

スマートウォッチ活用によるトンネル火災避難時の人間行動最適化

Optimizing human behavior when evacuating from a tunnel fire by utilizing a smart watch

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
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Miho SEIKE

要旨:

1. はじめに

日本には2020年段階で500m以上の道路トンネルが2943本(100m未満含め10912本⁽¹⁾), 鉄道トンネル4737本⁽²⁾)と国民一人当たり所有するトンネル本数が他の国と比べ極めて多い。したがって、トンネル火災に遭遇する率も高くなることから、理想的には全トンネル火災安全性を検討する必要がある。しかしながら、日本はトンネルが多いが故に、全てのトンネルに対して対策することが財政的に困難であり、将来的にリスク解析によってトンネル火災安全性の順位付けが必要と考えられる。トンネル内で火災が発生した際、閉鎖空間に煙が充満することから、避難者は煙中を逃げることになる。したがって、高精度のトンネル火災安全性評価を行うにあたって、煙中の避難行動を正確に入力する必要がある。

神⁽³⁾は、一定の煙濃度(Cs濃度 $0.35 \sim 0.55 \text{ m}^{-1}$)に達した際に多くの被験者が心理的に動揺し始めると報告している。一方、Seike, et al.⁽⁴⁾は、暗中避難時に被験者がストレスを感じることによって歩行速度が遅くなると報告している。Leach⁽⁵⁾は、海上及び航空機事故で危険に直面した避難者の70~75%が「フリーズ」のような状態になってしまい、避難の遅延を引き起こして犠牲となったと報告している。したがって、避難者は急性ストレス反応やパニックが続き、心拍数の増大や呼吸困難

が生じ⁽⁶⁻⁹⁾、スムーズな避難行動が困難になる可能性がある。本論文では、模型トンネルで実験を行い、煙濃度、ストレス(心拍数とアンケート)、歩行速度を計測した。

実大トンネルでの煙中の実験は行われているが、煙中の心理要因と挙動とを結びつけて調査している研究は少ない。神⁽³⁾は実際の煙(木材や灯油)中の心理要因と挙動とを結びつけて調査しているが、当時の実験機材では、行動中の心拍数をリアルタイムで計測するものではなく、同程度の煙濃度中の心拍数の計測と歩行計測とを別に実施している。また神⁽⁹⁾の研究では、煙濃度、心理的動揺度(本研究では心理的ストレス)と避難行動との相関が不明である。李らによる同研究は10名とサンプル数が少ないという点に問題が残されている。

実際の災害避難時に、煙濃度が避難限界に達したとしても、避難者は死に至らず、避難限界後にも数分から数時間程度の避難が継続すると想定している^(10,11)。また一定程度避難しない人が存在するとしている。しかしながら、避難限界後の心理的要因と避難行動について明らかにされておらず、避難しないと想定する割合の根拠も不明である。

