

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

Reduction of Incident Radiation and Heat Release Rate in a Tunnel with Water Screen

栗岡 均 佐藤博臣 天野玲子¹⁾

要 約

トンネル空間のような半閉鎖空間では、周囲からの巻き込み空気が制限され自由空間と異なった火災性状を示す。縮尺1/2模型トンネル装置を用いてn-ヘプタンを燃焼させながら火災実験を行った。模型装置内にウォータースクリーン設備を設置し、作動させた状況における燃料重量並びに放射受熱量、空間温度等を測定しこれらの測定データを用いて発熱速度や放射受熱量を求めた。散水設備作動時の発熱速度の算出については散水時の水滴が測定の障害となり定量化が難しかったが、重量換算法と放射計からの換算法の2種類の方法で求めた。また、放射受熱量に関しては、予め天井のある空間で火災実験を行い放射熱遮断効果に関する簡易予測法を求めておき、今回の実験の放射計実測値と比較し熱流計による換算法並びに簡易予測法による換算法の妥当性を報告する。

目 次

- ．はじめに
- ．目的
- ．実験方法
- ．解析法
- ．結果と考察
- ．まとめ

．はじめに

近年、ユーロトンネルやモンブラントンネルなどのトンネル空間や韓国テグ市の地下鉄駅舎などの空間において大規模な火災が発生している。これらの空間では、外気取入れが極めて限定されて、その結果不幸にも高温の煙の拡散方向と避難方向が一致し、大惨事となってしまった。このため、被災者の安全を確保する技術が火災防災上必要となってきた。

自然換気下のトンネルで火災が発生した場合、長手方向の流れに着目すれば、トンネル上部での出口に向う高温煙の流れは火源からの発熱速度の関数となり、トンネル下部における新鮮外気の逆方向の流れと質量束が一致する。このような環境に、水幕（ウォータースクリーン）を長手方向に対して一定間隔で法線方向に設置し、火災時に作動させた場合、この高温煙層の冷却化により流れの先端では密度差が小さくなり、その結果流れが停止し、あるいは熱放射低減などの区画化の効果が期待される。これにより発熱速度に対しても外部からの新鮮空気が少なくなり抑制効果が働くものと推定される。ウォータースクリーン（以下WSと略す）は火災が発生したゾーンを区画化することにより、被災者の避難安全性と構造物の被害を低減させて安全性を確保することを目的とする。

屋外空間においてはタンク火災の防御装置として粒子径が300μ

mより大きい水幕装置の実験が行われ（例えばP.H.Thomas¹⁾、中田等²⁾）化学物質の貯蔵タンクの構造物への放射の削減の研究が行われているが、トンネルのような閉鎖的な空間にWSを適用し、散水時の放射熱遮断や発熱速度特性に着目した研究はない。

．目的

粒子径が小さいほどWSの放射遮断率が高いことがこれまでの研究結果⁴⁾として得られている。そこで、散水設備の消火性能以外の機能すなわち防火区画や避難設備としての可能性を確認する目的でトンネル内の粒子径が200μm程度の水幕による新しい区画方法の放射熱吸収特性並びに発熱特性を把握することにした。以下に示す2種類の装置による実験を行った。まず天井を有し側壁部が開放された約100m²の実大模型を作成し火災実験を行い^{3), 4)}、WSによる放射熱遮断効果に関する簡易推定式を作成し、次に、WSを設置した縮尺1/2模型トンネル装置を用いてn-ヘプタンの燃焼実験を行い、上記の放射熱遮断効果の簡易推定式の適用性とWS区画内の発熱速度について検討を行った。

．実験方法

1. 開放系空間での燃焼時の熱放射遮断の把握（実験1）

（1）装置の概要と実験ケース

Fig. 1に示すように床上高さ3.0mの開放空間中で、床上高さ2.7mを天井面とした。間隔1.6mで平行に配置した2列の配管に放水ヘッドを各列5個取付け、火源から水平距離2.2mをF列、同3.8mをM列とし、列ごとに放水を制御できるようにした。ヘッドの取付け間隔は1.0mとして格子状に配置した。

また、高さ0.5mの垂れ壁を実験区画外周に設置し、発生した熱気流がWS方向へ流れ込むようにした。各ヘッド列の下には事務室空間

1) 土木管理本部

キーワード：火災、トンネル、地下街、ウォータースクリーン、区画化、発熱速度、放射遮断率

Table 1 使用した放水ヘッドの分類
(Classification of used Water-drainage Heads)

散水の形状	放水圧 [MPa]	流量 [L/min]	粒子径 ^{*1} [μm]	初速度 ^{*1} [m/s]
円錐形 1	1.09	10	265	27.0
	0.61	8	295	21.6
	0.31	6	340	16.2
	0.12	4	420	10.8
円錐形 2	0.69	10	295	23.6
円錐形 3	0.34	10	355	15.5
扇形 1	0.82	10	285	40.5
扇形 2	0.10	10	570	14.1

