

ウォータースクリーンの煤洗落し効果と遮煙性能

Performance for preventing smoke propagation and washing soot particle off

栗岡 均¹・今関 修²・天野 玲子³・大槻真人⁴

Hitoshi KURIOKA・Osamu IMAZEKI・Reiko AMANO・Masato OOTUKI

We did fire experiments to grasp for heat property in space by a 1/2 tunnel model, to evaluate performance of obstruction of smoke with Water-Screen(WS). As a result, it showed about 80% reduction rate without moving to a pair of swords of heat release rate, a pair of swords of the wind velocity for ceiling neighborhood temperature and received radiation. In addition, heat release rate showed a reduction effect by about 30%, and fire source property for the soot density occurred a reduction effect by about 40%. In a test site, the drop of water particle and steam gas which generates when WS operates at the time of a fire affect measurement machinery. It is difficult to grasp of various effect of WS.

Because the smoke becomes a trouble at the time of the evacuation, it is necessary to understand the effect of the washing drop with WS. The smoke is obstacle. The drop of water particle and steam gas which generate in a neighborhood of the model in a sky indoors, disappears in the edge of sky indoors. So, we measured a decrement property of the light density, and an analytical method in the effect of smoke washing effect with WS was examined using numerical simulation (CFD), and examined comparison with experiment results and analysis results.

key word : tunnel, fire, water screen, CFD, smoke washing effect

1. はじめに

ウォータースクリーン(以下 WS と表記)による火災防火システムは、火災が発生したゾーンを水幕によって区画化し、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し、構造物の被害を局所化するシステムである。鉄道や道路等の交通流のあるトンネル空間では物流を阻害することへの問題以外に大断面や複雑な形状を有することから従来の防災設備での区画化が困難である。しかし、WS は水幕を用いて区画化する技術であることから、既述のトンネル構造物の天井でも区画化が可能となる。

この WS による区画の性能を評価するため、1/2 のトンネル模型による空間内熱性状把握のための火災実験を行った。その結果、天井近傍温度なら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。また、発生した煤濃度に対しては約 60%、火源性状として発熱速度は約 30% の WS による低減効果を示した¹⁾。しかし、実験場においては、火災時に WS が作動している場合に発生する水滴粒子ならびに水蒸気ガスが測定機器に影響を与え、さまざまな WS の効果の把握を困難にしている。

近年、CFD を用いた火災現象への適用研究²⁻⁴⁾が進み、CFD はトンネル空間の火災安全設計の分野で適用されつつある。乱流モデル LES によるトンネル火災シミュレーションの検討では、川端⁵⁾らの報告がある。また、散水設備作動時の水滴モデルを組み込んだ LES コードは、米国商務省技術研究所(NIST)の Building and Fire Research Laboratory が開発した Fire Dynamics Simulator(以下、FDS)⁶⁾がある。

既報⁷⁾では、1/2 トンネル模型を用いて、散水設備作動時の空間熱性状について実験と解析との比較検討結果を報告した。本研究では、大空間内に 1/2 模型を設置し、模型近傍で発生する水滴粒子ならびに水蒸気ガスを大量に

キーワード：火災、トンネル、地下街、CFD、洗い落とし効果

¹正会員 博士(工学) 鹿島建設 技術研究所 ²鹿島建設 ITソリューション部

³正会員 博士(工学) 鹿島建設 土木管理本部 ⁴株式会社フルイドテクノロジー

含んだもやが大空間内で消失することを利用して光濃度の減衰性状を測定し、避難時に障害となる煤などの物質に対する水幕の水滴による洗い落とし効果の解析法を検討し、実験結果と解析結果を比較検討したので報告する。

2. 実験方法^{9), 9)}

(1) 実験場及び道路トンネル模型

本実験は、図 2-1 に示すように、高さ 25m(Z)×幅 25m(X)×奥行き 120m(Y)の大空間実験場内で実施した。模型は、道路規格第一種 AA 級トンネルの約 1/2 縮尺とし、高さ 2.7m×幅 5.4m×延長 18.2m の箱型である。トンネルなどの細長い空間では、火源からある程度離れると、壁体によって冷却された煙が降下する。そのため、トンネル延長によって火災時の煙の挙動は異なるが、本報告では、WS 作動時直後の煤濃度の性状を把握することを目的に、延長 18.2m の実験結果を利用した。

火災実験中、トンネル模型から流出した煤は、模型が設置されている実験場内に拡散すること、また、模型近傍で発生した水滴粒子ならびに水蒸気ガスが実験場端部で消滅することを利用し、実験場内に光電式分離感知濃度計（以下光濃度計と表記）を設置して WS 設備による煤の捕捉及び洗浄効果について、検討を行なった。

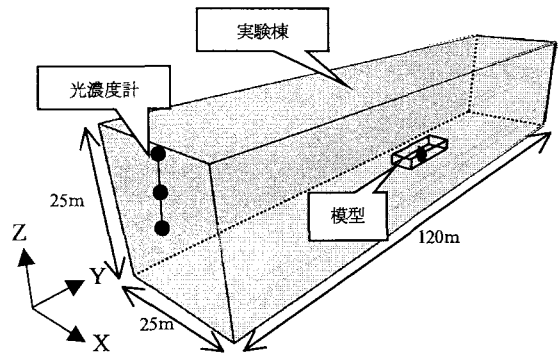


図 2-1 実験場の模型設置位置と光濃度測定位置

(2) 火源の設定

火源の発熱速度は、実トンネルの空間の火災実験より火炎からの放射と不完全燃焼を考えると理論的発熱量のうちに対流に約 50% が寄与する¹³⁾と考えられるので、実トンネルの空間高さ 7m、大型 VAN 2 台分の燃焼（15MW 相当）^{10), 11), 12)}を想定し、模型での火源は模型縮尺比を考慮して、式(2-1)⁷⁾より発熱速度(Q_{model})を 1.5MW とした。式(2-1)は、フルード則によって式(2-2)の無次元発熱速度より導出される。火皿（直径 1000mm×高さ 200mm）を模型装置中央部の床上に設置し、燃料 n-ヘプタン 23.3l に可視化のための 5% トルエンを混合し約 10 分間燃焼させた。

$$\frac{Q_{model}}{Q_{full}} = \left(\frac{H_{model}}{H_{full}} \right)^{5/2} \quad (2-1)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} l^{5/2}} \quad (2-2)$$

