

# 機器を用いた瞬間的な火炎に係る安全性の検証

原田 祐介\*、飯田 明彦\*、大滝 英一\*、東 優太\*\*

## 概要

東京都火災予防条例第 23 条では、劇場、観覧場の舞台等における裸火等の使用を禁止しているが、消防総監が定める基準に適合していると消防署長が認めたときは、この限りでないとしている。平成 21 年度に瞬間的な火炎に関する新たな承認基準が整備されたが、その後、瞬間的な火炎を発生させる機器の種類や演出方法が多様化している。また、東京 2020 オリンピック・パラリンピック競技大会の開催にあたり、従来よりも大規模な火炎を使用する申請が予想される。

本検証では、現行の承認基準で想定する規模を超えた火炎を発生させ、周辺の温度及び放射熱流束を測定し、当該基準に示された可燃物、観客及び演技者の離隔距離について、安全確保の可否を確認した。

## 1 はじめに

東京都火災予防条例第 23 条第一項ただし書の規定では、禁止行為の解除承認申請届出に対して審査を行い、劇場や百貨店等への危険物品の持ち込みや裸火の使用等を承認している。

承認するものの一つである裸火の中で、気体燃料又は液体燃料を熱源とする機器を用いて発生させたもので、かつ、発生から消滅するまでに要する時間がおおむね 1 秒以内であるものを「瞬間的な火炎」としている。

瞬間的な火炎は現行基準では燃料消費量や容器、発生させた火炎に対する危険範囲、離隔距離や防火措置等が示されているが、その火炎の規模については明記されていない。このことから現行基準(図 1)制定当時の想定を超える大規模な火炎による、周囲への熱的影響を把握する必要がある。

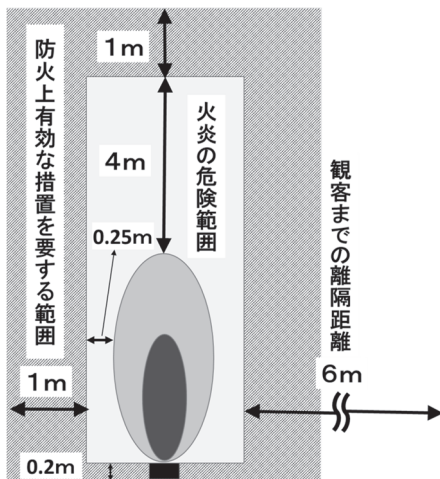


図 1 防火上有効な措置を要する範囲

## 2 目的

想定する規模を超えた大規模な火炎を発生させた場合、可燃物、観客及び演技者との離隔距離等の現行の解除基準で安全が担保できるかを確認することを目的とした。

## 3 実験方法

### (1) 実験期間及び場所

ア 期間 平成 28 年 1 月 25 日から同 1 月 29 日

イ 場所 東京都調布市深大寺東町 4-35-3  
消防庁消防大学校 消防研究センター  
大規模火災実験棟

### (2) 使用機器及び実験パターン

ア 使用機器<sup>1)-2)</sup>

瞬間的な火炎による演出を行うために開発・使用されてきた機種で、表 1 に示す電子制御で火炎噴射時間を調節できる 3 機種を使用した(図 2)。棒状火炎を生じさせるものとして、液体燃料を使用する機器(以後、「機器 1」という。)を使用した。機器 1 は液体燃料を不活性ガス(N<sub>2</sub>)で押し出し、高速の乱流拡散火炎を発生させる。球状火炎を生じさせるものとして、従来規模の火炎を生じる

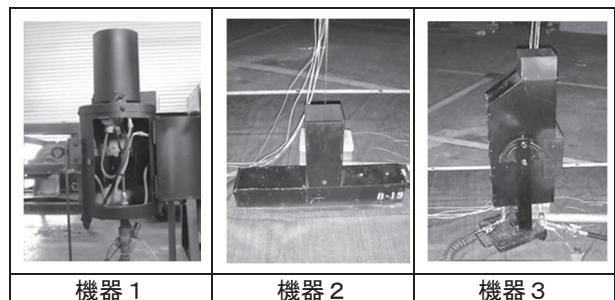


図 2 使用した機器の外観

\* 装備安全課 \*\* 品川消防署

機器（以後、「機器2」という。）と従来の規模をこえる火炎を生じる機器（以後、「機器3」という。）を使用した。機器2はカセットコンロ用液化ブタンを使用し、機器3はLPGをCO<sub>2</sub>ガスにより加圧する、いずれも気体を燃料とするものである。

表1 使用した燃料の発熱量及び機器の仕様<sup>1)</sup>

	機器1	機器2	機器3
火炎形状	棒状	球状	球状
燃料種別	IP ソルベント 2028(液体)	ブタンガス (気体)	プロパン ガス (気体)
燃料容器	専用ポンペ	カート リッジ式	LPG ポンペ (5kg)
ノズル径	0.6mm, 1.0mm	—	—
火炎高さ	10.0-12.0m	3.0m	8.0-9.0m
低発熱量	47.1×10 <sup>3</sup> [kJ/L]	45.7×10 <sup>3</sup> [kJ/kg]	46.0×10 <sup>3</sup> [kJ/kg]
構造	窒素ガスを 加圧して燃 料を噴射す る方式	カートリッジ ポンペ 本体の加圧	ポンペ圧 (0.5MPa)

### イ 実験パターン

実験パターンを表2に示す。実験1と実験2は火炎発生時の発熱速度等を測定することを目的として、各機器において一定量の燃料を使い切るものとした。実験3、実験4、実験5では、それぞれの機器における火炎噴射周囲の温度、放射熱流束を測定した。

