

研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	ストレス評価によるトンネル火災の避難者挙動解析への応用研究
研究者名※	清家 美帆
所属組織※	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
研究種別	研究助成
研究分野	都市計画、都市景観
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団2020年度研究助成実施報告書

所属機関名 広島大学
申請者氏名 清家 美帆

研究課題	ストレス評価によるトンネル火災の避難者挙動解析への応用研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>本研究は、災害時の危険因子(本研究では煙)がある場合の心拍数、血圧を計測することで、危険因子の度合い(本研究では煙濃度)に応じた避難挙動とストレスレベルを明らかにし、定量化することを目標に、模型実験を行った。その結果、ストレスを感じた際に、男性の避難速度は遅くなり、女性の避難速度は速くなることがわかった。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究は、災害時の危険因子(本研究では煙)がある場合の心拍数、呼吸数、血圧を計測することで、危険因子の度合い(本研究では煙濃度)に応じた避難挙動とストレスレベルを明らかにし、定量化することを目標とする。学術的独自性は火災に遭遇した避難者のストレスと煙濃度の相関を明らかにすることであり、医学、工学の融合分野として新たに開拓される点に新規性がある。これまで、心理的要因として神⁽¹⁾がある建築空間で、煙濃度と動揺度を調べ、避難限界を考察しているが、実際の避難では避難限界後も死に至るまでは、半時間から数時間避難することが想定され、これまでの知見(避難限界)のみでリアルタイムの避難誘導への応用はできない。そこで本研究では、これまで我々が報告してきた火災時の避難速度と煙濃度の関係⁽¹⁻⁴⁾を発展させて、煙濃度とストレスを、工学的かつ医学的側面から定量化する。煙濃度とストレス、そして煙濃度、ストレス、避難速度の相関に関する研究は、申請者が調べた限り見られず、学術的独自性がある。</p> <p>トンネル火災時、煙は成層状態で一空間に広がり、トンネル内に存在する全ての利用者は避難する必要がある。その中にバスが含まれる場合、バス乗客も迅速にバスから出て避難する必要がある。Mikame et al.⁽¹⁾、江本他⁽²⁾、黄他⁽³⁾はトンネル火災時の排煙方式について、それぞれ横流排煙、低風速化制御、集中排煙と低風速化制御にて定量的評価を実施した。その際に、バスが存在することを考慮して評価しているが、その際のバスからの避難者の流量計数を0.5pps(2秒に1人、流量計数=(全降車人数-1)/一人目から最後まで全降車時間)としている。一方、Chung et al.⁽⁵⁾は、バスからの避難者の流量計数を実験と観測結果から求め、緊迫した状態で0.69-0.88pps、緊迫度が低い状態では0.21-0.48ppsと報告しており、これまでの結果はそれらの結果の間となる。しかしながら、これらの結果は、ほとんどが若年層の結果であり、高齢者の降車時の流動係数はわかっていない。そこで本論文では、トンネル火災時に焦点を当て、被験者に高齢者セットを着用してもらい、バスから降車する実験を行った。更に、トンネル火災安全性定量化で必要な避難者の流量計数を求めた。</p>	

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、幅2m、長さ10mの煙体験テント(図1)を用い、演劇等で用いられるスモークマシンで、テント内を煙で満たし、煙濃度を薄(0m^{-1})・中(0.5m^{-1})・濃 A (1.0m^{-1})・濃 B (1.5m^{-1} 以上)の4ケースに対して、被験者にその中に入ってもらい、ルートを移動してもらう。血圧・心拍数測定(オムロンデジタル自動血圧計 HEM-1000)を行い、煙中の心拍数をWahoo社製心拍計にて計測した。煙濃度計測は、レーザー計測にて行った。実験後、煙中どのようなことを感じたのかアンケートを実施する。煙濃度とストレスの相関を求めるため、煙濃度1ケース当たり30名の被験者に参加してもらった。煙濃度とストレスの相関を求めるために、それぞれの煙濃度ケースで、ストレス反応確認項目である心拍数、血圧の上昇率を調べ、実験前よりも実験後に上昇した被験者を「ストレスを感じたグループ」に分類し、それらの速度を調べた。なお、コロナ渦の関係で、唾液による調査ができず、被験者人数も三密を避けるため、一度の実験人数を3~5名としたため、当初予定していた100名に及ばなかった。