*1: メーカー測定値

を模擬するとともに, 可燃物延焼防止として高さ 0.7m のローパーティションを設けた。実験に使用した放水ヘッドの仕様を Table 1 に示す。散水の形状, 放水圧力, 流量, 平均粒子径などが異なる。

(2) 火源

火源としては直径 0.84m(1000kW 相当), 1.0m(1500kW 相当), 1.12m(2000kW 相当) と 0.5m 角 6 枚(3000kW 相当)の火皿を用意し, 燃料としては n-ヘブタンを燃焼し点火から 120 秒後に WS を作動させた。

(3) 放射受熱量

火炎からの熱放射は, 火源を原点として X 方向(Ex)及び Y 方向(Ey)へそれぞれ 6.0m の地点で床上高さ 0.7m に設置した放射計を使い, 測定した。実験結果の検討の際には, X 方向からの測定は WS 有りの場合, Y 方向からの測定は WS なしの場合を想定し解析を行った。

2. 1/2 模型トンネル空間での燃焼時の熱放射遮断の把握(実験 2)

(1) 装置の概要と実験ケース

トンネル模型は, 道路規格第一種 AA 等級トンネルの約 1/2 缩尺とし, 高さ 2.7m × 幅 5.4m × 奥行き 18.2m の矩形である。

Table 2 使用した放射計と熱流計設置箇所
(Radiation Meter and Calorie Meter Installation Parts)

測定器	性能	設置位置 (x, y, z) [m]
放射計 A	0.002149 mV/W/m ²	(13.0, 0.0, 0.7)
放射計 B	0.002268 mV/W/m ²	(-13.0, 0.0, 0.7)
熱流計 A	2W/cm ²	(0.0, -2.7, 2.65)
熱流計 B	1W/cm ²	(0.0, -2.7, 1.35)

* 火源位置を基準とする

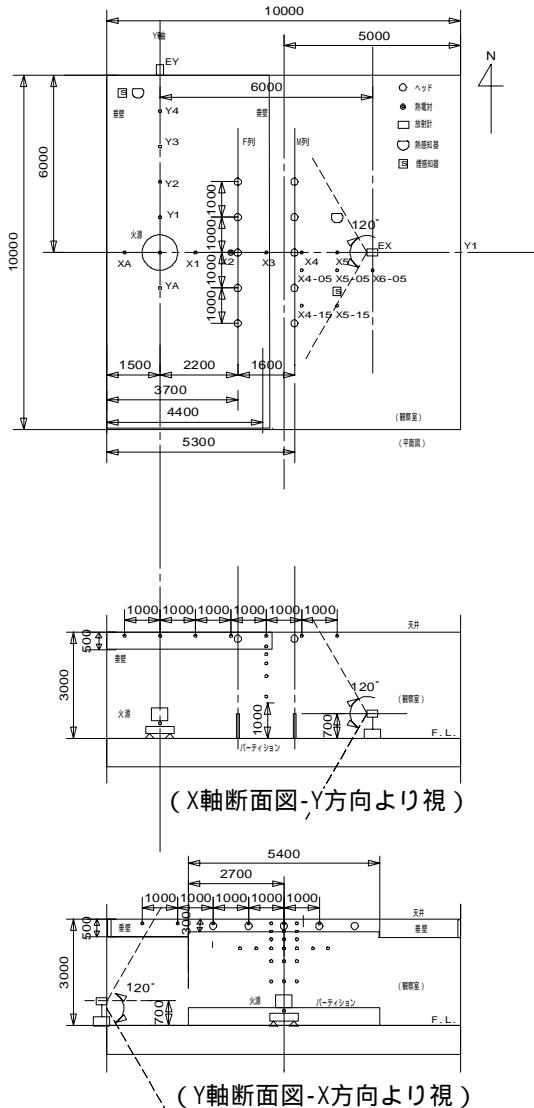


Fig. 1 実験 1 設備概要 単位[mm]
(Experiment 1 Equipment Apparatus.)

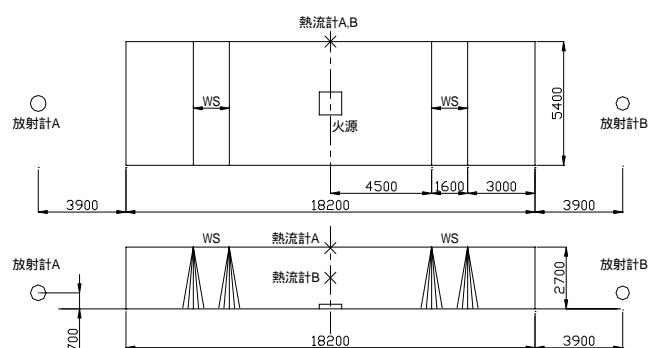


Fig. 2 実験 2 模型装置の概要 単位[mm]
(Experiment 2 Equipment Apparatus.)