#### (ア) 燃料消費実験

実験1では機器1による燃料消費実験を実施した。実験1-1、実験1-2は、それぞれ火炎噴射ノズルの口径0.6mm、1.0mmで、各実験とも燃料1.0L、5秒間隔で3秒間噴射を連続的に行った。

実験2では機器により、燃料を消費し尽くすまで表2に記載した間隔で連続発生させた。実験2-1ではカートリッジ式のブタンガス(250mL)を用い、実験2-2ではLPGポンペ(5kg)を使用した。

#### (イ) 熱環境測定実験

実験3では機器1による棒状火炎の連続噴射実験を行い、連続噴射時間は、3秒間、5秒間、10秒間とした。

実験4では機器2による球状火炎を連射する実験を行い、噴射回数は3連発、5連発、10連発とした。電子制御により、各火炎噴射時間は、0.2秒とし、噴射間隔は5秒間とした。

実験5では機器3による球状火炎を連射する実験を行い、噴射回数は3連発、5連発、10連発とした。電子制御により、各火炎噴射時間は、0.5秒とし、噴射間隔は5秒間とした。

表2 各実験での火炎噴射パターン(※はノズル口径)

	機器 [実験 NO]	噴射回数 (回)	噴射時間 (秒)	噴射間隔 (秒)
実験1	機器1 (0.6mm)※ [実験 1-1]	(連発)	3.0	5.0
	機器1 (1.0mm)※ [実験 1-2]	(連発)	3.0	5.0
実験2	機器2 [実験 2-1]	(連発)	0.2	5.0
	機器3 [実験 2-2]	(連発)	0.5	5.0
実験3	機器1 (0.6mm)※ [実験 3-1]	1回	3.0	—
			5.0	—
			10.0	—
	機器1 (1.0mm)※ [実験 3-2]	1回	3.0	—
5.0	—			
10.0	—			
実験4	機器2	3、5、10	0.2	5.0
実験5	機器3	3、5、10	0.5	5.0

### (3) 測定項目及び測定機器の配置(図3、表3)

火炎中心軸上の温度変化は、機器の火炎噴射ノズルを中心軸に、機器を設置した床面から上方計10箇所温度測定し、機器周囲の温度(以後、「周囲の温度」という。)及び放射熱流束計は、火炎中心軸から水平距離2.0mと水平距離6.0mの位置で測定した。また、放射熱流束は火炎中心軸上の高さ15.0mで下向き測定も行った。温度は素線径0.32mmのK型熱電対を、放射熱流束は、MEDTHERM社製サファイア・ウィンドウ水冷式の放射熱流束計64P-5-24を使用した。熱電対及び熱流束計からの出力値は江藤電気製ThermodacFを3台使用し、火炎周囲の熱電対を300ms、その他は100msの間隔で記録した。

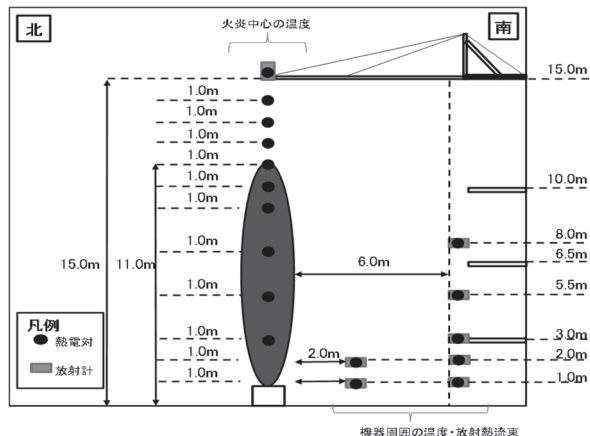


図3 測定機器配置図(断面図)

表3 測定項目

区分	測定内容	
温度	熱電対 (K型、素線径 0.32mm)	
	火炎中心	機器の垂直に配置、床面からの高さ 3.0m, 5.0m, 7.0m, 9.0m, 10.0m, 11.0m 12.0m, 13.0m, 14.0m, 15.0m
	火炎周囲	機器を中心として、水平方向 距離 2.0m の位置、高さ 1.0m, 2.0m 距離 6.0m の位置、高さ 1.0m, 2.0m 3.0m, 5.5m, 8.0m
放射熱	放射熱流束計 (サファイアウィンドウ水冷式)	
	火炎周囲	機器を中心として、水平方向 距離 2.0m の位置、高さ 1.0m, 2.0m 距離 6.0m の位置、高さ 1.0m, 2.0m 3.0m, 5.5m, 8.0m
	機器直上	床面から 15.0m の高さ、下向き
映像	ビデオカメラ	
	火炎周囲	実画像の撮影

#### 4 実験結果

##### (1) 実験1

火炎噴射時間は機器のノズルの開閉で調整しているが、この時間を超えて輝炎が見られたため、動画から 1/10 秒単位で輝炎を実測し、合計時間を火炎噴射時間とした (表4)。

表4 実験1 液体燃料消費実験(※はノズル口径)

	機器名称	火炎噴射回数	合計火炎噴射時間
実験 1-1	機器 1 (0.6mm)※	4	13.18 秒
実験 1-2	機器 1 (1.0mm)※	3	10.00 秒

