

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2020

課題番号：16KK0125

研究課題名（和文）自然換気トンネル火災時における水噴霧による火源燃焼速度と煙流動の能動的制御（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Active control of fire and smoke by water spray in the event of a natural ventilation tunnel fire(Fostering Joint International Research)

研究代表者

田中 太 (Tanaka, Futoshi)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：60401791

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,400,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、日本の多くの長大トンネルに設置されている水噴霧装置によるトンネル火災における煙流動制御を実現するための基礎研究として、実験的及び数値的な研究を行った。主に以下の点について明らかとなった。（1）トンネル火災時において天井下を流動する煙の一部が水噴霧によって遮断され、火源側に逆流する現象を記述するモデルを構築した。（2）火源発熱速度と水噴霧による火源発熱速度の低減効果の関係（3）数値シミュレーションによる消火現象の再現（4）水噴霧による煙降下現象を再現する数値シミュレーションモデルの開発

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで日本のトンネルに設置されてきた水噴霧設備は、トンネル躯体の保護や消防活動支援を目的としており、火災時において積極的に火災抑制や煙流動制御に使用されるものではなかった。本研究の成果は、水噴霧設備を利用することで煙流動を制御し、避難者の避難時間を延長したり、火源を積極的に冷却して火災延焼を防いだりするような積極的な水噴霧設備の活用への道標になり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted experimental and numerical studies as basic research to realize smoke flow control in tunnel fires by water spray systems installed in many long tunnels in Japan. The following points were mainly clarified. (1) A model was developed to describe the phenomenon in which a part of the smoke flowing under the ceiling is blocked by water spray in the event of a tunnel fire. (2) Relationship between the heat release rate of the fire source and the effect of fire cooling by water spray (3) Reproduction of the fire extinguishing phenomenon by numerical simulation (4) Development of a numerical simulation model that reproduces the smoke falling phenomenon by water spray

研究分野：流体工学

キーワード：トンネル火災

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界中の長大トンネルには、火災発生時における火力抑制と避難及び消火活動支援のため、水噴霧設備が設置されてきた。しかしながら、水噴霧設備の有効性について、未だに統一的な見解が定まっていない。そのため、水噴霧設備の作動タイミング、散水量、平均水滴径については、諸外国において規定が異なる。例えば、欧州などでは火災感知と同時に自動散水するが、この場合は火災外力低下を主目的としている。しかし、水噴霧により冷却攪拌されて路面降下した煙に避難者が巻き込まれる危険性を排除できない。一方、例えば日本では火災感知後、目視にて火点の位置と避難完了を確認した後、手動散水することが原則となっている。この場合、トンネル躯体の保護と消防活動の援護が主目的であるが、火災感知から散水開始までに10分以上が経過するため、火災外力は最大値近傍まで発達してしまう。その結果、排煙設備などに過大なものが要求されることになる。しかし、避難者が煙に巻き込まれる危険性は少ない。このような基本的使用方法でさえ違いが生じるのは、水噴霧が火源の燃焼と煙流動へ与える影響について、十分に解明されていないためである。

2. 研究の目的

本研究は、自然換気トンネルで発生した火災に対して、水噴霧が火源の燃焼と煙流動へ与える影響について解明する。水噴霧の散水量、平均水滴径、そしてノズル配置と噴霧方向を制御外力として考慮した煙降下モデルを構築する。最終的には水噴霧による火源燃焼速度と煙流動の能動制御シミュレーションモデルを構築し、水噴霧を制御外力として利用した燃焼速度抑制と煙流動制御を実現することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 水噴霧による煙遮断現象のモデル化

本研究では、1/10 スケールモデルを使用したトンネル火災実験を行うことで、水噴霧による煙遮断現象の観察及びモデル化を行った。図1に実験装置の概要図を示す。トンネル高さ及び幅は0.5 m、トンネル長さは12 mの模型トンネルで、対称壁から6.5 m地点に水噴霧装置を設置した。火源は対称壁から0.4 m地点に設置し、発熱速度は7.92 kWとした。水噴霧装置は、トンネル断面を一樣に水滴群で覆うために、トンネル壁面の左右に設置されたノズルから斜め下向きに散水する。1ノズル当たりの散水条件は圧力0.3 MPa、散水流量0.24 L/minである。

(2) 散水による発熱速度の低減及び消火に関する模型実験

本研究では、トンネル火災時において水噴霧による対流発熱速度の低減効果を調査するため、模型実験を実施した。実験条件は、火源の発熱速度、散水流量、水滴の平均直径のフルードスケールリング則を満たすように設定した。図2に実験装置の模式図を示す。区画の上部は燃焼ガスを収集するためのフードになっており、実験時にはすべての燃焼ガスを収集してガス濃度分析に基づく発熱速度計測を行う。

