

## [研究助成 (A)]

## 実大実験によるトンネル火災時の避難中のストレス評価

## Evacuation stress assessment in tunnel fires using full-scale experiments

2191017



研究代表者

広島大学大学院  
先進理工系科学研究科  
理工学融合プログラム

助教 清家美帆

## [研究の目的]

日本は世界有数の経済大国であり、その経済を支えるために日本列島を縦横に結ぶ道路交通網が整備されてきた。一方で、日本は国土の70%以上が山地ということもあり、多くのトンネルが建設された。また、近年は環境に配慮しながら経済を活性化させるために、地下幹線道路が進み、トンネルが増加している。日本は一国でEU15カ国と同等数のトンネルを所有している。トンネル空間は細長い閉鎖された大空間であり、内部で火災が発生した際、ガソリンが燃えるため、発熱規模が大きく、黒い有毒な煙が避難行動に影響を与え、救助・消火活動は非常に困難となり、小さな事故が大きな被害に発展する危険性が高い。トンネル内での火災事故は、経済を支える重要なインフラを止めることになるため、日本経済にも大きな影響を与える。都市部においては環境・渋滞対策のため道路の地下化が進んでいるため、火災事故が発生した場合のリスクが大きくなり、多くの避難者がいる場合の身体的かつ心理的な影響を考慮した対策が必要となる。

現在の日本の基準では原則換気設備が設置されるのは延長1500m以上であり、EU(延長500m)に比べるとかなり緩い安全対策といわざるを得ないが、数多くのトンネルを有することから対策に費用を掛けられない事情もある。以上、日本の現状をまとめると

- ・多くのトンネルを所有する日本は、すべてのトンネルに対して、世界基準を適用することは財政的に不可能であり、トンネル防災においては先進国として日本の状況は厳しく、諸外国に比べてより高度でかつ合理的な安全対策が必要とされる。
- ・都市部の道路トンネルでは慢性的な渋滞が発生している箇所も多く、多くの避難者を迅速かつ的確に避難させることが求められる。また、そのような場合には火災によって発生する煙のコントロールも難しく、煙に巻かれる避難者が多く発生する危険性が高い。しかしながら実際のトンネル火災時の状況、避難行動、そして心理については、トンネル管理者でも殆ど把握していない。

現状のトンネル防災検討では煙挙動シミュレータによる煙分布から最も遅く避難するケースについての安全性を基に判断されている。EUでは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、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からの膨大な出力結果からの人的被害の予測手法の開発が必要とされる。

しかしながら、本避難シミュレーションで高信頼性を有するトンネル火災安全性の定量化を可能とするには、煙中の避難者の歩行速度や避

難者が避難時に感じる心理的なストレスなど未解明な点が残されている。避難者は、ストレス反応急性期（火災事故現場に遭遇して数分から発症）にあたり、心拍数、血圧の増大、呼吸促拍、集中困難、やる気の減退に陥る。心拍数の増大や呼吸促拍からの過呼吸気味になると、避難者が避難をしたとしても、避難できなくなるのが容易に推測され、不安を伴うストレスは、避難行動、更に避難限界と密接に関係していると考えられる。したがって、心理的な不安は、避難限界の決定に必要なデータとなる。

### [研究の内容, 成果]

被験者のストレスと避難速度の相関を明らかにすることを目標として、実大トンネルを用いて被験者にはアイマスクをしてもらい、真っ暗な中での速度を計測し、かつ実験前後で被験者の血圧計測した。被験者は20歳から67歳まで、男性9名、女性22名である。

#### ・実験日時・場所

実大トンネルは、福井県所有で平成26年8月に供用終了になった旧戸ノ口トンネル（長さ488m、幅8m、高さ6m、馬蹄形断面）を用いた。

実験日時：2020年3月

実験場所：福井県鯖江市 旧戸ノ口トンネル  
本実験で用いた実大トンネルは全長488mであるが、去年はその内の200mを閉鎖壁（図1）にて閉鎖し、その区間にて実験を行う。なお、計測区間は150mとする。

#### ・実験ルート

計測区間を図2に示すが、セクションを50m毎に分類し、その区間をアイマスクをした被験者に歩行してもらった。被験者の後ろに係員を配置し、5秒間隔で被験者が通った地点にカードを置いてもらうことで軌跡の計測（図3）を行った。軌跡と同時に5秒間で移動した距離から、速度算出を行った。

