

ウォータースクリーンにおける区画化効果

Effects of Water Screen System in Compartment

桑 名 秀 明 栗 岡 均 新 井 芳 明
天 野 玲 子¹⁾ 出 石 陽 一²⁾

要 約

大深度地下利用法の施行に伴い地下空間利用の重要性が増している。しかし、輸送を中心とした地下空間で災害が発生した場合、従来の技術では火災発生地点を区画し、火災の延焼拡大・高温の煙の拡大を防止することと、消防・救援活動に役立てることの両立が難しい場合も見られた。今回それらの問題点を解決するために水の幕（ウォータースクリーン）を利用した区画形成システムを提案するとともに、その性能を把握することを目的として実大の 1/2 のモデルを利用して火災実験を行った。システムの区画化効果について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験目的
- III. 実験概要
- IV. 実験結果・考察
- V. WS 効果の考察
- VI. まとめ

I. はじめに

大深度地下利用法の施行や都市再生の進展に伴い、地下空間は、人間の利用空間として、より重要な地位を占めるようになってきている。そのため、未然に災害の発生を防止するだけでなく、災害が発生した場合にも被災者の安全を確保する防災技術が必要となる。

地下空間火災を想定した場合には、火災の延焼・拡大を抑制し、構造物を冷却することによって「構造物の安全性」を確保するとともに、被災者を火災に伴って発生する熱・煙や有毒ガスなどから隔離して、安全な場所に誘導すること、すなわち、「避難安全性」の確保が重要となる。

地下空間における火災を対象とした安全設計技術について、鹿島は独立行政法人消防研究所と共同で「地下トンネルの火災安全設計法に関する研究」（1994年10月～1999年3月）を実施し、調査・実験を通じて数多くの知見の蓄積を図った。

2000年度には鹿島が独自技術として「水幕による火災ゾーンの区画化技術＝ウォータースクリーン」に関する技術開発を進め、2001年度には建築分野で特定防火設備としての性能評価に基づき国内で最初に国土交通大臣認定を取得した。

ここで、ウォータースクリーンは、区画化する位置に列状に水幕用スパイラルヘッド（Photo 1）を配置し、そこから霧状の水を放水することで水の幕を作る技術である。

このシステムは、水の幕（ウォータースクリーン）を用いて火災

が発生したゾーンを区画化して、熱や煙の拡散を抑制し、有害浮遊粒子を捕捉・洗浄することによって被災者の安全を確保するとともに、構造物の被害を極小化する火災防災システムである。

また、区画化とは、火災に伴って発生する熱や煙を一定範囲内に封じ込め、空間全体への拡散を防止する考え方で、従来は鋼製の防火シャッターや防火シートが使用されていた。ほかにもエアカーテンなどがある。しかし、防火シャッターや防火シートなどの設備では、障害物があるために降下障害が発生し区画化が不完全になったり、区画内の温度上昇にともない設備が受熱により変形したり取っ手が熱くなるなどの避難安全性が阻害されるなどの問題点が、またエアカーテンについても、給・排気設備が大型化したり、制御が難しいなどの問題点が指摘されている。このような問題点は、鉄道や道路などの交通流のあるトンネル空間では大断面や複雑な形状に対応しなければならないなど、より困難なものとなる。

以上の背景より、大深度地下などに建設される鉄道・道路トンネルを対象とした新しい火災防災システム「水幕式火災防災システム」を開発した。

開発に際しては、2002年度11月に、道路トンネルを対象とした第1次トンネル模型火災実験を実施し、本システムの有効性を確認した^{1)～3)}。この結果を受けて、ウォータースクリーン（以下WSと記す）の区画化効果を定量的に把握するために、2003年度に第2次トンネル模型火災実験を独立行政法人消防研究所との共同研究のもと実施した。本報告は第2次トンネル模型火災実験の内容及び結果について記すものである。

