 (32.9)
段ボールAF1.8m高	②	②	2.9±0.8	3.9	161±73	51 (30.3)
段ボールWF0.9m高 (フルート横)	③	③	2.2±0.1	2.3	136±4	60.7 (30.7)
段ボールWF0.9m高 (フルート縦)	③	③	1.8±0.2	1.8	137±7	61.1 (28.5)
段ボールWF1.5m高	②	②	6.4±1.8	8.5	153±12	113.6 (69.9)
段ボールWF1.8m高	②	②	6.2±2.6	9.0	161±22	108.2 (73.8)
段ボール(防災)	0/3	-	-	-	-	-

敷物						
	燃焼回数	最大熱流束位置	熱流束平均 (kW/m ²)	最大熱流束 (kW/m ²)	最大熱流束到達時間 (秒)	最大温度 (上昇温度) (°C)
キルトラグ	3/3	③	0.16±0.01	0.18	-	34.1 (7.9)
アルミマット	0/3	-	-	-	-	-
カーペット	0/3	-	-	-	-	-
カーペット(防災)	0/3	-	-	-	-	-
災害備蓄マットA	2/3	③	0.03±0.02	0.03	-	25.7 (1.2)
災害備蓄マットB	2/3	③	0.03±0.02	0.03	-	25.7 (1.2)
ブルーシート	0/3	-	-	-	-	-
寝袋	0/3	-	-	-	-	-
段ボールBF	0/3	-	-	-	-	-
段ボールAF	0/3	-	-	-	-	-
段ボールWF	0/3	-	-	-	-	-

掛物						
	燃焼回数	最大熱流束位置	熱流束平均 (kW/m ²)	最大熱流束 (kW/m ²)	最大熱流束到達時間 (秒)	最大温度 (上昇温度) (°C)
平置き毛布	0/3	-	-	-	-	-
8つ折り毛布	3/3	③	0.24±0.13	0.38	-	35.8 (7)
4つ折り毛布	0/3	-	-	-	-	-
2つ折り毛布	0/3	-	-	-	-	-
丸め毛布	3/3	③	0.66±0.27	0.93	345±54	40.4 (9.8)
平置き毛布(防災)	0/3	-	-	-	-	-
8つ折り毛布(防災)	0/3	-	-	-	-	-
4つ折り毛布(防災)	0/3	-	-	-	-	-
2つ折り毛布(防災)	0/3	-	-	-	-	-
丸め毛布(防災)	0/3	-	-	-	-	-

網掛部分：最大熱流束サンプル

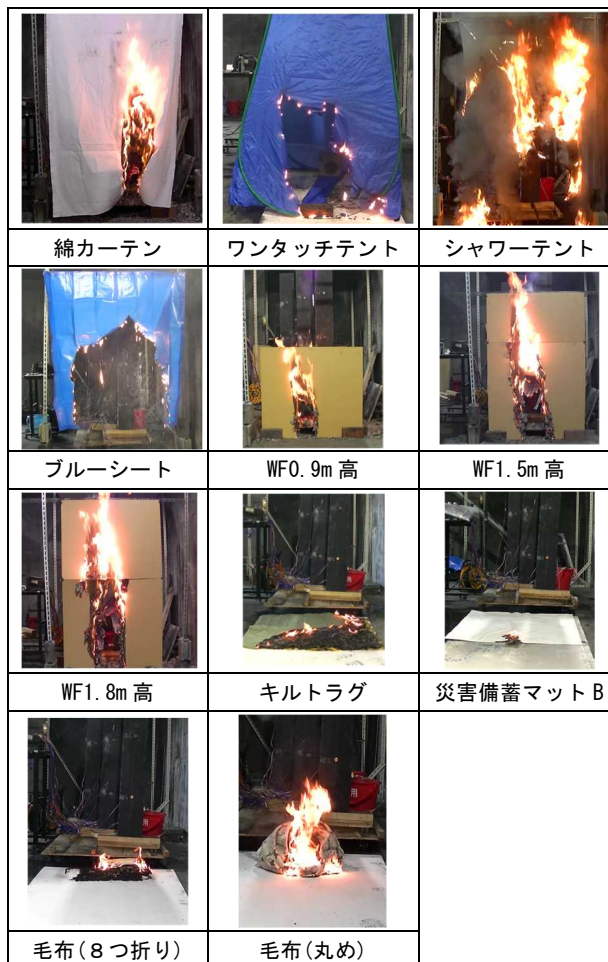


図4 実験サンプルの燃焼状況

イ 避難所居住スペースの再現実験

前アの最大熱流束サンプル（間仕切、掛物及び敷物）を組み合わせて居住スペースを作成し、燃焼実験を実施した(表6)。

表6 最大熱流束組み合わせ

	最大熱流束サンプル	最大熱流束
間仕切	段ボール WF1.8m高	9 kW/m ²
掛物	キルトラグ	0.18kW/m ²
敷物	毛布(丸め)	0.93kW/m ²

