AN EXAMINATION ON SUPPRESSIVE EFFECT OF FIRE BY WATER SPRAY SYSTEM AT A TUNNEL FIRE

菊本 智樹1・坂口 琢磨1・青木 貞憲2・咲間 健一2

Tomoki KIKUMOTO¹, Takuma SAKAGUCHI¹, Sadanori AOKI², Kenichi SAKIMA²

This study examined fire suppression effect of water spray system equipped in road tunnels by fire tests and CFD analyses. The purpose of its operation is not to extinguish the fire but to protect the tunnel structure and to prevent the spread of fire due to the suppression of the fire and the cooling effect. And the system is commonly used after confirming completion of evacuation because the visibility of evacuees inside the spray section may be degraded by the diffusion of smoke layer in operation of the system. However, the delay in the operation of the system may cause an increase the fire growth. In addition, other unclear factor may include the efficiency of the existence of large obstacle like an unreachable of water spray to the fire source. Therefore, the influence to the suppression effect and the characteristics of the smoke behaviour are necessary to be clarified by the difference of initiation timing and the existence of the obstacle. As a result, the system was confirmed that it has enough ability to suppress the heat release rate and the physiological influence due to the diffused smoke is limited impact under the condition of pool fire. In addition, we confirmed that the simulator used in this study is able to reproduce the reduction of heat release rate during the water spray roughly in the same level as the experiment.

Key Words : Fire test, Numerical simulation, Water spray system, Tunnel fire

1. 序論

わが国では、交通量が多く延長が長い道路トンネル (AA級, A級の一部)には水噴霧設備を原則として設 置することとしている¹⁾. 道路トンネルの水噴霧設備は, 消火ではなく, 火勢抑制, 延焼防止および構造体の保護 を目的に設置され、近年では我が国だけでなく欧州でも 検討や導入が進んでいる^{2),3)}.しかし,放水時には煙 の成層を乱し避難者の視界や生理的に悪影響を及ぼすお それがあるため、避難者が存在しないことを確認して運 用することが基本となる. そのため, 運用の遅れによる, 火災規模及び被害の拡大が懸念される.本報では、水噴 霧設備を早期に運用した場合の有効性や路面付近へ拡散 する煙の特性を明らかにすることを目的に火災実験を行 った. さらに、 火源付近に停車車両等の障害物が存在し、 水滴が火源に届き難い場合の効果に関しても検討した. また、実験を模擬した水噴霧時の3次元火災シミュレー ションから放水時の温度低減に関する予測精度の検証を

行い,実験では検証が困難なトンネル内の大規模火災時 の水噴霧設備の効果をシミュレーションを用いて検討し た.

2. 水噴霧設備の火勢抑制効果に関する火災実験

(1) 実験条件

a) 実験施設概要

火災実験は、耐火構造を有する大型建屋内(延長35m, 幅17.5m,高さ12m)に道路トンネルで使用する水噴霧 ヘッドを設置して実施した.この実験は水噴霧放水時の 火源近傍の特性を検討することを目的に、道路トンネル の水噴霧放水を模擬したものである.放水区画外の煙の 成層や挙動を扱う場合にはトンネル構造を模擬した実験 が必要である.

図-1に実験施設の概略を示す.座標軸の基点は火源の 中心とした.火源は建屋の中央に設置し,水噴霧ヘッド

¹正会員 株式会社エコープラン ECHOPLANCO., LTD. (E-mail:kikumoto@echoplan.co.jp)