以上から、リスク解析を正確に実施する上で、避難行動の解明が必要であり、避難者の心理的ス

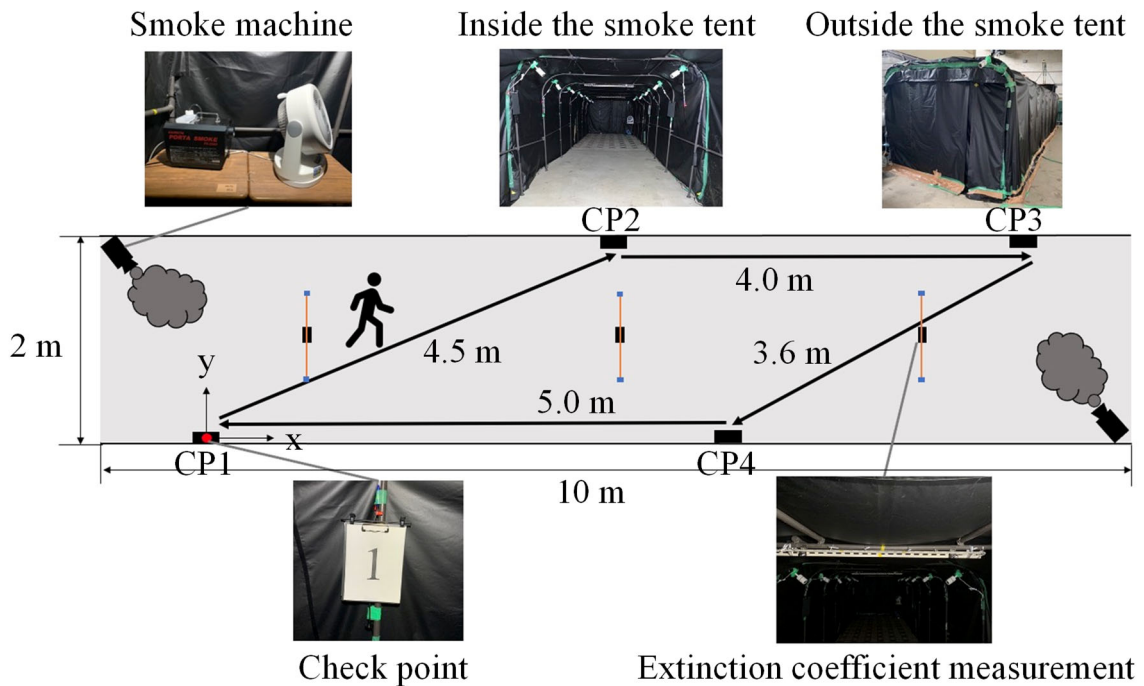


図1 煙体験テント実験ルート

トレスと避難行動との相関を明らかにする必要がある。しかしながら、トンネル火災時におけるストレスと避難行動との相関に着目した研究例は、Seike, et al.⁽⁴⁾以外には、これまでほとんどなされていない。そこで、本論文では、煙体験テントに煙を満たし、煙中での心理的ストレスと避難速度との相関を明らかにすることを目的とし、解析結果を報告する。

2. 避難実験

(1) 模型トンネル

実験は、煙体験テント（長さ 10 m、幅 2 m、高さ 2 m、黒シート、図 1）にて行った。煙体験テント内にチェックポイント（以下 CP）を 4 箇所設置した。本論文では x を長さ方向、y を幅方向とする。CP1 を原点として、CP1 から CP4 をそれぞれ 1.5 m の高さで(x,y)=(0,0), (4,2), (8,2), (5,0)に設置した。2 台のスモークマシン（PORTA SMOKE PS-2005, Dainichi）を用いて、

発煙した。煙の主成分は水とグルコースの混合物である。3 台の煙濃度計 (LV-NH100, Keyence) を、煙濃度計中間地点が(x,y)=(1,1), (4,1), (7,1)となるように設置した。

煙濃度の計測は、KEYENCE 製 LV-NH100 レーザーセンサーを用い、Lambert-beer の法則を基に、

$$Cs = -\frac{1}{l} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1)$$

で定義される減光係数 Cs [m⁻¹] を煙濃度とした。ここで、I は煙層を通過した光の強さ、I₀ は煙層に入る光の強さ、l は光路距離（本論文では光路長 0.8 m）である。濃度計測に関しては JIS に規定されているが、光源として電球を用いるため赤外線の影響が大きく、必ずしも可視光の特性を表していないと考えられる。そこで、本研究では赤外線を含まない可視光として、レーザー（波長 660 nm）を光源として用いた。

(2) 心理的ストレス計測

田場ら⁽⁸⁾は、精神ストレス負荷時に心拍数では全体的に速くなったと報告している。一方、Zimmerman, et al.⁽⁹⁾は実験室での一過性ストレスが、ほぼ例外なく血圧を上昇させると報告している。本論文では、ストレスがかかった際の生理変化として、心拍数、血圧に着目する。心拍数はWahoo Tickrの心拍計(WF124, 図2(i))を用いて、実験開始前から終了後まで計測し、血圧は、Omronの血圧計(HEM-6324T, 図2(ii))を用いて実験直前・直後に計測した。



(i) 心拍計

(ii) 血圧計

図2 ストレスによる生理変化計測器

(3) 被験者

被験者数は、30名(男性15名、女性15名)、男性被験者年齢は22歳から49歳(平均年齢34.8歳)、女性被験者年齢は20歳から48歳(平均年齢33.9歳)であった。被験者は、安全チョッキ、ヘルメット、膝肘パッド、マスク、ゴム手袋を着用した(図3)。実際の北海道石勝線トンネル火災事故時⁽¹³⁾、台湾での雪山トンネル火災事故時⁽¹⁴⁾に、避難者は携帯電話の懐中電灯機能を利用して避難したと報告されている。その結果を参考に、被験者に懐中電灯を持たせた。また、CP間の通過時間を計測するため、被験者にストップウォッチを持たせ、CP間の通過時間を計測した。

