

がん具用煙火の燃焼及び消火に関する検証（その1） （陳列状態における燃焼実験）

飯田 明彦*, 東 優太*, 大滝 英一*, 鈴木 健司**

概 要

東京都火災予防条例第23条では、売場にごん具用煙火を商品として陳列、販売する行為は、「総薬量5キログラム未満（SFマーク付きに限る）」まで危険物品持込み行為に含まないものとして運用している。しかし、運用当初と比べ昨今のがん具用煙火は多種多様化しており、燃焼性状が異なっている可能性がある。

本検証では、売場の陳列状態（棚板あり・棚板なし）において、がん具用煙火の火薬量を変化させたときの燃焼性状を把握するとともに、スプリンクラー設備作動時の燃焼抑制効果等を確認した。

1 はじめに

東京都火災予防条例第23条では、指定場所である百貨店等の売場にごん具用煙火等火薬類を持ち込む行為を「危険物品持込み行為」として禁止しているが、売場にごん具用煙火を商品として陳列、販売する行為は、「総薬量5キログラム未満（SFマーク付きに限る）」まで危険物品持込み行為に含まないものとして運用している。

この規定は、昭和45年の運用基準改正時に定められたものとされている。しかし、運用当初に比して、昨今のがん具用煙火は多種多様であり、燃焼性状も変化している可能性が高い。そのため、店舗関係者等に対し火薬取扱いに関する意識向上や安全管理指導を推進するためには、現在陳列、販売されているがん具用煙火の燃焼性状や周囲への延焼危険を明確にし、がん具用煙火の持ち込み量に対する安全性を再確認する必要がある。

2 目的

本検証では、百貨店等の売場において、現在陳列、販売されるがん具用煙火の危険物品持込み行為の基準となる総薬量5kgの燃焼性状を把握する。加えて、消火設備（スプリンクラー設備）による燃焼状況、延焼抑制効果等を検証し、実火災を想定した条件において、現在運用基準で認めている薬量の安全性を確認することを目的とする。

3 がん具用煙火について

(1) がん具用煙火

がん具用煙火（以下「煙火」という。）とは、がん具として用いられる煙火及びがん具として用いられる煙火

に類する煙火であって、火薬類取締法施行規則第1条の5に規定されるものである。

煙火の安全基準として、公益社団法人日本煙火協会で策定されている、「がん具煙火の安全基準及び検査等に関する規定」に基づく自主検査に合格したものにSFマークを付けている。

(2) 理化学的性質¹⁻⁴⁾

煙火に使用される火薬の原料は黒色火薬が主成分である。黒色火薬は、その成分に酸化剤を含んでおり、一般的に着火性がよく、燃焼速度が速く、黒色煙を発生させる。また、発熱量は685cal/g（2.87kJ/g）前後で、通常の紙、木材といったものよりも小さいが、着火すると激しく燃焼する性質がある。

4 実験方法

(1) 実験期間及び場所

ア 期間 平成26年11月25日から同12月3日

イ 場所 東京都調布市深大寺東町4-35-3

消防大学校 消防研究センター 総合消火研究棟（図1）



図1 研究棟内実験建屋設定状況

* 装備安全課 ** 企画課

(2) 実験条件及びパターン

売場の陳列状態での燃焼性状を把握するための自由燃焼実験及び、スプリンクラーが作動した時の燃焼抑制効果を把握するための燃焼抑制実験を行った。

本検証では、火源となる陳列棚には、棚板を付けた「棚板あり」及び棚板を付けなかった「棚板なし」の2通りについて陳列棚上に表1に示す総火薬量で実験を行った。

表1 実験条件

	総火薬量	棚板の有無
自由燃焼実験	1、3、5 kg 7 kg	棚板なし
	1、3、5 kg	棚板あり
燃焼抑制実験	3、5 kg	棚板なし
	1、3、5 kg	棚板あり

ア 陳列棚

スチール製陳列棚（図2、背面：金属網タイプ、サイズ：W900mm×D450mm×H1800mm、3段）を使用した。

イ 煙火と配置

販売店における売場での陳列状態の事前調査の結果をもとに、売場の陳列状態に即した煙火の種別と配置方法とした。

(ア) 煙火の種別

販売店では、袋入りのセット物の煙火が取り扱われていることが多く、本検証では図2に示す、主に「手持花火」で構成される「手持花火のセット物」、「噴出花火」の袋詰めの製品である「噴出花火のセット物」の2種類を使用した。