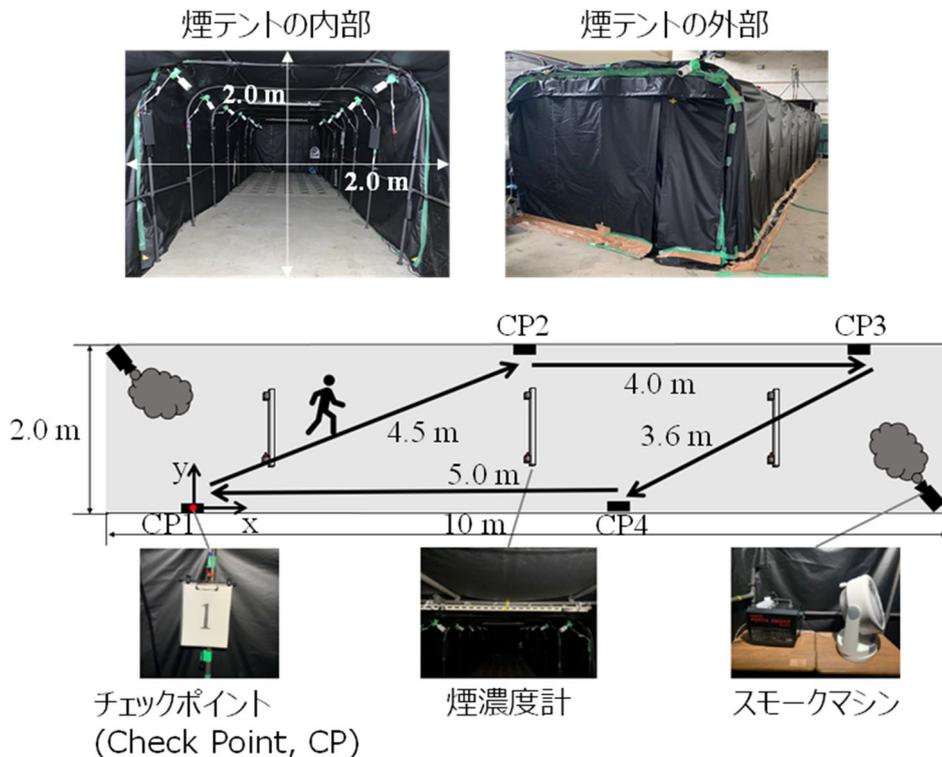


図1 模型実験装置とルート

チャーターしたバスを用い、被験者に高齢者セットを着用してバスから降車してもらった。本実験では、24人乗り(運転席除く)の中型バスを用いて実験する。出口は、通常出口、緊急出口の2つあるが、通常出口のみを用いて実施した。被験者は、男性12名、女性12名、計24名で行った。

本実験では高齢者に焦点を当てる。ただし、実験に高齢者をそのまま参加させるのは危険であるため、高齢者の避難行動を模擬するために高齢者セットを使用した。参加者(高齢者でない)に、視認を阻害するゴーグル(Cambridge 大学製作)、ウェイトカフ、ニーラップ、ウェイトスーツ、エルボーラップ、固定ベルトを着用する。小林ら⁽⁶⁾は、これらの要素が60~70歳前後の高齢者によく見られる可動性と視覚障害を模擬することができる報告している。Goodman-Deane, J. et al.⁽⁷⁾は、視認阻害ゴーグルで細部を見てコントラストの違いを知覚する能力を制限できると報告している。これらの影響は通常、加齢と目の状態の大部分で発生する。以上から、本研究では、加齢による視認阻害ゴーグルとして用