これに加え、この居住スペースの間仕切又は掛物若しくはその両方を防災製品に替えて燃焼実験を実施した(表7及び図5～7)。毛布(防災)の実験では、2つ折りにして可燃物を覆うように設定し、毛布(丸め)は可

燃物と接するように設置して着火した。

(ア) 再現実験No. 1

WF1. 8m高の間仕切単品の最大熱流束 9 kW/m^2 に比べ、 4.2 kW/m^2 増加し 13.2 kW/m^2 であった。最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は 153 ± 29 秒であった。可燃物の燃焼に伴い WF1. 8m、毛布（丸め）、キルトラグに延焼した。

(イ) 再現実験No. 2（毛布を防災に変更）

再現実験No. 1の毛布（丸め）を毛布（防災）にして2つ折りにして可燃物に覆うように設定したもので、最大熱流束は再現実験No. 1に比べ 0.9 kW/m^2 増加し 14.1 kW/m^2 であった。最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は 290 ± 31 秒で、平均値は137秒長くなった。可燃物の燃焼に伴い WF1. 8m高、毛布（防災）、キルトラグに延焼した。

(ウ) 再現実験No. 3（段ボール高さを0.9mに変更）

再現実験No. 1の間仕切高さを0.9mとしたもので、最大熱流束は再現実験No. 1に比べ 4.7 kW/m^2 減少し 8.5 kW/m^2 であった。最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は 156 ± 59 秒で、平均値は3秒長くなった。可燃物の燃焼に伴い、WF0. 9m、毛布（丸め）、キルトラグに延焼した。

(エ) 再現実験No. 4（段ボール高さを0.9m（防災）に変更）

再現実験No. 1の間仕切を段ボール（防災）0.9m高としたもので、最大熱流束は再現実験No. 1に比べ 6 kW/m^2 減少し 7.2 kW/m^2 であった。最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は 246 ± 24 秒で、平均値は93秒長くなった。可燃物の燃焼に伴い、毛布（丸め）、キルトラグに延焼し、その後、段ボール（防災）0.9m高に延焼した。

(オ) 再現実験No. 5（毛布を防災、かつ段ボール高さを0.9m（防災）に変更）

再現実験No. 1の間仕切を段ボール（防災）0.9m高、毛布（丸め）を毛布（防災）にして2つ折りにして可燃物に覆うように設定したもので、最大熱流束は再現実験No. 1に比べ 5.3 kW/m^2 減少し 7.9 kW/m^2 であった。最大熱流束到達時間（平均値±標準偏差）は 441 ± 147 秒で、平均値は288秒長くなった。可燃物の燃焼に伴い、毛布（防災）、キルトラグに延焼し、その後、段ボール（防災）0.9m高に延焼した。

表7 再現実験の熱流束の比較

再現実験No.	間仕切	掛物	敷物	燃焼回数	最大熱流束位置	熱流束平均 (kW/m^2)	最大熱流束 (kW/m^2)	最大熱流束到達時間 (秒)	最大温度 (上昇温度) ($^{\circ}\text{C}$)
1	WF1. 8m高	毛布(丸め)	キルトラグ	3/3	②	10.7 ± 2.9	13.2	153 ± 29	121.5 (107.9)
2	WF1. 8m高	毛布(防災)			③	11.1 ± 3	14.1	290 ± 31	131.7 (116)
3	WF0. 9m高	毛布(丸め)			6.6 ± 1.6	8.5	156 ± 59	93.6 (68.2)	
4	段ボール(防災)	毛布(丸め)			5.8 ± 1.2	7.2	246 ± 24	103.9 (92.6)	
5	0. 9m高	毛布(防災)			5.8 ± 1.8	7.9	441 ± 147	97 (75.9)	