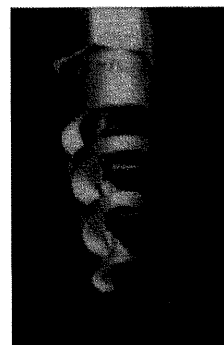


Photo 1 Spiral Head

1) 土木管理本部 2) 広島支店

キーワード: ウォータースクリーン, 防災設備, 水幕, 区画, 避難, 防火, トンネル, 地下空間, 鉄道, 道路

II. 実験目的

WSの区画性能を確認するため、予備試験を行い、性能把握のための実験手法の妥当性並びに区画化技術としての性能の保持を検証した。既報1)～4)において、火源燃料n-ヘプタンを主とした1/2スケールの模型装置(トンネル延長18.2m)を用いた火災実験に基づくWSの性能検証結果について報告した。この模型についてはトンネル延長が火源に対し短かったために、WSと火源が相互に影響した可能性が高い結果を示した。そこで、今回道路規格第一種AA等級トンネルの区画長さ50mを意図して新たに模型長を延長し、風速やガソリンを中心に実験条件を変化させ、WSの区画化特性を次の項目に関して定量的に把握した。また、避難者への影響の把握も行った。

- ①有風時におけるWS挙動の把握並びに水噴霧設備との比較
- ②WSのCO・CO₂捕捉効果の把握
- ③火災区画内性状の把握

III. 実験概要

1. 実施時期

2003年6月30日～7月11日

2. 実施体制

(独)消防研究所と鹿島建設(株)との2003年度共同研究として、ホーチキ(株)へ委託して実施した。

3. 実験場

宮城県角田市内ホーチキ(株)総合防災実験場

4. 模型

高さ2.7m×幅5.4m×長さ43.7mの矩形断面のトンネル状空間である。トンネル壁面は、基本的に鉄骨フレームと珪酸カルシウム版で構成された可動式ユニットを連結しているが、火源周辺部については高温と散水という悪条件に対応するため耐火パネルで保護した。また、側面には耐火ガラス製の観察窓を火源並びにWS周辺に4箇所設置した。Photo 2に模型の概観を示す。強制換気時の換気方向は図右側から左側方向に送風した。

5. 付属設備

模型装置の付属設備並びに主な計測器の設置位置をFig.1に示す。以下にその概要を示す。

WS設備：放水ヘッドの仕様は、放水圧1.0MPa、平均粒子径200 μ m、放水量10Liter/min/個、噴霧角150°～170°である。Fig.1に示すように火源から±12.5mの位置に、約1.6mの間隔で各々2列配置した。2列のヘッドは、1列当たり1.0m間隔で5～6個を千鳥に取り付けた。放水量は、片側11個のヘッドの合計110Liter/minとなる。

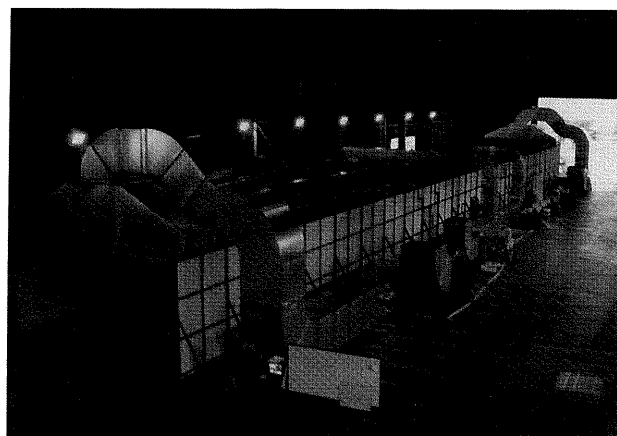


Photo 2 Outline of Experimental Model

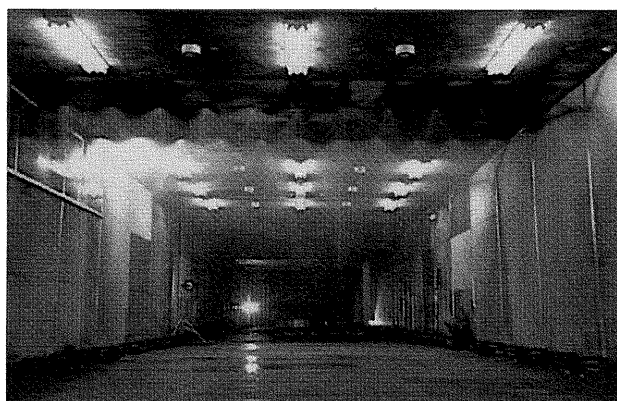


Photo 3 Circumstance of Model (Before Working)