被験者には、図1の経路のように、CP1からCP2、CP3、CP4、CP1を順に通過して移動しても

らう。経路は2回の壁沿い移動と2回の斜め移動となる。

被験者には、下記のように説明した。

「これから緊迫した状態で避難してください。ただし、周囲状況に注意して安全に避難してください。」

なお、本実験はトンネル火災時に心理的ストレスをもたらす可能性がある音、匂い等の因子を考慮せず、視認性のみに着目する。



図3 被験者装備

3. 歩行速度と心理的ストレス

被験者(女性)1名の心拍数の経時変化を図4、テントでの説明時と煙濃度毎の心拍数の最小値、最大値と平均値を表1に示す。煙テントに入っていない時の心拍数を薄い青色、煙テント内での説明時を灰色、煙なしを青色、 $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ をオレンジ色、 $C_s = 0.9 \text{ m}^{-1}$ を緑色で表している。Borovac, et al.⁽¹⁵⁾は、Wahoo Tickr心拍計にて心拍数を計測する際に、平均6.7秒の遅れが発生すると報告している。Borovac, et al.⁽¹⁵⁾の結果を参考に、本実験で計測した心拍数には6.7秒の遅れが発生しているとし、実際の計測開始時刻から7秒遅れた時刻を修正開始時刻とした。図4より、煙テントに入った時の心拍数は、煙なしの時に108 bpm、 $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ の時に99 bpm、 $C_s = 0.9 \text{ m}^{-1}$ の時に96 bpmとなった。

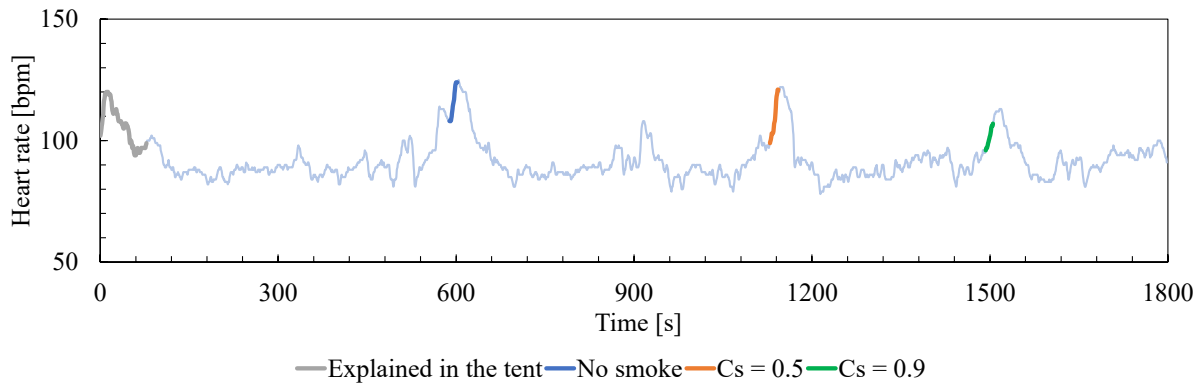


図4 ある女性被験者の心拍数経時変化

煙テントに出た時の心拍数は、煙なしの時に 124 bpm, $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ の時に 121 bpm, $C_s = 0.9 \text{ m}^{-1}$ の時に 107 bpm となった。煙がない場合と、煙有の実験において、図4に示す被験者の心拍数が上昇したことから、この被験者は、テント内に入ると緊張し初め、テントから出るところまで上昇することがわかった。ただし、煙なしの時の心拍数は $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$, 0.9 m^{-1} の最小値、最大値と平均値よりも高くなった。これは、一番初めの実験そのものに対する不安が高かったと考えられる(うまくできるか、失敗しないか等の不安)。心拍数の平均値は、表1より、煙なしで 116 bpm, $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ で 109 bpm, $C_s = 0.9 \text{ m}^{-1}$ で 101 bpm となった。煙なしの心拍数に比べ、 $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$, 0.9 m^{-1} の心拍数が段々低くなった。これは実験そのものに対する不安が小さくなり、実験に慣れてきたことが考えられる。各実験ケースの開始60秒前から開始直前までの心拍数について、煙なしで 87 bpm から 108 bpm, $C_s = 0.5 \text{ m}^{-1}$ で 83 bpm から 98 bpm, $C_s = 0.9 \text{ m}^{-1}$ で 92 bpm から 95 bpm と上昇している。したがって、この被験者は実験直前から緊張し始めたことがわかった。