-キーワード : 火災実験,数値シミュレーション,水噴霧設備,トンネル火災

²非会員 能美防災株式会社 NOHMIBOSALLTD

と火皿の離隔は、2車線トンネルのセンターラインが火 源中心となるように調整した.また、ヘッド間の離隔は 実際の道路トンネルの設置間隔と同様に5mとし、3か所 に設置した水噴霧ヘッドにより火源周囲の散水分布を実 際と同様の形態とした. なお、本検討で採用した水噴霧 ヘッドは開削トンネルのような矩形トンネルで用いられ るタイプである.水噴霧ヘッドの仕様を表-1に示す.さ らに、実験中は図中のシャッターAおよびシャッターB を地面からlm程度開放し、外気を取込むことで酸欠状 態を防ぐと共に、シャッターBから煙処理装置(処理風 量:500m³/min) を介して有害物質の除去後に大気へ放 出した. なお、実験建屋は十分に大きく処理風量は小さ いためシャッターAからシャッターBへの流れが煙挙動 に与える影響はほとんどないものと考えられる. 遮へい 板を設置するケースでは、長さ5.1m、高さ4.1mの鋼製板 を配置し、火源の近傍に大型車両が停止している等で放 水が火源に届き難い状況を模擬した.

b) 計測項目

測定は温度計測(熱電対:K型φ1.0mm),減光法によ る煙濃度(Cs計),放射熱(放射計),一酸化炭素濃度



図-1 実験施設の概略

表-1 水噴霧ヘッドの仕様			
ヘッドタイ	2 種組合せ型 天井板有り用		
プ			
標準放水圧	0.34MPa		
力			
標準放水量	組合せ流量 : 250L/min		
	近投用放水口:90L/min		
	遠投用放水口:160L/min		
放水形状	近投用放水口:	遠投用放水口:	
	120°円錐型	扇形	
放水ヘッド 姿図 (参考図)			

(CO濃度計),酸素濃度(O2濃度計),粒子径測定 (ディストロメータ)に関して行った.なお、粒子径測 定に関しては燃焼中の測定ではなく、事前に放水のみを 行い火源設置位置で測定したものである.計測機器配置 の概略を図-2に示す.また、水噴霧の放水が熱電対やCs 計にかかるため測定値にはこの影響が含まれることに留 意する必要がある.

c) 実験ケース

火災規模,大型障害物,放水開始時間の違いによる水 噴霧設備の効果および煙挙動への影響を検討するため, 表-2に示す5ケースの実験を行った.火源はガソリンを 燃料とした1m²火皿および2m²火皿であり,乗用車1~2台 の火災規模に相当する.ガソリン火皿火災は,道路トン ネル火災実験に従来から一般的に用いられ,ガソリン漏 洩火災のように短時間で火災が成長する,あるいは燃焼 の安定性から定常特性を検討する際のモデル火災として 採用される.また,火皿面積や燃料量を調整して火災規 模や燃焼時間を調整しやすい.本検討では,水噴霧設備 の火勢抑制効果と煙挙動を主に対象としたことから,火 災規模の成長が遅い実車火災は対象としなかった.

(2) 実験結果

a) 水噴霧設備の放水特性

粒子径測定結果を図-3に示す. 粒子径は5.5mmまでの範囲で存在し,最も多い粒子径は0.5mmで全体の約23%であ



図-2 計測機器の配置

表−2 実験ケース

ケース	火皿	ガソリン量	遮へい板	放水開始
1G-3.0-N	$1 \mathrm{m}^2$	19L	無	点火3分後
1G-0.5-N	$1 \mathrm{m}^2$	$9.5\mathrm{L}$	無	点火 30 秒後
1G-0.5-A	$1 \mathrm{m}^2$	9.5L	有	点火 30 秒後
2G-0.5-N	$2m^2$	19L	無	点火 30 秒後
2G-0.5-A	$2m^2$	19L	有	点火 30 秒後





放水前(150秒後) 放水中(360秒後) 図-4 燃焼状況(1G-3.0-N)

った. なお,積算体積を見ると,50%となる粒子径 (D_{x05})は1.5mmであり,次章で示す数値シミュレーショ ンの水滴径の入力条件として採用した.