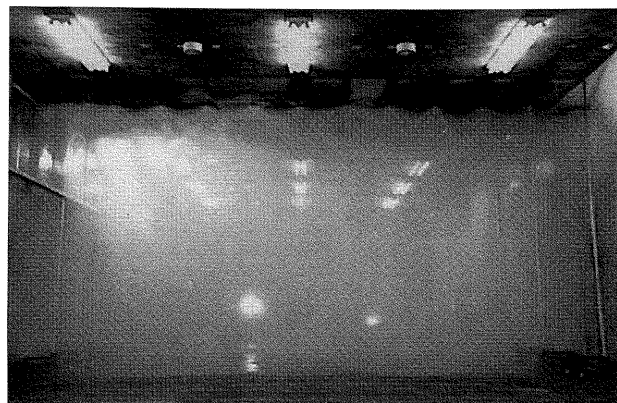


Photo 4 State of Water Screen (After Working)

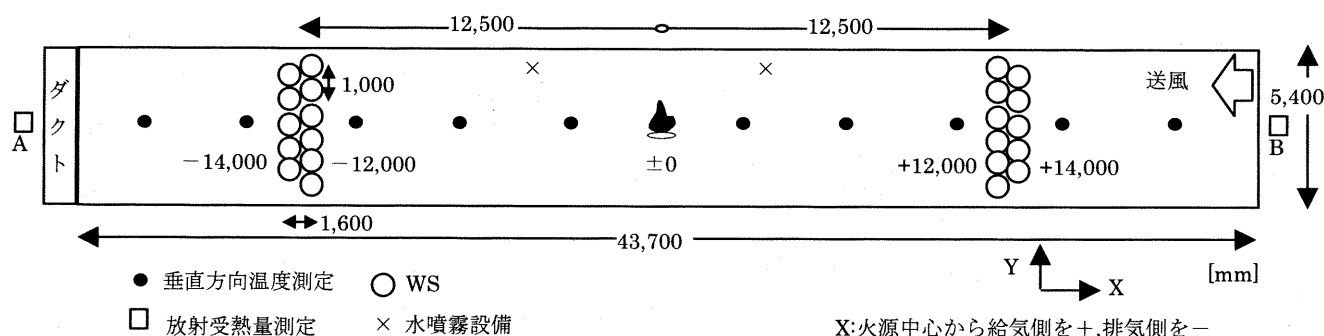


Fig.1 Experimental Apparatus

る。1/2 模型両端部で水幕が形成されることにより、約 25m(実トンネル空間 50m 区画を意図)の防災区画が形成される。WS 作動状況について Photo 3 に作動前, Photo 4 に作動後を示す。

水噴霧設備: 水噴霧ヘッドの仕様は、放水圧 0.34MPa, 平均粒子径 500 μm , 放水量 140Liter/min/個, 噴霧角 100° ~110° である。本実験においては、WS と比較という観点より水噴霧設備は直接火源には放水を行わない位置に 2 箇所 2 方向に設置した。給水配管は WS と別系統にして WS と独立させて作動させるようにした。

排煙ダクト: 排煙用フードを模型両端部上部に設置し、板厚約 10mm の矩形ダクト (1m $\times$ 1m) を用いることにより発生した高温の煙の性状を把握した。

排煙ファン: 排煙ファン(定格風量 30,000m³/h)をダクト端部に設置し排気した。

給気風速発生装置: 火災時の換気を模擬して給気側に模型端部から 2m 離れた位置に工業用扇風機を 20 台配置した。火源位置で模型内断面風速が均等になるように予備計測し作動台数及び位置を調整した。

6. 測定項目及び測定箇所・測定点数

計測概要を Table 1 に示す。本実験においては、火災時の基本量である発熱速度を酸素消費法と重量換算法で求めた。また、火災時に発生する煤の量に関する WS による洗い落とし効果を把握するために開口端部にダクトを設置し、高温煙中の煤の性状を把握した。火源燃焼状況や WS 噴出状況、煙流動状況の把握及び避難時や消防活動時の火源及び避難方向の視認性把握のために、目視及びビデオカメラ、サーモカメラによる観測を行った。