(3) 計測

水滴粒子および水蒸気の発生が模型近傍に限られていることより、図 2-1 に示すように、水蒸気の影響を受けない実験場端部の垂直方向高さ 9.9m～22.5m の壁際に光濃度計を設置し、煤濃度を計測した。温度は、図 2-2 に示すように直径 1.6mm のシース型 K タイプの熱電対を、模型の天井下 50mm の位置でトンネル奥行き方向中央に 1.0m 間隔に設置し、5 秒間隔で計測した。熱電対の位置を図 2-2 の No.1～No.16 に示す。

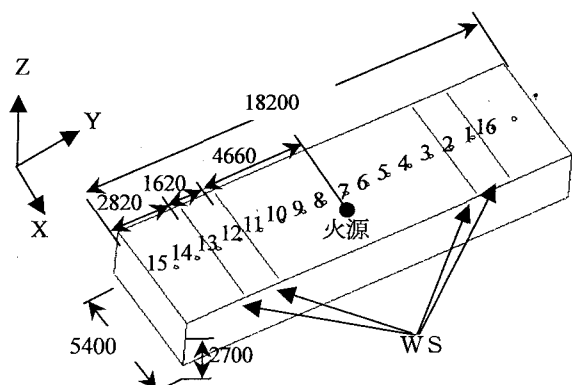


図 2-2 実験に用いた模型と温度測定位置

(4) 実験ケース

シミュレーションの対象とした実験ケー

スは、ケース1（WS非作動）、ケース2（WS作動）の2ケースである。火源は、図2-2に示す熱電対 No.7 の真下に設置した。WSは、火源から4.66mと6.28m離れた場所に2列の千鳥格子状に配置し、ヘッドは、1列あたり1.0m間隔で5～6個取り付け付けた。WSの仕様は片側11個のヘッドで、流量は10l/min（左右合計220l/min）、作動圧力は1.0MPa、噴霧初速度は20m/s、噴霧角は170～180度、ザウター平均は200μmである。

(5)発熱速度

ロードセルを火皿の下に設置して、可燃物重量ならびに火皿内に落下した水量を計測し、燃料の単位時間当りの重量減少値と理論的単位発熱量から、式(2-3)より図2-3に示すように発熱速度を求め⁷⁾、数値シミュレーションに用いた。

$$Q = q \left(\frac{\Delta G}{\Delta t} - w \right) \quad (2-3)$$

(6)煤発生率

本論文での煤とは火災時に発生する煤等の固形の燃焼生成物で、空間中を落下せずに漂う粒径でかつ光濃度計に測定可能な性状を有するものをさす。煤発生率 β [kg/kJ]は式(2-4)で求める。n-ヘプタンの燃焼熱 ΔH は 4.4745×10^4 [kJ/kg]、また、文献⁶⁾によると、煤の質量分率 Y_c は0.037[-]なので、煤発生率 β は 0.83×10^{-6} [kg/kJ]となる。

$$\beta = Y_c / \Delta H \quad (2-4)$$

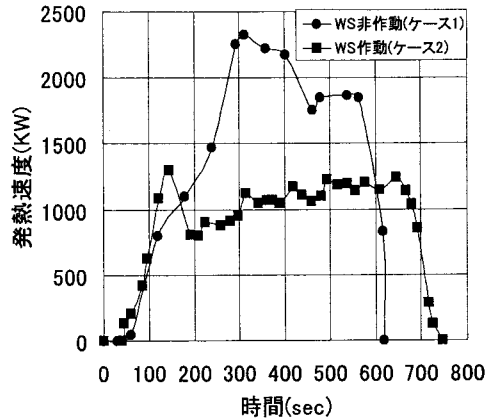


図2-3 発熱速度の時間変化

3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションは、実験場及び模型実験の空間条件、発熱速度、WSの仕様を実測と同一条件で与え、NISTのFDSを用いて行った。

(1)煤の洗い落とし解析モデル

WSの水滴粒子は煤を洗い落とし効果があるが、NISTが提供するFDSにはこの効果の解析モデルは組み込まれていない。そこで、煤の洗い落とし効果の解析モデルを提案する。式(3-1)及び式(3-2)に示す煤の質量分率に関する移流拡散方程式を考える。ここで、右辺第2項は燃焼による煤の生成項、第3項は水滴によって洗い落とされる煤の消滅項である。FDSにおいては個々の化学種について式(3-1)の形の保存式を解く代わりに混合分率とよぶ保存スカラー Z を導入して、 Z の保存式のみを解く。個々の化学種の質量分率は Z の値から一意的に計算できる。混合分率 Z と煤の質量分率 Y_c は、n-ヘプタンの燃焼反応においては、図3-1に示す比例関係となる。そこで式(3-1)の代わりに煤の洗い落とし効果を計算するための混合分率 Z_c を導入し、式(3-3)によって洗い落とし効果を記述する。(3-3)において右辺第二項をゼロ(洗い落とし効果なし)とした場合、 $Z_c = Z$ となる。煤以外の化学種の質量分率は Z より計算する。すなわち2種類の混合分率の保存則を解く。