##### ア 実験1-1 (0.6mm ノズルでの燃料消費実験)

##### (イ) 放射熱流束

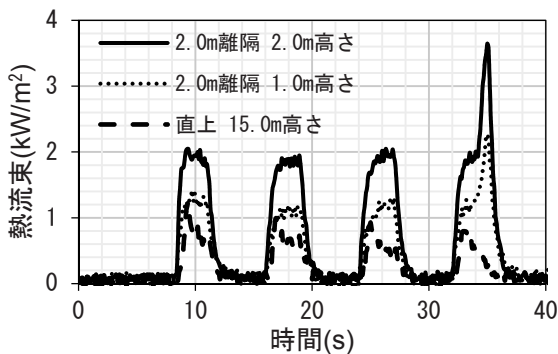


図4 放射熱流束 (実験1-1)

最後の有効噴射終了直前に、各測定点において急上昇し、測定点によっては他の噴射回の約2倍の数値を示した。15.0m 高さ下向きの測定値のみ噴射開始直後が最大値となり、約 1.0kW/m<sup>2</sup>に達した。測定点で最も値が高いのは、距離 2.0m・高さ 2.0m で約 2.0kW/m<sup>2</sup>であった。各噴射回とも3秒間で、急激な上昇から、緩やかな変化を示し、噴射終了後は急低下した。他の測定点もそれぞれのピーク値を示し、同様の変化を示した (図4)。

##### (イ) 発熱速度

表4のとおり、燃料を 1.0L 使用した時の輝炎の発生時間の合計から、実験1-1の実験条件では、発熱速度は、以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} \text{発熱速度} &= \text{IP ソルベント 2028 (1.0L) の発熱量 [kJ]} \\ &\quad / \text{燃焼時間 [秒]} = 47.1 \times 10^3 \text{ [kJ/kg]} \times 1.0 \times 10^{-3} \text{ [m}^3 \\ &\quad \times 0.789 \times 10^3 \text{ [kg/m}^3] / 13.18 \text{ [s]} \approx 2.8 \times 10^3 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

##### イ 実験1-2 (1.0mm ノズルでの燃料消費実験)

##### (イ) 放射熱流束

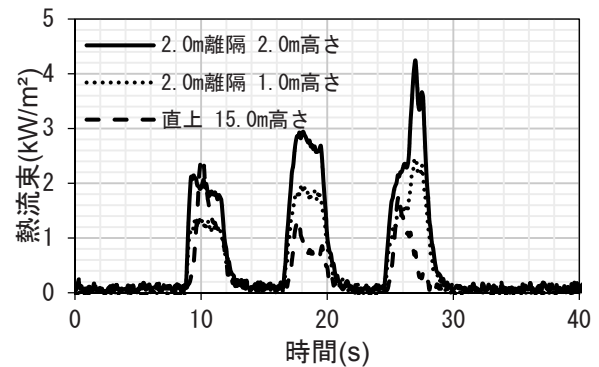


図5 放射熱流束 (実験1-2)

測定点中、最大値は、距離 2.0m・高さ 2.0m で、距離 2.0m の2カ所で約 2.0kW/m<sup>2</sup>を超えた。3回の噴射とも噴射開始直後の急激な上昇の後、数値変化は緩やかになり、噴射終了に伴い、急低下した。測定値は実験1-1と比べて変化の幅は大きい。最後の有効噴射終了直前のみ急上昇し、距離 2.0m・高さ 2.0m では約 4.2kW/m<sup>2</sup>になった。15.0m 高さ下向き測定値のみ噴射開始直後が最大となり約 2.4kW/m<sup>2</sup>に達した (図5)。

##### (イ) 発熱速度

表4のとおり、燃料を 1.0L 使用した時の輝炎の発生時間の合計から、実験1-2の実験条件では、発熱速度は、以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} \text{発熱速度} &= \text{IP ソルベント 2028 (1.0L) の発熱量 [kJ]} \\ &\quad / \text{燃焼時間 [秒]} = 47.1 \times 10^3 \text{ [kJ/kg]} \times 1.0 \times 10^{-3} \text{ [m}^3 \\ &\quad \times 0.789 \times 10^3 \text{ [kg/m}^3] / 10.00 \text{ [s]} \approx 3.7 \times 10^3 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

(2) 実験2 (気体の燃料消費実験)

実験1と同様にノズルの開閉時間を超えて球状火炎が観察された。有効な火炎噴射ができた回数と球状火炎が確認できた時間を動画から1/10秒単位で実測し、火炎噴射時間とした(表5)。

表5 実験2 液体燃料消費実験

	名称	火炎噴射回数	合計火炎噴射時間(10発)
実験2-1	機器2	79	10.74秒
実験2-2	機器3	54	11.54秒

ア 実験2-1 (機器2による燃料消費実験)

(イ) 放射熱流束

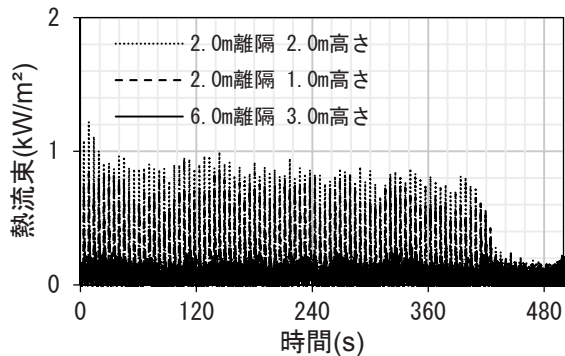


図6 放射熱流束(実験2-1)

離隔2.0m・高さ2.0mの測定値が最も高く、最大値で約1.2kW/m<sup>2</sup>となっていた。噴射回数を重ねる毎に測定値が低くなる傾向があった(図6)。