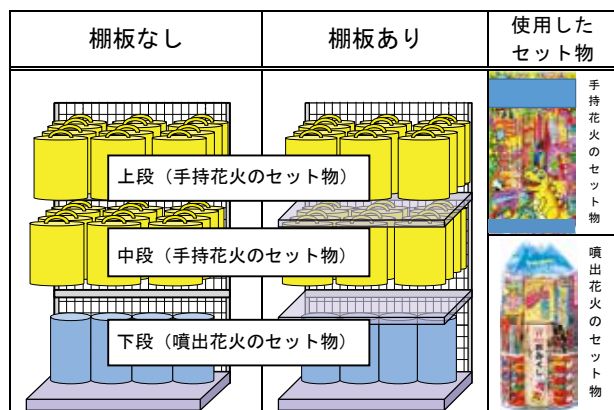


図2 陳列棚への煙火のセット物配置パターン

(イ) 煙火の配置方法

本検証では棚の床面上に噴出花火のセット物を設置し、手持ち花火のセット物はその上にネットフックを付けて、吊り下げた。使用した陳列棚の棚を便宜上、上から「上段」、「中段」、「下段」と呼称する（図2）。それぞれ設置した袋数は、表1の各実験条件において設定する総火

薬量に応じて袋数の量を調整した。

(3) 測定器等

測定項目は以下のとおり（表2）、それぞれの箇所に各測定器を設定した（図3、4）。これらのセンサーによる電圧変化を出力として、データロガーで記録した。

表2 測定項目

区 分	測定内容	
温 度	熱電対（K型、素線径0.64mm）	
	火源中心	陳列棚中央背面側で、それぞれ高さ1.91m（中心上段）、1.23m（中心中段）、0.68m（中心下段）
	天井面の温度	高さ2.70m天井面で陳列棚から西・北西・北側に、それぞれ0.57m、0.81m、0.57mの位置
	周囲の温度	陳列棚から西側・北西側・北側5.0mで、高さ0.90m、1.50mの位置
放射熱	放射熱流束計（サファイア窓付水冷式、20～50kW/m ² ） MEDTHERM 社製 64P-5-24	
		陳列棚から西側・北西側・北側へ5.0mで、高さ1.05m及び0.90mの位置
映 像	ビデオカメラ	陳列棚の西側・北西側・北側
	熱画像カメラ	陳列棚の北西側 9.0m

(4) スプリンクラーの設定

表3に示す仕様のものを使用した。スプリンクラーヘッドは陳列棚の中心から天井板の対角線上に、有効散水半径（ $r=2.30m$ ）で包含できる位置に1個設置した。

自由燃焼実験時に、若干の水を充填した閉鎖型スプリンクラーヘッドを設置し、スプリンクラーヘッド傍の熱電対の温度が、表示温度72℃となった時点から作動するまでの時間を計測する。燃焼抑制実験では開放型スプリンクラーヘッドを設置し、ヘッドの温度が72℃になってから、対応する自由燃焼実験時に計測した時間となった時点で手動操作により作動させた。

なお、燃焼抑制実験において、スプリンクラー配管への加圧方法は、D級ポンプによるものとした。事前に放水流量80L/分となるよう元圧を設定し加圧した。

表3 本検証で用いたスプリンクラーヘッド

	閉鎖型スプリンクラーヘッド	開放型スプリンクラーヘッド
実験種別	自由燃焼実験	燃焼抑制実験
詳細及び適用	マルチ型 感知種別 : 1種 表示温度 : 72℃ 放水流量 : 80L/分 (0.1MPa) 放水方向 : 下向き	放水量 : 80L/分 (0.1MPa) 放水方向 : 下向き 有効散水半径 : 2.30m

本実験図(燃焼)