$$\frac{\partial \rho_a Y_c}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_a Y_c \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho_a D_{LES} \nabla Y_c + \dot{m}_c'' - \alpha \rho_a Y_c \quad (3-1)$$

$$\rho_a D_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (3-2)$$

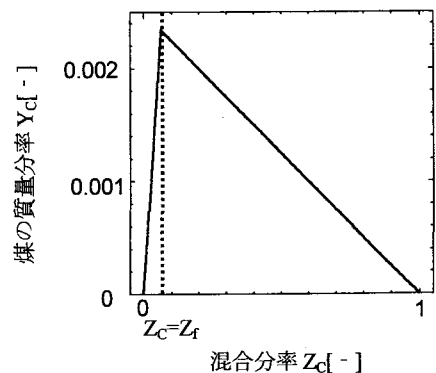


図3-1 混合分率と質量分率の状態関係式

$$\frac{\partial \rho_a Z_C}{\partial t} + \nabla \mathbf{u} \rho_a Z_C = \vec{\nabla} \cdot \rho_a D_{LES} \vec{\nabla} Z_C - \alpha' \rho_a Z_C \quad (3-3)$$

混合分率 Z_C と煤の質量分率 Y_C は、n-ヘプタンの燃焼反応においては、図3-1に示す比例関係を用いている。FDSの火炎面モデルでは $Z_C=Z_f$ の面が火炎面を表し、 $Z_C>Z_f$ の領域では燃料過多となって燃焼は生じない。 $Z_C<Z_f$ の領域では Y_C と Z_C は正比例する。そこで、煤の洗い落としを考慮した場合の煤の質量分率 Y_C は、式(3-3)から得られた Z_C と図3-1の関係を用いて計算する。洗い落としによる煤の消滅項の係数 α' は、洗浄集塵装置の集塵率の評価式¹⁴⁾から式(3-4)で表し、 η_T は水滴一個あたりの煤捕集率でStokes数の関数¹⁵⁾として、式(3-5)及び式(3-6)を用いて計算する。ただし、 $Z_C>Z_f$ の領域では比例関係は成り立たないものとしてモデル化する。この領域は火炎面の内側であり、この領域での煤洗浄の効果は無視してもさしつかえないものと考え、 $Z_C>Z_f$ なら $\alpha'=0$ とおく。個々の水滴の飛跡は、式(3-7)～式(3-9)に従う⁶⁾。

$$\alpha' = K |V| \eta_T \frac{L}{2r_d} \quad (3-4)$$

$$\eta_T = \frac{Stk^2}{(Stk + 0.25)^2} \quad (3-5)$$

$$Stk = \frac{\rho_w d^2 U}{18 \mu_G a} \quad (3-6)$$

$$\frac{d}{dt} (m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho_a C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| \quad (3-7)$$

$$C_D = \begin{cases} 24 / Re & Re < 1 \\ 24(1 + 0.15 Re^{0.687}) / Re & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re \end{cases} \quad (3-8)$$

$$Re = \frac{\rho_a |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| 2r_d}{\mu} \quad (3-9)$$

(2) 洗い落とし係数の推定

水滴径に応じた洗い落とし係数に関する既報告がなく、平均水滴径 $200 \mu m$ の洗い落とし係数 K を推定する必要がある。洗い落とし係数 K は、式(3-10)を用いて、光濃度計設置位置(高さ $9.9m \sim 22.5m$)において、高さ方向に濃度を積分値して求めた。尚、高さ方向濃度積分は、式(3-11)で求める。また、洗い落とし係数を求める際には、WS 非作動時の発熱速度が最大となる $300 \text{ 秒} \sim 360 \text{ 秒}$ の両ケースの平均値を用いた。模型坑口では、水滴による洗い落とし効果とWSの遮煙性能の両方の効果が見られるが、実験空間においては煙粒子がトンネル坑口からの拡散するとともに空間内に蓄積されるので光濃度計に対する減衰量は洗い落とし効果が主な原因と考えた。図 3-2 は、洗い落とし係数 K を $1 \sim 90$ まで変化させた時の実験場煤濃度測定位置での、煤集塵率と洗い落とし係数 K の関係を示したものである。トンネル実験結果から、燃料がヘプタンの場合、WS 作動時の実験場煤濃度測定点における煤集塵率は、

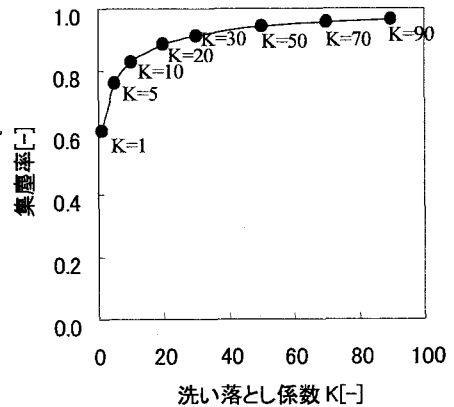


図 3-2 実験場煤濃度測定位置での集塵率と洗い落とし係数の関係

0.83 と報告⁷⁾されているので、K=10 とした。

$$\text{煤集塵率}=1.0-(\text{WS 作動時の } 300\sim 360 \text{ 秒の濃度積分値})/(\text{WS 非作動時の } 300\sim 360 \text{ 秒の濃度積分値}) \quad (3-10)$$

$$\text{濃度積分値} = \sum (\text{煤濃度} \times \Delta Z_i) / \sum \Delta Z_i \quad (3-11)$$

