

令和元年6月14日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03122

研究課題名（和文）トンネル火災時の避難速度に対する煙濃度による影響と評価シミュレータの高精度化

研究課題名（英文）Influence of smoke concentration on evacuation speed in case of fire in tunnel and improvement of accuracy of evaluation simulator

研究代表者

川端 信義（KAWABATA, NOBUYOSHI）

金沢大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：90126631

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：トンネル火災時の煙流動解析シミュレータはほぼ完成されているが、煙に影響された避難者の行動については未解明の点が多い。本研究では、避難者行動シミュレータの基礎データを収集する目的で、煙中の様々な状況における避難速度について被験者実験を行い、避難速度の確率密度分布等を明らかにした。

水噴霧設備は日本の道路トンネルの特徴的な非常用設備であるが、実験との比較による検証は殆どされていない。本研究では、水滴・空気間の運動量・熱・物質交換のモデル化を新たに組み入れ、模型実験結果と比較し、定量的な予測精度が高いシミュレータを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、火災時に煙に暴露された避難者の行動について被験者による実験を行い、様々な状況における避難速度などの基礎的データの収集を行ったことにある。建築火災における避難者行動は狭い出口に避難者が集中し流動係数が極端に低下する現象が支配的であるが、トンネル火災では避難距離が長く避難者が極端に集中することはないが、煙に暴露されて避難速度が低下する可能性が高く、煙濃度による避難速度低下の解明が重要である。

本研究の成果により道路トンネル火災時の対応についてより正確に把握することができ、公共交通の安全性の向上に寄与できることが社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Tunnel fire smoke flow simulators are almost developed, but there are many unexplained points about the behavior of smoke affected refugees. In this study, in order to obtain basic data for the evacuation behavior simulator, we conducted a subject experiment on evacuation speed in various situations in smoke, and clarified probability density distribution etc.

Although water spray equipment is a characteristic emergency equipment for road tunnels in Japan, verification by comparison with experiments has hardly been done. In this study, modeling of momentum, heat, and mass exchange between water droplets and air was newly incorporated, and a simulator with high quantitative prediction accuracy was developed in comparison with model test results.

研究分野：流体工学

キーワード：トンネル火災 避難実験 熱気流 水噴霧 シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

道路は物流および人の移動を支える重要な社会インフラであり、極めて高い安全性が求められる。その道路において最も危険性が高いのはトンネル部であり、火災事故発生時の安全性に対する対策は重要とされている。トンネルは細長く閉鎖された大空間であり、火災対象が車両であり大火源であることから、通常の建築空間とは異なる対応が必要である。とりわけ近年では、都市部での重要道路の地下化が進められており、渋滞発生時の火災事故における効果的な煙のコントロール、および多数の避難者のコントロールが大きな課題として挙げられる。申請者代表者は長年道路トンネル火災時の煙挙動の解析に関する研究に従事しており、その過程で独自に開発した火災煙流動シミュレータは、国内の道路トンネル防災対策において標準的なツールとして用いられている。そのシミュレータの特徴としては、道路管理者等と協力し、実大トンネルおよび模型トンネルを用いた火災実験結果を通して、様々な現象を定量的に再現することを確認していることにある。海外でも CFD シミュレータを用いているが、実験との比較を通して精度の確認を行っている例は少ない。

2000 年前後にヨーロッパで相次いで発生したモンブラントンネルなどのトンネル火災事故を受け、EU ではリスク解析を取り入れたトンネル安全性の評価が始められた。日本でも研究が始められているが、そのネックとなるのが事故事例の無い大規模火災事故の被害予測であり、トンネル火災シミュレータの出力結果から人定な被害を予測する手法の開発が必要とされる。この状況を踏まえ申請者らは、独自開発した三次元 CFD シミュレータの膨大な時系列データから各避難者毎の周囲の煙の状況を危険度で表し、その危険度に基づいて避難者の行動を決定する避難シミュレーション法を提案した。さらに煙に暴露された避難者数を基に対象とするトンネルに対する被害を見積もる評価方法を提案した。しかしながら、この避難シミュレーションによる定量的な見積もりを可能にするためには、様々な状況での煙中の避難者の行動に関する未解明の問題を明らかにする必要がある。