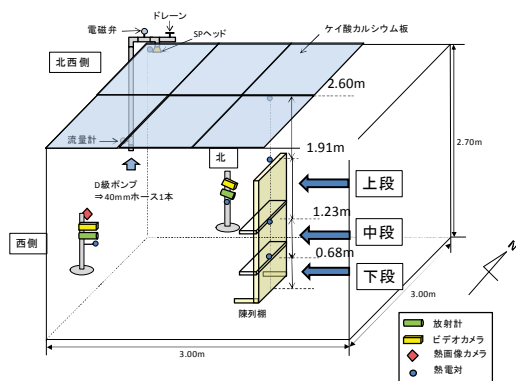


図3 立面図

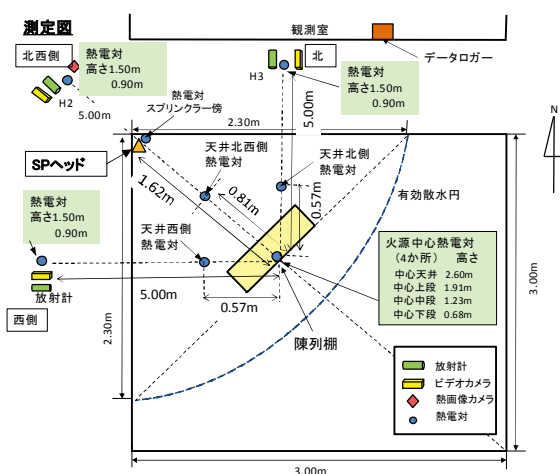


図4 平面図

(5) 実験手順

ア 点火方法

陳列棚の下段に配置した中央の噴出セットの背面側に、包装の上からガストーチの火炎を、接炎させ着火させた。

イ 実験終了

煙火の着火から 10 分経過するか、煙火の火薬の燃焼が終息した状態を終了時間とした。

ウ スプリンクラー作動時間

自由燃焼実験では、天井に設置した閉鎖型スプリンクラーヘッドの作動時間を計測し、対応する燃焼抑制実験での開放型スプリンクラーの作動時間とした。

5 結果及び考察

自由燃焼実験及び燃焼抑制実験（以下、それぞれ「自由燃焼」、「燃焼抑制」という。）の結果及び考察については以下のとおりである。

(1) 自由燃焼実験

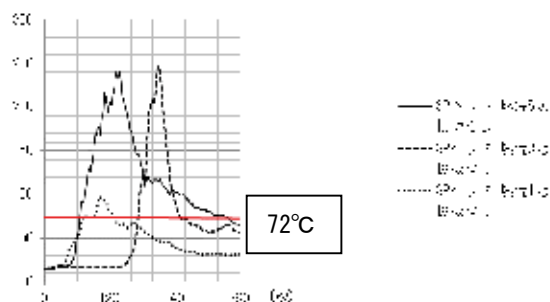


図5 閉鎖型スプリンクラーヘッド傍の温度
(自由燃焼棚板なし) 縦軸の単位は℃

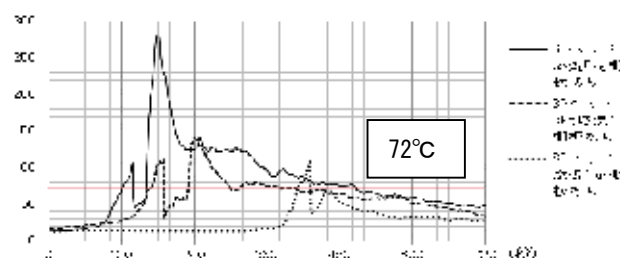


図6 閉鎖型スプリンクラーヘッド傍の温度
(自由燃焼棚板あり) 縦軸の単位は℃

表4 自由燃焼でのスプリンクラーの作動時間
(スプリンクラーヘッド傍で 72℃に達した後の時間)

	総火薬量	棚板の有無	作動時間	対応する燃焼抑制実験
自由燃焼	1 kg	棚板なし	作動せず	(実施せず)
	3 kg		1 0 秒	燃焼抑制 3 kg 棚板なし
	5 kg		1 1 秒	燃焼抑制 5 kg 棚板なし
	1 kg	棚板あり	2 2 秒	燃焼抑制 1 kg 棚板なし
	3 kg		2 0 秒	燃焼抑制 3 kg 棚板あり
	5 kg		1 7 秒	燃焼抑制 5 kg 棚板あり