(3)解析条件

解析条件を表3-1に示す。本報告では、煤の洗い落とし効果を確認するためにトンネル模型と実験場を解析領域として同時にメッシュ分割した。図3-3は、既報⁷⁾の模型メッシュ分割を参考に、実験場を高さ方向から見たX-Y平面図である。実験場は5つの領域(mesh1～5)に分け、表3-1に示すように分割した。ただし、模型はmesh2のメッシュ分割に従った。模型近傍では温度などの変化が激しいためメッシュを細かくして、模型から離れるとX方向に分割数を序々に粗くした。実験場及び模型の速度壁面条件はHalf-slip、温度壁面条件は断熱とした。また、図3-3に示すように、ガラリは大気圧固定とした。模型の坑口では、実験場との質量保存が満足するように、運動方程式、エネルギー保存式、化学種の質量保存式を計算する。

表 3-1 解析条件

項目	条件
初期条件	速度：0m/s、温度：14℃(測定時の室温)
速度壁面条件	Half-Slip
温度壁面条件	断熱
ガラリ境界条件	開口：大気圧固定 高さ：3.5m～4.5m
火源条件	・発熱速度：図 2-3 参照 ・面積：1.0m×0.8m、位置：模型中央床面 ・燃料：n-ヘプタン
メッシュ分割 (X×Y×Z)	図 3-3 に示す5つの領域に分割した。模型は mesh2 の領域に含まれる。 ・mesh1:25×160×50 ・mesh2:36×160×50 ・mesh3:8×160×50 ・mesh4:8×160×50 ・mesh5:8×160×50

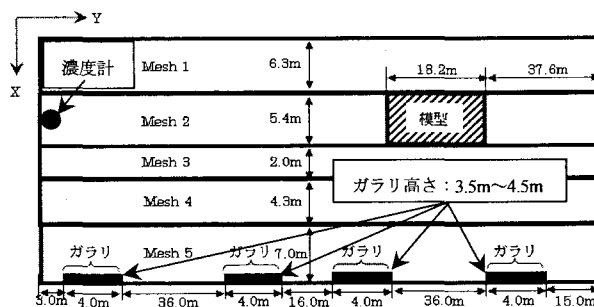


図 3-3 実験場 X-Y 平面図

4. 解析結果

(1) 実験の再現性

a) 模型内温度分布の比較

火災時のトンネル内高温煙流はWSによって冷却されながらも、高温特性を保持し実験場へ噴出する。実験空間からは、冷たい空気が模型内に流入する。既報⁷⁾にて模型内温度の再現性

については報告されているが、実験場の流れに対する熱源でもあるので、実測実験値と計算値の比較を行った。

図4-1は、図2-2に示すWS非作動時の模型内のNo.11の温度変化であり、図4-2は、No.14の温度変化である。両者

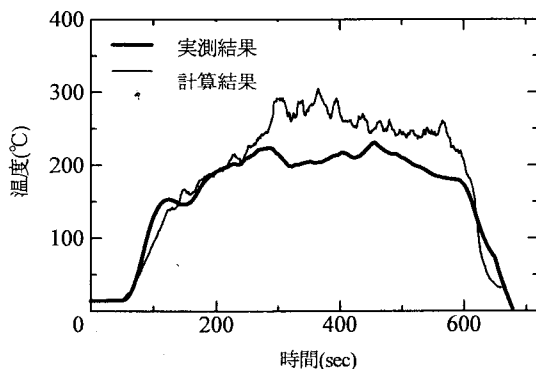


図 4-1 実測値と計算値の温度変化 (No.11)
(WS 非作動時)

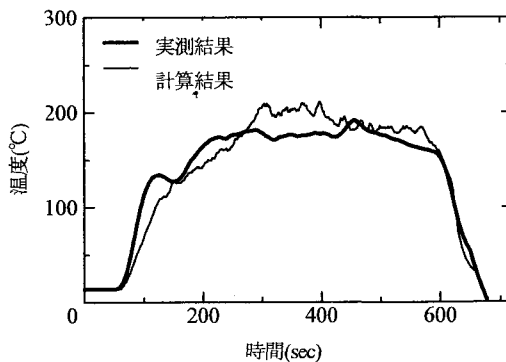


図 4-2 実測値と計算値の温度変化 (No.14)
(WS 非作動時)

とも計算値はよく実測値を再現していた。

WS作動時の模型内の温度の時刻歴を図4-3と図4-4に示す。図4-3は、No.11のWS通過前の温度変化であり、図4-4は、No.14のWS通過後の温度変化である。両者とも実測値と計算値はよく一致した。WS通過後の温度は、WS通過前の温度に比べて約75%低くなった。

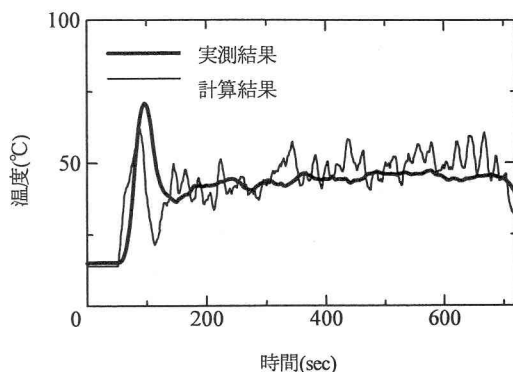
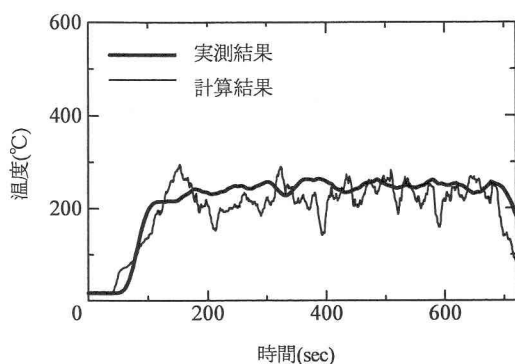