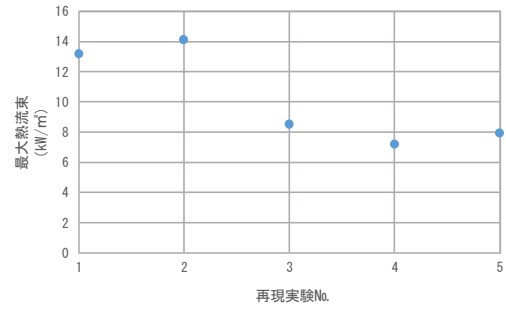


図5 再現実験の最大熱流束の比較

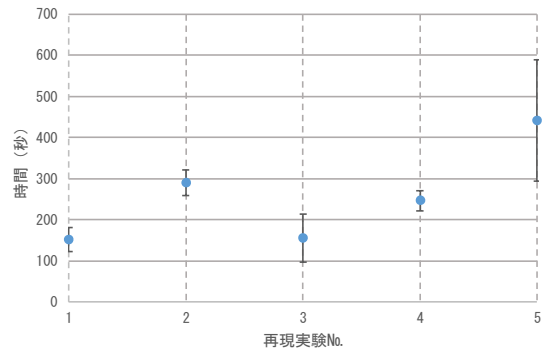


図6 再現実験による最大熱流束到達時間の比較

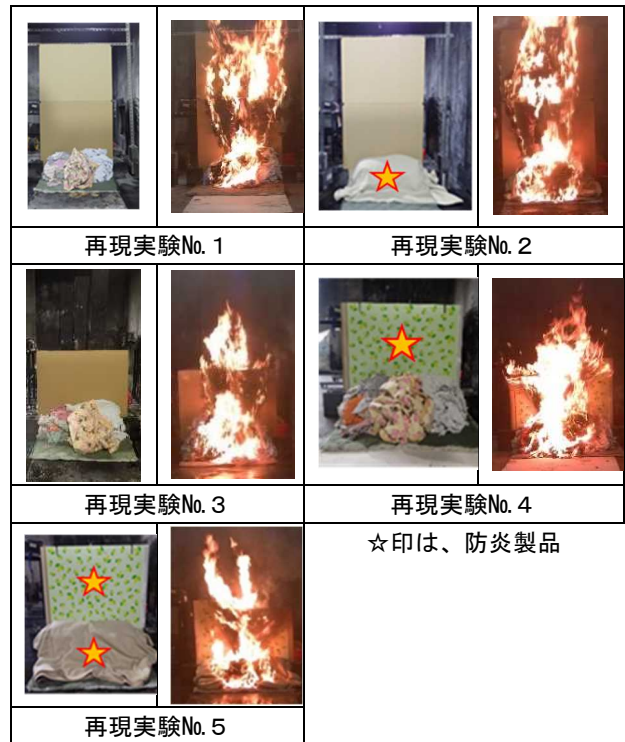


図7 再現実験の設定及び燃焼状況

(2) その他の方法による延焼抑制

各処理を施した実験サンプルの燃焼結果及び燃焼状況を示す（表8及び図8～9）。表7中の「未処理」の欄の

数値は、表5に示す各実験サンプルの数値を転記したものである。

なお、最大熱流束が0.5kW/m²未満の実験サンプルについては、ノイズのピークで最大熱流束のピークが判別できないため、最大熱流束到達時間は求めなかった。

ア 綿カーテン

防災処理は燃焼が継続しなかった。一方、不燃処理は燃焼した。未処理の最大熱流束3.2 kW/m²と比較して、不燃処理の最大熱流束は10.6 kW/m²で7.4kW/m²増加し、最大熱流束到達時間は17秒短くなった。

イ ワンタッチテント及びブルーシート

燃焼の仕方に違いはあるものの防災及び不燃処理共に燃焼した。ワンタッチテントの最大熱流束は未処理0.13kW/m²と比較して、防災処理0.17kW/m²で0.04kW/m²増加、不燃処理0.13kW/m²で増減しなかった。ブルーシートの最大熱流束は未処理0.11kW/m²と比較して、防災処理0.14kW/m²で0.03kW/m²増加、不燃処理0.09kW/m²で0.02kW/m²減少した。

ウ シャワーカーテン

防災及び不燃処理共に燃焼した。最大熱流束は未処理5.4kW/m²と比較して、防災処理1.2kW/m²で4.2kW/m²減少、不燃処理1.6 kW/m²で3.8kW/m²減少した。最大熱流束到達時間は、防災処理が1秒長くなり、不燃処理は4秒長くなった。

