

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04881

研究課題名（和文）地下街での避難の円滑化に向けた避難シミュレーションモデルの構築

研究課題名（英文）Modelling and simulation for a smooth evacuation in an underground shopping mall

研究代表者

山口 行一（YAMAGUCHI, YUKIKAZU）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：80294718

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地下街での避難については、避難完了時期に着目した実績はあるものの、避難誘導方策が出口での待ち行列に与える影響については、研究実績が十分に蓄積されていなかった。本研究では、マルチエージェントを用いた避難行動シミュレーションモデルを構築し、発災時の来街者全体の避難行動を明らかにしたうえで、3種類の避難誘導方策を適用し、避難時の来街者の衝突・滞留といった待ち行列について分析を行うことで、各避難誘導方策の効果を明らかにした。そして、機械学習を用いた避難誘導方策の提案システムの検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの来街者が滞る地下街の避難時において、想定していない地点での突発的に雑踏事故が発生するとその対応もできないことから、事前にその状況を把握して対応の準備を行える点で意義を有している。避難シミュレーションでは、3種類の避難誘導方策の適用が群衆避難に与える影響を明らかにしている。また、対象地域における複数の来街者数と適用する避難誘導方策のシミュレーションの結果を学習させ、災害時に来街者数を入力すれば最適な避難誘導方法を出力できるシステムのプロトタイプを構築した。

研究成果の概要（英文）：Although there are many research results on evacuation in underground malls focusing on the time of completion of evacuation, there has been insufficient accumulation of research findings on the impact of evacuation guidance measures on the queueing at exits. In this study, first, a multi-agent simulation model of evacuation behavior was constructed to clarify the evacuation behavior of all visitors at the time of a disaster. Next, three different types of evacuation guidance measures were applied, and the effects of each evacuation guidance measure were clarified by analyzing the queues, such as collisions and retention of visitors during evacuation. Then, the system for proposing evacuation guidance measures using machine learning was developed.

研究分野：防災計画

キーワード：避難 群衆 マルチエージェント シミュレーション 避難誘導 防災 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

近年の地下街は、ますます大規模化・複合化が進み、買い物や乗り換えなど不特定多数の利用者にとって重要な歩行空間としての役割を有している。大規模地震などへの防災・減災対策を進めるにあたっては、事前に災害発生時の避難行動を予測し、避難上の問題点を改善する必要がある。来街者全員が避難を完了するにあたり、避難完了時間を把握することは重要であるが、来街者が出口に集まることで待ち行列が発生し、来街者同士の衝突や滞留の危険が高まったり、避難が完了する時間に影響を与えたりするが、この点に言及した研究は十分ではない。

## 2. 研究の目的

地方自治体や地下街の管理者などが適切な避難誘導の指示を出すことを支援することを目的としている。本研究では、①地下街の来街者が最寄りの避難施設や最短避難経路を認知できないことと待ち行列を表現できる避難シミュレータを構築した後、②避難誘導方を複数案適用し、各案が群衆避難に与える影響を分析し、③避難シミュレーション結果を学習データとして機械学習させることで、来街者数を入力すると最適な避難誘導方を出力するシステムの開発を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) マルチエージェントシミュレーション (MAS) を用いた避難シミュレータの開発

MAS は、個々のエージェントにルールを与え、システム全体の現象を捉えようとする手法であり、避難シミュレーションに有効な手段である。このため、MAS を用いた避難シミュレータの開発を行った。来街者の避難ルールは、避難先選択割合と避難経路の選択割合を、調査結果をもとに設定した。地下街を対象としていることから、避難先の選択については、来街者には土地勘がない、あるいは、過去に訪問している、高層であるとか頑丈そうである建物に避難したいという意識があること、避難経路の選択については、落下物の危険があることから地下街でできるだけ遠くまで進みたい、あるいは、いち早く地上に出たいという意識があることを反映するためである。また、来街者にとっては、仮想の空間よりも実在の空間で避難を想定して回答してもらう方が、精度が上がることから、対象地区として、大阪梅田地下街を模した空間を設定した。なお、実際の大阪梅田地下街各社の防災に関わる取り組みとは一切関係はない。

### (2) 複数の避難誘導方が与える群衆避難への影響分析

避難誘導無しの場合と、指差し法、引き連れ法、出口封鎖法という避難誘導方を適用した場合で避難シミュレーションを行い、群衆避難に与える影響を分析した。①指差し法は、特定の出口における来街者の集中を防ぎ、地下街全体の出口で待ち行列を平準化するため、地下街通路の交差点部を通過する来街者を混雑していない最寄りの地上への階段へ誘導し、避難完了時間の短縮を目的とする。②引き連れ法は、出口周辺で長い待ち行列が発生すると、誘導員が来街者を当該出口から待ち行列の少ない出口へと誘導することで、待ち行列を解消し、避難完了時間を短縮することを目的とする。③出口封鎖法は、球技場などで実績がある方法で、出口前の待ち行列に着目し、長い待ち行列が発生する出口を封鎖することで、未然に待ち行列の発生を防ぐことを目的とする。各避難誘導方が群衆避難に与える影響については、避難完了時間、待ち行列が発生する出口、待ち行列の人数、待ち行列の解消に掛かる時間を把握し、比較分析を行った。

