

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なら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***

Hitoshi KURIOKA, Hiroomi SATOH and Reiko AMANO

In rather confined spaces such as tunnels, the influx of air from the surroundings is restricted and the fire attributes, which are different from those in free spaces, are shown. In this report, the fire experiments were conducted by burning n-heptane in a 1/2-scale model tunnel. In this model, water screens and sprinklers were put to measure the fuel weight, the heat flux and the space temperature in the cases where they were operated separately or simultaneously, and the heat release rate and the receiving radiation were calculated by using the measured data. This report describes the validity of the converting method calculated from the actual data measured by the radiation meter, the heat flux meter in these experiments and the converting method calculated from the simple predicting method.

Keyword : fire, tunnel, underground center, water screen, heat release rate, radiation

1. 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地下鉄駅舎などの空間で大規模な火災が発生している。これらの空間では、外気の取り入れが極めて限定され、かつ高温の煙の拡散方向と避難方向が一致して大惨事となってしまう。これらの事故を背景として、これらの空間についても被災者の安全を確保するための技術の確立が叫ばれるようになった。

そこで、筆者らはこのような長手方向に連続する空間を一定間隔で区画化することが火災防災上極めて有効であると考えた。すなわち、その区画化の技術として、化学物質など可燃性物品の貯蔵タンクや文化財・建物外部開口部などの火災防護策としてその有効性が確認^{1),2)}され、多数の実績を持つ水幕防火設備の火災放射遮断性能に着目した。また、この水幕区画を形成する水滴の粒子径の大きさについても微細であることが火災抑止に有効であることにも考慮して、微細な水滴からなる水幕（ウォータースクリーン、以下WSと略す）でトンネルなどの空間を区画することとした。

本研究は、これらの技術の適用性を確認する目的で実施した。しかるに、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かう高温煙層の流れは火源からの発熱速度の関数となり、トンネル下部での新鮮空気の流れと質量束が一致する。このような環境にWSを長手方向に対して一定間隔で法線方向に設置し、火災時に作動させて区画を形成した場合に、当然、火災からの放射熱の遮断効果の期待とともに、外部に流出しようとする高温煙層はWSによって冷却されて高温煙層の先端では下部流入流れとの密度差が小さくなって流れが停止あるいは遅くなることが期待できる。また、WS面にて、新鮮空気の流入が制限されれば、発熱速度も緩慢なものとなることも期待できると

火災、トンネル、地下街、WS、発熱速度、放射遮断率

* 正会員 鹿島建設 技術研究所

** 鹿島建設 技術研究所

*** 正会員 鹿島建設 土木管理本部

考えた。

これらの期待が達成されれば、構造躯体へのダメージを低減できるだけではなく、避難安全性を大幅に向上できると考え、以下の２種類の実験を行った。

2. 目的

上記のようにWSをトンネル内に適用する場合に、トンネル内部での火災挙動の把握とモデル化が研究の端緒となる。筆者らは模型や実大トンネルで実験を行い、そのモデル化について既に報告^{3),4)}している。ついで、WS自身がどの程度の熱放射遮断などの区画としての性能を有するか把握し、遮断効果の簡易モデル式を誘導（実験１）することが必要である。それらのステップを経て、1/2 模型（実験２）など実空間での性能確認となる。すなわち、実験１では、天井を有し、側壁が開放された約 100m² の開放系の空間にWSを設置・作動させ、火災からの遮断効果について測定し簡易モデル式の誘導を行い、実験２では道路トンネルの1/2 模型の内部にWSを設置・作動させて、実験１で求めた火災からの熱放射遮断に関する簡易モデル式の妥当性を確認するとともに、発熱速度に関するWSの区画化の効果を調べた。

3. 実験方法

3.1 開放系空間での燃焼時の熱放射遮断の把握（実験１）

3.1.1 装置の概要と実験ケース

図-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 を天井面とした模型を制作した。天井中央に間隔 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。火源の中心を原点とし東西方向に X 軸、南北方向に Y 軸を設定した。