(イ) 発熱速度

表5のとおり、燃料をガスカートリッジ1缶分0.25kg使用した時の輝炎の発生時間の合計から、本検証での実験条件では発熱速度は以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} \text{発熱速度} &= \text{ブタンガス (0.25 kg) の発熱量 [kJ]} \\ & \div \text{燃焼時間 [秒]} = 45.7 \times 10^3 [\text{kJ/kg}] \times 0.250 [\text{kg}] \\ & \div 10.74 [\text{s}] / 10 [\text{回}] / 79 [\text{発}] \approx 135.2 [\text{kW}] \end{aligned}$$

イ 実験2-2 (機器3による燃料消費実験)

(イ) 放射熱流束

図7では、実験2-2における放射熱流束値の変化のグラフを示した。

離隔2.0m・高さ2.0mの測定値が最も高く、最大値で約7.0kW/m<sup>2</sup>で、他の測定点では約4.6~7.0kW/m<sup>2</sup>となった。

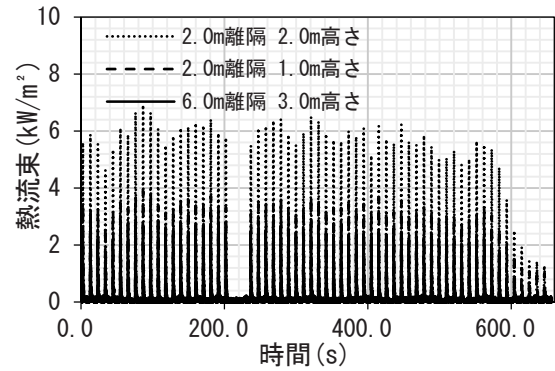


図7 放射熱流束(実験2-2)

(イ) 発熱速度

表5のとおり、5kg LPGボンベでプロパンガス燃料を使用した時の輝炎の発生時間の合計から、本検証での実験条件の発熱速度は以下のとおり算出された。

$$\begin{aligned} \text{発熱速度} &= \text{プロパンガス (5 kg) の発熱量 [kJ]} \div \text{燃焼} \\ & \text{時間 [秒]} = 46 \times 10^3 [\text{kJ/kg}] \times 5.0 [\text{kg}] \div 11.54 [\text{s}] \\ & \div 10 [\text{s}] / 54 [\text{回}] \approx 3.7 \times 10^3 [\text{kW}] \end{aligned}$$

(3) 実験3 (機器1の熱環境測定)

ア 実験3-1 (0.6mmノズル)

(イ) 火炎形状

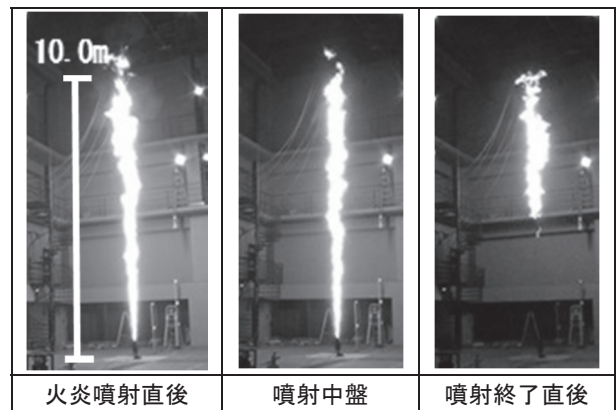


図8 機器1 0.6mmノズルの火炎発生状況

火炎は噴射開始直後に、最大高さ約10mまで達した。その後、一旦火炎は縮小し、約8~10mの間を伸縮した。火炎幅は約1mで、水平方向の変動は少なかった。火炎噴射が終了すると、輝炎が下から上方に向かって消えて浮き上がり火炎状になった(図8)。

(イ) 火炎中心軸上の温度変化

図9では、実験3-1(10秒間噴射)の火炎中心軸の温度変化のグラフを示した。

噴射開始から3秒後程度で最高温度に達した後、ほぼ一定の温度で推移し、噴射終了直後に急低下した。

高さ5.0~9.0mの値が他に比べて約500℃以上と著し

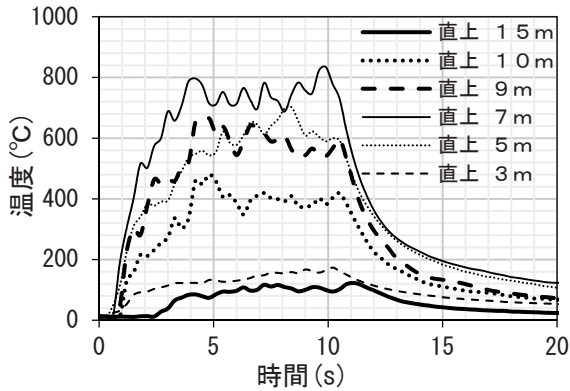


図9 火炎中心軸上の温度変化(実験3-1, 0.6mmノズル)

く高くなり、高さ7.0mの値がもっとも高かった。これより上方では温度は低くなり、高さ15.0mでは70~130°C程度となった。また噴射時間が長いほど、最高温度は高くなる傾向があった。

(ウ) 周囲の温度変化

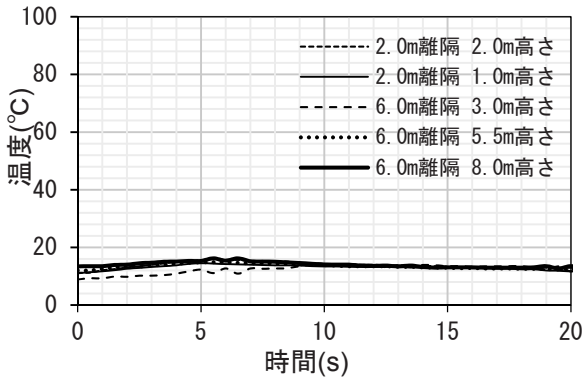


図10 周囲の温度変化(実験3-1, 0.6mmノズル)