Table 2 Experiment Condition

検討条件	風速 [m/s]	燃料	発熱速度 [MW]	水噴霧	Case No.	
					WS 無	WS 有
①. 基本条件	0.0	G	1.5	無	1	2
②. 燃料	0.0	H	1.5	無	3	4
③. 水噴霧	0.0	G	1.5	有	5	6
④. 発熱速度	0.0	G	5.0	無	7	8
⑤. 風速小	1.4	G	1.5	無	9	10
⑥. 風速小・発熱速度	1.4	G	5.0	無	11	12
⑦. 風速中	1.8	G	1.5	無	13	14
⑧. 風速大	2.2	G	1.5	無	15	16

*燃料: G=ガソリン, H=n-ヘプタン

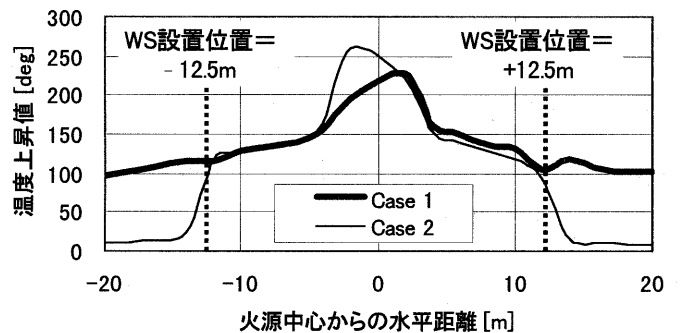


Fig.2 Distribution of Ceiling Temperature
Condition ①

Table 1 Measurement Elements

測定項目	対象	使用機器	計測箇所 (測定点数)
温度	天井近傍温度分布	シーブ型熱電対	X=0.0 から ϕ 2m で 18 箇所(Y=0.0,Z=2.65) (18 点)
	垂直温度分布	K 型熱電対	(1 個所に Z=0.6m から垂直方向 ϕ 0.3m ごとに 8 点) $\times$ (X=0.0 から ϕ 3.5~4.0m で 10 箇所) (80 点)
	火源近傍温度分布	K 型熱電対	火源上部に 0.1m メッシュに 0.9m 幅 $\times$ 1.7m 高(97 点)
	外気温	K 型熱電対	模型から約 5m 離し外乱の無い位置に設置(1 点)
	フード内温度	K 型熱電対	排気側フード入り口断面中心(1 点)
	ダクト内温度	K 型熱電対	ダクト横引部の断面中心(1 点)
風速	断面風速設定時用	熱線風速計	燃焼実験前に断面風速設定用に実施(6 点)
圧力	実験時風速用	二方向管	X=-10.0m に Z=0.7m から ϕ 0.3~0.7(6 点)
熱流計	熱流測定	メドサーム	火源周辺(5 点)
放射計	放射測定	東京精工 RE-4 型	X= $\pm$ 25.0m, Y=0.0m, Z=1.2m(2 点)
重量減少	燃料重量変化	1kN 用ロードセル	燃焼皿下に設置(3 点合計値を 1 点)
ガス濃度	O ₂ 濃度	ベスト測器 BMG-110	ダクト横引部の断面中心(1 点)
	CO, CO ₂ 濃度	島津製作所 CGT-7000	ダクト横引部の断面中心(1 点)
湿度	ガス温湿度用	バイサラ	ダクト横引部の断面中心(1 点), WS 区画内(1 点)
煙濃度	実験場内、区画内及びダクト内煙濃度変化	減光式煙濃度計	区画内 X=-5.8, -8.8m, Y=0.0m, Z=0.79m, ダクト横引部の断面中心 (計 3 点), 実験場端部
散水分煤量	WS 周辺, ダクト内煤量捕捉	ダストサンプラー, 散水樽	WS 区画を中心に -2m~6m, ダクト横引部の断面中心(1 点)

X, Y, Z 方向について: X は火源中心を X=0.0 とし給気側を+, 排気側を-とした。Y は火源中心を Y=0.0 とし X 給気側に向かって左方向を+とし, 右方向を-とした。Z は火源中心床面を Z=0.0 とし, 垂直上方向を+とした。

