

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05008

研究課題名(和文)トンネル火災の早期検知と風速0化の有効性向上に関する研究

研究課題名(英文) Research on early detection of tunnel fires and improving effectiveness of zero flow control

研究代表者

川端 信義 (Kawabata, Nobuyoshi)

公立小松大学・生産システム科学部・教授

研究者番号：90126631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、(1)実トンネルでの燻焼煙の検知実験、(2)煙降下特性の解明、(3)風速0化の効果的な運用法に関する検討の3項目がある。(1)では燻り段階での火災早期検知について、各種のセンサの評価を行った。(2)では模型実験により降下位置および降下時間について明らかにし、シミュレーションの再現性の確認を行った。(3)では同一のトンネルに対して欧米方式と日本方式の評価方法の比較を行った。さらに100MW大火災の場合の日本方式について風速0化は大規模火災でも有効であることを明らかにした。さらに過年度に行った煙中の避難速度の被験者実験を整理し、避難シミュレーションのための歩行速度モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の道路トンネルは縦流換気方式が主流であり、火災安全性の向上には煙の降下特性の解明が重要である。しかしながら、降下特性に関する研究論文は極めて少なく、特性の解明がなされたとは言えない。本研究はこの降下特性について、実験、シミュレーションの両面から検討を行い、勾配0%、風速0m/sの場合について明らかにしたことは学術的意義を有していると言える。次に降下開始時間を遅らし、成層状態を長く維持することを目的とした煙の拡がりを検知するセンサ、さらに煙中の避難速度モデルを構築し、避難シミュレーションを通して適切な換気運用方法を提案したことはトンネル火災安全性の向上に寄与し、社会的意義を有すると言える。

研究成果の概要(英文)：This research has three components: (1) experiments to detect smoking smoke in an actual tunnel, (2) elucidation of smoke descent characteristics, and (3) examination of effective methods of zero wind speed operation. In (1), various sensors were evaluated for early detection of fire at the smoldering stage. In (2), model experiments were conducted to clarify the descent position and descent time, and the reproducibility of simulations was confirmed. In (3), a comparison was made between the Western and Japanese evaluation methods for the same tunnel. Furthermore, in the case of a 100 MW large fire, it was clarified that the Japanese method of zero wind speed is also effective in large-scale fires. Furthermore, the results of a subject experiment on evacuation speed in smoke conducted in previous years were collated, and a walking speed model for evacuation simulations was constructed.

研究分野：安全工学

キーワード：トンネル火災 安全性評価 風速0化 縦流換気 煙降下

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

道路トンネルの換気方式は、日本は縦流換気、欧州は集中排煙とそれぞれ主流となる方式に違いがある。火災時の安全評価でも、日本は安全な避難環境を維持する、欧州は重傷者・死亡者を無くす、と大きな違いがある。これらの違いにより火災時の煙制御方法も異なっている。日本では縦流風速を低下させ（渋滞が無い場合は2m/s程度、重渋滞時に対しては0m/s）、煙を攪拌することなく成層状態をできるだけ維持することによって煙層の下部に避難可能な空間を確保するような対策を採用している。一方欧州では煙が火災地点から上流側に流れる遡上現象を阻止するように3m/s程度の縦流風速で、渋滞時は1m/s程度で運用している。これらの違いにより、トンネル火災時の煙制御の研究の方向が異なると考えられ、欧州は遡上阻止風速に関する研究を数多く行っている。一方で成層状態になった煙はいずれ拡散し路面まで煙で覆われることから、日本に必要な研究は成層状態の煙の降下特性（どの位置でどの時間煙が降下し始めるのか）であるが、その研究例は極めて少ない。最近の研究では海外で煙降下に関する研究が始まっている。

2. 研究の目的

本研究は日本のトンネル火災安全の向上を目指して低風速化における成層煙の降下・拡散現象の特性および効果的な制御方法について検討するために開始した。トンネル内火災時に縦流風速を低下させ煙の成層化を維持して路面での避難環境を実現させるために把握する必要がある特性は、煙の降下特性（降下位置と降下時間）である。これらを明らかにし、より安全な避難環境の実現を可能にする換気運用について検討することを大きな目的としている。本研究課題は大きく3つの項目に分けられる。以下それぞれの項目ごとに記載する。

(1) 実トンネルでの燻焼煙の検知実験

火災の初期対応のためには早期検知が重要である。そこで、火災初期、特に発火前の燻焼煙の状態の検知を可能にし、早期検知を可能にすることを目的とする。

(2) 模型トンネルによる煙降下特性

本項目はコロナ禍のため、(1)で示した実大トンネルを用いた実験が不可能となったためその代替として行ったもので、0.3m角の正方形断面の火災実験用模型トンネル実験装置を製作し、温度分布の計測や煙挙動の観測を行うことにより、煙の降下特性（降下開始時間、降下開始位置、など）について明らかにすることを目的とする。