日本の道路トンネル防災設備の特徴に水噴霧設備があるが、実験と対比した CFD シミュレーションは申請者代表者による実大実験による例がある程度で、シミュレータの精度検証は殆ど進んでいないため、トンネル火災事故の予測精度向上のためには実験室レベルの詳細な実験が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、申請者らが開発したトンネル火災煙流動解析および避難者行動シミュレータの高精度化・高機能化を目的として行った。具体的には、(1) 実大トンネルでの煙中の避難実験により、通常時の歩行速度や緊急避難を想定した避難速度および避難速度確率分布曲線に関する煙濃度の影響について明らかにし、避難者の複雑な行動を再現できるモデルを構築する、(2) 火災時の水噴霧の CFD シミュレータを新たに開発し、実験室でのモデル実験との比較によってモデル定数の確認を行い、高精度化を図ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 実大トンネル空間における煙中の避難速度 共用終了した道路トンネル内で、図 1 のような閉鎖シートを設置し、煙を充満させ、年齢・性別のバランスを考慮した被験者を用いて避難速度を計測する。車両を模擬した障害物(図 2)の存在による影響、アイマスクをした暗中歩行速度の計測を行い、避難速度に対する確率密度分布としてまとめる。



図 1 トンネル内閉鎖シート

(2) バスからの避難速度 当初、避難者が避難必要性を認識するタイミングの実験を行う予定であったが、実際の状況に対応した実験が困難であると判断し、バスからの避難実験に切り替えた。実際のバスに平均的な乗車率である定員の 60%程度になるように被験者が乗車し、合図と同時に一斉にバスの出口から降車し、出口における流動係数の計測を行った。バスの非常口の構造の違いに注目し、日本と台湾で実験を行った。



図 2 計測区間と障害物

(3) 水噴霧シミュレータの開発およびモデル実験 前述の Fireles をベースに、液滴と空気相間で運動量・熱・物質交換を考慮したシミュレータを開発する。1 辺 2 m の閉空間内で燃焼により温度層を形成させ、燃焼終了後に水噴霧し、その後の温度変化を計測し、開発したシミュレーションとの比較を行った。

(4) 縦流換気と集中排煙方式の火災時の避難環境 本研究の成果の一部を取り入れて改良した避難シミュレータの適用例として行った。日本の道路トンネルで主流となっている縦流換気方式トンネルと EU でよく用いられている集中排煙方式との比較を行い、それぞれの換気方式の問題点について考察する。実験例が少ない集中排煙の場合のシミュレータの確認のため、大型模型トンネルを用いた火災実験を行い、集中排煙時の煙濃度分布についてシミュレーションとの比較を行う。その後、シミュレーションを行って、二つの換気方式の場合の火災流動シミュレ

ーションおよび避難シミュレーションにより、煙に暴露される避難者の数を求め、評価を行った。

(5) 滞留車両がある場合の熱気流遡上特性 水噴霧を取り入れたシミュレーションの適用例として行った。まず、水噴霧しない場合について滞留車両が熱気流流動に与える影響についてシミュレーションの再現性について検証するため、幅 2m、高さ H=1m (スケール比 1/5) の大型模型トンネルを用いた実験を行い、熱気流の遡上特性に対する本シミュレータの再現性について検証を行った。実験装置は水噴霧に対応していないため、水噴霧する場合はシミュレーションのみで熱気流遡上特性に対する影響について明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 実大トンネル空間における煙中の避難速度 59 歳以下の男性の平常時の歩行速度の確率密度分布を図 3 に示す。煙濃度の濃さによって、領域 ~ に分けて示す。平均値となるピーク値は煙濃度が上昇すると低下するが、と の違いは少ないが、分布範囲はの方が狭くなることが分かった。また、女性の場合は各煙濃度において、男性の歩行速度より約 0.1m/s 前後低くなる。この他、緊急時の避難速度、障害物の影響、暗中歩行速度等について同様な正規分布曲線を決定した。