図 4-3 WS 通過前の実測値と計算値の温度変化(No.11)
(WS 作動時)

図 4-4 WS 通過後の実測値と計算値の温度変化 (No.14)
(WS 作動時)

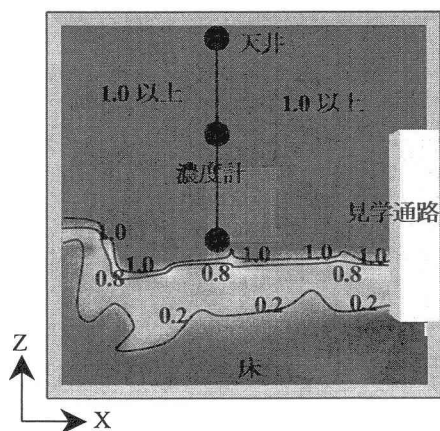


図 4-5 WS 非作動時実験場濃度測定断面煤濃度分布
(時間=360sec)

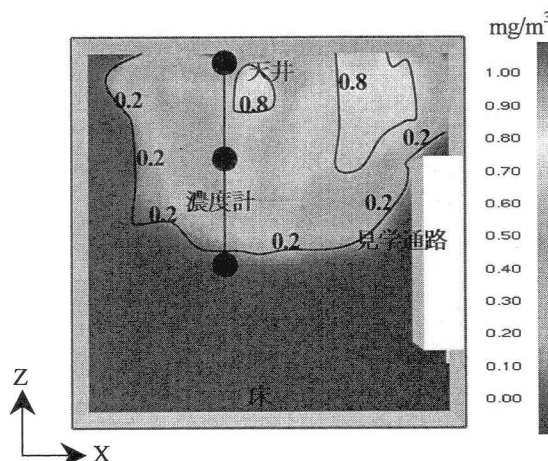


図 4-6 WS 作動時実験場濃度測定断面煤濃度分布
(時間=360sec)

b)実験場の煤濃度

図4-5にWS非作動時、図4-6にWS作動時の実験場濃度測定断面(X-Z)の計算結果の煤濃度分布を示す。図中の数字はコンターの主な境界値を示す。WS作動時は、 $0.2\text{mg/m}^3 \sim 0.8\text{mg/m}^3$ の濃度が、濃度計を設置した高さ($Z=9.9\text{m} \sim 22.5\text{m}$)とほぼ同じ位置に広く分布し、WS非作動時は、 1.0mg/m^3 以上の濃度が広く分布している。図4-7の実験場の煤濃度測定位置における実測値と計算値の比較では、計算値を高さ $9.9\text{m} \sim 22.5\text{m}$ の範囲で高さ方向へ積分した。また、図4-7の実測値と計算値の両者とも、WS非作動時の600秒の濃度値で正規化した。WS非作動時とWS作動時の両ケース

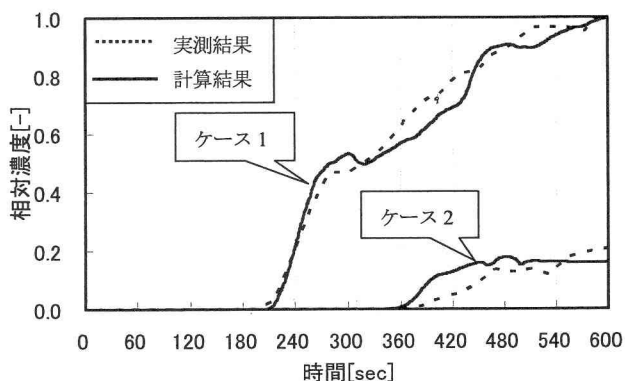


図 4-7 煤濃度の実測値と計算値の比較

の濃度時刻歴変化はよく実測値の性状を再現した。実験場での濃度は、WS作動時は、WS非作動時に比べて濃度は約80%低減した。

(2)WSの遮煙性能と洗い落とし効果

図4-8は、模型坑口におけるY方向速度Vによる質量流量と高さの関係を示したものである（ただし、正の場合：模型への流入、負の場合：流出）。WS作動時は図2-3に示すように発熱速度が小さくなり、上部高温層に運ばれる質量流量も小さくなる可能性があるが、それらの効果を含めた装置全体の性能を見るうえで、模型坑口出口側への質量流量(負の場合)が遮煙性能の一つの評価尺度と考え比較すると、WS作動時は非作動時に比べて、質量流量は25%減少していることになる。

図4-9は、模型坑口の集塵率と洗い落とし係数Kの関係を示したものである。WS作動時は、WSからの下向きの水滴によって煤の動きは高さ方向にも乱れるので、坑口の煤濃度は、X-Z断面全体の積分値とした。図4-9より、K=10の時、WS通過直後の坑口全体での集塵率は60%となる。模型坑口での体積流量の流出入関係と洗い落とし効果が高温の流出の煙粒子に作用し、低温の流入空気には作用しないことを考えると妥当な集塵率である。