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を模擬するとともに、可燃物延焼防止として高さ 0.7m の低い仕切り板を設けた。各区画に

表-1 使用した放水ヘッドの分類

散水の形状	放水圧 [MPa]	流量 [L・min ⁻¹]	粒子径* [μm]	初速度* [m・s ⁻¹]
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

(*メーカー測定値)

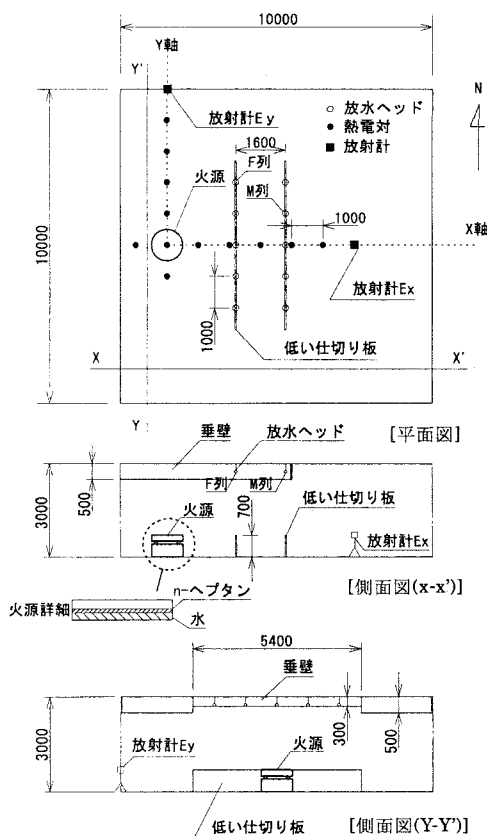


図-1 実験１設備概要 単位[mm]

は珪酸カルシウム板（厚さ 25mm）を用いた。実験に使用した放水ヘッドの仕様を表-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。

3.1.2 火源

火源としては普通乗用車火災を想定して直径 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、燃料としては消防関係の火災実験に用いられている n-ヘプタン (C_7H_{16} 、688kg/m³、44.56kJ/g) を燃焼し点火から 120 秒後に WS を作動させた。

3.1.3 放射受熱量

火源を原点として X 方向の放射受熱量(E_x)及び Y 方向の放射受熱量(E_y)としてそれぞれ 6.0m の地点の床上高さ 0.7m に放射計を設置した。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 無しの場合を想定し解析を行った。

3.2 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)

3.2.1 装置の概要と実験ケース

トンネル模型は、図-2 に示すように道路規格第一種 AA 等級トンネルの約 1/2 縮尺とし、高さ 2.7m×巾 5.4m×奥行き 18.2m の矩形である。火源部に相当する天井ならびに周辺は耐火材（厚さ 25mm、熱伝導率：0.058W/m/K）を使用し、その他は珪酸カルシウム板（厚さ 25mm）を用いた。

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。実験 1（水粒子径：265～570 μ m）において図-5 に示すように粒子径が小さいほど WS の放射遮断率が高いことが判明したことより、本研究においては粒子径をできるだけ小さくかつ WS が横風を受けた場合にも区画が形成されるように 200 μ m に設定した。

解析対象とした実験ケースは、表-4 に示すように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ての同様の条件（ケース 3、4）の合計 4 ケースである。

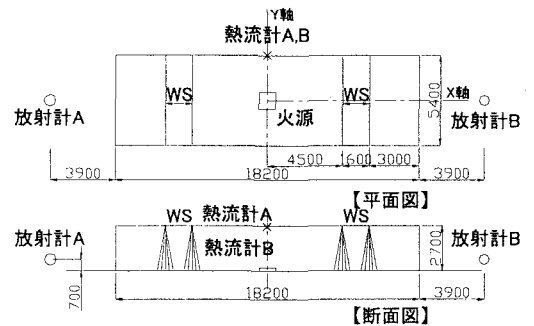


図-2 実験 2 模型装置の概要 単位[mm]

3.2.2 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 1.5 MW 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。