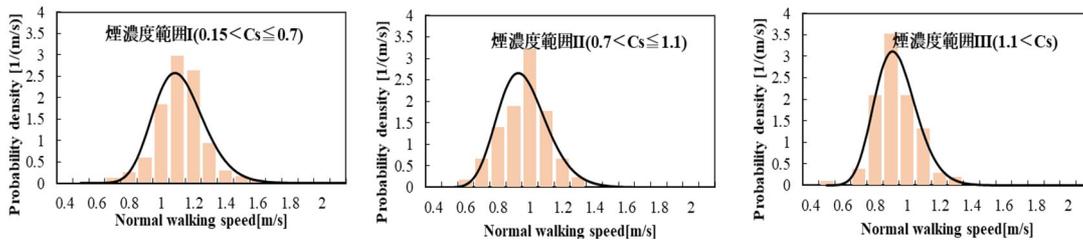


図 3 歩行速度の確率密度分布

(2) バスからの避難速度 当初、避難者が避難必要性を認識するタイミングの実験を行う予定であったが、実際の状況に対応した実験が困難であると判断し、バスからの避難実験に切り替えた。実際のバスに平均的な乗車率である定員の 60% 程度になるように被験者が乗車し、合図と同時に一斉にバスの出口から降車し、出口における流動係数の計測を行った。バスの非常口の構造の違いに注目し、日本と台湾で実験を行った。図 4 は、出口での流動係数を示した結果で、避難実験 (黄) 観光バスからの降車時の観察結果 (青) 実際に発生したトンネル火災時の分析による流動係数 (赤) である。実際の事故時は、初期においては 0.3pps 程度で、通常の降車の中でも低い方であったが、後半火災が大きくなったら 0.58pps 程度となり、避難実験のように急いで降車する状況がみられた。0.19pps は平均値で、初期に比較的落ち着いて避難する乗客と後半に慌てて避難する乗客との間に 40 秒程度の間隔があったため低い値となった。



図 4 バス出口での流動係数

(3) 水噴霧シミュレータの開発およびモデル実験 実験装置内部の 2 隅に壁から 10cm 離し垂直熱電対ツリーを設置し、これらの平均値を区画内平均温度とした。図 5 に平均温度の時間変化 (Exp.) を示す。火皿でのエタノール 100g を燃焼させ、燃焼終了 (318s) の 30 秒後に天井中央のスプレーノズルから約 0.5L/min の流量で水噴霧を行った。燃焼時の装置内平均温度は最大約 84 に達したが、壁からの熱損失のため、火勢の衰えたあたりから温度の低下が始まっており、噴霧開始時の平均温度は約 60 であった。噴霧開始から約 50 秒程度の間にはさらに急な温度減少が計測されておりその傾向は実験・シミュレーションとも一致した。ただし、十分時間が経過した後の平均温度は実験値のほうが約 2 低い。図 6 は

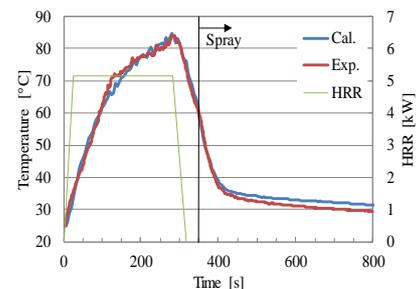


図 5 区画内平均温度の時間変化 (水噴霧による温度低下)

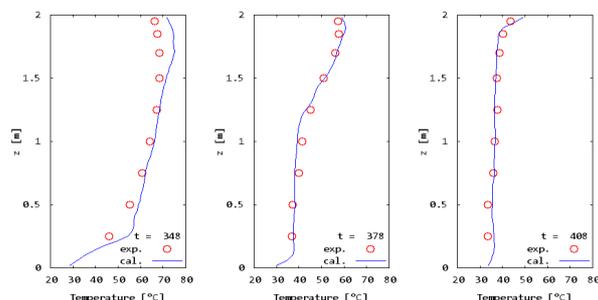


図 6 区画内鉛直方向温度分布

噴霧開始時,開始 30 秒後および 60 秒後の鉛直方向温度分布を示している。これらの結果は実験と計算との間で良好な一致を示した。

(4) 縦流換気と集中排煙方式の火災時の避難環境 図 7 は集中排煙方式の場合の縦方法煙濃度分布の模型実験とシミュレーションの比較である。位置は火源と排煙口の 17m 区間内の、実線は火源から 3m、点線は排煙口から 4m で、実験とシミュレーションはよく一致することを確認した。縦流換気方式に関しては、これまでに様々な実験との比較を行い、定量的に高精度のシミュレーションが可能であることを示してきたので、本研究での検討は行わなかった。避難シミュレーションを実施し、煙に暴露される避難者数 NPRH 値の発火からの経過時間による変化を図 8 に示す。集中排煙方式は勾配 2%以上では殆ど違いがなく、2 分から 3 分の間(排煙ファンの起動時間)に排煙による気流の乱れにより拡散された煙に暴露される避難者が急増し、その後は排煙により天井に沿った煙の拡がりや抑制されるため、新たな暴露者は発生しない。一方、縦流換気方式は勾配 2%以上では火源が大きくなるに連れて NPRH 値も大きくなり、勾配が大きいくほど NPRH 値は早く増加し始める。0% の場合は、縦流も集中排煙も NPRH 値はほぼ 0 である。以上より、火災初期に関しては縦流方式の方がより安全で、特に勾配 2%以下であれば集中排煙方式よりも安全であると言える。4%以上では、集中排煙よりも若干安全であるが、その差は少ない。2%の場合、5 分経過時から NPRH 値は増加し始め、7 分経過時に集中排煙方式を上回る。これらから、日本で主流である縦流換気方式は早期の避難開始を前提とすることが分かった。

