

氏名（本籍）	田中俊成（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第1134号
学位授与の日付	2022年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	バーチャルリアリティを用いた地下街火災時の避難行動分析に基づく効果的な避難誘導方法に関する研究

論文審査委員（主査）教授 河野 守  
嘱託教授 萩原 一郎 准教授 水野 雅之  
教授 竹村 裕 准教授 山本 隆彦

## 論文内容の要旨

本研究では、地下街の火災時における避難時の行動特性の分析および避難誘導手法の確立を目的とし、避難シミュレーションによる避難群集性状の分析、VR技術を応用したVR避難シミュレーターの開発、それを用いた被験者実験による避難行動特性の分析、またデジタルサイネージを用いた避難誘導効果の検証を行なった。以下に、各章について結論を含めた概要を示す。

第1章では、地下街における火災時の避難安全計画の必要性について、老朽化などの地下街の現状課題、関連する法規に基づき社会的背景を述べた。検討課題に関連する既往の研究の知見に基づき、課題について検討の余地があることを示し、本研究の目的が地下街の火災時における避難時の行動特性の把握、また避難誘導手法の開発であることを提示した、加えて、本研究の構成と各章の概要を示した。

第2章では、大規模避難時の避難群集性状に関する知見を得ることを目的とし、避難シミュレーションを用いて、出口幅、出口の配置条件、避難者の避難パターンをパラメータとし、それらが避難時間、出口付近の滞留密度に及ぼす影響を分析した。一連の計算結果から、直近の出口を選択し避難した場合、出口付近の滞留密度は高く、群集災害の可能性あることを示唆し、水平避難の必要性を提示した。一方で、大規模避難を想定とした実際の避難では、どのような行動を取るか分析する必要があることを示したとともに、実際の空間で被験者実験の実施が困難な施設において新たな避難行動分析ツールとしてVR技術を応用した避難行動分析手法について提示した。

第3章では、大規模避難時の避難行動特性に関する知見を得ることを目的とし、VR 避難シミュレータを開発し、それを用いた避難行動分析実験を通して、避難開始位置や避難開始時に向いている方向、他の避難者の在館者密度が被験者の出口選択行動に与える影響について分析した。これにより、最寄りの出口が火災方向に位置した場合、火災から離れる被験者と最寄り出口を選択した被験者でばらつきがあり、在館者密度が高くなると、最寄りの出口には並ばず、離れた出口に出口へ避難する被験者の割合が高くなることが明らかになった。また、実験後のアンケート調査によって実験中の行動理由について、避難方向の判断要因は人の流れを見て判断した傾向があり、出口探索は、避難誘導灯を目標にする傾向があったことを示した。また本研究で、開発した VR 避難シミュレーターについて評価してもらい、改善点を示した。

第4章では、第3章で開発した VR 避難シミュレーターを改良し、異なる他の避難者の移動速度の構成比率による被験者の出口選択の影響を分析することを目的として、第3章同様に、避難開始位置、避難開始時に向いている方向、群集の平均的な移動速度をパラメータとした避難行動分析実験を実施した。避難開始時の向きが非火災方向の条件では、平均的な避難群集の移動速度の違いによる出口選択の影響は見られなかったが、火災方向を向いて避難を開始した条件では、平均的な避難群集の移動速度が速いほど他の避難群集に同調するように避難した傾向があった。アンケートの結果から平均的な避難群集の移動速度が遅い条件では、被験者の移動経路にばらつきがあり、他避難者を追い抜きたいと感じた傾向があることを確認した。これは、遅い避難群集が直近の出口に集まり流れが遅くなると無理な追い抜きが発生する可能性を示唆しており、最寄りの混雑している出口ではなく、遠くの出口に水平避難を行って避難することが二次的な群集災害を制御するため必要であることを提示した。

第5章では、第4章で提示した水平避難を実行するための誘導方法を提案し、その効果を検証することを目的として、デジタルサイネージを用いた避難誘導手法を提案した。また、防火シャッターが降下する状況で、特別な誘導指示がない場合における被験者の行動特性とデジタルサイネージによる水平避難指示で、被験者がサイネージの指示に従って行動するか、行動制御の効果を分析した。特別な避難指示がない場合では、最短経路選択の傾向が見られたが、サイネージを活用することによって、指示通りに避難する被験者の割合が高くなることがわかった。また、防火シャッター降下時に特別な指示がない状況ではほとんどの被験者は、シャッターをくぐることなくシャッター手前の出口に避難した傾向があったが、サイネージに水平避難を指示する案内が表示された場合、サイネージの指示内容に従い水平避難に移した被験者の割合が増加した。一連の実験によってデジタルサイネージによる誘導効果を定量的に評価し、その有用性を示した。