3.2.3 測定条件

図-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、B 2 箇所床上 0.7m に設置した。一方、

表-2 使用した放射計と熱流計設置箇所

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

* 火源位置を原点にトンネル長手方向を X 軸、トンネル断面方向を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸とする。

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。

表-2 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。

4. 解析法

4.1 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、熱放射遮断効果は次に示す 3 種類の方法で確認を行った。

4.1.1 WS 作動前後の放射計値からの算出法 (方法 1)

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。

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

4.1.2 放射計と熱流計測定値からの算出法 (方法 2)

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。

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

4.1.3 平均粒子径と流量を用いる算出法 (方法 3)

(1) 算定法

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 E_x 、 E_y は (3) 式のように記述できる。

$$\log_{10} \frac{E_y}{E_x} = K \sum_0^{D_p} n D_p^2 \quad (3) \quad n = Q \cdot \frac{Z}{u_0} \cdot \frac{6}{\pi D_p^3} \quad (4)$$

WS の散水によって形成される WS 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 WS 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 Crank-Nicolson 法で粉体粒子の一次元運動方程式 (5) 式⁷⁾を差分化しヘッドからの吐出速度を初期値とし所定の高さの粒子速度を求めた。

$$\frac{du}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) - C_D \left(\frac{3\rho_f u^2}{4\rho_p D_p} \right) \quad (5)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.125 Re_p^{0.72}) \quad Re_p = \frac{\rho_f D_p u}{\mu_f} \quad (\text{ただし } 0.5 < Re_p < 10^3)$$

C_D : 抵抗係数 [-]、 g : 重力加速度 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]、 u_0 : ヘッドから 1 m の位置の粒子速度 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

u : 落下速度 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]、 D_p : 平均粒子径 [m]、 K : 比例定数 [-]、 Z : 単位落下高さ [m]

E_x : X 軸方向の放射受熱量 [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]、 E_y : Y 軸方向の放射受熱量 [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]、 n : 粒子の個数

Q : 流水量 [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]、 Re_p : 粒子 Reynolds 数 [-]、 t : 運動時間 [s]、 ρ_p : 粒子密度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ρ_f : 周囲流体密度 (空気) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]、 μ_f : 流体の粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

(2) 落下速度解析条件

- 1) 周囲空気は静止流体とした。
- 2) 解析に用いる周囲温度は放水列近傍の実測値とした。
- 3) 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。
- 4) 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 ビ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。

4.2 発熱速度の換算法

4.2.1 重量からの発熱速度換算法

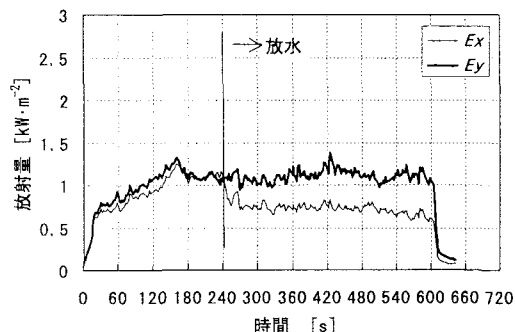
本実験ケース群の中で WS が作動していないケース 1,3 は上記区画化の効果が無く、火源面積と開口面積とを考えると燃料支配型の燃焼実験が行われたものと推定される。

そこで、ロードセルを火皿の下に設置し、燃料の単位時間当りの重量減少値 ($\Delta G/\Delta t$: [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]) と理論的単位発熱量 ($q=44.56[\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}]$) 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水量 (w : [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]) を差し引き燃焼中の単位時間あたりの重量減少速度の推定値を (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。

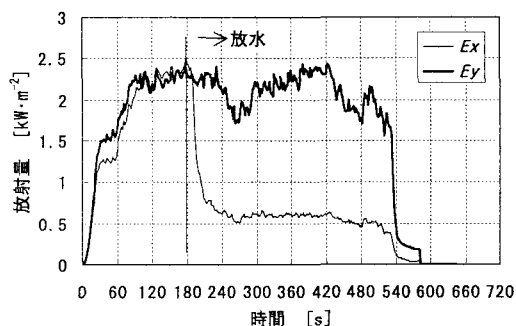
$$Q = q \left(\frac{\Delta G}{\Delta t} - w \right) \quad (6)$$