(3) 散水による火源の消火シミュレーション (FDS)

模型実験によって火源の消火条件が得られたので、これを数値シミュレーションで再現することを試みた。本研究では、数値シミュレーションコードとしては米国NISTで開発されたFire Dynamics Simulator (FDS)を使用した。比較対象は、研究の方法(2)で述べた模型実験から得られた消火時のデータである。FDSにおいて火災の消火条件として使用したのは、プロパンガスの着火温度である。図3に計算モデルと火源近傍の格子生成、計算結果の例を示す。

(4) 全体シミュレーション (FireFOAM)

本研究では水噴霧による能動的煙制御システムの構築のため、散水によって影響を受ける煙流動の特性を調査し、煙遮断性能を定量的に評価することを目的とした。図4に本研究で対象とする煙遮断の模式図を示す。本研究では、数値シミュレーションコードとしてはFireFOAMを使用した。まず初めに自由燃焼条件下での温度上昇分布に対して格子感度解析を実施した。次に、開空間での散水質量流束分布と、自由燃焼条件及び煙遮断条件下での温度分布に関するFireFOAMの予測結果を実験データと比較検証した。検証によって高い予測精度を確認した後、FireFOAMによって予測された流れ場に基づき水噴霧の影響を受ける煙流動の特性を解析し、浮力流の成層の変化を調査した。最後に、質量流量に基づいて水噴霧の煙遮断性能を定量化した。