図10では、実験3-1(10秒間噴射)の周囲の温度変化のグラフを示した。各測定点では、時間経過に伴う顕著な温度変化は見られなかった。

最も温度上昇が大きくなったのは、離隔2.0m・高さ2.0mで約10°C上昇した。他の測定点では、上昇値は10°C未満であった。噴射時間が長いほど、上昇温度が高くなる傾向がある。離隔6.0mの位置では、測定位置が高くなるほど、温度上昇値が高くなった。

(エ) 放射熱流束

図11では実験3-1(10秒間噴射)の周囲の放射熱流束値の変化のグラフを示した。

それぞれの測定点で、噴射とともに急上昇したのち、3秒までは緩やかな上昇、または、ほぼ一定の数値変化を示し、噴射終了とともに急低下した。

高さ15.0m下向きの測定点のみ、噴射直後の熱流束値はピーク値、約0.8~0.9kW/m<sup>2</sup>を示した後、約60%程度の値まで低下し、約0.5~0.6kW/m<sup>2</sup>で推移した。

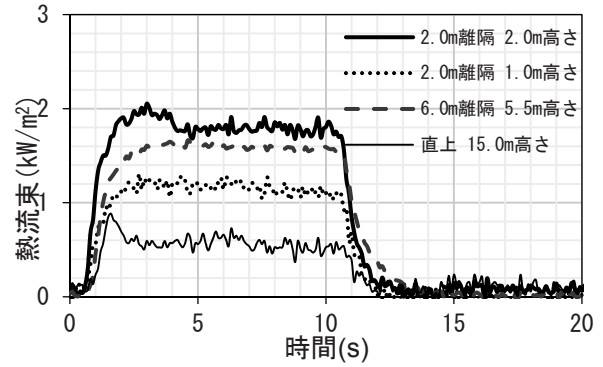


図11 放射熱流束(実験3-1)

火炎噴射時間が長くても、放射熱流束値に大きな差が生じなかった。最大値は高さ2.0m・距離2.0mの測定点で、2.0kW/m<sup>2</sup>を超えることがあった。距離6.0mで最大値は高さ5.5mの約1.5~1.7kW/m<sup>2</sup>で、これより上下の位置では低い数値となる。高さ15.0m下向きの測定値は全体を通じて、1.0kW/m<sup>2</sup>に達しなかった。

イ 実験3-2 (1.0mmノズル)

(ア) 火炎形状

火炎の噴射開始時に、最大高さは約12mまで達した。その後、一旦火炎は縮小し、約10~12mの間を伸縮し、火炎幅は1.0m程度で、水平方向の変化は少なかった。実験3-1(0.6mmノズル)と同様に、火炎噴射が終了すると、輝炎が下から上方に向かって消えて浮き上がり火炎状になった。

(イ) 火炎中心軸上の温度変化

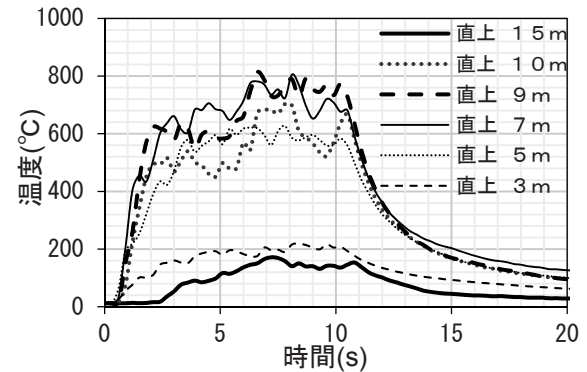


図12 火炎中心軸上の温度変化(実験3-2, 1.0mmノズル)

図12では、実験3-2(10秒間噴射)の火炎中心軸の温度変化のグラフを示した。

噴射開始から3秒後程度で最高温度に達した後、ほぼ一定の温度で推移した。噴射終了直後に急低下した。噴射時間が長いほど最高温度は高くなる傾向が認められ、高さ15.0mではほとんど100°C以上、最大値で約237.7°Cとなっていた。

(ウ) 周囲の温度変化

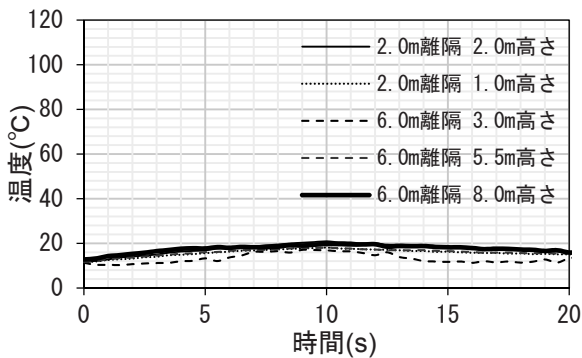


図 13 周囲の温度変化(実験 3-2, 1.0mm ノズル)

図 13 では、実験 3-2 (10 秒間噴射) の周囲の温度変化のグラフを示した。

ノズル 0.6mm の時とほぼ同様の温度変化となった。最も温度上昇が大きかったのは離隔 2.0m・高さ 2.0m の約 9~10°C程度で、他の測定点は 10°Cに達しなかった。噴射時間が長いほど、周囲の温度は高い傾向があり、離隔 6.0m では、測定位置が高いほど温度上昇が高かった。