4.2.2 放射計および熱流計からの発熱速度換算法

放射受熱熱量は火源から発達した火災プルーム(火源上の火災および浮力で上昇する熱気流の総称)の代表温度の 4 乗に比例しかつ火災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時に計測する。火災プ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ならびに熱流計計測値の関係(図-10 参照)を求めた。



(a)扇形ヘッド 1



(b)円錐形ヘッド 1

図-3 放射受熱量の時間推移

5. 結果と考察

5.1 熱放射遮断簡易推定のための実験結果（実験 1）

5.1.1 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 の測定結果を図-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。

結果を見ると散水形状によらず放水後の放射受熱量は削減している(図-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図-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ほうが扇型よりも熱放射遮断効果が高い結果となった。

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

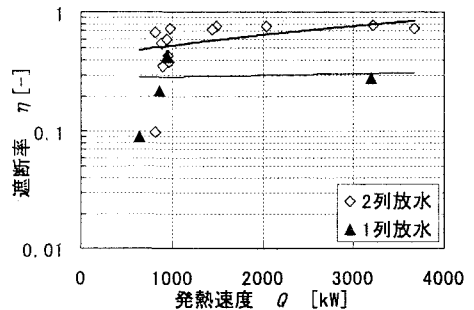


図-4 発熱速度と遮断率の関係

5.1.2 WS の放射熱遮断効果

図-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。

$$\eta_3 = 1 - 1/10 \sum_{i=1}^{n_p} K n_i D_p^2 \quad K=0.344 \quad (8)$$

(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、実際の設計にあたっては、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 $100 \mu m$ 以上で検討する必要がある。

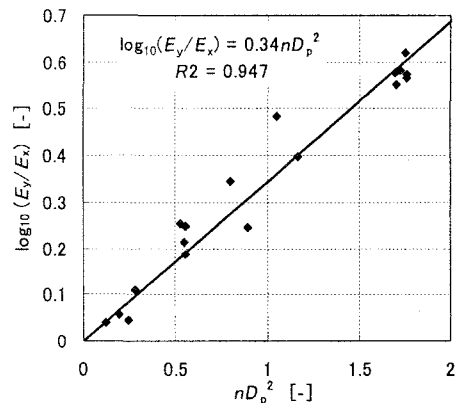


図-5 水粒子平均径と熱放射の関係

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・放水量を設定することで、その熱放射遮断性能の概略値を容易に推定することができる。

5.2 トンネル模型の放射受熱量ならびに熱流束の特徴(実験 2)

図-6、7 にケース 1、図-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。

- ①燃料として液体燃料 (n-ヘプタン) を用いたので、点火後、急激に放射受熱量およ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。