#### ・血圧・心拍数測定



図1 戸ノ口トンネルと閉鎖壁

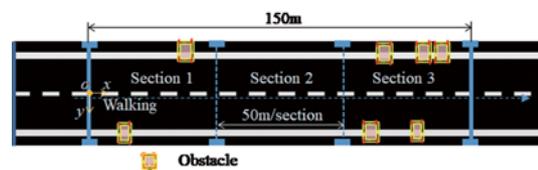


図2 計測区間と血圧測定箇所



図3 実験中被験者の挙動

血圧は、OMRON HEM-6324T（図4）にて実験直前・直後に手首に巻いて座った状態で計測し、血圧計測時間とともに記録した。

#### ・実験結果

図5は150m歩いた際の平均歩行速度であ



図4 血圧計測機器

る。実験前後で示しているが、6割が帰りの歩行速度のほうが速くなった。これは慣れによる影響であることや、壁に触れて歩けばよい等の他被験者からの情報からであると考えられる。なお、行きの最大速度が0.84 m/s、最小速度が0.32 m/sに対して、帰りの最大速度が0.86 m/s、最小速度が0.36 m/sと大きな差はみられない。一方で、全体の平均値は行きで0.57 m/s、帰りで0.62 m/sとなり、被験者全般が平均的に歩行が速くなったことが分かった。

図6に横軸に実験前の心拍数、縦軸実験後の心拍数を取り、実験前後での上昇を最小二乗法で回帰直線を求めた。図7は最高血圧、図8は最低血圧である。どちらも7割程度が上昇して

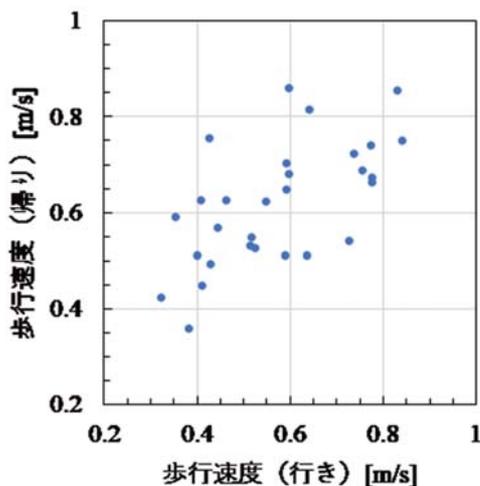


図5 150 m 区間の平均速度 (行きと帰り)