また,煙が無い状況で放水した際のCs濃度の上昇は 0.2~0.3m¹程度であった.

b) 放射熱の時間変化

本検討で用いたガソリン火皿火災に対して水噴霧放水 を行った場合、図-4に示すように放水中の火勢抑制は可 能であるが、消火することは不能であった。図-5に火源 から6mの位置における放射熱の時間変化を示す.放水 前の放射熱は1m²火皿で2kW/m²程度,2m²火皿で4kW/m² 程度である. 放水後は急激に放射熱が低下し、放水前の 半分以下までに熱的影響が抑制されることが確認できる. 遮へい板を設置したケースでも低減が確認できるが、放 水中の低下量は遮へい板なしよりも少ない傾向である. 放射熱が2kW/m²を超えると人間の耐容時間が急速に落 ち始める傾向にあるとされている%ことから、乗用車1~ 2台程度の火災に対して水噴霧放水を行うことで、火源 に比較的近い領域でも火傷発生の可能性を低減できるも のと考えられる. また, 水噴霧放水により燃焼の抑制お よび水滴による放射熱の遮断が確認できるため、周囲車 両への延焼抑制(25~40kW/m²で着火可能性が高まると いう報告例うがある)およびトンネル構造物の保護にも 水噴霧設備の効果が期待できる.

c) 熱気流温度の時間変化

図-6に熱気流温度の時間変化を示す. 1G-3.0-Nおよび 1G-0.5-Nの比較から,放水のタイミングに関わらず放水 直後に急激に低減し,乗用車クラスの火災であれば放水





図-6 熱気流温度の時間変化



が遅れても十分に火勢を抑制できるものと考えられる. なお、2m²火皿の実験に関しては、放水開始時間を30秒 としたケースのみ実施したが、放水が遅れる場合には更 に火災規模が発達すると予想され、開削トンネルの天井 付近の高さ(5m)では200℃を超える領域が発生し、長 時間に渡り暴露した場合はコンクリート強度を劣化させ ることが考えられる.しかし、早期放水を行うことによ り100℃を越えない温度に低減および維持できるため、 熱的ダメージの低減には早期放水が有効である.また、 遮へい板により火源へ水滴が届き難い場合でも、低減量 は小さくなるが温度は低下しており、火源付近に大型車 両等の障害物がある場合でも熱的ダメージの抑制に効果 があることが確認できた.

d) Cs濃度の時間変化

図-7にCs濃度の時間変化を示す. 放水することで煙層 が撹拌され、路面付近に煙が充満することにより視距を 悪化させるが、遮へい板がある場合には撹拌が抑制され るため、路面付近の濃度上昇が抑制される傾向であり、 大型障害物が視距をさらに悪化させる要因にはならない ことが確認できる. 日本の道路トンネル火災において避 難行動に必要な路面付近の視距をCs=0.4m-1と考える事例 が多いが、早期放水により火災規模を抑制し煙の発生を 低減させた状況でも、前述の通り、放水だけでCs=0.3m⁻¹ 程度の上昇が発生するため、放水区画内は短時間で Cs>0.4m⁻¹の濃度に至る.なお、本検討における建屋の高 さは12mであり、蓄煙空間が十分な状態で路面付近の視 距が確保される時間は100秒未満(2G-0.5-N)であったこ とから, 蓄煙空間が少ない実トンネル(一般的な開削ト ンネルの内空高さは5~6m程度)ではより短時間で視距 が悪化するものと推察され、放水区画内(一般に50~ 100m)の視距確保は極めて困難と考えられる.しかし、 放水と同時に換気を行うことで放水区画内の煙濃度の希 釈も考えられ、その効果や放水区画外の視距への影響等 の検討が今後の課題である.

e) ガス濃度の時間変化

図-8に放水区画内(高さ1.5m)の一酸化炭素濃度と酸 素濃度の時間変化を示す.水噴霧放水時には煙層の撹拌 により路面付近の一酸化炭素濃度が時間経過に従って上 昇する.本検討の2m²ガソリン火皿火災(乗用車火災相 当)の最大上昇量は35ppm程度であることが確認でき, 日本産業衛生学会の許容濃度の勧告値である50ppm⁹よ りも小さい.また,酸素濃度の低下も0.3%程度であり, 労働安全衛生法の酸素欠乏症防止規則に規定される酸素 濃度の18%よりも十分に高い.したがって,本検討の範 囲では酸欠や急性中毒による生理的影響は限定的と考え られる.ただし,大規模火災や燃焼物の種類によっては 生理的影響が高まると考えられるため,更なる検討が必 要である.