いた。関節のこわばり、関節の可動性の制限、および後弯症によって高齢者の動きを模擬し、バス避難時の心拍数について調べた。



図2 バス避難実験写真

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

1) 煙濃度と避難歩行結果

煙濃度、ストレス、避難速度の相関、及び性別によるこの相関の違いを調べるため、男性8名（年齢21-25歳、平均年齢23歳）と女性8名（年齢20-23歳、平均年齢21.4歳）の実験結果を用いた。ストレスの指標として、実験中の平均心拍数と実験直前3分間の平均心拍数の比を用い（グループ0： <1 ，グループ1： $1-1.2$ ，グループ2： >1.2 ），グループ分けした。そして、男女別で煙濃度ケース毎にグループ間の平均避難速度を比較した（図3，図4）。女性は、煙がない時に、グループ0が0.83 m/s，グループ1が0.96 m/s，グループ2が1.33 m/sとなった。薄の時に、グループ1が0.79 m/s，グループ2が1.07 m/sとなった。中の時に、グループ0が0.72 m/s，グループ1が0.94 m/s，グループ2が1.23 m/sとなった。濃Aの時に、グループ1が0.83 m/s，グループ2が1.37 m/sとなった。濃Bの時に、グループ0が0.75 m/s，グループ1が0.77 m/s，グループ2が1.16 m/sとなった。なお、薄と濃Aの時にグループ0のサンプルがなかった。女性では、いずれのケースにおいても、心拍数の比の上昇に伴い、平均避難速度が速くなった。一方、男性は、煙がない時に、グループ0が0.80 m/s，グループ1が1.12 m/s，グループ2が1.00 m/sとなった。グループ1と2と共に、グループ0より速くなったが、女性と異なった点として、グループ1は2より速くなった。薄の時に、グループ0が1.01 m/s，グループ1が0.99 m/s，グループ2が1.35 m/sとなった。グループ0と1がほぼ等しくなったものの、女性と似ているような傾向が見られ、心拍数の比の上昇に伴い、平均避難速度が速くなった。しかし、中の時に、グループ0が1.05 m/s，グループ1が0.83 m/s，グループ2が0.75 m/sとなった。そして、濃Aの時に、グループ0が0.87 m/s，グループ1が0.85 m/s，グループ2が0.57 m/sとなった。女性と全く逆転し、心拍数の比の上昇に伴い、平均避難速度が遅くなった。濃Bの時に、グループ0が0.66 m/s，グループ1が0.74 m/s，グループ2が0.72 m/sとなった。煙がない時と同じ傾向にあった。

以上より、女性では、煙濃度ケースに関わらず、心拍数の比の上昇に伴い、平均避難速度が速くなった。男性では、煙がない時に、グループ1と2と共に、グループ0より速くなったが、グループ1は2より速くなった。薄の時に、女性と似ているような傾向が見られた。中と濃Aの時に、女性と逆転し、心拍数の比の上昇に伴い、平均避難速度が遅くなった。濃Bの時に、煙がない時と同じ傾向にあった。つまり、ストレスを感じた際に、男性と女性の避難速度が異なることがわかった。