本論文では

$$H(i) = HR(i,0) / HR(i, C_s) \quad (2)$$

として1未満(HRグループ0), 1-1.2(HRグループ

1), 1.2以上(HRグループ2)になるかでストレスを感じたかを判断した。なお、5分程度歩行した際に、心拍数が1.2倍程度になると報告があるが、本実験は長くとも1分程度であるため、運動による心拍数の上昇はないとした。

図5に実験前後の平均血圧変化率を示す。ここで、 C_s レベルは、煙濃度によって分類した。 C_s レベル0を煙濃度 0 m^{-1} (煙がない場合), C_s レベル1を煙濃度 $0.01-0.5 \text{ m}^{-1}$, C_s レベル2を煙濃度 $0.5-1.0 \text{ m}^{-1}$, C_s レベル3を煙濃度 $1.0-1.5 \text{ m}^{-1}$, C_s レベル4を煙濃度 1.5 m^{-1} 以上である。図中青が最高血圧、オレンジが最低血圧の変化率である。図より、最高血圧は、 C_s レベル0が最も高く、それから徐々に低くなる。この理由として、実験に慣れたことが考えられる。一方で、 C_s レベル2で、最高血圧・最低血圧共に上昇する。これは、煙が濃くなることでストレスを感じたためと考えられる。

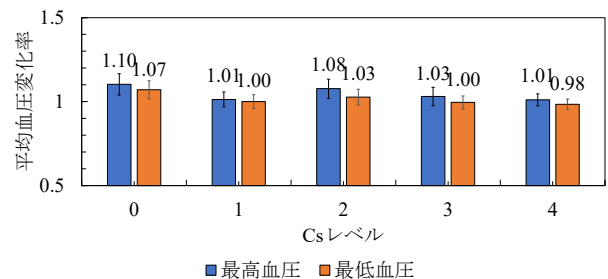


図5 実験前後の平均血圧変化率

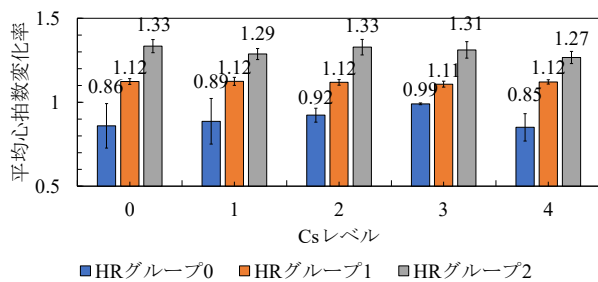


図6 実験前後の平均心拍数変化率

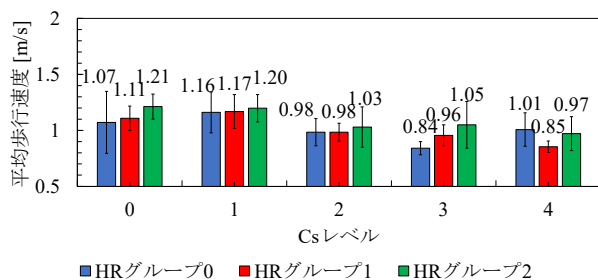


図7 平均歩行速度

図6に実験前後の平均心拍数変化率を示す。HRグループ0はCsレベル0時、0.86だったが、徐々に上昇し、Csレベル3時に最大値0.99となった。エラーバーは95%CIを示しているが、HRグループ0が最も大きなエラーバーとなっている。これはサンプル数少ないためである。HRグループ1は、Csレベルが変化してもほぼ1.12と同程度となった。HRグループ2は、全体的に1.3程度となり、実験中に心拍数が上昇している結果となった。なお、本実験は1分程度煙中にいるため、1.2以上になるのは、ストレスを感じて心拍数が上昇したことを示していると考えられる。

図7にCsレベル毎の平均歩行速度を示す。Csレベル0時、HRグループ0が最も遅く1.07m/sとなり、HRグループ2が最も早く1.21m/sとなった。その傾向はCsレベル3まで同じとなるが、Csレベル1の速度はHRグループ2のみ遅くなる。Csレベル2になると、更に遅くなり、Csレベル3では、HRグループ0は