模型の両開口部近傍に区画境界を設定し, WS 用放水ヘッドを約1.6mの間隔で各々2列配置した。2列のヘッドは, 1列当り1.0m間隔で5~6個を千鳥に取り付けた。WSの放水量は, 片側11個のヘッドの合計110 L/minである。

解析対象とした実験ケースは, 換気設備を作動しない場合ではケース1(WS設備無し), ケース2(WS作動)と換気設備を作動させたの同様の条件(ケース3, 4)の合計4ケースである。

(2) 火源

火源は, 普通乗用車を想定し, 縮尺比を考慮して発熱速度1.5MWとした。火皿(直径1.0m×高さ0.2m)を模型装置中央部の床上に設置し, n-ヘプタン23.3Lに5%トルエンを混合し約10分燃焼させた。

(3) 測定条件

Fig.2に示すように放射計はトンネル空間短手方向の中心軸に沿って火源から13m離れたWSが形成する区画外にA, B2箇所床上0.7mに設置した。一方, 熱流計は火源中心位置からトンネル空間短手方向の内壁表面に高さ1.35mと2.65mの位置に設置した。

Table2に計測に用いた熱流計と放射計の仕様と設置位置を示す。

解析法

1. WSの放射熱遮断効果

トンネル空間のような半閉鎖空間では放射計が高温空気に曝されるのでWS作動時の内外で同時に放射量を測定して比較検討ができない。このため, 热放射遮断効果は次に示す3種類の方法で確認を行った。

<方法1> WS作動前後の放射計値からの算出法

WS作動前後の発熱速度が変化しないと仮定し, 同一の放射計の測定値より求める。WS作動前は5~10秒間の平均値, 作動後は測定値が安定した区間の60秒の平均値を用いた。

$$\text{遮断率 } \gamma_1 = 1 - (\text{作動後放射計測定値}) / (\text{作動前放射計測定値}) \quad (1)$$

<方法2> 放射計と熱流計測定値からの算出法

WS内部に設置した熱流計の計測値から放射受熱量に換算し, 同一時刻(WS作動後3分以降の測定値が安定した区間1~2分の平均値)の放射計の測定値との比較を行う。

$$\text{遮断率 } \gamma_2 = 1 - (\text{WS作動時放射計測定値}) / (\text{同時刻熱流計からの換算した放射受熱量}) \quad (2)$$

<方法3> 平均粒子径と流量を用いる算出法

放水ヘッドの種類及び放水列の組合せにより形成されるWSの放射量の遮断率が異なる傾向がある。本報告では放水ヘッドから放射される水粒子の粒子径に注目した評価式の導入を試みる。Lambert-Beerの光透過式を元にしたRoseの拡張式^{7), 8)}から測定結果Ex, Eyは(3)式のように記述できる。

$$\log_{10} \frac{E_y}{E_x} = K \sum_0^{D_p} n D_p^2 \quad (3)$$

$$n = Q \cdot \frac{Z}{u} \cdot \frac{6}{\pi D_p^3} \quad (4)$$

Ex: X軸方向の放射受熱量 [kW/m²] Ey: Y軸方向の放射受熱量

[kW/m²] Z: 単位落下高さ [m]

Q: 流水量 [m³/s] n: 粒子の個数 u: 粒子速度 [m/s]

$$D_p: \text{平均粒子径 [m]} \quad K: \text{比例定数 [-]}$$

WSの散水によって形成される水幕空間に存在する水量は, 水粒子の落下時間に1秒あたりのヘッド流水量Qを乗じて求める。放出された水量を水粒子の体積で除した結果を水幕空間に存在する水粒子の個数とし, (4)式で記述した。このときD_pはザウター平均粒子径を用いた。また, 水粒子の落下速度は粉体粒子の一次元運動方程式(5)式⁸⁾の時間項を差分法で近似し, 所定の高さの粒子速度を求めた。

$$\rho_p \frac{du}{dt} = \underbrace{\rho_p g}_{a_1} - \underbrace{\rho g}_{a_2} - \underbrace{\rho C}_{a_3} \left(\frac{3 u^2}{4 D_p} \right) \quad (5)$$

$$C = \frac{24 (1 + 0.125 \text{ Re}^{0.72})}{\text{Re}} \quad \text{Re} = \frac{u \rho D_p}{\mu}$$

(ただし 0 < Re < 1000)

ρ_p : 粒子密度 [kg/m³] Re: Reynolds数 [-]

: 周囲密度(空気) [kg/m³] C: 抵抗係数 [-]

μ : 粘性率 [kg/m·s] g: 重力加速度 [m/s²]

t: 運動時間 [s] L: ヘッド取付け高さ [m]