(3) 風速0化の効果的な運用法に関する検討

日本のトンネル火災時の換気運用の特徴である、縦流風速の低速化（特に風速0化）の避難環境をできるだけ長く維持し得る適切な運用方法について明らかにすることを目的とする。また、避難シミュレーションを用いて適切な運用法の評価を行うが、避難モデルの基本的な諸元である煙中の避難速度モデルを構成することも目的としている。

3. 研究の方法

(1) 実トンネルでの燻焼煙の検知実験

本研究の初年度にあたる令和2年度はコロナ禍のため実験を実施できなかったため、過年度に予備実験として実トンネルで行った早期検知に関する実験成果をまとめた。煙検知のセンサとして、検出方法の異なる煙センサ、レーザガスセンサ、フォトダイオードセンサを選定し、実大トンネルで発煙筒および火皿火災実験により、各センサの検知特性について調査した。

(2) 模型トンネルによる煙降下特性

縦流風速0m/s、勾配0%の場合について、発熱速度を3種類に変えて煙降下特性について調べた。降下特性の計測はレーザー光をトンネル高さ3か所にトンネル幅方向に水平に照射し、各高さにおいてレーザー光が煙に反射する時間を記録する。この高さ方向3点の計測を火源からの距離が0.6mピッチで16か所設定し、煙降下特性の計測を行った。

(3) 風速0化の効果的な運用法に関する検討

2020年度は同一のトンネルに対し火災時の排煙方式として縦流換気と集中排煙のそれぞれを採用した場合に対して、日本の考え方の評価方法（安全な避難環境を実現する）と欧州の考え方による評価方法（重傷者および死者を無くす）結果について比較検討した。

2021年度は縦流風速を0m/s～3m/sの範囲で変化させたCFDシミュレーションおよび避難シミュレーションを行い、人的被害に対する影響について検討を行った。また、想定する火源規模は欧州は10MW～100MW以上と幅広い火災規模であるが、日本は30MWのみである。そこで、発熱規

模を 10MW~100MW に変化した場合の風速 0 化の効果についてシミュレーションを行った。

2022 年度は避難シミュレーションの基本データである煙中の避難速度に対する障害物（滞留車両）の影響について過年度に行った被験者実験結果を用いて検討を行った。

4. 研究成果

(1) 実トンネルでの燻焼煙の検知実験

実大実験での結果、各センサともに発火前のくすぶり段階での火災早期検知の可能性を有することが分かった。特にフォトダイオードセンサは煙がセンサ設置個所に到達する前でも俯瞰している範囲に煙が進入することで、煙の色にかかわらず、早期火災検知の可能性が示唆された。

(2) 模型トンネルによる煙降下特性

降下位置は火源から $x/H=20\sim40$ (H はトンネル高さ, x は火源からの距離) で、火源規模が大きくなるほど x/H が増加する傾向であることが分かった。また、風速をステップ状に変化させた場合の煙先端位置の変化について計測し、先端位置の動特性について計測を行った。これらの結果は水平トンネルの場合について平成 6 年に発表予定である。

(3) 風速 0 化の効果的な運用法に関する検討

2020 年度の結果は、縦流換気は「勾配が小さい場合は安全な避難環境の維持は可能であるが、勾配の増加さらに避難が遅れると負傷に至る可能性がある」、集中排煙は「0%以外は多くの避難者が煙に暴露されるが、負傷者になるほどではない」という結果となった。このような日本と欧州の具体的な比較を行った例はなく、現状の評価方法の検討に有益な資料となると考えられる。

2021 年度での 100MW に達する大規模火災の場合の検討では、勾配 0% では 60MW 以上で避難時に煙に暴露される避難者が表れるものの、100MW でも負傷者はほぼ発生せず、風速 0 化は大規模火災でも有効であることが分かった。一方、勾配 2% の場合は、30MW 程度ならば負傷者の発生はほぼないが、50MW 以上では避難口から 100m 以上離れた地点で行動不能の避難者が表れることが分かった。