※火薬量 7 kg では自由燃焼のみ行った。燃焼抑制 1 kg は自由燃焼 1 kg でスプリンクラーが作動しなかったため、実施しなかった。

ア 棚板がスプリンクラーの作動に与える影響

自由燃焼時のスプリンクラーヘッド傍の温度変化は図5、6のとおりである。温度がスプリンクラーヘッドの表示温度 72℃に達してから、実際に閉鎖型スプリンクラーヘッドが作動するまでの時間は表4に示すとおりであった。棚板なしに比べて棚板ありの方が作動するまで時間を要し、10 秒程度遅かった。また、温度上昇の勾配が、棚板なしの場合と比較して約 1/2 であった。

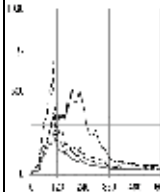
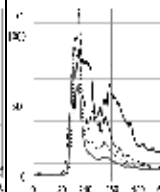
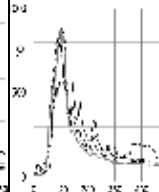
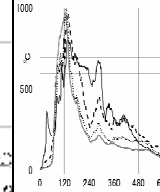
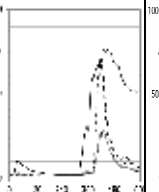
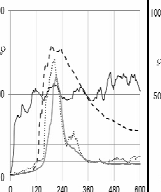
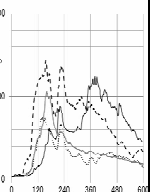
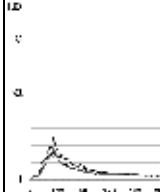
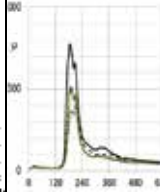
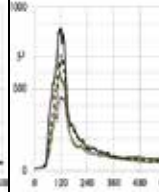
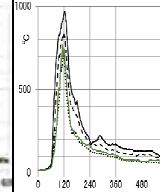
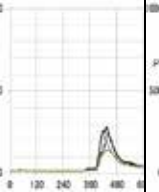
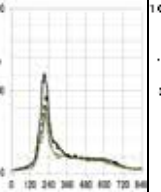
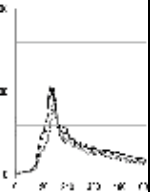
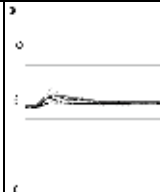
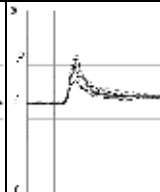
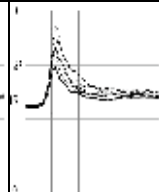
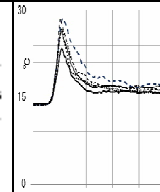
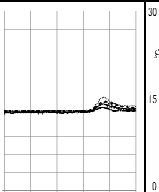
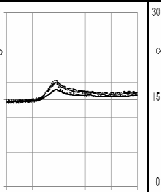
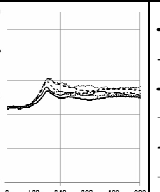
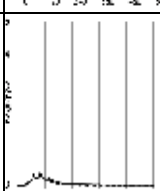
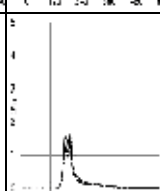
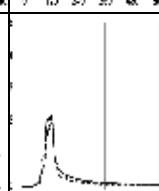
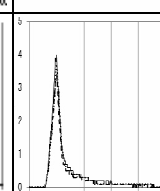
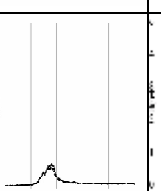
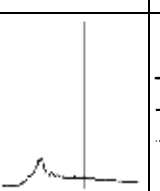
自由燃焼（棚板あり）と自由燃焼（棚板なし）それぞれにおいて、火薬量が多いほど 72℃に達してから作動するまでの時間が短い傾向があった（表4）。また、自由燃焼（1 kg 棚板なし）でスプリンクラーが作動しなかった。図5、6の温度変化から、自由燃焼（1 kg 棚板

表5 自由燃焼実験での燃焼状況

	棚板なし				棚板あり		
	1 kg	3 kg	5 kg	7 kg	1 kg	3 kg	5 kg
熱流束 上昇開始	 42 秒	 150 秒	 63 秒	 70 秒	 383 秒	 120 秒	 85 秒
最盛期 30 秒前	 69 秒	 178 秒	 102 秒	 89 秒	 399 秒	 187 秒	 144 秒
最盛期	 99 秒	 208 秒	 132 秒	 119 秒	 429 秒	 217 秒	 174 秒