(エ) 放射熱流束

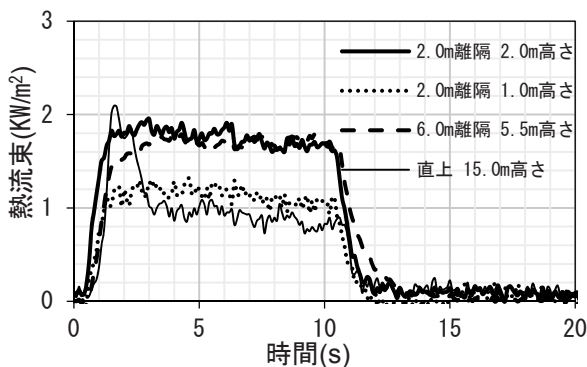


図 14 放射熱流束 (実験 3-2)

図 14 では、それぞれ実験 3-2 (10 秒間噴射) の放射熱流束値の変化のグラフを示した。

噴射時間が長くなっても数値の変化は顕著ではなかった。噴射とともに急上昇した直後は緩やかな上昇、または、ほぼ一定の数値変化を示し、噴射終了とともに急低下した。高さ 15.0m 下向き測定点のみ、噴射直後に熱流束値がピークを示した後、約 1.0kW/m<sup>2</sup>前後の値で推移した。

(4) 実験 4 (機器 2 の熱環境測定)

ア 火炎形状

火炎は噴射開始直後、ノズル先から上方へ伸長し、上端が球状を形成し始めた。噴射終了に伴い火炎が球状になり、直径は最大で約 1.0m 程度で、ノズルから伸びる輝炎部分が消失した。球状火炎はその後、高さは約 3m 程度まで上昇し、消失した。

イ 火炎中心軸上の温度変化

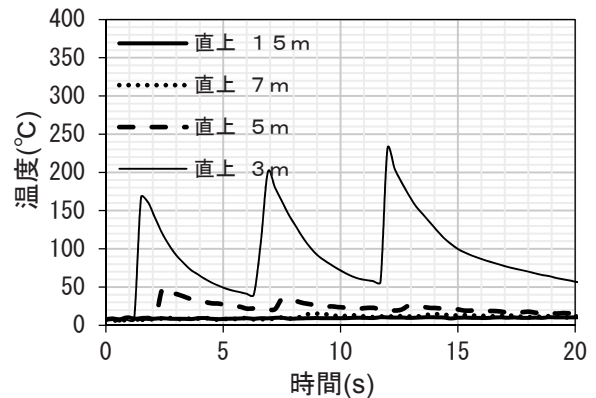


図 15 機器直上の温度変化(実験 4、3 回噴射)

図 15 では、実験 4 (3 回噴射) の火炎中心軸上の温度変化のグラフを示した。

高さ 3.0m の温度が最も高く、次いで高さ 5.0m がそれに続いた。噴射時に応じて温度の上昇・低下を明瞭に示し、ピーク時はそれぞれ約 70~210°C、約 30~60°Cを示し、温度変化の幅は噴射回数毎に異なり、特に傾向は見られなかった。他の測定点では、約 10°C程度の変化で顕著な変化を示さなかった。噴射回数により、温度が高くなる傾向がみられる。最高温度は高さ 3.0m における 180~230°C程度で、それより高い位置の測定点では、ほとんどが 30°C以下となった。

ウ 周囲の温度変化

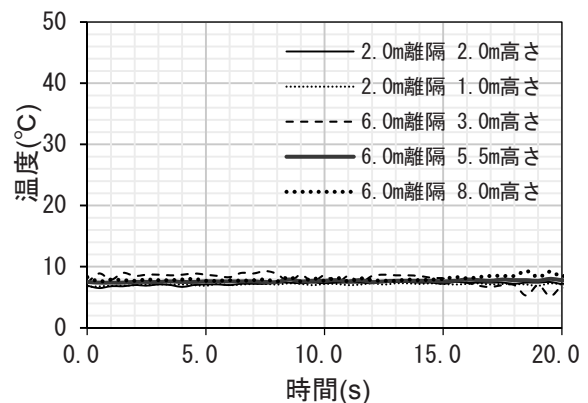


図 16 周囲の温度変化(実験 4、3 回噴射)

図 16 では、それぞれ実験 4 (3 回噴射) の周囲の温度変化のグラフを示した。

全体的に、火炎噴射時の顕著な温度変化は見られず、約 5°Cの範囲に収まった。噴射回数による傾向はほとんど認められなかった。離隔 6.0m では高さ 3.0m が最大で、4.4~3.9°C上昇していた。全体として上昇温度は、ほとんどが 3.0°Cに達していなかった。

エ 放射熱流束

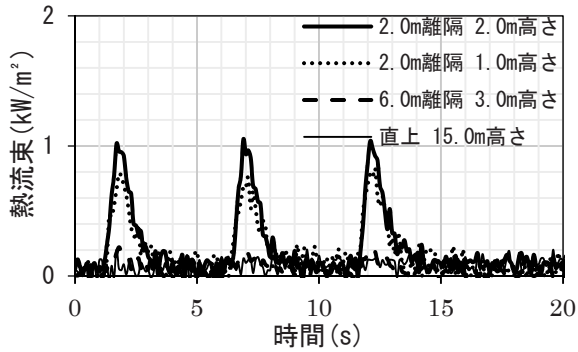


図 17 放射熱流束 (実験 4)