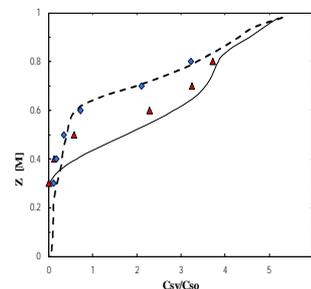


図 7 火源-排煙口間の煙濃度分布 (実験とシミュレーションの比較)

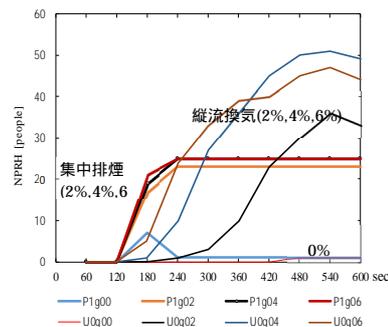


図 8 煙に暴露される避難者数の時間推移 (縦流換気と集中排煙の比較)

(5) 熱気流遡上特性に対する滞留車両による影響 本項目は、急遽最終年度に含めたものであり、目的である水噴霧シミュレーションの実施までは到達できなかったが、水噴霧無しの場合の模型実験とシミュレーションの比較はできた。図 9 は、無次元発熱速度  $Q$ 、フルード数  $Fr$ 、トンネル高さ  $H$ 、遡上距離  $L_b$  とし、横軸に  $Q^{1/3}/Fr$ 、縦軸に  $L_b/H$  を取り、車両高さを  $0.7H$  (赤)  $0.5H$  (青)、車両無 (緑) について実験結果とシミュレーション結果を示したものである。実験とシミュレーションはよく一致することが確認でき、また車両高さによる影響が大きいことが分かった。

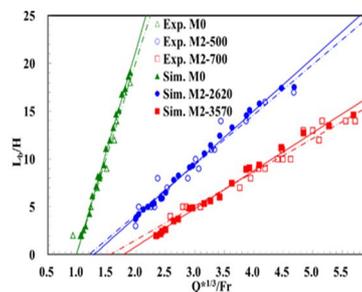


図 9 煙の遡上特性の滞留車両による影響 (実験とシミュレーションの比較)

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 2 件)

Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Evacuation speed in full-scale darkened tunnel filled with smoke, Fire Safety Journal Special Issue, Vol.91, 901-907, 査読無, 2017

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.034>

Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Quantitative assessment method for road tunnel fire safety -Development of an evacuation simulation method using CFD-derived smoke behavior-, Safety Science, 査読有, Vol.94, 2017, 116-127

<http://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.01.005>

### [学会発表](計 7 件)

Nobuyoshi Kawabata, Miho Seike, Quantitative assessment for road tunnel fire safety (behavior of smoke and evacuees), The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 招待講演, 査読無, 2018

Masato Hasegawa, Nobuyoshi Kawabata, Miho Seike, Hao-Yu Dai, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Small Scale Test of Numerical Simulation for Spray Cooling, The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 査読無, 2018

Ti-Sheng Huang, Nobuyoshi Kawabata, Miho Seike, Masato Hasegawa, Futoshi Tanaka, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Model-Scale Fire Experiments and Simulations of a Tunnel with Point-Extraction Ventilation, The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 査読有, 2018

Hung-Chieh Chung, Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Time gaps for passing through bus exits in tunnel fires by an experimental evacuation and ordinary use, The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 査読有, 2018

Yu-Tsung Ho, Nobuyoshi Kawabata, Miho Seike, Masato Hasegawa, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Influence of Stationary Vehicles upon Thermal-fume-backlayering Length in Tunnel Fires, The 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 査読有, 2018

Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Noritada Yamashita, Yung-Chi Lu, Experimental investigation of walking speed in a full-scale darkened tunnel, 9th International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety -, 査読有, 2018

Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Yung-Chi Lu, Evacuation speed distribution in smoke filled full-scale tunnel experiments, 8th International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety -, 査読有, 270-275, 2016

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：長谷川 雅人

ローマ字氏名：( HASEGAWA, masato )

所属研究機関名：金沢大学

部局名：理工研究域機械工学系

職名：助教

研究者番号 ( 8 桁 ): 40324107

研究分担者氏名：清家 美帆

ローマ字氏名：( SEIKE, miho )

所属研究機関名：富山県立大学

部局名：工学部機械システム工学科

職名：助教

研究者番号 ( 8 桁 ): 70757244