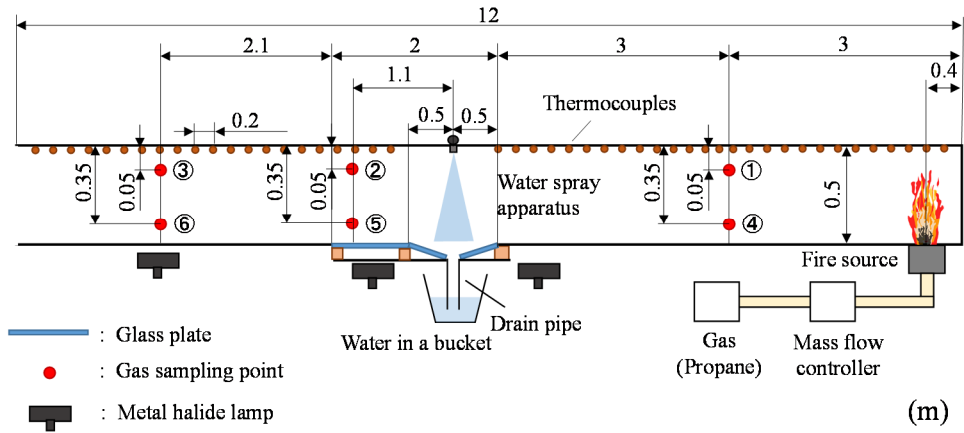


図1 模型トンネル実験装置

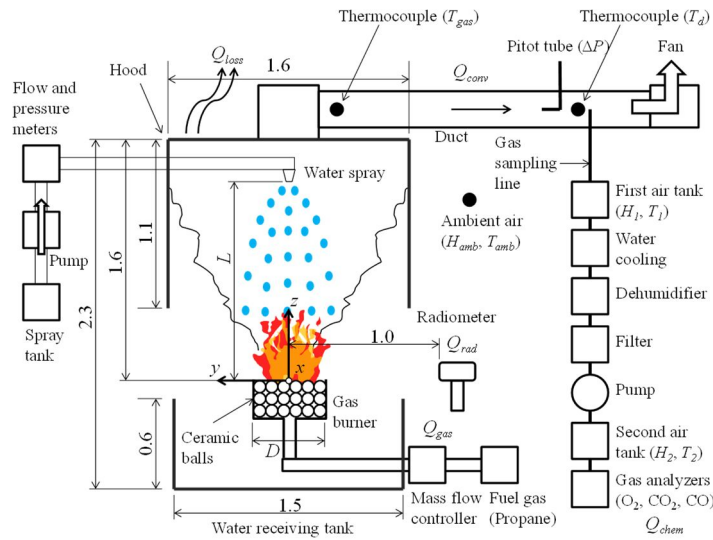


図2 実験装置

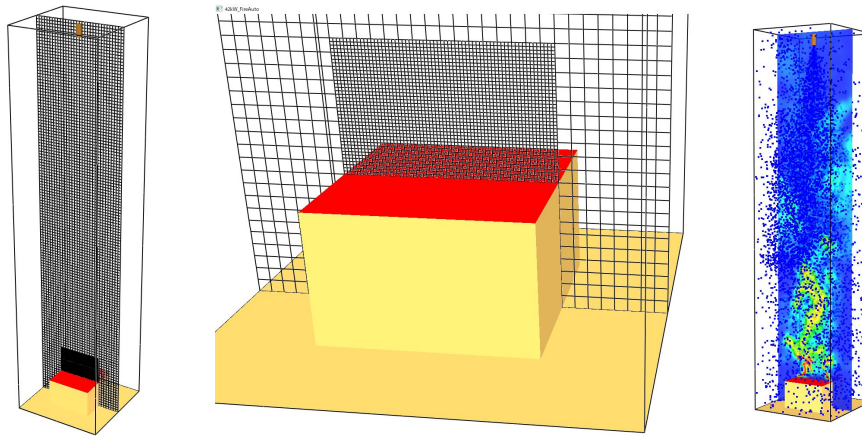


図3 計算モデルと火源近傍の計算格子、計算結果の例

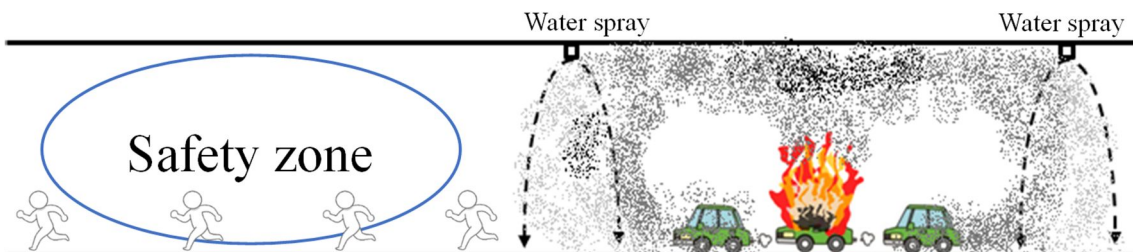


図4 煙遮蔽の模式図

4. 研究成果

(1) 水噴霧による煙遮断現象のモデル化

トンネル火災時における水噴霧の煙遮断性能について、模型実験結果及び実験データを基に構築した煙遮断モデルによって以下のことが分かった。

- ・ 水噴霧にはトンネル火災時に天井下を流れる煙の一部を遮断する能力がある。遮断された煙は、散水によって誘起された気流によって床面に強制降下し、火源に逆流する。
- ・ 水噴霧領域を通過した煙は一時的に拡散するが、15 K 以上の上昇温度を保っているならば、再度天井付近で安定成層を形成するため、煙層下には安全空間を確保できる。
- ・ 構築したモデルによって本実験における水噴霧の煙流動遮断性能を評価できる。
- ・ 構築されたモデルによって水噴霧の散水条件と遮断性能の関係が明らかとなったため、要求される遮断性能を実現するために必要な散水条件を推定できる。

(2) 散水による発熱速度の低減及び消火に関する模型実験

散水を伴う模型実験では液滴直径のスケールに関して矛盾が生じる。フルード数を用いたスケールでは、液滴直径はスケール比の $1/2$ 乗に比例したサイズとする必要がある。一方、散水ノズルを実大スケールに対して幾何学的にスケールダウンした模型スケールの散水ノズルを用意したとき、ウェーバー数を用いたスケールからは、液滴直径はスケール比の $1/3$ 乗に比例したサイズとなる。よって、液滴直径をフルードスケールに一致させるためには、幾何学的にスケールダウンしたノズルを使用することはできない。そこで、不完全なスケール条件下でも水噴霧による対流発熱速度の低減効果をスケールアップするために新しい緩和スケール法を提案した。本研究により以下のことが明らかとなった。

- ・ 不完全なスケール条件下でも対流発熱速度の低減効果をスケールアップできる新しい緩和スケール法を開発した。
- ・ 緩和スケール法の適用により、火源の発熱速度と散水による対流発熱速度の低減効果の関係が得られた。
- ・ 本実験の条件下における散水による消火条件を明らかとした。

(3) 散水による火源の消火シミュレーション (FDS)