②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。

③WS 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ならびに発熱速度の特性を示す。

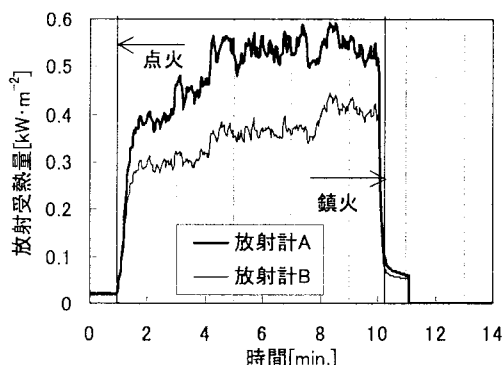


図-6 放射計の時間変化（ケース 1）

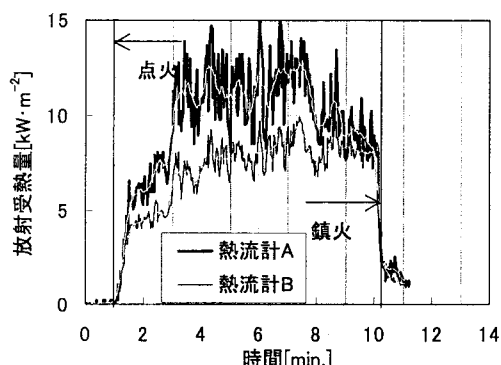


図-7 熱流計の時間変化（ケース 1）

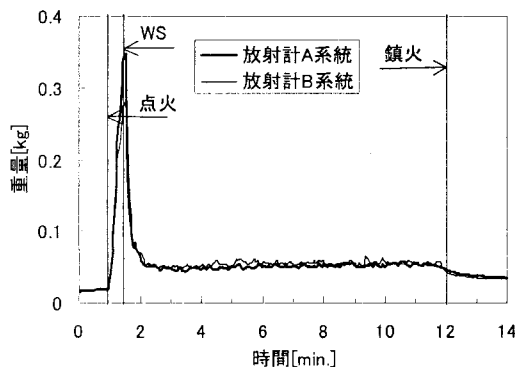


図-8 放射計の時間変化（ケース 2）

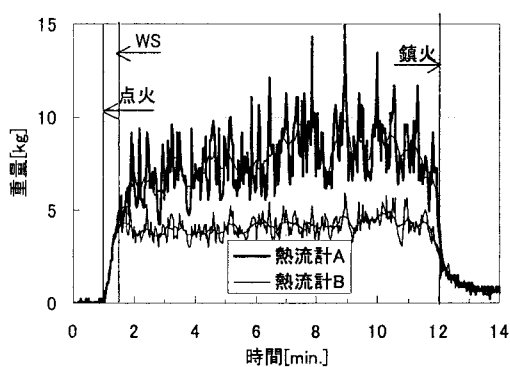


図-9 熱流計の時間変化（ケース 2）

5.2.1 トンネル模型の熱流計および放射計の測定値の関係

WS 作動時の n-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あたって 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。

図-10 に本実験に使用した放射計および熱流計計測値の関係を示す。図中の実線は、計器間の回帰線である。

図-6 にトンネル開口部の外側に設置した A、B 放射計の測定値の時間変化を示すが、自然換気下の火災実

験においては火災に伴う流れが生じ火炎が傾斜し両者の測定値間には差が生じた。しかし、図-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、図-7、図-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、図-10(b)に示すように、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 B 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めることにした。

5.2.2 トンネル模型の放射熱遮断率

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表-3に示す。

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

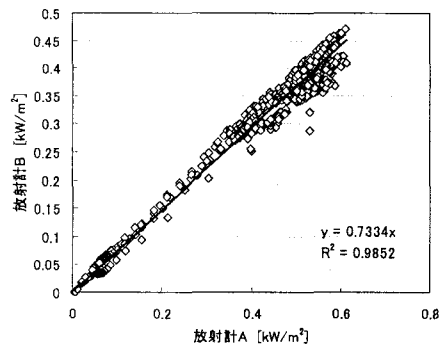
表-3 ケース別遮断率

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

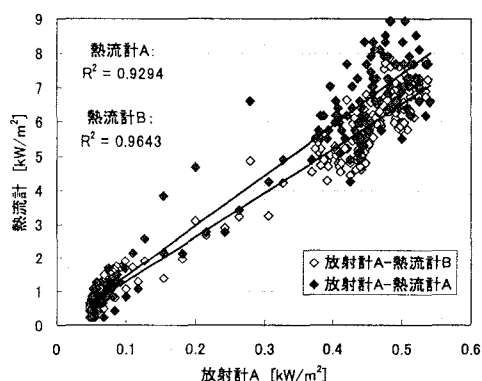
*: 200 μm で推定

5.2.3 トンネル模型の放射受熱量から換算した発熱速度

図-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図-12、図-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) 放射計間の関係



(b) 放射計 A と熱流計の関係

図-10 計測計間の関係 (ケース 1)