落下速度解析条件

a. 周囲空気は静止流体とした。

b. 解析に用いる周囲温度は放水列近傍の実測値とした。

c. 水粒子は落下するまで存在すると考え, WSを形成する水粒子の代表速度として, 天井から1mの位置の速度を(5)式で算出した。

d. 各実験で放水量は実験開始から実験終了までの間で安定している期間(放水後2~3分)の平均値とした。

本実験のWSが, 放水ヘッドの有効散布幅より小さな1mピッチで構成されているので, 放水ヘッドは列方向の広がりに対しては水量的に補間されているとし, 評価にあたっては放水ヘッドの散布パターンを考慮しなかった。さらにWSの厚さ方向の広がりに対しては光路中の粒子数は変わらないものとした。

2. 発熱速度の換算法

(1) 重量からの発熱速度換算法

本実験ケース群の中でWSが作動していないケース1, 3は上記区画化の効果がなく, 火源面積と開口面積とを考えると燃料支配型の燃焼実験が行われたものと推定される。

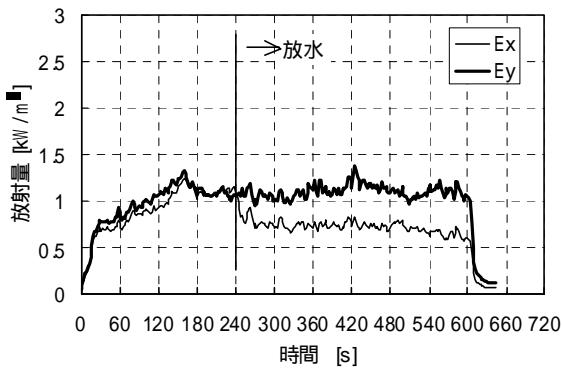
そこで, ロードセルを火皿の下に設置し, 燃料の単位時間当たりの重量減少値(G: [kg/s])と理論的単位発熱量(q=44.56kJ/g)から発熱速度(Q: [kW])を求めた。一方, WSが作動した場合, 火皿に放水時の水滴が入り, 重量が増加する。そこで, WS作動時の増加量が一定であり, かつ, 燃焼中蒸発しないものと仮定して, 測定値から散水設備による増加分を差し引き, (6)式で求めるとともに1分(測定間隔5秒)程度の移動平均を行い発熱速度に換算した。

$$Q = q \left(\frac{G}{t} - w \right) \quad (6)$$

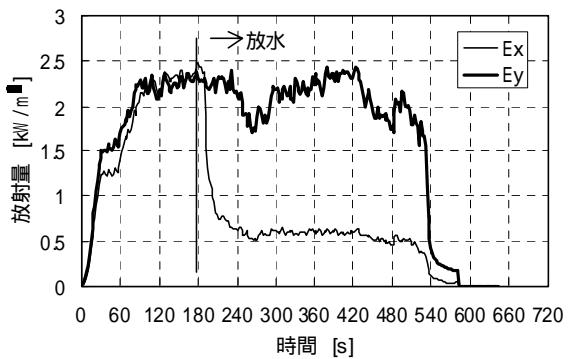
w: 散水設備による増加水量 [kg/s]

(2) 放射計及び熱流計からの発熱速度換算法

放射受熱量は火源から発達した火災ブルームの代表温度の4乗に比例し, かつ, 火炎と測定位置迄の距離の2乗に反比例する。火源近傍に設置した熱流計は放射熱とともに対流による熱移動成分も同



(a)扇形ヘッド 1



(b)円錐形ヘッド 1

Fig.3 放射受熱量の時間推移
(Time Transition of received Radiations)

時に計測する。火災ブルームの代表温度は、例えば McCaffrey⁹⁾が報告しているように発熱速度の2/5乗の関数で記述できる。そこで、まずケース1の重量減少量からの換算法で得られた発熱速度と放射受熱量並びに熱流計測定値の関係を求めた。

結果と考察

1. 热放射遮断簡易推定のための実験結果（実験1）

(1) 結果の概要

各種条件で火源からの熱放射をX方向とY方向から測定し、比較することでWSによる放射減衰効果を求めた。扇形ヘッド1と円錐形ヘッド1の測定結果をFig.3(a), (b)に示す。図中に示した時点で放水を開始し、その後燃料が燃え尽きるまで測定した。

結果を見ると放水形状によらず放水後の放射受熱量は削減している(Fig.3 参照)。全結果を比較するために2方向から測定した放射受熱量の比と発熱速度の関係をFig.4に示した。遮断率は(7)式で定義した。⁷⁾ この図では放水ヘッドの種類は区別していない。放水列数が1列のときは同じ放水ヘッドを使用した2列放水に比べて遮断能力が低い結果となった。また、散布形状では円錐型の方が扇型よりも熱放射遮断効果が高い結果となった。

$$\eta = \frac{E_y - E_x}{E_y} = 1 - \frac{E_x}{E_y} \quad (7)$$

(2) WSの放射熱遮断効果

Fig.5はX軸に(4), (5)式を用いて求めた nD_p^2 をとり、実験値の E_y/E_x と比較したものである。両者は相関係数0.947と良い一致が見られた。この関係を用いて方法3の遮断率 η_3 は(8)式で簡易的に求めることができる。

$$\eta_3 = 1 - 1/10^{K \sum_{p=0}^{D_p} nD_p^2} \quad K = 0.344 \quad [-] \quad (8)$$