※ 写真の下の数秒は点火からの時間を示す。

表6 自由燃焼実験での測定結果

	棚板なし				棚板あり			凡例
	1 kg	3 kg	5 kg	7 kg	1 kg	3 kg	5 kg	
火源 中心								— 中心下段 - - 中心中段 中心上段 — 中心天井
天井 温度								— 中心天井 - - 天井西側 天井北西側 — 天井北側
周囲 の温度								— 西側0.90m — 西側1.50m - - 北西側0.90m 北西側1.50m - - 北側0.90m 北側1.50m
放射 熱流束								— 放射西側 - - 放射北西側 放射北側

なし) だけが 72℃に達したのちの温度上昇が継続しなかったことが原因だった可能性がある。これは、比較的熱量が小さく、自由燃焼 (1 kg 棚板あり) に比べて火源の高さが低くなってしまったため、熱気流が天井に達しスプリンクラーヘッドに達するまでに拡散し、温度が低下したことが原因と考えられる。

したがって、火薬量が少ない場合でも、自由燃焼 (1 kg 棚あり) のように、スプリンクラーヘッドが作動した棚板ありの方が安全上有利と考えられる。

イ 棚板による燃焼状況の変化 (表 5)

棚板なしの場合、燃焼の進行に伴って火勢が強くなり、火災高さが高くなるにつれて陳列したセット花火が落下し、周囲の床面に堆積し、その堆積物が一体となって火炎を上げ、激しく燃焼した。

棚板ありの場合、点火した後、棚板が障壁となって時間差を生じながら、棚ごとに燃焼が進んでいった。時折、セット花火からの火炎や火花が水平方向の 3 方向 (北、北西、西) に激しく噴出し、周囲への延焼危険が高まった。

このことから、煙火は一度着火すると、激しく燃焼する可能性があるが、陳列棚に棚板を付け分割することで、燃焼が比較的緩慢になると考えられる。

ウ 火源中心の温度変化 (表 6)

棚板ありの場合、火薬量が多くなるほど、各測定点での温度が高くなる傾向があった。火薬量が 3 kg と 5 kg の場合の温度差は、1 kg との場合に比べて顕著な差はみられず、5 kg の場合に比べて 3 kg の方が著しく温度が高い部分も見られた。

棚板なしの場合、比較的単峰性のグラフが示す温度変化になったが、棚板ありでは、温度変化中にピークを複数生じ、幅広なグラフになった。

このような温度変化は、前イのように、火源中心の温度は、煙火の燃焼の進行に伴い、火源が移動し、火炎及び熱気流の動き等の変化による影響を強く受けた結果、測定された数値であると考えられる。

エ 天井面の温度 (表 6)

棚板あり及び棚板なしともに、単峰性のグラフを示す温度変化となり、火薬量が多くなるほど高温になる傾向があった。棚板ありでは、3 kg の場合で一部の測定点で 5 kg の同じ測定点よりも高温になったが、天井面の温度は火源中心の場合と比較して、棚板の有無の違いによる顕著な変化が見られなかった。このことは、燃焼中に火源の移動等の変化があっても、発生した火炎及び熱気流は、天井面の温度変化に対してあまり影響しなかったためと考えられる。

オ 周囲の温度変化 (表 6)

火薬量が多くなるほど、周囲の温度が高くなる傾向があった。特に自由燃焼実験の北側高さ 1.50m の測定点では、棚板なしで、火薬量 5 kg で約 14℃、3 kg で約 8℃であった。棚板ありの温度上昇は、火薬量 5 kg で約 6℃、

火薬量 3 kg で約 5℃を示した。

このことは、同数量の火薬量に対して、棚板ありの温度上昇は、棚板なしの場合の約 1/2 であったことを示す。前イで述べたように棚板なしの場合は棚板ありの場合に比べて燃焼が激しかったためと考えられる。

表 7 放射熱流束及びスプリンクラー傍の温度の最大値

		自由燃焼実験			
		放射熱流束 (最大値)		スプリンクラーヘッド 傍最高温度	
		棚板なし	棚板あり	棚板なし	棚板あり
総火 薬量 (kg)	1	0.4kW/m ²	0.38kW/m ²	98℃	110℃
	3	1.8kW/m ²	0.70kW/m ²	250℃	142℃
	5	2.2kW/m ²	0.85kW/m ²	250℃	290℃
	7	4.0kW/m ²	—	375℃	—