第6章では、本論文の結論の章である。総括として、各章の結論を含む概要、まとめとして各章の結果の一覧、加えて、今後の展望を示している。

## 論文審査の結果の要旨

本学位論文の内容について、論文の構成、各章の内容を火災科学、工学の見地から審査した。

地下街は、不特定多数の人々が使用する施設で、通路に隣接して店舗や飲食店が配置され、階段は一定距離以内に配置される。火災が発生した場合、最寄りの階段から地上に避難することが想定されているが、階段を上る避難は身体的な負担が大きく、特に高齢者などは移動速度が遅く、階段で健常者が追い抜く際に接触すれば転落を引き起こす危険性もある。こうしたことから本論文では、火元に近い避難者は地下街通路の防火シャッター区画を越えて水平避難して安全な場所に一時避難し、落ちついて階段を上り避難したり、消防隊の救助を待つことを推奨している。このような新しい避難を有効なものとするため、デジタルサイネージを活用した避難誘導方法を提案し、予め設定された経路に沿って移動する大勢の避難者と一緒に、直線状の地下街を避難する VR 避難シミュレーターを製作し、Player（被験者）の避難行動を分析することにより、その避難誘導効果が高いことを明らかにしている。

本論文は 6 章で構成され、第 1 章では研究背景、目的および構成について述べている。

第 2 章では、避難シミュレーションモデルを用いて地下街を避難する状況を解析し、最寄りの出口から避難する場合よりも、火元から遠い出口から避難する場合の方が出口前に滞留する避難者密度を低く抑えられ、水平避難のメリットを定量的に評価している。

第 3 章では、直線状の通路を持つ地下街を対象に、予め設定された経路に沿って移動する大勢の避難者と一緒に避難する VR 避難シミュレーターを製作し、それを用いて被験者が VR 空間をどのように避難するか分析する被験者実験を行っている。一連の実験により、特別な避難誘導がない条件下での避難時の出口選択特性を分析している。被験者は火元とは逆方向を向いた状況で避難開始した場合、他の避難者が火元から離れる避難行動に同調して移動し、ほとんどの被験者が避難開始位置から 10 数メートル先にある最寄り出口に避難する傾向を確認している。最寄り出口前での混雑を回避して通り過ぎる割合は、在館者密度が低または中では 3~7%であったものが、在館者密度が高い場合は 15%に高まったことを確認している。また、火元の方向を向いて避難開始した場合、10 数メートル先の最寄り出口に約 40%の被験者が避難し、残りは周囲の他の避難者の移動方向に同調して転回した傾向を確認している。このように避難する他の避難者の在館者密度などの条件に基づく出口選択特性を論じている。

第 4 章では、VR 避難シミュレーターを改良し、在館者密度が高い条件を対象に、移動速度が異なる 3 つの避難者の構成比率の違いにより代表的な移動速度が異なる避難群集を考慮した実験をしている。火元と逆方向を向いて避難開始した状況では、他の避難者の代表的な移動速度が速い場合には、被験者は遅い避難者を追い抜いて避難したが、代表的な移動速度が遅い場合には避難者の密度が比較的高くなり、被験者は避難者を追

い抜かず追従して避難した傾向を確認している。一方、火元の方角を向いて避難開始した状況では、避難者の代表的な移動速度が速いほど、周囲の避難者の移動方向に同調して転回した傾向が高いことを確認している。このように他の避難者の代表的な移動速度の違いによる移動特性や出口選択特性を論じている。

第5章では、VR避難シミュレーターをさらに改良し、防火シャッターの閉鎖状況を考慮すると共に、デジタルサイネージによる避難誘導の効果が高いことを論じている。特に地下街通路の二段降下防火シャッターが床面から高さ2mまで降下する最中に、被験者が降下中のシャッター下を通過して水平避難する割合は、デジタルサイネージによる指示で約13%から約50%に高まったことを確認している。さらに、シャッターが高さ2m以下に降下する状況では、デジタルサイネージにシャッター下の通行禁止を表示し、水平避難する割合を約13%に減じられたことを確認している。

第6章では、各章での結論を総括して本研究の成果を述べ、今後の課題を述べている。

本論文は、地下街火災時の避難を体験できるVR避難シミュレーターを開発し、それを用いて他の避難者の在館者密度や代表的な移動速度が変化した場合の避難行動や出口選択傾向を明らかにすると共に、地下街通路に配置された防火シャッターを通過する水平避難を促すためにデジタルサイネージによる避難誘導が効果的であることを分析した研究として高く評価できるものであり、地下街の避難安全計画の向上に資する成果であると考えられる。以上から、本論文は博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。