図-8 ガス濃度の時間変化

3. 数値シミュレーションによる検討

実験では安全上の理由等から大規模火災の検討は困難 であり、計測点も限定される.そこで、数値シミュレー ションを用いた検討を行った.

本報では水噴霧設備の火勢抑制効果を主対象とした検 討であるため、水噴霧放水時の発熱速度の変化や火源周 辺の温度変化を予測可能なシミュレータを選択し、その 予測精度を把握する必要がある.そこで、2章の実験を 模擬したシミュレーションから予測精度を確認し、実ト ンネルを対象とした解析を行った.

(1) シミュレータ

本検討では、米国国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)で開発されたFire Dynamics Simulator Version 6 (FDS6)を用いた. FDSは燃料の燃 焼反応モデル、熱放射モデル、スプリンクラーや放水ノ ズルモデルが考慮可能⁷であるため、水噴霧設備運用時 の発熱速度の変化や周囲温度の低下等の検証が可能なシ ミュレータと考えられる.

(2) 実験に対するシミュレーション

2G-0.5-N の実験ケースを対象としてシミュレーション を行い、予測精度の検証を行った.

a) 解析条件

計算領域は図-1に示した実験領域と同じ大きさとし、 火皿や水噴霧ヘッドの位置も実験と同じ位置に配置した

(図-9参照).格子分割に関しては,格子サイズの影響 を検討するために2パターンを採用した.表-3に格子分 割パターンを示す.また,壁面はコンクリート製,シャ



図-9 シミュレーションの解析領域

表-3 🕫	格子分割パターン	\sim
-------	----------	--------

so the state	分割幅[m]		
Ng-7	x方向	y方向	z方向
細格子	0.1~0.2	0.1	0.1~0.2
粗格子	0.5	0.35	0.3

ッターは鋼製として熱物性値を与えた(表-4).

シミュレーションの火源は、実験と同じ火皿領域に実験と同量(19L)のガソリンを与えて燃焼させた.

また、FDSの放水ノズルに関するパラメータは、表-1 に示した水噴霧ヘッドの仕様(放水圧力0.34MPa,放水 量250L/min)に合うように調整し、放水開始時間も実験 と同様に点火30秒後とした.なお、放水角度に関しては 計測データがないため、画像データを参考として実験に 近い分布形状となるように調整した.粒子径分布は FDS6のデフォルトモデルのRoshin-Rammler-Lognormal Distributionに実験で測定したD_{x05}=1.5mmを適用した分布とし た⁷.

b) 発熱速度曲線の推定

実験において水噴霧放水時の発熱速度曲線の測定は、 放水の水滴が火皿に混入するため火皿燃料の重量減少量 の測定から求めることは不可能である. そこで、シミュ レーションから発熱速度曲線の推定を行った. シミュレ ーションより求めた発熱速度の時間変化を図-10に示す. 格子サイズの違いにより発熱速度の立上りに違いが見ら れ、 粗格子の場合には細格子に比べてピーク値が高く、 また、放水後には鎮火されやすい傾向である. 放水後の 発熱速度の低下量は、どちらの格子サイズでも大きな差 は見られない. なお、実験では放水によって鎮火するこ となくすべての燃料が燃え尽きたが、シミュレーション では燃料が燃え尽きずに鎮火した点が異なる.一般に, 発熱速度曲線は放射熱の時間変化曲線と相似形になると 考えられ、格子サイズが細かいほど図-5に示した実験の 放射熱測定の分布形状に近づく傾向である. このことか ら、格子サイズが細かいほど発熱速度の予測精度が高ま るものと考えられるが、道路トンネルのような大空間を 解析する場合には計算負荷が大きくなりすぎる.後述す