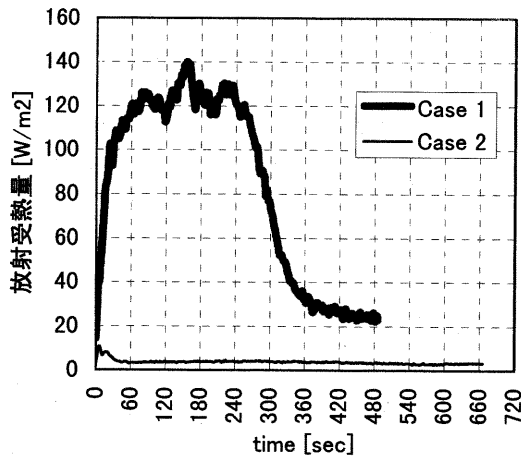


Fig.3 Time History of Received Radiation Ratio
Condition ①

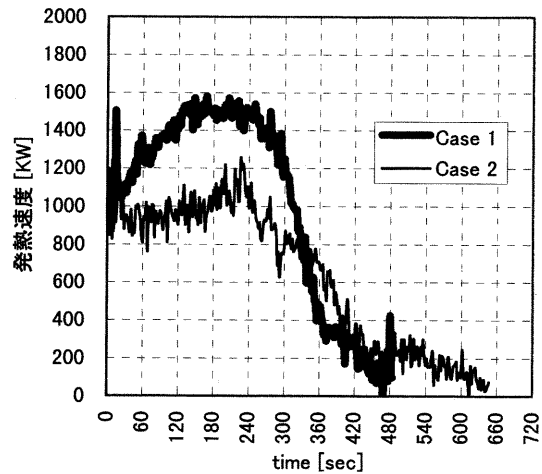


Fig.4 Time History of Heat Release Rate
Condition ①

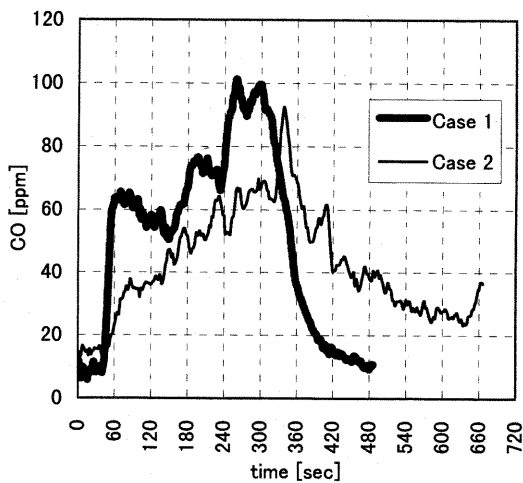


Fig.5-a Time History of CO Gas Density
Condition ①

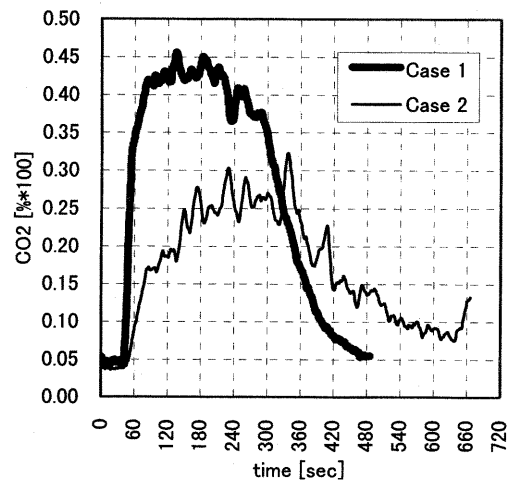


Fig.5-b Time History of CO₂ Gas Density
Condition ①

7. 実験条件

実験因子としては、風速 (0.0, 1.4, 1.8, 2.2 [m/sec]), 燃料種類 (煙の濃淡), 発熱速度 (1.5, 5.0 [MW]), 水噴霧設備作動の有無, WS 設備作動の有無の5項目とした。相似則としては、フルード則を基に模型縮尺比を考慮して、発熱速度は普通車1台想定 of 1.5MW, 換気条件は自然換気と縦流換気方式での遡上阻止風速である 1.4m/sec を基準とした。Table 2 に条件一覧と実験ケースを示す。

8. 燃焼時間及び計測時間

燃焼時間は 10 分間を目標に燃料量を決定した。計測は着火 1 分前から開始し鎮火後 1 分まで、2 秒間隔で計測を行った。IV 章の結果の検討に用いた値は、初期値は着火前 60 秒～30 秒の平均値を、V 章の考察時に用いた値は着火後 120 秒～240 秒の平均値である。上昇値は[実験値]－[初期値]とした。