エ 段ボール厚み5mm（以下「AF」という。）0.9m高

全処理サンプルが燃焼した。最大熱流束は未処理1.7kW/m²と比較して、防災処理1.5kW/m²で0.2kW/m²減少、不燃処理2.9 kW/m²で1.2kW/m²増加、アルミ処理9.7kW/m²で8kW/m²増加、生地処理は6.6kW/m²で4.9kW/m²増加、塞ぎ処理は1.6kW/m²で0.1kW/m²減少した。最大熱流束到達時間は、防災処理が14秒長く、不燃処理は4秒短く、アルミ処理は2秒短く、生地処理は4秒短く、塞ぎ処理は1秒短くなった。

表8 各種処理を施した間仕切の燃焼結果

品名	処理方法	燃焼回数	最大熱流束位置	熱流束平均 (kW/m ²)	最大熱流束 (kW/m ²)	最大熱流束到達時間 (秒)	最大温度 (上昇温度) (°C)
綿カーテン	未処理	3/3	①	2.9±0.3	3.2	78±12	45.7 (15.9)
	防災処理	0/1	-	-	-	-	-
	不燃処理	1/1	①	-	10.6	61	40.2(22.6)
ワンタッチテント	未処理	3/3	③	0.13±0.01	0.13	-	20 (2.2)
	防災処理	1/1	③	-	0.17	-	15.4 (1.8)
	不燃処理	1/1	③	-	0.13	-	16.5(2.9)
ブルーシート	未処理	3/3	②	0.09±0.02	0.11	-	22.1 (2.7)
	防災処理	1/1	①	-	0.14	-	15.8(2.6)
	不燃処理	1/1	①	-	0.09	-	17.5(0.8)
シャワーカーテン	未処理	3/3	③	3.6±1.6	5.4	43±7	33.9 (12)
	防災処理	1/1	②	-	1.2	44	23.5(5.2)
	不燃処理	1/1	③	-	1.6	47	25.7(10.1)
AF0.9m高	未処理	3/3	③	1.6±0.2	1.7	97±4	38.8(25.5)
	防災処理	3/3	③	1.1±0.4	1.5	111±2	29.6(19.5)
	不燃処理	3/3	②	2.2±0.7	2.9	93±2	57.5 (35.7)
	アルミ処理	3/3	②	6.7±3	9.7	95±5	37.2(23.6)
	生地処理	3/3	③	4.9±1.5	6.6	93±15	57.3 (39.7)
	塞ぎ処理	3/3	③	1.6±0.1	1.6	96±9	33.5(21.9)

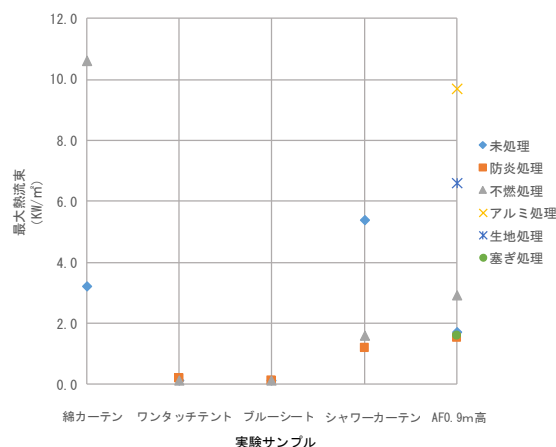


図8 各処理間仕切の最大熱流束の比較

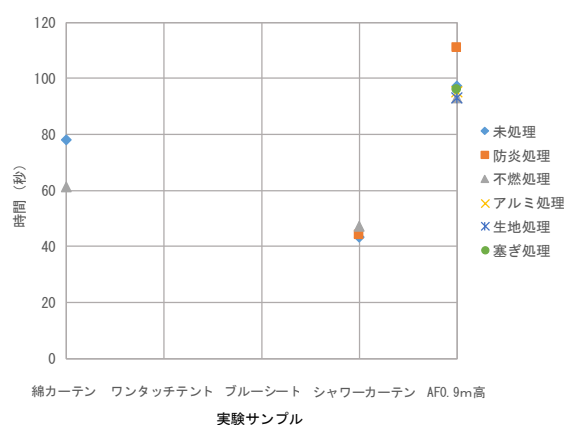


図9 各処理間仕切の最大熱流束到達時間の比較

5 考察

(1) 避難所物資の燃焼性状

ア 避難所物資サンプル個別の燃焼性状

ア) 段ボールの中しんの向き

WF0.9m高の中しんの向きを変えた実験では、フルート横で0.5 kW/m²大きい熱流束が測定された。フルート縦では、燃焼で生じた熱分解ガスが火炎の上昇気流に乗り速やかに上昇し、燃焼に関与する前に一部拡散したことにより若干熱流束が低く測定されたと考えられる。避難所では段ボール間仕切の中しんの向きを縦にすることで、燃焼により生じる熱流束を低減できると考えられる。