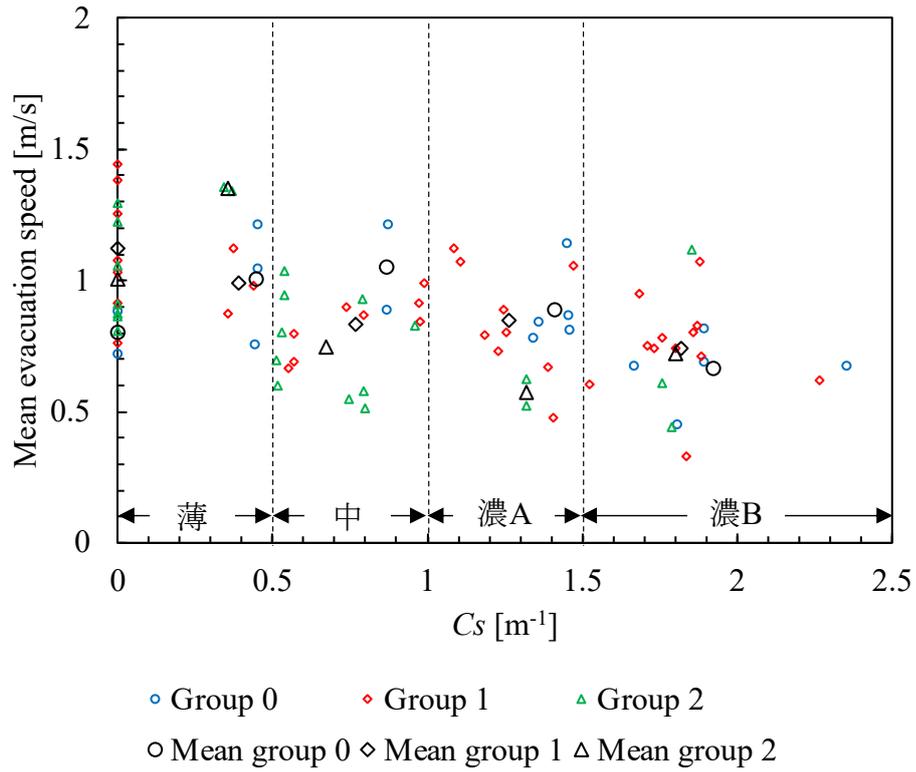


図3 男性のグループ毎の避難速度の平均値と分布

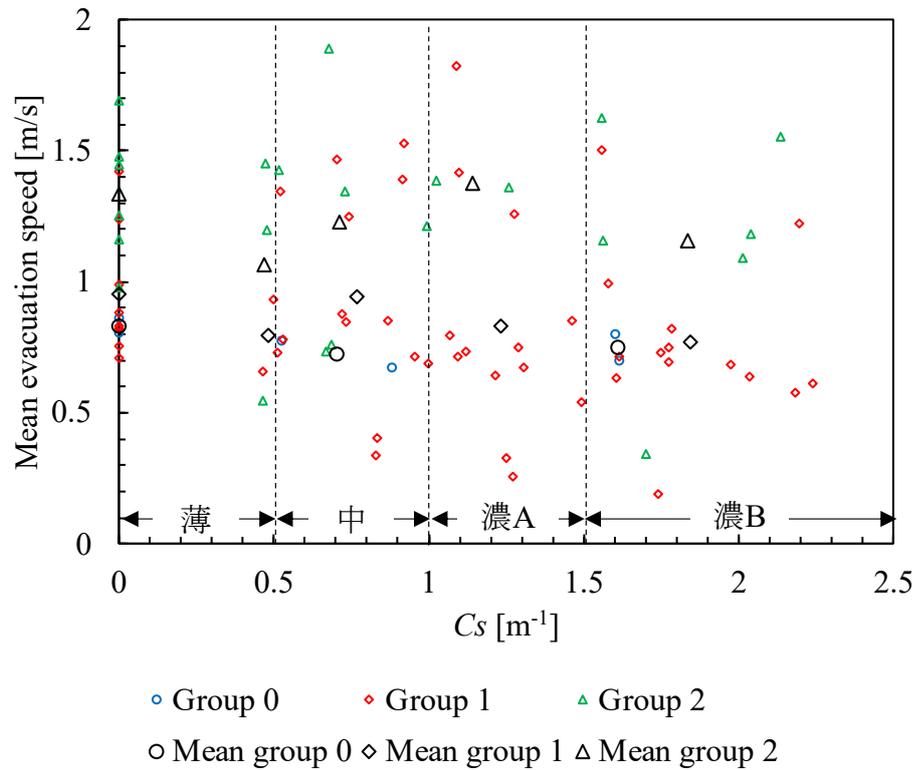


図4 女性のグループ毎の避難速度の平均値と分布

2) 中国人と日本人の避難挙動の違い

国籍の違いによる避難速度の違いを調べるため、中国籍 12 名（男性 5 名，年齢 22-33 歳，平均年齢

27.4 歳，女性 7 名，年齢 22-36 歳，平均年齢 25.9 歳）と日本籍 12 名（男性 5 名，年齢 22-24 歳，平均年齢 22.8 歳；女性 7 名，年齢 20-23 歳，平均年齢 21.6 歳）を用いた。そして，煙濃度ケース毎に中国籍と日本籍の平均避難速度を比較した（表 1）。中国籍男性被験者は日本籍男性被験者に比べ，サンプル数が少ない「薄」の時を除き，全ては中国籍男性被験者のほうが速くなった。一方，中国籍女性被験者は日本籍女性被験者に比べ，男性と同様に，全ては中国籍女性被験者のほうが速くなった。国籍の違いにより，中国籍と日本籍被験者の避難速度が異なることがわかった。これらの理由として，中国と日本の小学校からの避難教育が異なることが挙げられる。