カ 放射熱流束 (表 6, 7)

表 6、7 に示すとおり、火薬量が多いほど、放射熱流束が高くなる傾向があった。棚板なしの場合、総火薬量 3 kg と 5 kg の場合での放射熱流束は顕著な差が生じなかったが、7 kg の場合では、著しく大きな数値約 4.0kW/m² となった。5 kg に対して、2 kg 多いだけでほぼ 2 倍に近い値となった。このような放射熱流束値では、早い段階で熱傷等の人命危険が生じるおそれがあると考えられる。火薬量を増やした際の放射熱流束値の増加は、前イで示した燃焼の仕方のように煙火全体が急速に燃焼した影響であると考えられる。一方で、棚板ありの場合は、いずれも 1.0kW/m² 以下で抑えられており、火源からある程度離れた位置での延焼危険が抑えられていると考えられる。

(2) 燃焼抑制実験

前(1)、自由燃焼の結果から得られた陳列状態の煙火の総火薬量別の燃焼性状をもとに、スプリンクラーを作動させた時の消火または燃焼抑制効果等について検討する。
ア 視覚的な変化 (表 8)

スプリンクラーが作動するまでは対応する各自由燃焼実験と同様に燃焼した。燃焼抑制 (1 kg 棚板あり) のみ、スプリンクラーの作動前に火勢が弱くなり始めたが、これは最盛期を過ぎていた可能性がある。

スプリンクラー作動後暫くは火源の中心部の燃焼は著しかったが、周囲の火炎は抑制された。スプリンクラーが作動してから 30 秒後、燃焼抑制 (1 kg 棚板あり) はほぼ火炎が収まったが、他の条件では引き続き激しい燃焼が継続した。表 8 の実験終了後の状況で示すとおり、煙火のセット物が燃え残った状況から、一定の延焼抑制効果はあると考えられる。

イ 火源中心の温度 (表 9)

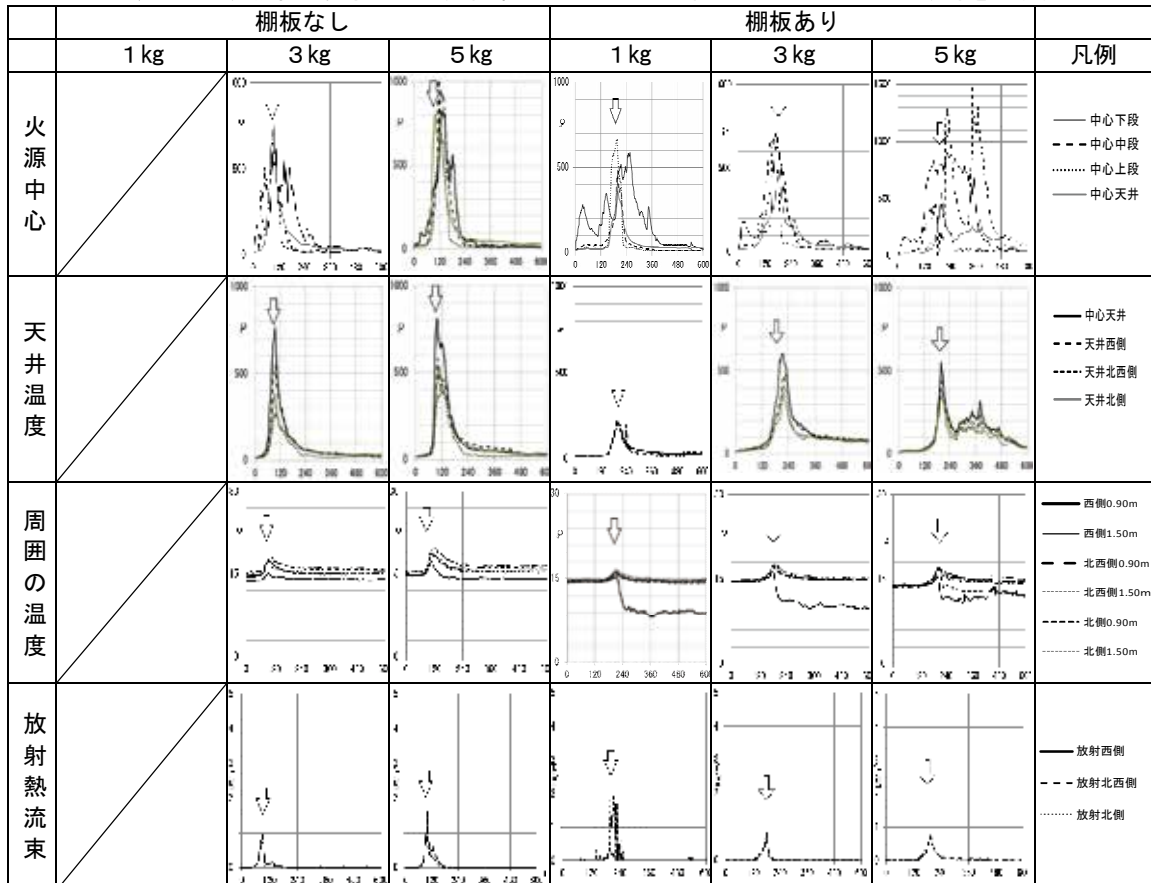
スプリンクラーによる散水開始直後に、上方の測定点では急激な温度低下がみられた。上方の測定点では、熱電対が直接散水の影響を受けたものと考えられる。ま