(イ) 間仕切

WF1.8m高が最大熱流束サンプルとなり、測定位置①で9kW/m²の熱流束を生じた。

一方、測定位置⑥では熱流束が3.9kW/m²であり、火源からの距離1mにおける危険性は、距離0.5mの避難通路幅に比して低いことが分かった。

(ウ) 敷物

平面状のため着火しても当該火炎による未燃焼部分への加熱が弱い熱分解ガスの発生及び供給速度が遅く、また、下部に空気層がないため燃焼は継続しないか継続

しても非常に緩慢であった。敷物は、折り目などで下部に空気層ができており、そこに沿って燃焼することがあった（燃焼は途中で自然鎮火した）ため、居住スペース設営の際には、折りジワをよくとってから敷くことで、燃焼を抑制することができると思われる。

(エ) 掛物

毛布の平置き、2つ折り、4つ折りは燃焼が継続しなかった。8つ折りにしたり丸めたりした状態では、容易に燃焼した。折り目を増やす、又は丸めることにより空気層が増えたことが原因であると考えられる。

以上のことから、避難所物資燃焼時の熱流束について、敷物及び掛物のような地面と接して平面的に使用する可燃物よりも、間仕切のように垂直に立て高さが出る物資の方が隣接スペース等への延焼危険性が高いことが分かった。このことから、居住スペース内に置く敷物や掛物は高さが出ないよう、畳まずになるべく平らな状態にすることが延焼防止のために重要であると考えられる。

また、防災物品及び防災製品の段ボール（防災）、カーペット（防災）及び毛布（防災）は、着火しても燃焼が継続せず、一般品と比較して、その防火性能は明らかであり、火災初期の微小な火源による着火防止に有効であると考えられる。

イ 避難所居住スペースの再現実験

(ア) 間仕切の延焼危険

間仕切高さ 1.8mの方が間仕切高さ 0.9mより最大熱流束は高いことから（図5）、間仕切は高いほうが延焼危険は高いと考えられる。

間仕切は燃焼すると大きな熱流束により延焼危険を高めることから、衣服類の可燃物を間仕切から離すため居住スペース中央付近に置くことは安全対策として有効である。

(イ) 1m通路幅の有効性

再現実験No.2の最大熱流束 14.1kW/m²は、木材が着火する強度の熱流束である。従って、木材を原料とする段ボール間仕切が避難通路幅 0.5mの反対側に存在する場合、燃焼により生じた熱流束で着火させる可能性があると言える。このときの火源から1m離れた測定位置④における熱流束は8kW/m²となっており、当庁の例示する「1m幅通路」は、再現実験においても熱流束の観点から延焼防止に有効な幅員であると考えられる（表9）。

また、木材以外の化学繊維等の間仕切が設置された場合も、その臨界熱流束（着火に十分な熱分解ガスを放出させる熱流束）は測定結果よりも大きい熱流束により着火することはないと考えられる（表10）。

(ウ) 防災製品の有効性

最大熱流束到達時間は、防災製品を使用することで遅らせられることが分かった（図6）。これは、2つ折りにして可燃物を覆っていた毛布（防災）が可燃物の火炎を

抑えたことで、段ボールに火炎が当たるまでの時間を遅延させたためと考えられる。

このため、防災製品の毛布がある場合は居住スペース内の衣類等の可燃物を覆い、最大熱流束到達時間を遅延させることが避難や初期消火を行う上で重要であると考えられる。

表9 熱流束の影響⁴⁾

熱流束 (kW/m ²)	影響等
1	快晴時の地表での太陽光
2.5	消防活動時の環境
4.5	人体皮膚が30秒以内にII度熱傷
6.4	人体皮膚が18秒以内にII度熱傷
10	人体皮膚が10秒以内にII度熱傷
13	木材から熱分解ガスが発生
16	人体皮膚が5秒でII度熱傷
20	フラッシュオーバー初期の床面における熱流束
80	フラッシュオーバー時の床面における熱流束