(4)式の右辺は D_p と反比例的な関係であることから、放水量が同じであれば平均粒子径は小さく、かつ、落下速度が遅いほど熱放射遮断効果が高くなることを示している。

ただし、実際の設計に当たっては、渡辺の報告¹⁰⁾のように火災気流で流されたり蒸発消滅したりしないように、水粒子の平均粒子径は100 μm 以上で検討する必要がある。

以上の結果より、新たな放水ヘッドの検討やWSの設計に際しては、

放水ヘッドの設置間隔・列数・平均粒子径・噴射初速度・放水量を

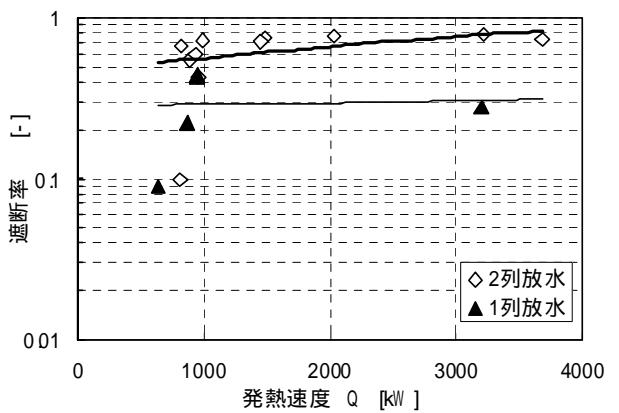


Fig.4 発熱速度と遮断率の関係
(Relation between Heat Release Rates and Reduction of incident Radiations)

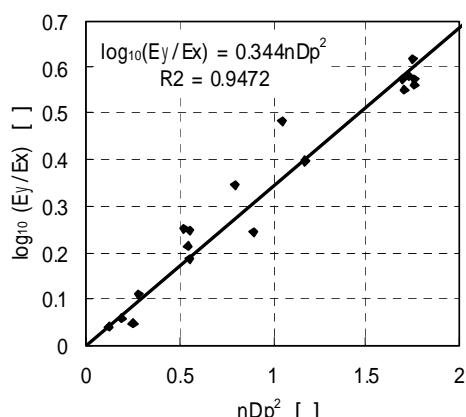


Fig.5 水粒子平均径と熱放射の関係
(Relation between Diameter of Water Particle Average, and thermal Radiation)

設定することで、その熱放射遮断性能を概略値を容易に推定することができる。

2. トンネル模型の放射受熱量並びに熱流束の特徴（実験 2）

Fig.6,7 にケース 1, Fig.8,9 にケース 2 のトンネル模型実験での放射計及び熱流計の測定値の時間変化を例示する。ケース 2,4 ともに点火後 1 分で WS を作動させた。

各ケースの実測結果に以下の特徴が見られた。

- a . 燃料として液体燃料 ($n\text{-}ヘプタン$) を用いたので、点火後、急激に放射受熱量及び熱流束の測定値は増加し、30 秒以降は比較的緩やかな挙動を示した。
- b . 放射受熱量は WS が作動すると 80% 程度小さくなる傾向を示した。
- c . WS 作動時の熱流束は、発熱速度とほぼ同様の挙動を示した。以下に放射熱遮断率並びに発熱速度の特性を示す。

（1）トンネル模型の熱流計及び放射計の測定値の関係

WS 作動時の $n\text{-}ヘプタン$ など液体燃料の消費量を重量減少としてとらえようとする時の重量の測定には、散水による重量増加が含まれ、測定精度に影響を与える可能性がある。そこで、区画外で直接散水

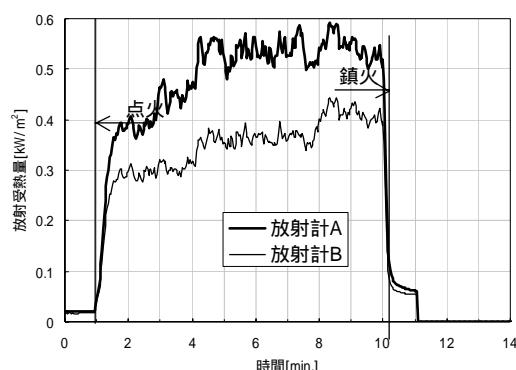


Fig.6 放射計の時間変化（ケース 1）
(Time Change of Radiation Meters (case 1))