表 8 燃焼抑制実験での燃焼状況

	棚板なし			棚板あり		
	1 kg	3 kg	5 kg	1 kg	3 kg	5 kg
スプリンクラー 作動 30 秒前		 63 秒	 69 秒	 196 秒 (最盛期)	 150 秒	 165 秒
スプリンクラー 作動		 93 秒	 99 秒	 211 秒	 180 秒	 195 秒
スプリンクラー 作動 30 秒後		 123 秒	 129 秒	 241 秒	 210 秒	 225 秒
実験 終了後						

※ 写真の下の数値は点火からの時間を示す。

表 9 燃焼抑制実験での測定結果（グラフ中の矢印はスプリンクラー作動時を示す。）



た、中心下段等の熱電対は急激な温度低下に至らなかった。これは熱電対が、燃焼抑制（棚板なし）では、燃焼堆積物の中に埋没していたこと、燃焼抑制（棚板あり）では、棚板の下にあったための散水障害によるものと考えられる。よって、火源中心の温度から燃焼抑制効果を検討するのは困難と考えられる。

ウ 天井面の温度（表 9）

燃焼抑制実験では、棚板なし、棚板ありのいずれの場合でも、温度変化のグラフは、単峰性の形状を示した。

棚板なしの場合、燃焼抑制 3 kg の散水直後から天井面の温度は各点ともに低下していたが、燃焼抑制 5 kg では、散水後も、約 300℃ を超える状態が約 40 秒程度続いた。自由燃焼 3 kg 及び自由燃焼 5 kg と同温度の最高温度に達してから、スプリンクラーヘッドが作動した。

棚板ありでは、燃焼抑制 1 kg と燃焼抑制 3 kg は、自由燃焼 1 kg と自由燃焼 3 kg の同温度の最高温度に達しないうちにスプリンクラーヘッドが作動したと考えられる。このことは、スプリンクラーが早期に作動できるかどうかの点において、効果的と考えられる。

また、棚板ありでは、温度上昇が棚板なしに比べ低い状態でスプリンクラーが作動した。スプリンクラーの散水が始まるとすぐに温度低下が始まるが、5 kg では、一旦低下するものの再度温度が上昇し、高温状態が続いた。5 kg の場合は、棚板があることによる散水障害部分で燃焼が継続することで、スプリンクラー作動後も燃焼が継続しやすかったことが考えられる。

しかしながら、散水障害が生じる可能性があっても、棚板ありのように燃焼が緩慢な場合、燃焼が最盛期になる前にスプリンクラーが作動する可能性が高いため、未燃の煙火への延焼防止効果が期待できる。

エ 周囲の温度（表 9）

火源から距離 5.00m の場所においては、大きな温度上昇はせず、同火薬量での自由燃焼実験に比べて、温度上昇はほぼ 1/2 に抑えられている。スプリンクラーの散水による水幕が形成されたことで、放射熱流束を遮断し、水幕の内側を冷却したと考えられる。火源に対してスプリンクラーからの散水による抑制効果の有無に関わらず、「周囲の温度」の変化から、散水による延焼抑制効果はあるものと考えられる。