図 17 では、実験 4 (3 回噴射) の放射熱流束値の変化のグラフを示した。

最も高い数値は、離隔 2.0m・高さ 2.0m の約 1.0kW/m<sup>2</sup> 前後の数値で、次いで、離隔 2.0m・高さ 1.0m で約 0.2~4.0kW/m<sup>2</sup> を示した。他の測定点では、ほぼ 0.3kW/m<sup>2</sup> 以下の低い数値で推移し、顕著な変化は示さなかった。

放射熱流束値は噴射回数での傾向は認められなかった。最大値は離隔 2.0m・高さ 2.0m の 1.0~1.2kW/m<sup>2</sup>、次いで、離隔 2.0m・高さ 1.0m の 0.7~0.8kW/m<sup>2</sup> である。離隔 6.0m では、高さ 3.0m の数値が 0.22~0.17kW/m<sup>2</sup> で最も高かった。高さ 15.0m 下向きの数値は 0.19~0.27kW/m<sup>2</sup> であった。

(5) 実験 5 (機器 3 の熱環境測定)

ア 火炎形状

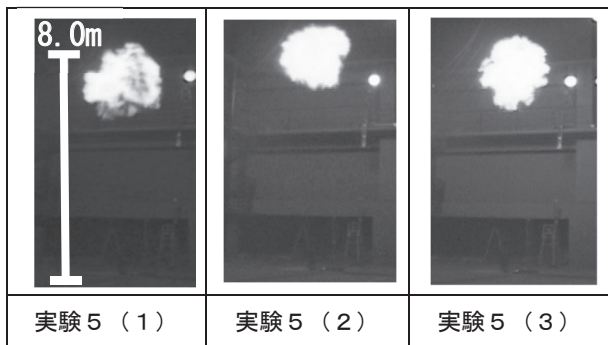


図 18 機器 3 の火炎形状

図 18 では機器 3 の球状火炎形状を示した。

火炎噴射開始直後は棒状火炎を形成しながら、上部に球状部分を形成した。噴射終了後は、棒状部分が消失しながら、球状火炎に変化し、直径 2.0~2.8m 程度に形成された。球状火炎は高さ約 8m まで上昇し、消失した。

イ 火炎中心軸上の温度変化

図 19 では実験 5 (3 回噴射) の火炎中心軸上の温度変化のグラフを示した。

高さ 3.0m の温度が最も高く、次いで高さ 5.0m、7.0m がそれに続いた。その他の測定点は比較的溫度が低く、約

200℃以下であった。それぞれのピーク値は高さ 3.0m で

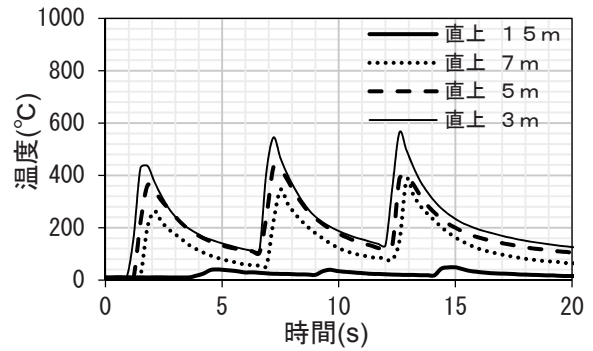


図 19 機器直上の温度変化(実験 5、3 回噴射)

約 400~620℃を示し、噴射回数に応じて最高温度が高くなる傾向が見られた。

最も温度が高かった高さ 3.0m では 627.4℃に達した。上方向に行くにしたがって、温度は低くなり、高さ 15.0m では最高温度は 100℃以下であった。

ウ 周囲の温度変化

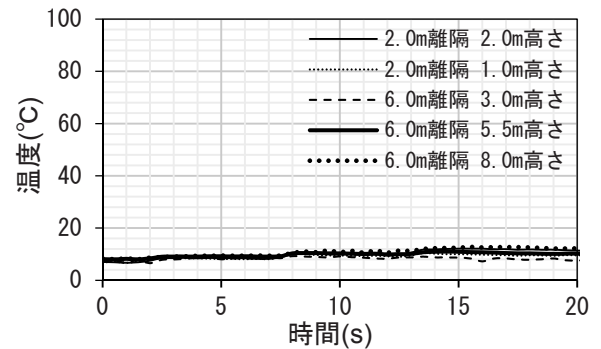


図 20 機器周辺の温度変化(実験 5、3 回噴射)

図 20 では、それぞれ実験 5 (3 回噴射) の周囲の温度変化のグラフを示した。

温度変化の幅は約 10℃程度の変化で顕著な変化を示さなかった。また、噴射回数による傾向はあまり認められなかった。この中での最高温度は、離隔 2.0m・高さ 2.0m で、4.0~9.1℃の温度上昇であった。離隔 6.0m では高さ 5.5m が最大で、これより上下方向に行くにしたがって、上昇温度が低かった。全体として上昇温度は、ほとんどが 5.0℃以下であった。

エ 放射熱流束

図 21 では、実験 5 (3 回噴射) 放射熱流束値の変化のグラフを示した。

個々の噴射は単峰性のグラフとなり、噴射回数に限らず熱流束値はほぼ同様の数値変化を示す。最大値は、離隔 2.0m・高さ 2.0m の約 4.0~5.6kW/m<sup>2</sup> で、次いで、離隔 2.0m・高さ 1.0m の約 2.0~3.0kW/m<sup>2</sup> であった。