表 1 性別・煙濃度ケース毎の日本籍と中国籍の平均避難速度 (m/s)

性別	国籍	煙濃度ケース				
		煙無	薄	中	濃 A	濃 B
男	日本	0.93	1.13	0.81	0.77	0.67
	中国	1.38	0.94	0.98	0.87	0.77
女	日本	1.01	0.96	0.93	0.79	0.74
	中国	1.23	1.34	1.15	0.92	0.76

3) バス避難

高齢者セット有の場合，男性で 0.44 pps，女性で 0.36 pps，男女混合で満席となった場合で 0.42 pps となった。この理由として，高齢者セットの錘が，男女関わらず一定であることから，男性と女性の筋力量による差が降車にかかる時間に影響を与えたと考えられる。高齢者セットがない場合，男性で 0.64 pps，女性で 0.68 pps，男女混合で満席となった場合で 0.67 pps となり，性別差が小さいことが分かった。Chung et al.⁽⁴⁾は，緊迫した状態で 0.69-0.88 pps と報告しているが，緊迫した状態との比較をすると，高齢者セット有の場合，男女関わらず，Chung et al.⁽⁴⁾が報告している値よりも小さくなり，男女混合で満席となった場合の流量計数は，Chung et al.⁽⁴⁾が報告している値の半分となることがわかる。一方，高齢者セットがない場合は，Chung et al.⁽⁴⁾が報告している値の範囲内となった。

心拍数計測は，実験中の平均心拍数と実験直前 3 分間の平均心拍数の比を調べた。

男性高齢者セット有で 0.98 倍 (0.73-1.19)，女性高齢者セット有で 1.1 倍 (0.94-1.20)，男性高齢者セット無しで 0.93 倍 (0.72-1.05)，女性高齢者セット無し (1.06-1.18) で 1.1 倍となった。男女ともに高齢者セットがない場合，心拍数は低くなった。なお，運動による心拍数の上昇も考えられるため，更なる調査が必要である。

参考文献

- (1) Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Experiments of Evacuation Speed in Tunnel Filled Smoke, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 53, (2016) pp. 61-67, <http://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.003>
- (2) Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Evacuation speed in full-scale darkened tunnel filled with smoke, Fire Safety Journal, Vol. 91, (2017), pp. 901-907, <http://10.1016/j.firesaf.2017.04.034>
- (3) Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Walking Speed in Completely Darkened Full-Scale Tunnel Experiments, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 106C, (2020),103621, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103621>.
- (4) Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Emergency evacuation speed distributions in smoke-filled

tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vo. 112, (2021), 103934.

- (5) Chung, H.-C., Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Chien, S.-W., Shen, T.-S., (2021). Investigation of bus evacuation flow rates for tunnel fire quantitative risk assessment, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*(Accept). <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1905646>
- (6) <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103934> 小林陽子, 高田谷久美子, 山岸春江, 瀧澤孝子, 高齢者疑似体験装具装着による歩行への影響, *Yamanashi Nursing Journal*, 1 (2002) 33-36, <https://lib.yamanashi.ac.jp/igaku/mokuji/YNJ/YNJ1-1/image/YNJ1-1-033to036.pdf>.
- (7) Joy Goodman-Deane, Sam Waller, Alice-Catherine Collins, John Clarkson, (2013), Simulating vision loss: What levels of impairment are actually represented?, the Ergonomics & Human Factors 2013 conference, pp. 1-9, http://www.inclusivedesign toolkit.com/csg/goodmandeane_ergonomics13.pdf

本成果発表予定

- 1) Li Wen-Hao, Miho Seike, Akimasa Fujiwara, Makoto Chikaraishi, Experimental study on gender difference in mental stress and walking speed during tunnel fires, 11th International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety, May 2022.
- 2) 李文浩, 清家美帆, 藤原章正, 力石真, 閉鎖空間火災時の煙中の避難挙動—模型実験による中国人と日本人の違いに関する考察—, 令和4年度(2022) 土木学会中国支部研究発表会, 2022年5月(広島オンライン, 発表予定).
- 3) トンネル火災時の中国人と日本人の避難行動とストレスに関する調査, 機械学会年次大会 2022, 2022年9月(富山, 発表予定).

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

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。