オ 放射熱流束（表 9）

棚板なし 5 kg で、最大値は約 1.6kW/m²であったため、5.00m 離れた場所では、ほぼ 1.0kW/m²以下に抑えられている。このことは、火炎からの放射熱流束が散水による有効散水円内を通過するため、大きく減衰していると考えられ、延焼及び火傷危険は著しく低下していると考えられる。燃焼抑制実験では、実験終了後に煙火の一部が未燃のまま残っていた場合があり、スプリンクラーの有効散水円内では、未燃部分が散水によって、燃焼せずに燃え残る可能性がある。

放射熱流束の変化と前イの天井面の温度と放射熱流束

の数値と合わせて考慮すると、スプリンクラー設備は煙火の火源そのものの燃焼抑制効果は少ない可能性はあるが、放射熱流束が抑えられており、周囲への延焼危険は減少できていると考えられる。したがって、スプリンクラーの散水は煙火の燃焼自体に対して抑制効果は低くても、延焼抑制の効果はあると考えられる。

6 おわりに

本検証において売場の陳列状態にある煙火の総火薬量をそれぞれ、1、3、5 kg とした場合で、陳列棚の棚板をありとなしの条件で燃焼した時の燃焼性状とスプリンクラーが作動した時の燃焼抑制効果は以下のようにまとめられる。

- (1) 売場の陳列状態にある煙火が燃焼した時の燃焼性状
ア 総火薬量が多いほど、各測定点の温度、熱流束等が高くなり、累進的に値が高くなる可能性がある。
イ 棚板ありと棚板なしの場合の比較から、棚板がある方の燃焼時間がやや長くなる傾向があるが、周囲への温度や放射熱の影響は低くなると考えられる。
- ウ 火薬量が少なくても、陳列棚に棚板がある方がスプリンクラーが作動する可能性が高いため、火災安全上有利である。
- (2) スプリンクラーが作動した時の燃焼抑制効果
ア スプリンクラーが作動した場合は、火源周囲 5 m での温度、放射熱は低く抑えられる。
イ スプリンクラーが作動しても、天井面は非常に高温の状態が継続する。
ウ スプリンクラーが作動した場合は、未燃の煙火に散水できれば、着火防止、延焼防止になるので、スプリンクラー作動以降の延焼抑制効果がある。
- エ 5 kg の場合のように火薬量が多いと、散水中も火源からの放射熱が高い状態が続くため、燃焼中の煙火部分には、燃焼抑制効果は低いと考えられる。
- オ 棚板ありの方が、一部に散水障害が生じる可能性があるが、棚板なしと比較して、放射熱流束、温度等が低く抑えられるため、延焼抑制効果が高い。

【参考文献】

- 1) 松永猛裕：「火薬のはなし 爆発の原理から身のまわりの火薬まで」ブルーバックス（2014）
- 2) 久保田浪之介：「今日からモノ知りシリーズトコトンやさしい燃焼学の本」日刊工業新聞社（2012）
- 3) 岡本智：「観測気球用火薬式ロープ・カッターについて」、東京大学宇宙航空研究所報告、p741-747、第 13 巻、第 3 号（1977）
- 4) Huggett, C：「Estimation of Rate Heat Release by Means Oxygen Consumption Method」, Fire and Materials, Vol. 4, No. 20（1980）

Study on the Fire Behavior and the Suppression of Fireworks Fire (Part 1) (Fire Tests in Display on the Shelf)

Akihiko IIDA*, Yuuta HIGASHI*, Hidekazu OTAKI*, Kenji SUZUKI**

Abstract

Although dangerous goods are regulated in article 23 of the Tokyo Fire Prevention Ordinance, it is not regarded the fireworks, less than 5 kilograms of total gunpowder (only with SF mark), as dangerous goods in store for sale and display. It is necessary to examine the fire behavior of fireworks fire, because recent fireworks become to show variety.

This study shows the fire behavior of fireworks containing ca. 1, 3 and 5 kilograms of gunpowder on the shelf (with and without shelf board) in store display and the fire suppression against the fire under each condition by sprinkler system activation.

*Equipment Safety Section **Planning Section