の影響を受けない放射計の測定値から発熱速度の推定値を求め、熱流計の値と比較する。一方、火源周辺への放射熱の遮断効果を測定するに当たって WS の内外で同時に放射量を測定して比較検討するのが望ましいが、測定環境上難しい。そこで、WS 作動時の放射熱の遮断効果を確認する場合、火源近傍に設置した熱流計の測定値から WS 内部の放射熱を推定し遮断効果を確認することにした。

Fig.10 に本実験に使用した放射計及び熱流計測定値の関係を示す。図中の実線は、計器間の回帰線である。

トンネル模型を使用した自然換気下の火災実験においては、Fig.6 に示すように火災に伴う空間内の流れが生じ火炎が傾斜し各開口部の放射受熱量に差が生じる。しかし、Fig.10(a) に示すように各開口での放射受熱量は線形性があることが認められた。

また、Fig.7, Fig.9 に示すように火災時にトンネル上部に形成される高温煙層により煙層内部と下部で熱流束に差異が生じていた。しかし Fig.10(b) に示すように熱流計 A, B の測定値はほぼ線形性を有していた。これらより、各測定結果間には比較的大きな相関性があり、放射計測定値との相関性が高かった熱流計 A の測定値を用いて WS 作動時の区画内部の放射受熱量を求ることにした。

（2）トンネル模型の放射熱遮断率

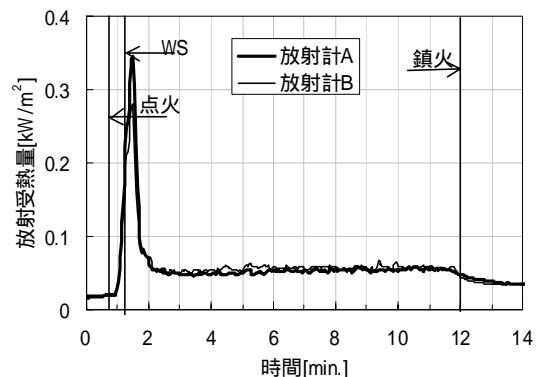


Fig.8 放射計の時間変化（ケース 2）
(Time Change of Radiation Meters (case 2))

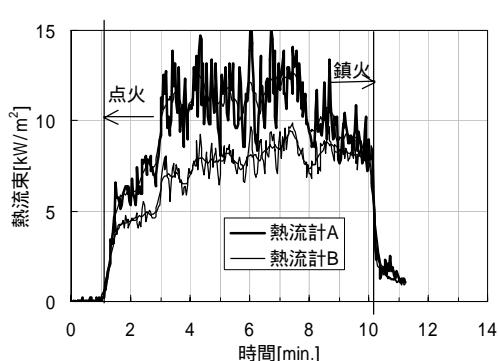


Fig.7 热流计の時間変化（ケース 1）
(Time Change of Calorie Meters (case 1))

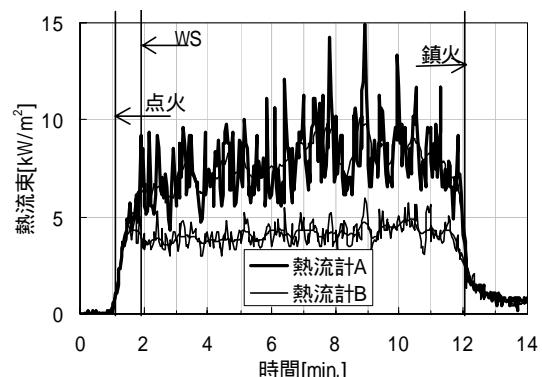
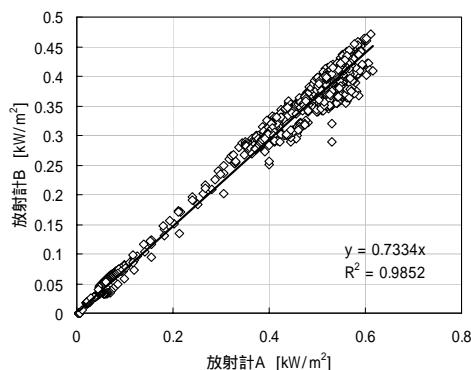
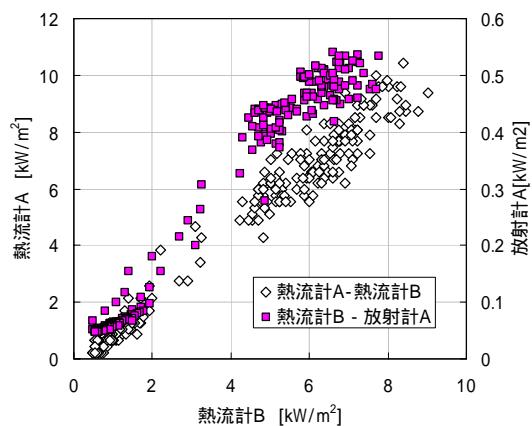


Fig.9 热流计の時間変化（ケース 2）
(Time Change of Calorie Meters (case 2))