9. 実験設備作動手順

WS 設備は着火 30 秒後、水噴霧設備は着火 3 分後で作動させ、換気設備は着火前から作動させた。

IV. 実験結果・考察

実験因子の組合せにより、総計 22 ケースの実験を実施したが、WS の区画化効果の確認は、Table 2 の検討条件に従って、WS 有無のケース (計 16 ケース) を用いて行った。本報告においては、実験結果として検討条件① (無風, ガソリン 1.5MW) (Case 1, Case 2) を例にその性状の概要を述べる。

1. 天井面近傍温度分布への影響

Fig. 2 に天井下 5cm に設置したシース型熱電対の温度分布を示す。WS が無い場合、火源設置直上が高温になっているが出口に向かって緩やかに温度降下している。一方 WS 作動時は、区画内においては若干温度上昇を示したがほぼ WS が無い場合と同じ挙動を示し、区画外において急激に温度が減衰した。

2. 放射受熱量への影響

Fig. 3 に模型開口外部に設置した放射計 A の時間履歴を示す。着火後のピークとして Case 1 (WS 無し) においては約 120～140W/m² となり、Case 2 においては約 5W/m² となった。WS を用いた区画化のため、区画外への熱の放射量が小さくなっている。

3. 発熱速度への影響

Fig. 4 に発熱速度の時間履歴を示す。Case 1 においては最大 1.5MW となり、Case 2 においては 1.0MW となった。WS の区画と水滴粒子により、燃焼の抑制効果が生じ小さくなったものと推定される。

4. ガス濃度への影響

Fig. 5-a に CO 濃度、Fig. 5-b に CO₂ 濃度の時間履歴を示す。Case 2 においては発熱速度の減少によるガス発生量の抑制の影響だけでなく、鎮火後の後半に緩やかな減少を示した。これは、区画化効果によりガスが区画内に閉じ込められ、徐々に流出したものと判断される。

V. WS 効果の考察

WS の効果として避難者への影響と構造躯体への影響を検討した。避難者が受ける影響としては、区画の熱の遮断効果（区画外における熱環境、区画内外差における熱環境、区画内外の放射）、区画のガス遮断効果（空間内のガス濃度）を考え、構造躯体への影響としては区画内の発熱速度を考え、以下の五つの方法により低減率を確認することにした。（各低減率は%で示す。）

1. 低減率の定義

a. WS 区画外での温度に基づく低減効果

区画の熱遮断効果（区画外の熱環境の低減効果）として、WS 区画外側の同位置での温度測定を基にした、WS 作動の有無のケースで温度上昇値の比較による低減率を式(1)とする。

$$\eta_1 = 1 - \frac{\Delta T_{WS有}}{\Delta T_{WS無}} \quad \dots (1)$$

ΔT : 温度上昇値 [deg]

ただし、遮炎性能に関しては、加熱炉を用いた実験 (IS0834 標準加熱曲線) において、WS 区画外での温度上昇が 250℃以上(火災時の見立てで火災相当範囲温度)とならず、火災相当熱気流を防止することと別途確認している。

b. WS 内外温度に基づく低減効果

区画の熱遮断効果の一つとして、同時刻の WS 区画内外における温度上昇値の比較による低減率を式(2)とする。a, b の効果は、他の防火区画にはない性能で、地下空間での火災時における、区画化された火源空間の温度低減効果を意味する。

$$\eta_2 = 1 - \frac{\Delta T_{WS外}}{\Delta T_{WS内}} \quad \dots (2)$$

c. 放射受熱量上昇値に基づく低減効果

避難者の放射環境及び隣接区画の可燃物への延焼防止を確認するために、模型開口外部に設置した放射計による放射受熱量上昇値の比較による低減率を式(3)とする。

$$\eta_3 = 1 - \frac{\Delta E_{WS有}}{\Delta E_{WS無}} \quad \dots (3)$$

ΔE : 放射受熱量上昇値 [kW/m²]

d. ガス濃度上昇値に基づく低減効果

CO 濃度並びに CO₂ 濃度は避難者への影響が大きい。これらを低減することは、避難者が燃焼によるガスに暴露されることの低減につながるものと考えられる。ダクト内でのサンプリングにおけるガス