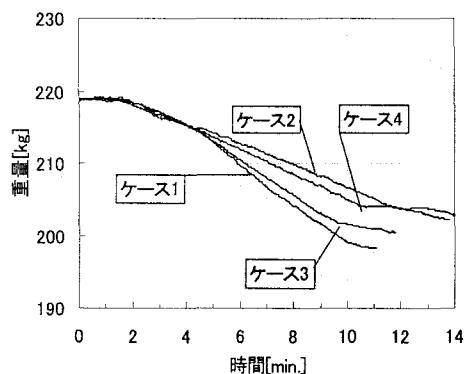


図-11 ロードセル測定値の時間変化 (ケース 1～4)

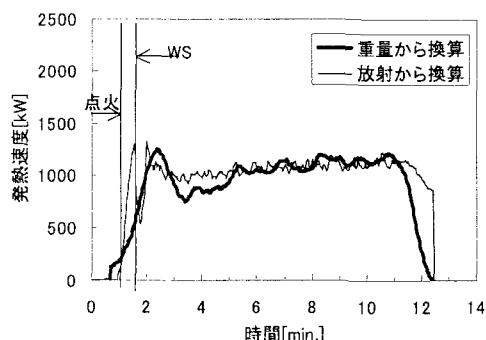


図-12 補正後の発熱速度（ケース 2）

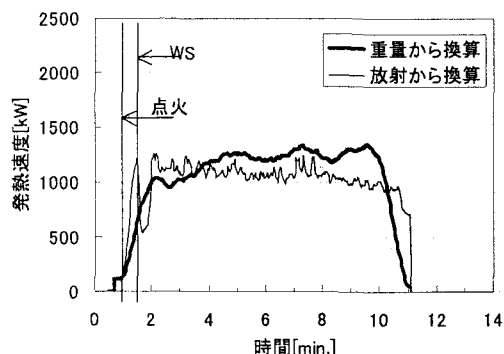


図-13 補正後の発熱速度（ケース 4）

- ① 各測定器間の時間遅れならびに精度の問題
- ② 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。

5.2.4 重量換算発熱速度の特徴

図-14 に換気を行っていない時と換気を行っている時（換気風量：221m³/分）の燃料重量から換算した発熱速度を示す。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 は点火後約 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 分後に表-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。表-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った。

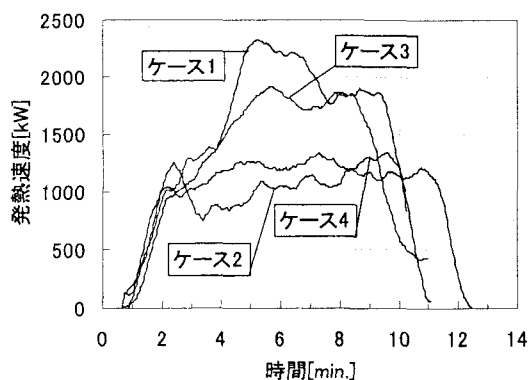


図-14 発熱速度の時間変化（ケース 1～4）

表-4 燃焼時間と発熱速度の一覧表

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)

6. まとめ

以上の検討結果を以下にまとめる。

- ① 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異なっていた。
- ② WS の放射熱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。
- ③ WS 作動時トンネル実験の放射熱遮断率について二種類の方法による算定結果はほぼ一致し、0.76～0.83 であった。
- ④ 放射熱遮断率簡易推定式を WS 作動時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。
- ⑤ 放射計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。
- ⑥ 換気無しの場合、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率なら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。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。

謝辞

本実験の実施ならびに解析にあたり橋本和記氏、新井芳明氏ならびに、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, pp385, 1952
- 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, 吉川昭光, 佐藤博臣, 栗岡均, 森田昌宏 ; 「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, 辻利秀, 栗岡均, 佐藤博臣 ; 「実大規模火災実験における WS 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, 佐藤博臣, 栗岡均, 橋本和記, 出石陽一 ; 「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, 栗岡均, 天野玲子 ; 「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. 134, 243～246
- 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 年