表-4 シミュレーションで用いた壁面の熱物性値

十十万万	熱物性値		
的頁	比熱	熱伝導率	密度
コンクリート	879J/(kgK)	1.106W/(mK)	2100 kg/m^3
鋼製シャッター	473 J/(kgK)	53.0 W/(mK)	7830 kg/m^3



る9m²ガソリン火皿のシミュレーションでは、本節の細 格子に近い分割幅を用いたが放水による鎮火は見られな かった.以上から、本検討で採用した格子サイズの範囲 では発熱速度を実際よりも高めに見積もり、小規模火災 時には鎮火しやすいことに留意する必要があるものと考 えられる.

c) 温度変化の実験結果との比較

水噴霧放水エリアの上方部(高さ10m)および放水エ リア内(高さ3m)の温度の時間変化に関して、シミュ レーションと実験の比較を図-11に示す.実験とシミュ レーションで発熱速度の立上りが異なる等の理由が考え られるため、温度の立上りにも違いが見られるが、放水 開始からの時間経過に従って実験結果に近い温度になる ことが確認できる. 高さ3mの水噴霧放水エリア内の温 度は、実験に比べて変動量は大きいが概ね実験値に近い 値で推移することから、放水時の温度低減をシミュレー ションで再現できているものと考えらえれる.また、放 水が直接的に温度低減に作用しない放水エリア上方の温 度変化も概ね一致していることから、放水による実験領 域全体の気流の流動も模擬しているものと考えられる. 格子サイズの違いによる温度変化への影響は小さく、本 検討で採用した格子サイズの範囲では解析結果に大きく 影響しないことが確認できる.





(3) 実トンネルを想定したシミュレーション

a) 解析条件

前節で火皿火災に対する水噴霧放水時の火勢抑制およ び温度低減が実験を概ね模擬することが確認できたため, 実トンネル内のガソリン火皿火災を想定したシミュレー ションを行った.火源のガソリン火皿面積は9m²とした. 9m²ガソリン火皿は大型車バス1台当たりの火災規模に相 当する[®].解析領域の概要を図-12に示す.延長200m,幅 10m,高さ5mの矩形断面トンネルを想定し,x方向に0.2 ~0.4m,y方向に0.2~0.4m,z方向に0.125~0.2mの分割幅 で解析領域を分割した.壁面はコンクリート製とし,前 節と同じ熱物性値を用いた.水噴霧ヘッドの設置高さお よび仕様は前節と同じである.放水エリアは,道路トン ネル火災時の放水区画として50~100m程度が一般的で



図-12 矩形トンネルを想定したシミュレーションの解析領域

あるため、本検討では100m(火点の前後50mを水噴霧へ ッドで放水)を採用した.本検討では、放水開始のタイ ミングの影響を検討するために、点火30秒後および点火 3分後の2パターンについてシミュレーションを行った.

b) シミュレーション結果

シミュレーションの発熱速度の時間変化を図-13に示 す. 点火直後は急激に発熱速度が立上り,60秒程度で安 定した燃焼となる.安定した燃焼時の発熱速度は40MW 程度である. 放水を行うことですぐに発熱速度が16MW 程度まで低減するが,鎮火せずに低減した発熱速度を維 持して燃焼し続けることが確認できる.