(a) 放射計間の関係



(b) 热流計間及び放射計と热流計の関係

Fig.10 計測計間の関係 (ケース 1)

(Relation between measurement Meters (case 1))

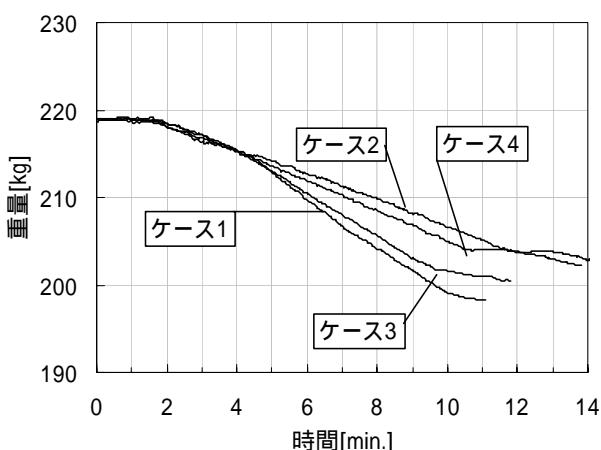


Fig.11 口ードセル測定値の時間変化 (ケース 1~4)
(Time Change of Load Cell measured Values (cases 1~4))

方法 1 ~ 3 の放射熱遮断率算定法を本実験結果に適用した結果を Table 3 に示す。

Table 3 ケース別遮断率

(Reduction Rate of incident Radiation classified by case)

実験ケース	方法 1	方法 2	方法 3
2	0.83	0.80	0.78 ¹
4	0.76	0.76	

*1:200 μm で推定

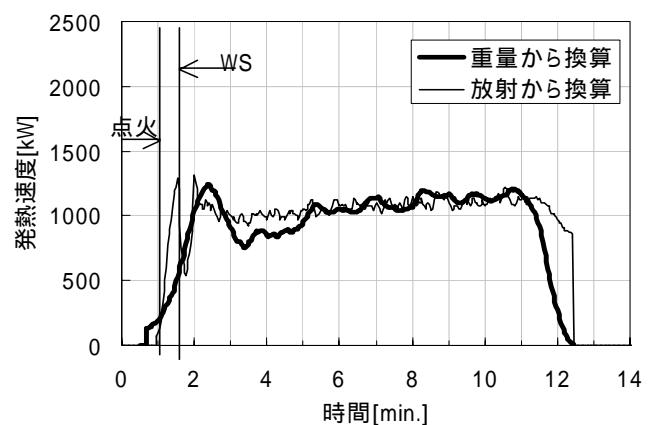


Fig.12 補正後の発熱速度 (ケース 2)
(Heat Release Rates after compensation (case 2))

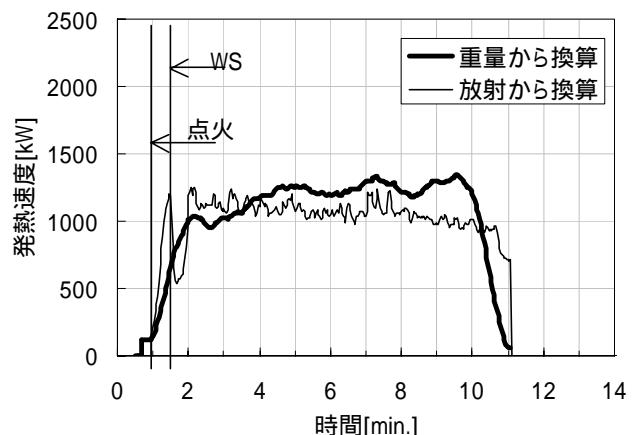


Fig.13 補正後の発熱速度 (ケース 4)
(Heat Release Rates after compensation (case 4))

a . WS 作動時の実測値を用いた方法である方法 1 並びに方法 2 の両方法の算定結果はほぼ一致した。

b . WS 作動時では平均粒子径と流量を用いる予測法は実測値を用いた換算結果とほぼ一致していた。

WS は 0.76 ~ 0.83 と高い放射熱遮断率を示した。放水圧力を高め水径を小さくすることにより空間に長く浮遊させ、火源と防護対象領域間に熱放射に有効な厚みを確保しているものと推定される。

本実験の実施並びに解析に当たり橋本和記氏,新井芳明氏並びに,

Table 4 燃焼時間と発熱速度の一覧表

(Table of Combustion Time and Heat Release Rate)

実験ケース (WS,換気)	燃焼時間	平均発熱 速度 ¹	発熱速度抑 制効果 ²	最大発熱 速度
1(非作動,無)	550s	1313kW	-	2319kW
2(作動,無)	666s	1085kW	17%	1192kW
3(非作動,有)	534s	1353kW	-	1906kW
4(作動,有)	594s	1216kW	10%	1332kW

* 1:全投入燃料が完全に燃焼すると仮定し燃焼時間で割った値

* 2:(WSのケースの平均発熱速度)/(ケース1又は3の平均発熱速度)