図4-10(a)はWS非作動時の模型坑口での煤濃度を表し、図4-10(b)はWS作動時の煤濃度を表す。図4-8から、WS非作動時は天井付近の坑口出口側への強い流れによって煤は坑口側へ流れる。また、WS作動時は水滴の下向きの流れによる対流によって、煤が下部へ若干流れるが、天井近傍の強い流れによって多くの煤は坑口側へ流れる。

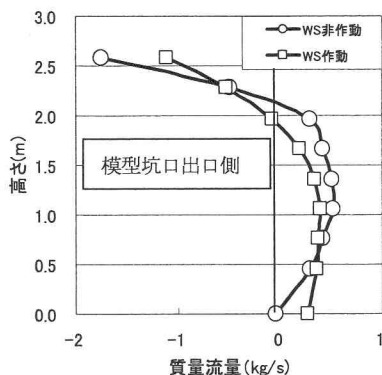


図4-8 質量流量と高さの関係
(模型坑口位置、300~360sec)

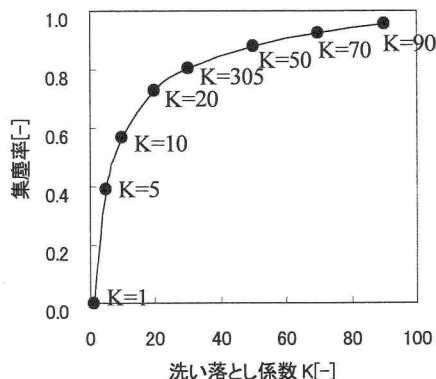


図4-9 模型坑口位置での集塵率と
洗い落とし係数の関係(300~360sec)

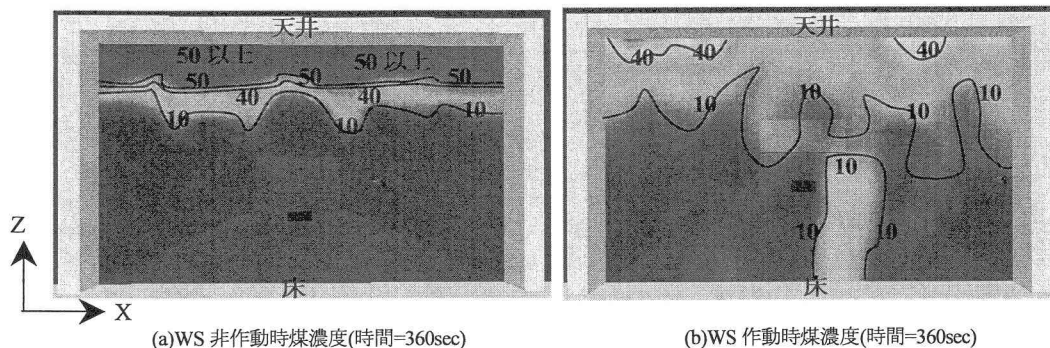


図4-10 模型坑口での煤濃度

(3)模型内気流性状および煤濃度分布

WS非作動時、火源から発生した火災プルームが天井に衝突後、天井ジェットとなって坑口へ向かい、坑口天井部から実験空間へ流出する。一方、坑口下部からは、火災プルームの巻き込み空気に見合う新鮮な空気が火源まで流入する。

図4-11は、WS作動時の360秒後の模型内熱気流である。火源から発生した上昇気流が天井に衝突後、天井ジェットとなって坑口へ向かい、WSの天井から床に向かう水滴によって気流は下側に向きを変える。また、火源による巻き込みによって再び火源へ向かうWSの通過前に対流が発生しているのが確認できる。WS通過後の気流は、坑口天井部から実験空間へ流出し、坑口下部からは、新鮮な空気が流入しWSを境に対流を生じている。このことからWSによる遮煙効果が確認できる。

360秒後のWS非作動時の模型内の煤濃度分布を図4-12に示す。火災プルームの流れに伴って天井部に煤が運ばれ、天井部に高濃度層を形成し坑口から実験空間に噴出する。360秒後のWS作動時の模型内の煤濃度分布を図4-13に示す。火災プルーム流れに伴って天井部に煤が運ばれるが、WSによる洗い落とし効果と遮煙効果によりWS形成区画内の天井近傍の高濃度層はWS非作動時よりも発達しないが、低濃度ながらWS形成区画内に煤が拡散する結果となった。

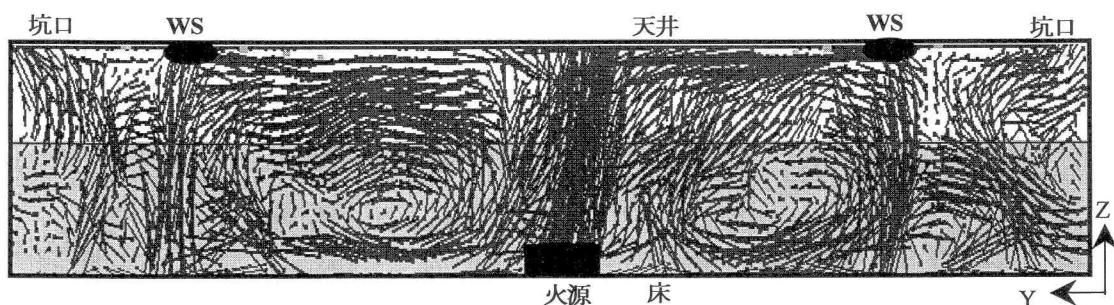


図4-11 WS作動時模型内気流分布(時間=360sec)