0.84m/sと最も遅くなる。これは冷静であるがゆえに慎重になった可能性が借る。一方、HRグループ2の速度はCsレベル内で最速な状況は変わらない。これは、煙にストレスを感じ、煙中から早く逃れたいがゆえに速度が速くなったと推測される。Csレベル4は他煙濃度と傾向が異なる。これは、煙濃度範囲が1.5~2.5m⁻¹であったため、濃い濃度での挙動についてさらに調査する必要がある。

4. さいごに

煙体験テントを用いて、避難実験を行った。煙なし、煙がある際の心拍数、最高血圧、最低血圧を調べ、避難速度との相関を調べた。火災避難時の人間行動最適化に向けて、基礎データを取ることができた。冷静な人が必ずしも迅速な行動をしないことが推測されるが、心拍数が上がりすぎて早すぎる行動からパニックを誘発する可能性があることもわかった。今後、実験を行う際に、被験者の慣れを防ぐため、実験ケースの順番やルートの変更等、更なる検討が必要である。

謝辞

本研究をご支援くださいました公益財団法人京都技術科学センターに深く感謝申し上げます。本研究は広島大学大学院先進理工系科学研究科交通工学研究室にて行ったものです。被験者含め、研究にご参加いただいた皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 国土交通省：道路統計年報2020，トンネルの現況，2020 <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2020/nenpo04.html> (See in April 3, 2022).
- (2) 国土交通省社会資本の老朽化対策情報ポ

- ータルサイト：インフラメンテナンス情報，各社会資本の老朽化の現状，鉄道，2013 (See in April 3, 2022). https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_pdf12.pdf
- (3) 神忠久：煙の中での心理的動揺度について，日本火災学会論文集，Vol.30, No.1, pp.1-6, 1980.
- (4) Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Tsuji, C., Higashida, H. and Yuhi, T.: Experimental attempt on walking behavior and stress assessment in a completely darkened tunnel, *Infrastructures*, Vol.6, No.75, pp.2-14, 2021.
- (5) Leach, J.: Why people ‘freeze’ in an emergency: temporal and cognitive constraints on survival responses, *Aviation, Space and Environmental Medicine*, Vol.75, No.6, pp.539-542, 2004.
- (6) 山口勝機：心拍変動による精神負荷ストレスの分析，志学館大学人間関係学部研究紀要，Vol.31, No.1, pp.1-10, 2010.
- (7) 多田志麻子，稲森義雄，濱野恵：ストレス課題に対する心臓血管反応にハーディネスが及ぼす影響，*バイオフィードバック研究*，Vol.28, pp.54-601, 2001.
- (8) 田場信裕，高良富夫，星野聖：ストレス負荷時の心拍数と瞳孔反応，*テレビジョン学会技術報告*，HIR96-66, pp.75-79, 1996.
- (9) 高津浩彰，宗像光男，小関修，横山清子，渡辺與作，高田和之：心拍変動による精神的ストレスの評価についての検討，*電気学会論文誌*，C120.1, pp.104-110, 2000.
- (10) Ntzeremes, P. and Kirytopoulos, K.: Evaluating the role of risk assessment for road tunnel fire safety: A comparative review within the EU, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, Vol.6, No.3, pp.282-296, 2019.
- (11) Kirytopoulos, K., Kazaras, K., Papapavlou, P and Ntzeremes, P.: Exploring driving habits and safety critical behavioural intentions among road tunnel users: a questionnaire survey in Greece, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.63, pp.244-251, 2017.
- (12) Zimmerman, R. S., Frohlich, E. D., “Stress and hypertension”, *Journal of Hypertension*, 8(Suppl. 4), S103-7, 1990.
- (13) 十勝毎日新聞社：部品脱落し脱線か 無残な姿見せる石勝線特急，*WEB TOKACHI*, 2015 (See in May 25, 2015).
- (14) Next Digital Limited, May 8th 2012 (in Chinese, see in November 25, 2018). <https://tw.news.appledaily.com/local/realtime/20120508/121709/>
- (15) Borovac, A., Stuldreher, I. V., Thammasan, N. and Brouwer, A. M.: Validation of wearables for electrodermal activity (EdaMove) and heart rate (Wahoo Tickr), *Proceedings of Measuring Behavior 2021-21*, pp.18-24, 2020.

研究成果発表

- (1) 李文浩，清家美帆，藤原章正，力石真，トンネル火災を想定した煙中のストレスの実験調査，*日本機械学会 2021 年度年次大会 2021 年 9 月*.