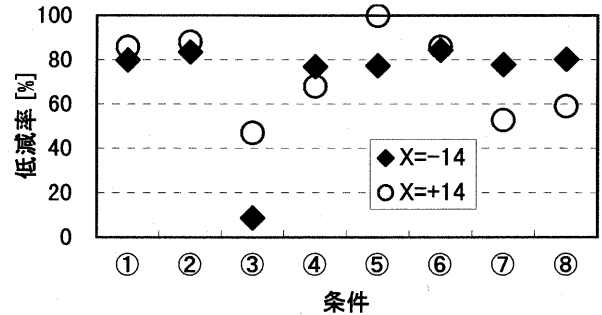


Fig. 6 Reduction Rate of Temperature

η_1 Eq. (1)

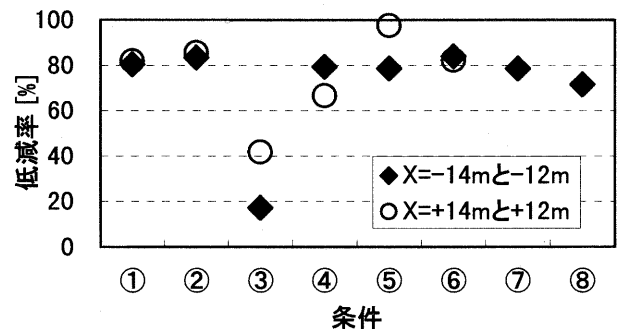


Fig. 7 Reduction Rate of Temperature

η_2 Eq. (2)

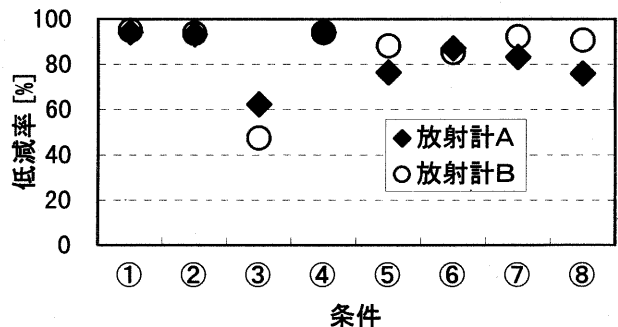


Fig. 8 Reduction Rate of Received Radiation

η_3 Eq. (3)

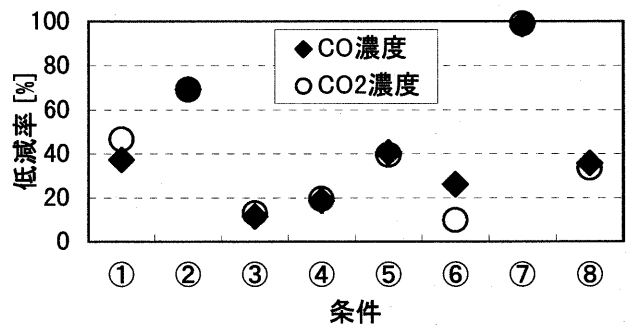


Fig. 9 Reduction Rate of CO/CO₂ Gas Density

η_4 Eq. (4)

濃度上昇値の比較による低減率を式(4)とする。

$$\eta_4 = 1 - \frac{\Delta D_{WS有}}{\Delta D_{WS無}} \quad \dots (4)$$

ΔD : CO及びCO₂ガス濃度上昇値

e. 発熱速度に基づく低減効果

WSの区画化効果により燃焼速度を抑制することは、構造躯体へ影響する天井部の最高温度と全体の温熱環境の抑制につながる。ロードセルを用いた重量測定からの発熱速度の比較による低減率を式(5)とする。

$$\eta_5 = 1 - \frac{Q_{WS有}}{Q_{WS無}} \quad \dots (5)$$

Q : 発熱速度[MW]

2. WS外の同地点温度の低減率

Fig. 6に式(1)を用いた、WSの直接的影響の少ないWSから1.5m離れた位置での温度測定結果からの低減率を示す。条件③が低い値を示したのは、水噴霧により区画内の空気が一様に混合するとともに温度低減しているためである。条件⑦・⑧では、風速を与えている側(Fig. 1右側)の+方向の値が小さくなったが、全体として約80%の低減率となった。