過年度に行った煙中の避難速度の被験者実験を整理し、滞留車両を模擬した障害物の存在によって避難速度は低下するものの、障害物の個数による影響はあまりないことを明らかにした。また、多くの避難者が集まり互いに干渉しあう場合の避難速度の低下のモデル化を行い、さらに東南アジアなどにみられる多くのバイクが滞留している場合の避難速度を計測し、バイク密度と避難速度の関係式を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Cheng Cheng-Chung, Chung Hung-Chieh, Kawabata Nobuyoshi, Seike Miho, Hasegawa Masato, Chien Shen-Wen, Shen Tzu-Sheng	4. 巻 12
2. 論文標題 Walking Speed in a Motorbike Lane Considering the Density of Evacuees and Motorbikes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 12580 ~ 12604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app122412580	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
1. 著者名 Ho Yu-Tsung, Kawabata Nobuyoshi, Seike Miho, Hasegawa Masato, Chien Shen-Wen, Shen Tzu-Sheng	4. 巻 12
2. 論文標題 Scale Model Experiments and Simulations to Investigate the Effect of Vehicular Blockage on Backlayering Length in Tunnel Fire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Buildings	6. 最初と最後の頁 1006 ~ 1029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/buildings12071006	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
1. 著者名 Seike Miho, Kawabata Nobuyoshi, Hasegawa Masato	4. 巻 133
2. 論文標題 Walking speed under emergency situation in smoke-filled tunnel with obstacles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tunnelling and Underground Space Technology	6. 最初と最後の頁 104939 ~ 104962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tust.2022.104939	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 -
1. 著者名 Tung Po-Wei, Chung Hung-Chieh, Kawabata Nobuyoshi, Seike Miho, Hasegawa Masato, Chien Shen-Wen, Shen Tzu-Sheng	4. 巻 13
2. 論文標題 Numerical Study of Smoke Distribution in Inclined Tunnel Fire Ventilation Modes Considering Traffic Conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Buildings	6. 最初と最後の頁 714 ~ 749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/buildings13030714	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

1. 著者名 Li-Yu Chen、Seike Miho、Kawabata Nobuyoshi、Hasegawa Masato、Chien Shen-Wen、Shen Tzu-Sheng	4. 巻 45
2. 論文標題 Walking speed probability distribution in smoke-filled tunnel experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Chinese Institute of Engineers	6. 最初と最後の頁 661 ~ 668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02533839.2022.2126402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 KAWABATA Nobuyoshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Effect of zero-flow control in large-scale tunnel fire	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan	6. 最初と最後の頁 S054 ~ 04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2021.S054-04	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KAWABATA Nobuyoshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Reynolds dependence on smoke backlayering characteristicR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan	6. 最初と最後の頁 S054-09
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SUZUKI Naoya、KAWABATA Nobuyoshi、YOKOTA Masahiro	4. 巻 77
2. 論文標題 EXPERIMENTAL STUDY ON EARLY DETECTION OF TUNNEL FIRE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F2 (Underground Space Research)	6. 最初と最後の頁 11 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejusr.77.1_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HUANG Ti-Sheng, KAWABATA Nobuyoshi, SEIKE Miho, HASEGAWA Masato, TANAKA Futoshi, CHIEN Shen Wen, SHEN Tzu Sheng	4. 巻 77
2. 論文標題 COMPARISON BETWEEN LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEM AND POINT EXTRACTION SYSTEM IN ROAD TUNNEL FIRE SAFETY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F2 (Underground Space Research)	6. 最初と最後の頁 41 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejusr.77.1_41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 黄 弟勝, 川端 信義, 清家 美帆, 長谷川 雅人, 田中 太, 簡 賢文, 沈 子勝	4. 巻 77
2. 論文標題 道路トンネル縦流換気方式と集中排煙方式の火災安全性評価の比較	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集F2 (地下空間研究)	6. 最初と最後の頁 41 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejusr.77.1_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 鈴木 直也, 川端 信義, 横田 昌弘	4. 巻 77
2. 論文標題 トンネル火災の早期検知についての実験的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集F2 (地下空間研究)	6. 最初と最後の頁 11 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejusr.77.1_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鍾宏杰, 清家美帆, 川端信義, 長谷川雅人, 簡賢文, 沈子勝	4. 巻 120
2. 論文標題 Time gap distribution of bus alighing in tunnel fires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 103152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.firesaf.2020.103152	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

1. 著者名 Huei-Ru Hsieh, Hung-Chieh Chung, Nobuyoshi Kawabata, Miho Seike, Masato Hasegawa, Shen-Wen Chien and Tzu-Sheng Shen	4. 巻 6
2. 論文標題 Assessment Method Integrating Visibility and Toxic Gas for Road Tunnel Fires Using 2D Maps for Identifying Risks in the Smoke Environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fire	6. 最初と最後の頁 1~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fire6040173	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5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 川端信義
2. 発表標題 縮小模型トンネルに対するLES火災シミュレーション
3. 学会等名 2022年度 機械学会年次大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川端信義
2. 発表標題 トンネル火災煙遡上距離に影響を及ぼすシミュレーション諸元に関する議論
3. 学会等名 2022年度 機械学会年次大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木智哉、小橋卓実、川端信義、長谷川雅人、江本 信司
2. 発表標題 水噴霧放水による発熱速度の影響実験(第二報)
3. 学会等名 2022年度 機械学会年次大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鍾 宏杰、鄭 崇鄭、川端信義
2. 発表標題 避難時の歩行速度に対する避難者密度の影響
3. 学会等名 2022年度 機械学会年次大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 KAWABATA Nobuyoshi
2. 発表標題 On the fire smoke forward exhaust of longitudinal ventilation tunnel
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会一般講演
4. 発表年 2020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

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