離隔 6.0m では、高さ 2.0~5.5m で 2.0kW/m<sup>2</sup> を超え、最大値は高さ 3.0m で、2.4~2.86kW/m<sup>2</sup> となった。高さ 15.0m 下向きの数値は 1.2~1.70kW/m<sup>2</sup> であった。

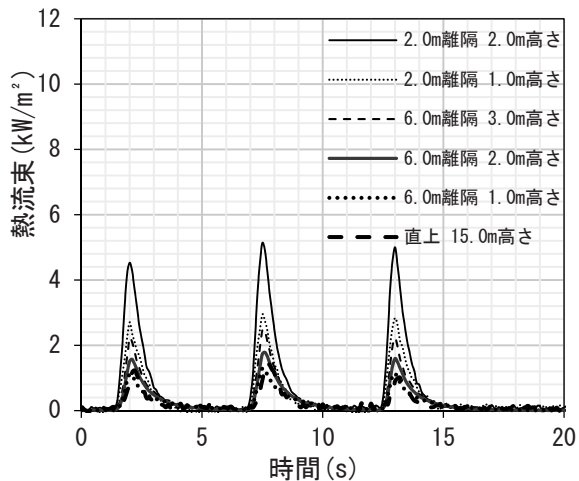


図 21 放射熱流束 (実験 5)

## 5 考察

機器 1、機器 2 及び機器 3 で、高さ 3 m を超える瞬間的火災を発生させた結果、以下のように考察する。

### (1) 燃料消費量と発熱速度

従来の基準に対応した規模の機器 2 は 4 (2) ア (イ) より、発熱速度は約 0.1 MW であった。同じ気体燃料の機器 3 はボンベ型の容器であり、4 (2) イ (イ) よりその発熱速度は 3.7 MW まで達した。機器 1 は 1 度に基準値である 100 mL 以上の燃料を要し、4 (1) ア (イ) 及び 4 (1) イ (イ) より、発熱速度は 2.8~3.7 MW であった。機器 1 や機器 3 のような大規模な火災を発生させるには、現行基準を超えた燃料消費量や容器が必要と考えられる。

### (2) 火炎形状

各機器が発生させる火炎は、噴射圧力や角度等の設定を変えなければほぼ一定の範囲の形状・寸法を示した。燃料を加圧噴射することで棒状火炎を形成する場合は、4 (3) イ (イ) 及び 4 (5) ア より、同程度の発熱速度の拡散火炎よりも火炎高さが高くなるため、危険性が增大するものと考えられる。

### (3) 火炎中心軸の温度変化

4 (3) イ (イ) 及び 4 (5) イ より、火炎高さの中央付近が最高温度を示し、上方向に向かって温度が低く、火炎高さよりも 4~5 m 高い位置では 100°C 程度となり、着火危険性は認められない。

しかし、機器使用時の温湿度条件や発熱量に対して相対的に狭い屋内や区画内であった場合は、火炎の発生が連続すると、高温状態になる危険性がある。

### (4) 火炎周囲の温度変化

4 (3) イ (イ) 及び 4 (5) ウ より、火炎から隔離 2.0 m においても温度上昇は 10°C を超えず、隔離 6.0 m の位置では数°C 程度しか上昇しなかった。しかし、機器使用時の温湿度条件や発熱量に対して相対的に狭い屋内や区画内であった場合は、火炎の発生が連続すると、より高温状態になる危険性が考えられる。

### (5) 放射熱流束

4 (3) ア (エ) 及び 4 (3) イ (エ) より機器 1 の最大値は約 2.0 kW/m<sup>2</sup> 以下となり、着火の危険や熱傷の危険性は低い。4 (5) エ より、機器 3 では一部の場所で 4.0~5.0 kW/m<sup>2</sup> に達したが、球状火炎は「瞬間的」に発生し消失するため、着火危険性及び熱傷危険性は少ないと考えられる。

## 6 おわりに

本検証の結果から、従来機器に対して大規模な火炎においても、周囲の熱環境に影響は少ないことが分かった。機器が適切かつ安定な運用がされていれば、従来の基準の隔離距離である距離 2.0 m での着火危険性、距離 6.0 m の位置に観客がいた場合の熱傷危険の安全性が確保できると判断できる。ただし、大規模の火災を生じさせるときは、演出を屋内で実施する場合や、連続して火災を発生させる場合に、機器の及ぼす周囲への温度上昇と熱の蓄積に注意する必要がある。

### [参考文献]

- 1) 東京消防庁：「瞬間的な炎を発生させる機器を用いた安全性のあり方に関する調査研究」(2009)
- 2) 須川修身：「高速で噴出する拡散火炎（バックドラフト時の火炎）の性状の計測とモデリング」科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書(2013)



# Study on Safety of Instantaneous Open Flame by the Flame Effect Devices

Yuusuke HARADA\*, Akihiko IIDA\*, Hidekazu OTAKI\*, Yuuta HIGASHI\*\*

## Abstract

According to the Article 23 of the Tokyo Fire Prevention Ordinance, the use of open flames is prohibited in theaters, on performance stages, and the others. But it might be permitted if a fire station chief verifies that it meets the safety standard established by the fire chief of the Tokyo Fire Department.

In 2009, a new standard was provided for the submission of the flame effect. Since then, the devices for the instantaneous flames and the methods of the flame effect have been diversified. Furthermore, in connection with the Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games, applications for requesting the use of larger flames are expected to be submitted.

The purpose of this study was measurement of the surrounding temperature and the radiant heat flux with the flames larger than assumed in the current safety standard. As a result, it became clear that each distance from the flames to the combustible materials, operator and spectators was adequate.