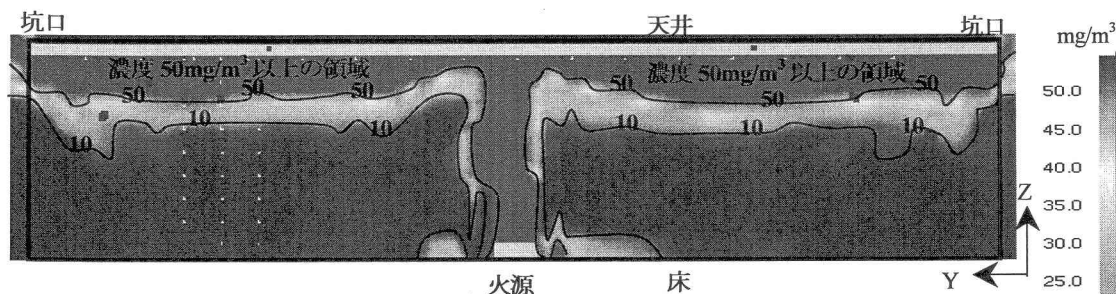


図 4-12 WS非作動時模型内煤濃度分布(時間=360sec)

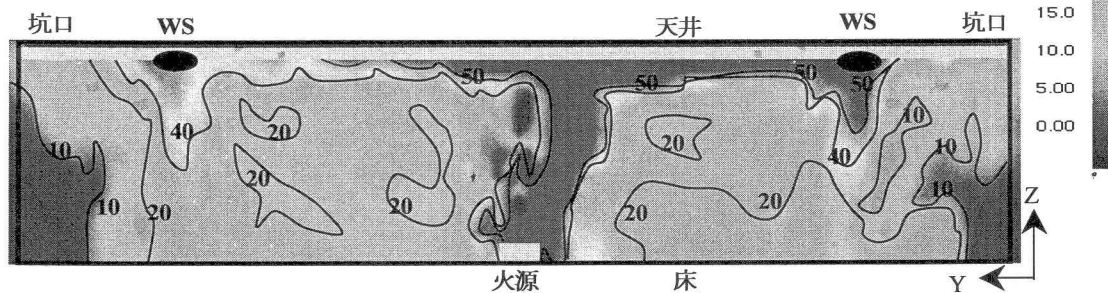


図 4-13 WS作動時模型内煤濃度分布(時間=360sec)

(4)実験場内の煤濃度分布

図4-14は、WS非作動時の360秒後の実験場内の煤濃度分布、図4-15は、WS作動時の360秒後の煤濃度分布である。図中の数字はコンターの主な境界値を示す。両端の模型坑口の天井近傍から実験場へ流出した煤は、浮力によって天井へ達し、実験場の天井に高温煙層を発達させる。煤は、実験場の境界壁に達すると、実験場中央に向う流れに

よって再び中央へ向う。実験場天井近傍では対流が生じていて、時間とともにこの対流は大きく発達し、これによって煤も実験場全体に拡散しながら拡大する。また、WS非作動時は、WS作動時に比べて模型からの流出する煤が多いため、実験場全体の煤濃度は高くなる。

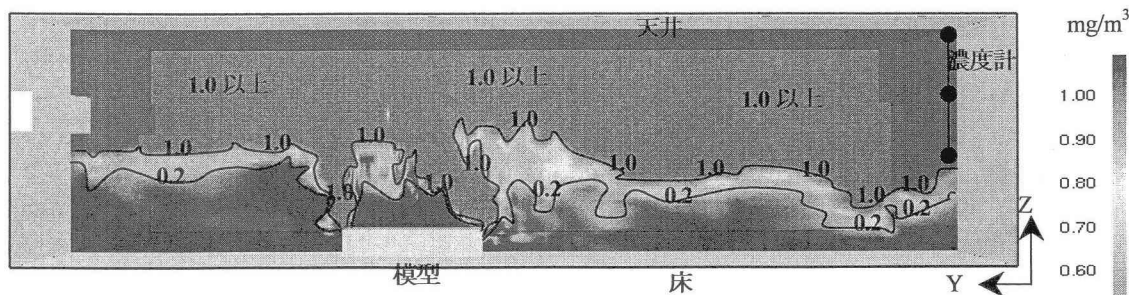


図4-14 WS非作動時実験場内煤濃度分布(時間=360sec)

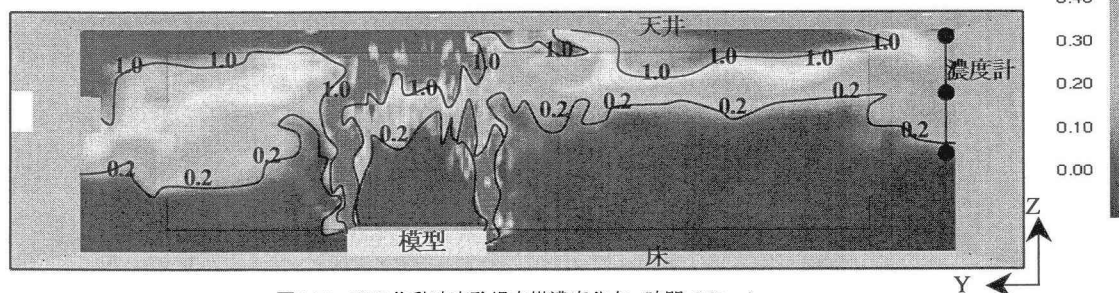


図4-15 WS作動時実験場内煤濃度分布 (時間=360sec)