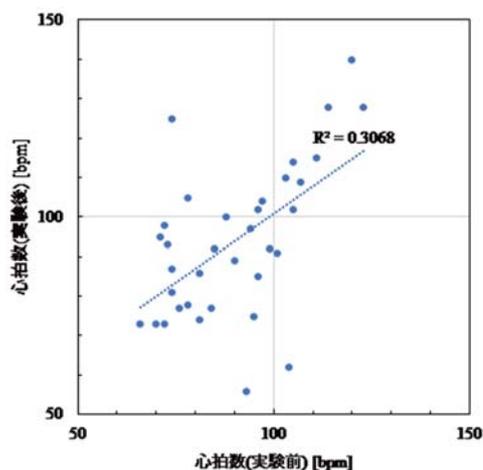


図6 各被験者の実験前後の心拍数

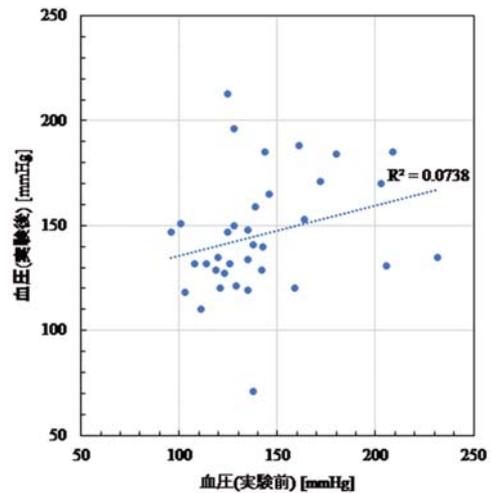


図7 各被験者の実験前後での最高血圧

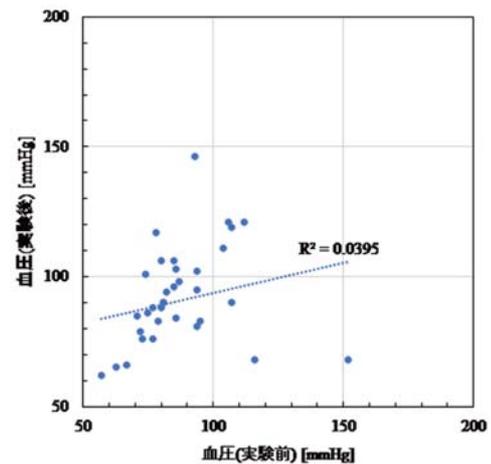


図8 各被験者の実験前後での最低血圧

いることから、緊張していたと考えられる。

#### [今後の研究の方向、課題]

危険因子(火災の場合は煙濃度)とストレスの相関が明らかになれば、AIに危険因子とストレスの相関を学習させることで、スマートウォッチ(心拍数や呼吸数の計測)とスマートフォンを連携させ、避難者へのストレス緩和を促すようなアナウンスの実施や、IoTを用いてスマートウォッチと非常用設備の連携から、冷静な避難行動を促す誘導(例えば誘導灯の色を変化させる、点滅速度の変化で冷静かつ迅速な心理バランスの制御)の実現が可能となる。本

研究が実現可能となれば、火災時の安全設計だけでなく、全災害における新しく、画期的な防災対策の第一歩となる。大多数が利用する道路トンネルや大規模地下施設増加から、利用者への避難教育に際して、管理者側や設計側から疑問が呈されている状況で打開策を検討する段階にきた。そこで昨今発展が著しいAIやIoTを、避難誘導に際して利用できないかと考えたのが、本研究の着想に至った経緯である。避難誘導に関する研究は、誘導灯設置のみに留まっており、リアルタイムでの避難誘導まで至っていない。リアルタイムの避難誘導が可能となれば、防災全般の避難の考え方が変わり、先日発生した台風19号や今後起こるとされる南海トラフ地震、首都直下型地震等大規模災害にも活用できる。本研究の最終目標は、煙濃度とストレスの相関を反映した避難安全性評価とリアルタイム誘導等新しい非常用設備の提案である。本申請では、まず基本データとなる煙中のストレスレベルの解明を行う。現在、建築・道路トンネルともに、通常歩行速度(1~1.3 m/s)を用いていることが多いが、冷静な状態で、煙中をその速度で移動できるかは不明である。そこで、これまでのトンネルの知見を活用し、煙濃度とストレスレベルの関係を明らかにする。そして、その関係を用いて、煙中の避難挙動に際して煙濃度と歩行速度の減衰の関係を煙濃度とストレスとの相関から考察し、煙濃度、ストレス、そして歩行速

度の相関を明らかにする。更に、ストレスを緩和する非常用設備の調査を工学と医学の視点から行う。最終的に、ストレスレベルを考慮したリアルタイム避難誘導を提案する。

[成果の発表, 論文等]

1. **Miho Seike**, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Evacuation locus in a full-scale tunnel experiments, 10th International Conference Tunnel Safety and Ventilation — New Developments in Tunnel Safety —, 2020 (Accepted, 講演予定).
2. 清家美帆, 辻知陽, 川端信義, 長谷川雅人, 東田陽博, 由比光子, アイマスク着用による暗中避難時の実大トンネルを用いた避難時のストレス評価に関する実験的研究日本機械学会 2020 年度年次大会, 2020 (講演予定).
3. Yung-Chi Lu, **Miho Seike**, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Experimental investigation of age bracket influence to completely darkened walking speed distribution in a full-scale tunnel, The 10th Korea/Japan/Taiwan Joint Seminar for Disaster Prevention Measures of Long Tunnel, pp. 229-236, 2019.
4. Li-Yu Chen, **Miho Seike**, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Shen-Wen Chien, Tzu-Sheng Shen, Experimental investigation of age bracket influence to normal walking speed distribution in smoke filled tunnel, The 10th Korea/Japan/Taiwan Joint Seminar for Disaster Prevention Measures of Long Tunnel, pp. 217-228, 2019.
5. 清家美帆, 川端信義, 長谷川雅人, 煙を満たした実大トンネル避難実験によるアンケート調査, 日本機械学会 2019 年度年次大会, S05414, 2019.