図-14に天井面付近(高さ4.5m)および路面付近(高さ1.5m)の放水前後の縦断方向温度分布を示す.なお, 解析領域は火皿を中心に左右対称であることから,温度



図-13 水噴霧時の発熱速度の時間変化 (9m²ガソリン火皿)





分布も対称となるため、トンネルの正方向の分布のみを 示した. コンクリート壁面が長時間に渡って高温下に曝 されると圧縮強度が低下する. 受熱許容温度を200℃と して考えた場合、放水開始180秒のケースの天井面付近 温度(図-14 a))では、火点の前後70m程度の範囲(計 140m)が200℃を超える領域となることが分かり、放水 開始が遅れるとさらにその範囲が拡がるものと推定され る. また, 放水後は200℃を超える範囲が火点の前後 30m程度に抑制され、トンネル構造物への熱的影響の範 囲を大幅に低減できることが確認できる. さらに、図-14 c) に示す路面付近の温度分布から、大型車のような 大規模火災では熱気流層が厚いため、放水開始時間が遅 い場合に路面付近の温度も上昇し、60℃を超える領域 も見られることから、避難者が存在する場合には気道熱 傷等が発生する可能性がある.水噴霧を早期に放水した 場合(図-14d))は、熱気流が拡がる前に火勢を抑制す るため、路面付近の高温領域の縮減が期待できる. なお、 放水区画内は熱気流層を撹拌するため, 放水区画外より も高めの温度となるが、道路トンネル内火災における避 難者の限界温度の推奨値9とされる60℃程度であるため、 短時間の暴露であれば影響は小さいものと考えられる.

以上の検討から,現状の水噴霧設備の仕様で,大型車 火災程度までの火勢抑制や周囲への影響低減が十分可能 であると考えられる.

4. 結論

道路トンネルの水噴霧設備の実験および数値解析によ る検討結果を以下にまとめる.

- 乗用車火災相当の熱出力のガソリン火皿実験において、消火は不能であるが十分に火勢を抑制でき、 温度も十分に低減できることからトンネル構造物の保護や避難者への熱的影響の低減に有効であることを確認した。
- 障害物が火源に隣接し、放水が火源に届き難い状況でも一定の効果を有することを確認した。

- 小規模火災でも放水区画内の視認性を確保することは困難であり避難行動への悪影響はあるものと考えられるが、生理的影響に関しては限定的である。
- 本検討で用いたシミュレータのFDS6は、ガソリン 火皿火災に対して水噴霧放水時の燃焼状況の変化 および温度変化を概ね模擬することを確認した。
- 大型車のような大規模火災に対しても現状の水噴 霧設備は有効であることを確認した。

今後、シミュレーションから水噴霧時の避難者の行動 環境を議論する際には、ガス濃度や煙濃度の予測精度を 確認する必要があることや、FDS6を実車火災に適用す る場合の火源モデルが検討課題である.

参考文献

- 道路トンネル非常用施設設置基準・同解説,(社) 日本道路協会, Oct. 2001.
- M. Yokota, and K. Yamazaki.: Functions of Water Spray Systems in Japanese Expressway Tunnels, *Proceedings from the 8th International Symposium on Tunnel Fire and Security*, pp.581-592, Borås Sweden, March pp.14-16, 2018.
- Ingason, H., Y.Z. Li, and M. Bobert.: Large-scale fire tests with different types of fixed firefighting system in the Runehamar tunnel, in SP Report 2016:76. 2016, SP Fire Research.
- 4) 火災と建築, 日本火災学会編, pp.205, 2002.
- 5) 岡本勝弘:自動車火災における自動車の燃焼性状, 予防時報, 227号, pp.3641, 2006.
- 許容濃度等の勧告(2017 年度),産衛誌,59 巻, pp.153-185,2017.
- Fire Dynamics Simulator User's Guide, National Institute of Standards and Technology(NIST), NIST special publication 1019 sixth edition, 2015.
- 8) 竹國一也,下田哲史:第二東名高速道路清水第三トンネルにおける火災実験,高速道路と自動車,第44巻第6号, pp.30-35, 2001.
- NFPA502 National Fire Protection Association, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2017.