表10 化学繊維等の臨界熱流束⁵⁾

ポリマー種	臨界熱流束 (kW/m ²)
ポリエチレンテレフタレート	10-19
ポリプロピレン	15
ポリエチレン（高密度）	15
ポリウレタン	23
ポリ塩化ビニル	15-28

(2) その他の方法による延焼抑制

ア 綿カーテン

防災処理したものでは燃焼が継続しなかったことから、浸漬方法による防災処理方法ではないものの、ある程度の防災効果は確認された。しかしながら、防災薬剤を均一に散布することが難しく、一定の防災効果を出すことが困難である点やアルカリ性薬剤による目や皮膚等に接触した場合の危険性も考慮しなければならない。不燃処理したものでは、未処理のものより高い熱流束となり、最大熱流束到達時間も短くなった。これは、不燃処理した綿カーテンは不燃薬剤の性能規定での基材（不燃材料）とは異なり、不燃薬剤の塗布によりウレタン塗膜が形成され綿カーテンと同時に燃焼した影響であると考えられる。

イ ワンタッチテント及びブルーシート

防災及び不燃処理したものと未処理のものとの最大熱流束に大差は見られなかった。これは、防災処理したものでは、ワンタッチテント、ブルーシートなどの材料である化学繊維（ポリエステル、ポリエチレン）が、霧吹き等で防災薬剤を噴霧しても繊維本体に浸透することなく表面に固まって付着したことが原因と考えられる。また、不燃処理したものでは、綿カーテンと同様に、不燃材料の性能規定での基材（不燃材料）とは異なるため不燃効果は得られなかったと考えられる。

ウ シャワーカーテン

最大熱流束到達時間に大差はなく、防火及び不燃処理したものと未処理のものとの最大熱流束がそれぞれ $4.2\text{kW}/\text{m}^2$ 及び $3.8\text{kW}/\text{m}^2$ 減少したもののワンタッチテント及びブルーシートと同様の理由により、防火及び不燃効果は得られなかった。

エ 段ボール AF0.9m高

防火及び不燃処理したものと未処理のものとの最大熱流束に大差はなかった。段ボールに対する防火及び不燃処理の効果は低いと考えられる。

アルミ処理では、熱流束が約6倍増加した。これは、アルミホイルを巻いたためにアルミホイルと段ボールの間に熱分解ガスが蓄積し、アルミが破れることで外部に放出され、周囲の空気と混合し激しい燃焼となったものと考えられる。更に、アルミニウム（酸化面）の反射率（ 0.96 （常温時） 0.75 （ 260°C ））が高いため、火炎から入射した放射熱が反射し、熱流束を強めたものと考えられる⁶⁾。

生地処理では、段ボールの燃焼を防ぐことができなかったため、防火生地が可燃物となり熱流束が増加したと考えられる。

フルート塞ぎでは、フルート内の空気の流動を抑えることで燃焼抑制に効果があると考え実施したが、未処理の最大熱流束と大差がなかった。

以上より、今回実験した方法では綿カーテンの防火処理のみである程度の効果が確認されたものの、均一な薬剤散布は困難であったことから実験サンプルに対する有効な延焼抑制方法は確認されなかった。

(3) 避難所の火災危険の可視化について

米国立標準技術研究所（National Institute Of Standard And Technology）が無償提供している流体シミュレーションソフト「Fire Dynamics simulator (FDS) version6.6.0」を用いた。FDSの描画や設定、映像化には、補助ソフトウェアとして「Pyrosim version2018.1.0417」を使用し避難所の火災シミュレーション映像を作成した。図10は避難所の一部を再現したシミュレーション映像の一部である。衣服類に着火した後1.8m高の間仕切りに延焼し、通路幅が十分でない隣のブースへと延焼拡大していく状況が映像化出来た。このような映像資料により、避難所の火災危険を視覚的に把握することが出来ると考える。