3. WS内外の温度の低減率

Fig. 7に式(2)を用いた、WS内外の温度測定結果からの低減率を示す。上記2と同様に条件③において低い値となった。条件⑦・⑧の給気側条件は解析から除いた。全体として約80%の低減率となった。

4. 放射受熱量の低減率

Fig. 8に式(3)を用いた、WS外に設置した放射計測定結果からの低減率を示す。条件③以外は80~90%の低減率を示し、WSの放射量遮断効果の高さを示した。

5. ガス濃度の低減率

Fig. 9に式(4)を用いた、ダクトにおけるガスサンプリングによる濃度測定結果からの低減率を示す。ガス濃度は10~95%の低減率を示した。条件①の基準において約40~50%の低減率を示した。COは水に難溶で、水への溶解はヘンリー則(水に溶解する気体の濃度はその分圧に比例する)に従う。COのヘンリー定数は酸素と窒素の間にある。値をTable 3に示す⁶⁾。本実験値は、WS作動地点から外側に設置したフードとダクトにより収集した値を用いたが、WS作動後もガスがうまく収集できていたのか、今後詳細な検討が必要である。この効果に加え、火災時の煤などの燃焼に伴う人体に有害な発生物のWSの洗い落とし効果も観察されたが、この効果については現在検討中である。

6. 発熱速度の低減率

Table 4に式(5)を用いた、重量減少法から求めた発熱速度を用い

Table 3 Henry's Constant Number

温度	20℃	40℃	80℃
CO	5.35	6.95	8.45
N ₂	8.04	10.4	12.6
O ₂	4.00	5.35	6.78

Table 4 Reduction Rate of Heat Release Rate

η_5 Eq. (5)

条件	Case No.	発熱速度 [MW]	低減率 [%]
①基本条件	Case 1	1,519.1	31.3
	Case 2	1,043.2	
②燃料	Case 3	1,294.3	11.9
	Case 4	1,139.8	
③水噴霧	Case 5	1,118.7	8.6
	Case 6	1,021.9	
④発熱速度	Case 7	4,654.9	28.6
	Case 8	3,324.7	

た低減率を示す。燃料種としてはヘプタンよりガソリンの方が低減効果が大きくなった。また、1.5MWから5MW程度の発熱速度の範囲では、約30%の燃焼抑制効果が確認された。また、WSの区画化効果による発熱速度の低減から、燃料の燃焼時間は長くなる傾向を示した。

VI. まとめ

1/2スケールの区画長さ43.7mのトンネル模型を用いてWSの性能確認実験を行った結果、天井近傍温度並びに放射受熱量としては発熱速度の大小、風速の大小によらず約80%の低減率を示した。基本条件①におけるWSの低減効果は、発生したガス濃度に対して約40%、火源性状としての発熱速度は約30%であった。これは、WSにより区画外の熱的性状の減衰及び燃焼が抑制されたためと考えられる。

上記の点から、WSにより防火区画としての性能が担保されるとともに構造躯体への熱的影響が低減されることが確認された。このことから、避難者に対する安全性に関して、WSの区画外において良好な避難環境を作り出すことができるものと考えられる。

今後、WSによる煤の洗い落とし効果と観測された各効果の相互の影響を含めてWSの総合的な効果を検討していく予定である。

謝 辞

当実験及び解析に、ホーチキ株式会社に多大なご協力をいただきましたことをここに感謝します。

参考文献

- 1) 天野玲子他；地下空間のための水幕式火災防災システム，2003年度日本火災学会研究発表会，(2003)，pp. 224-227.
- 2) 佐藤博臣他；ウォータースクリーン設備作動時の発熱速度の特性，2003年度日本火災学会研究発表会，(2003)，pp. 228-231.
- 3) 林龍也他；実規模火災実験におけるウォータースクリーンの熱性状，2001年度日本火災学会研究発表会，(2001)，pp. 78-81.
- 4) 栗岡均他；トンネル空間でのウォータースクリーン設備作動時の放射熱遮断並びに発熱速度の特性，2004年地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.9，(2004)，pp. 59-68.
- 5) 天野玲子他；水幕式火災防災システムの開発，2004年度日本火災学会研究発表会，(2004).
- 6) 化学工学協会；化学工学便覧第6版，丸善，1999.