プロパンガスを燃料として火源から放出する計算モデルを作成し、プロパンガスの着火温度を燃焼条件として、安定に燃焼現象が継続する格子解像度を決定した。その結果、火災の燃焼を継続するには火源の燃焼面近傍に非常に高い格子解像度が必要であり、試行錯誤の結果、それは 2.5 mm 以下であることが分かった。そこで火源近傍を 2.5 mm とし、それ以外を 10 mm とした計算モデルを構築した。プロパンガスの着火温度を燃焼条件として、自然な火源を再現することができたので、次に散水による消火現象の再現を試みた。まず初めに実験では火災の消火が生じない散水条件である散水流量 0.91 L/min、水滴群の初期速度は 21.9 m/s を用いて数値シミュレーションを実施した。粒子径分布関数や平均水滴径は実験により計測した値を使用した。この条件では、実験では炎が大きく変形したり、火源近傍まで押し込まれたりするが、消火には至らない。数値シミュレーションでも同様な傾向を再現することができた。次に実験では火災の消火に至る散水条件である散水流量 1.13 L/min、初期速度は 27.1 m/s を用いた。この散水条件では、実験ではすぐに炎が抑制されて消火に至る。数値シミュレーションにおいても、火災が火源側に押し込まれて、約 5 秒で消火に至る様子が観察された。以上の結果から、プロパンガスの着火温度を使用した比較的シンプルな消火モデルを使用しても、格子解像度が十分であれば、消火の様子を捉えられることが分かった。ただし、火源近傍において、mm オーダーでの格子解像度が必要になり、トンネル火災全体の数値シミュレーションにおいて、このような消火現象を同時にとらえるのは現状の計算リソースでは無理がある。散水による消火現象を数値シミュレーションで捉える必要がある場合には、火源近傍の燃焼現象や消火現象だけ切り出して取り扱うのが妥当であることが分かった。

(4) 全体シミュレーション (FireFOAM)

FireFOAM を使用してトンネル火災における水噴霧による煙遮断の詳細な LES 解析を実施し、以下の結論が得られた。

- ・ 水平および鉛直方向温度分布と散水質量流束に関する検証において、FireFOAM の予測結果は実験データと比較して良好な一致が見られた。
- ・ 散水は煙流動を完全には遮断できず、漏れる煙が存在することが分かった。散水によって強制降下した煙は実験と同様に火源方向に逆流した。この煙の逆流は抗口側から流入する新鮮空気と混ざり火災区域の下部に汚染空気層を形成した。さらに、散水の冷却効果により煙の抗口への伝播速度が低下することが分かった。自由燃焼時と比較して散水シミュレーションでは 20 秒、散水実験では 21 秒遅延し、両者の良好な一致が確認できた。この煙伝播の遅延は避難成功のために有意なものとなり得る。
- ・ Fr と S_{Y_CO2} を評価することで、それぞれ浮力流の熱成層と化学成層に及ぼす影響を定量的に示すことができた。抗口側において、散水によって破壊された浮力流の成層は界面での混合は増加したが、ノズル設置位置から 0.6 m 以内で再び熱的・化学的に成層化された。この結果は、「(1) 水噴霧による煙遮断現象のモデル化」で得られた 15 K 以上の温度上昇を

保つ煙ならば再度安定成層を形成することの一般化である。また、本研究で使用した Fr と S_Y_{CO2} は、散水領域を通過した後の煙流動の形態を予測できるものであり、煙流動制御時の参照パラメータとして有用である。

- ・ 質量流量に基づいて煙漏れ率を定量的に評価し、FireFOAM の予測は実験データとの比較において良好な一致を示した。

煙漏れ率と散水によって影響を受ける煙流動性状は、散水パターンに大きく依存する可能性がある。そのため、トンネル火災における水噴霧による煙遮断現象は、異なるノズル構成と火災規模でさらに研究し包括的な洞察を得る必要がある。さらに、散水によって生じた火災区域における汚染空気は、火源近傍で酸素欠乏状態を引き起こし自己消火に至る可能性があり、今後研究する価値がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka Futoshi, Mizukami Wataru, Moinuddin Khalid A.M.	4. 巻 112
2. 論文標題 Fire cooling performance by water sprays using medium and small-scale model experiments with scaling relaxation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.firesaf.2020.102965	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Nishino Ryo, Ren Ning, Noda Yuki, Tanaka Futoshi
2. 発表標題 LES of smoke behavior in reduced-scale tunnel fires
3. 学会等名 The 11th FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishino Ryo, Noda Yuki, Tanaka Futoshi
2. 発表標題 Modeling of Smoke Blocking Performance of Water Spray in a Tunnel Fire
3. 学会等名 The 10th FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	モイヌディン カリ (Moinuddin Khalid)	ビクトリア大学・CESARE・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	CESARE, Victoria University		