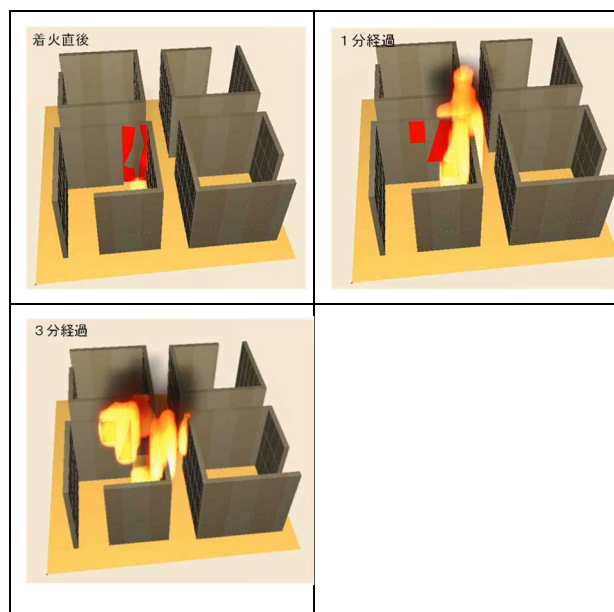


図10 避難所の一部を再現したアニメーション
（居住スペース 4床 室温 20°C ）

6 まとめ

(1) 間仕切、敷物及び掛物個別の熱流束

避難所物資（間仕切、掛物及び敷物）それぞれの最大熱流束サンプルは、段ボールWF1.8m高（ $9\text{kW}/\text{m}^2$ ）、キルトラグ（ $0.18\text{kW}/\text{m}^2$ ）、そして毛布（丸め）（ $0.93\text{kW}/\text{m}^2$ ）であった。間仕切は高いものほど熱流束が高く、敷物及び掛物は燃焼が継続しないものが殆どだった。

(2) 居住スペースの再現実験の熱流束

再現実験における最大熱流束は、火源から距離 0.5m で木材の着火危険がある $14.1\text{kW}/\text{m}^2$ 、距離 1m では $8\text{kW}/\text{m}^2$ であり、 1m 幅通路は熱流束の観点から延焼防止に有効な距離であると考えられる。

(3) 防火製品使用による延焼抑制効果

防火製品は微小火源では着火せず、再現実験のように多量の可燃物の燃焼により着火するが、最大熱流束到達時間の遅延に効果があることが分かった。

(4) 安全な居住スペースの配置について

本検証により、延焼防止、抑制の観点からは、以下の点に留意した居住スペースの配置が望ましいと考えられる。

- ・通路幅 1m 以上確保する。
- ・間仕切の高さは低めにする。
- ・衣服類などの個人の持ち物は間仕切から離しておく。
- ・防火製品を使用する。

しかしながら、居住スペースの配置は避難所の規模や避難者の人数などに制約され、防火製品の備蓄状況も自治体により異なることから、通路幅確保や低い間仕切りの使用が困難な避難所では消火器を多めに設置するなど、避難所の実態に沿った対策が必要であると考えられる。

(5) 避難所の火災危険を可視化した動画資料

本検証で得られた避難所物資の燃焼危険に関する知見を取り入れ作成したシミュレーション映像は実際の避難所で予想される火災危険が可視化されており、防火安全対策の資料又は消防職員の教養資料として活用が期待できる。

7 謝辞

本検証の実施にあたり、東京理科大学大学院関沢愛教授より多くの貴重な知見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 内閣府ホームページ
- 2) 東京都防災会議、東京都地域防災計画震災編(令和元年修正) [本冊] p. 8
- 3) 東京消防庁、令和3年版火災の実態、p.133
- 4) National Institute of Standards & Technology, Building & Fire Research Laboratory, FIRE FACTS Heat Flux & Response
- 5) CHARLES A. HARPER, HANDBOOK OF BUILDING MATERIALS FOR FIRE PROTECTION, CHAPTER 3、p.33
- 6) 日本火災学会編、火災と建築第3版、p.128

Verification of the Burning Behavior of the Materials Used for Shelters

KIKUCHI Ryosuke*, OMORI Shunsuke**, HOSOYA Masasuke***

Abstract

In order to study the potential combustion hazards of shelter materials and the safety of shelter living spaces, we conducted experiments to measure the heat flux and relevant factors on the heat-receiving side with the materials for a shelter on fire.

We classified shelter materials into partitions, rugs and hangings; identified the sample with the largest heat flux from each material type; and conducted combustion experiments with simulated shelters. The heat flux at a distance of 0.5 m from the fire source was 14.1 kW/m², while at a distance of 1 m it was 8 kW/m². This fact indicates that an evacuation passage width of at least 1 m between occupied spaces effectively prevents the spread of fire in terms of heat flux. We also found out that flameproof products can delay the time to reach the maximum heat flux.