(3)トンネル模型の放射受熱量から換算した発熱速度
Fig.11に燃料重量の時間変化を示す。WSを作動させたケースについて,(6)式による重量換算法と放射計Aの計測値から換算した発熱速度をFig.12, Fig.13に示す。重量計測値から求めた発熱速度が作動後1000~1500kWを示し,放射計からの換算値もほぼ同様の変動を示した。今後,次のような項目の検討が必要であろう。

- a. 各測定器間の時間遅れ並びに精度の問題
 - b. WS作動時に換気支配型の燃焼や放水による不完全燃焼の性状が生じている可能性があること
- 今後,酸素消費法でも算定を行い,精度とともに現象の確認を行う必要がある。

(4)重量換算発熱速度の特徴

Fig.14に換気を行っていない時と換気を行っている時(換気ファン:2.75kg/s)の発熱速度を示す。トンネル空間内でのWS設備が作動していないケース1,3は約60秒で1000kWになり,点火後5~6分で最大値となる山型となり,WS作動ケースは放水後1~2分後にTable 4に示すようにほぼ一定値を示した。

WSを作動させた(点火30秒後)場合,散水により発熱速度が換気無しで17%(換気ありで10%)の減少を示していた。Table 4に示すように,換気装置の作動(点火60秒後)の有無にかかわらず,WSの作動により区画化が行われた場合はわずかではあるが燃焼時間が長く,平均発熱速度は小さくなかった。

まとめ

以上の検討結果を以下にまとめる。

- a. 散水ヘッドの列数,粒子速度,粒子径によって放射熱遮断率が違ってくる。
- b. 水幕の遮断率の評価法として,散水量・列数・水滴の平均粒子径・初速度・水量等をパラメーターにして簡易推定式を提案した。
- c. WS作動時トンネル実験の放射熱遮断率は二種類の方法の算定結果はほぼ一致し0.76~0.83であった。
- d. 放射熱遮断率簡易推定式をトンネル空間火災実験に適用すると約0.78となり,他の推定法とよく一致した。
- e. 放射計測値と放射熱遮断率を用いることにより散水時の発熱速度の算定が可能であった。
- f. 換気なしの場合,WSを作動させた場合の発熱速度は17%の減少を示した。

WS設備作動時の放射熱遮断並びに発熱速度の算定法について報告したが,性能設計の考え方は,建築防火の分野では一般的な手法になりつつあるが,この設計法の基本的な考え方は土木分野のトンネルや地下構造物にも極めて有効な考え方であると思われる。今後,実大実験での検証を含めるとともに,理論的な裏付けも必要と考えられる。

謝 詞

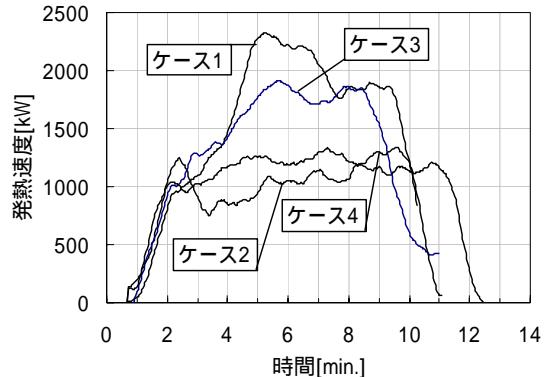


Fig.14 発熱速度の時間変化(ケース1~4)

(Time Change of Heat Release Rates (cases 1-4))

ホーチキ株式会社の辻利秀氏,石田博志氏,林龍也氏をはじめとして関係者の多大なご協力を頂いた事に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Thomas, P.H.; "Absorption and scattering of radiation by water sprays of large droplets", British journal of applied physics, Vol3, (1952), pp385.
- 2) 中田金市,山下邦博; ウォータースプレーによる放射の減衰について,消防研究所報告, 第34号,(1971).
- 3) 清水敦ほか; ウォーターミストの輻射熱遮断効果に関する研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.128-131, (2000).
- 4) 林龍也ほか; 実大規模火災実験におけるウォータースクリーンの熱性状,日本火災学会研究発表会概要集, pp.78-81, (2001).
- 5) 天野玲子ほか; ウォータースクリーン設備の火災時の特性,日本火災学会研究発表会発表,pp.224-227, (2003).
- 6) 佐藤博臣ほか; ウォータースクリーン設備作動時の発熱速度の特性,日本火災学会研究発表会発表,pp.228-231, (2003).
- 7) 化学工学便覧,丸善, pp.969-978.
- 8) 粉体 理論と応用, 丸善, pp.181-185.
- 9) McCaffrey, B.J. ; "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results", NBSIR 79-1910, (1979).
- 10) 渡辺冽; ウォーターミストに依る消火の特徴,検定協会だより,206号,消防検定協会, (1998).