5. まとめ

煤の洗い落とし効果の解析モデルを提案し、数値計算を行い火災実験結果と比較検討し以下のことが明らかになった。

- ① WSの水滴粒子による洗い落とし効果の解析モデルの洗い落とし係数(K)は実験結果より約10が妥当であることを推定した。
- ② 模型天井下50mmの温度の計算値は、WS非作動、作動ともに実測値の挙動を再現していることを確認した。
- ③ 実験場でのWS非作動時に対するWS作動時の煤集塵率の測定結果が約80%であったが、煤の洗い落とし効果の解析モデルを用いた計算結果は、この比率および実験場内の煤の実験時の時間的挙動を良く再現していることを確認した。
- ④ 模型の熱気流性状としては模型坑口天井から実験空間へ高温の空気が流出し、低温空気が流入する。WS作動時はWSの水滴によりWS周囲の気流は下向きになり、WSの遮煙効果が見られる。実験場の天井近傍には高温煙層が蓄積されるが、WS作動時は洗い落とし効果により煤の高濃度領域が減少し全体的に低濃度になることが確認された。
- ⑤ 模型坑口でのWS遮煙性能は、質量流量換算で約25%で、模型坑口全体での煤の集塵率は60%であった。

謝辞

本解析に用いた実験の実施にあたり鹿島技術研究所桑名秀明氏、土木管理本部村上信氏、ホーチキ株式会社の辻利秀氏、石田博志氏、林龍也氏をはじめ関係者の多大な協力を頂いたことに感謝の意を表します。

記号

a : 水粒子の半径[m], C_p : 空気の比熱[kJ/kgK], C_D : 抗力係数(局所レイノルズ数 Re の関数), D_{LES} : 物質拡散係数[m²/s], d : 煤の直径[m], g : 重力加速度[m/s²], $\Delta G / \Delta t$: 燃料の単位時間あたり重量減少量[kg/s], H : トンネル空間高さ[m], K : 洗い落とし係数[-], ΔH : 燃焼熱[kJ/kg], L : 水ガス比[l/m³], l : 代表長さ(トンネル

高さ[m], M : 分子量[kg/mol], $\dot{m}''$: 煤の発生速度[kg/s], m_d : 水滴の質量[kg], Q : 火源の発熱速度[KW], Q^* : 無次元発熱速度[-], q : 単位発熱量[kJ/kg], r_d : 水滴半径[m], S_c : Schmidt 数[-], Stk : Stokes 数[-], T_a : 空気の温度[K], u : 気体速度[m/s], u_d : 水滴速度[m/s], $U = \sqrt{(u-u_s)^2 + (v-v_s)^2 + (w-w_s)^2}$: 気流と水粒子との相対速度[m/s], $|V|$: セル内の水粒子速度の平均値[m/s], Y_c : 煤の質量分率[-], w : 散水設備による増加水量[kg/s], Z_c : 煤の混合分率[-], Z_t : 火炎面境界での煤の混合分率[-], ΔZ_i : 要素 i の高さ方向分割幅, β : 発煙率 [kg/kJ], ρ_a : 空気の密度[kg/m³], ρ_w : 水粒子の密度[kg/m³], η_T : 液滴一個の粒子捕集率, $\delta x \delta y \delta z$: 格子セルの体積[m³], μ : 空気の粘性係数[kg/ms], μ_{LES} : 粘性係数[kg/ms], μ_G : ガスの粘性係数[kg/ms], α, α' : 洗い落とし係数[-]

添字

model: 実験模型のスケール, full: 実スケール

参考文献

- 1) 桑名秀明, 栗岡均, 天野玲子, 出石陽一: ウォータースクリーンにおける区画化効果, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 10 巻, pp.51-58, 2005
- 2) W.K.Chow, N.K.Fong: Numerical Simulation on Cooling of the Fine-induced Airflow by Sprinkler Water Sprays, Fine Safety Journal 17, pp.263-290, 1991
- 3) William Mell, McGattan KB, Borm HR: Large Eddy Simulation of Fine-Driven Flows, ASMEHTD Vol.304, National Heat Transfer Conference Vol.2, pp.73-77, 1995
- 4) 國兼裕子, 川端信義, 石川拓司, 竹國一也, 下田哲史: 大断面トンネルにおける火災熱気流と煙の挙動シミュレーション, 日本火災学会研究発表会概要集, B2, pp.96-99, 2002
- 5) 川端信義他, トンネル火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 65-634B, pp.1870-1877, (1999)
- 6) Kevin B. McGrattan et al.: "Fire Dynamics Simulator (Version 3) Technical Reference Guide," NISTIR 6783, 2002 Ed.
- 7) 佐藤博臣, 栗岡均, 今関修, 田中太: CFD による散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 9 巻, pp.69-78, 2004
- 8) 橋本和記, 天野玲子, 出石陽一, 栗岡均, 佐藤博臣: 地下空間における新しい火災防災システム, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp.721-722, 2003
- 9) 出石陽一, 橋本和記, 天野玲子, 栗岡均, 佐藤博臣: 火災区画化技術としてのウォータースクリーンの特性, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp.723-724, 2003
- 10) Carola Steinert: Smoke and Heat Production in Tunnel Fires, Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, SP REPORT, 1994
- 11) Haukur Ingason: Measurements in Tunnel Fire", Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, SP REPORT, 1994
- 12) PIARC: Design Manual for Roads and Bridges Chapter 5, August, 1999
<http://www.official-documents.co.uk/document/deps/ha/dmrb/vol2/sect2/bd7899b.pdf>
- 13) 江尻康人, 川端信義, 森文利: 横流換気トンネルにおける火災時の熱気流挙動シミュレーション, 日本火災学会研究発表会概要集, A16, pp.62-65, 2004
- 14) 化学工学協会編, 改定 4 版化学工学便覧, 丸善, pp.1250, 昭和 53 年 10 月
- 15) http://www.clarkson.edu/fluidflow/courses/me637/P_Impaction.pdf