### (3) 機械学習による避難誘導方の提案システムの開発

携帯電話や Wi-Fi をセンサとして来街者の位置が把握できるようになっていることから、発災時の来街者数を把握できる場合、短時間でゾーンごとの来街者数に応じた最適な避難誘導方を提案できるシステムを構築した。本システムは、本研究の避難シミュレーションの結果を教師データとした機械学習を行うことで、管理者などが発災時の来街者数をゾーン別に入力すれば避難完了時間が最小となる避難誘導方を出力するものである。過去の発災時における実際の避難行動は把握がそもそも難しいことから、避難シミュレーションの結果をデータとして、最適案を検討することに意義はあると考えている。

## 4. 研究成果

### (1) マルチエージェントシミュレーション (MAS) を用いた避難シミュレータの開発

#### ①シミュレーションの概要

本研究では、MAS のプラットフォーム「artisoc」(株式会社構造計画研究所)を用いて、避難の様子を表現するシミュレーションモデルを構築した(図-1 参照)。シミュレーションモデルの空間表現形式は、「セル空間表現」を用いる。ここでは、対象地域を参考にした仮想空間を 1.2m×1.2m のセルで表現した。次に、地上へ直接出られる階段や地下街に接続する店舗の出口ごとに、出口までの距離(以降、ポテンシャル値)を表した「ポテンシャルマップ」を作成する。ポテンシャルマップは、出口のセルの値を「0」として設定し、出口から 1 セル離れる度に「1」大きい値をセルに設定する。来街者であるエージェントは、発災時にいるセルの場所から、避難す

る出口を決めてポテンシャル値が小さい方に 1 秒で 1 セル移動していく形式でシミュレーションを行う。なお、来街者はシミュレーションごとにランダムに発生させる。

## ②シミュレーションの前提条件

エージェントの通常時の避難歩行速度は 1.2m/s とした。階段移動時の避難歩行速度を、0.6m/s と設定するため、階段出口のセルにて 1 秒停止させ 2 秒で 1 セル移動することで表現する。避難先となる出口数は、地下街に接続しているビルの出口と地上へ直接出られる階段をあわせると 247 カ所あるが、災害時は、接続ビルも出入り口を閉鎖することから、地上への階段が 146 カ所と津波避難ビル 3 棟 5 カ所の合計 151 カ所とした。津波避難ビルの地下街からの来街者受け入れ数は、地上からの来街者を考慮して、大阪市の公表値の 50%を上限として、上限に達するとそれ以上は受け入れない設定とした。



図-1 作成したシミュレーションモデル  
来街者が地下街に発生している様子

## ③発災から避難完了までの流れ

まず、対象地域内に来街者をランダムに発生させる。発災後、来街者は各々が避難先として接続ビルの出口あるいは地上への階段を選択する。接続ビルの出口へと向かう場合は、その出口のポテンシャルマップを選択し、地上への階段へと向かう場合は、自身から最寄りの地上への階段へのポテンシャルマップを選択して、避難を開始する。そして、出口に到達すると避難は完了する。来街者は毎秒ごとに、自身のセルを中心とした周囲 8 セルの中からポテンシャル値が最小のセルへと移動する。ただし、8 セルの中に別の来街者がいる場合にはそのセルは選択しないものとする。また、そのセル以外で自身がいるポテンシャル値よりも小さいポテンシャルが存在しなければ、一時停止する。ここで、同時に複数の来街者が同じセルを選択した場合には、その来街者は同じセルへと移動して、同時に 1 セルに複数の来街者が存在することとなる。

## ④来街者に与えるルールの設定

来街者の避難先選択は、過去に調査した結果から、自身から一番近い最寄りのビルへと避難する場合と、来街者がかつて訪問したことがあるなどで予め知っているビル（以降、既知ビルとする）へと避難する場合に分けることとし、53%が最寄りのビル、47%が既知のビルを選択することとした。既知のビルを選択した来街者は、選択した既知のビルを避難先として目指す。次に、来街者の避難先への経路選択割合は、調査結果より、いち早く地上に出た後から避難する経路が 77.6%で、地下のみを使用する経路が 22.4%と設定した。そして、出口周辺で発生する出口の混雑は、来街者が、出口のセルから 90 セル内に侵入してから 180 秒以内に出口に到達しない場合、出口が混雑していると判断して、出口を変更する。新たに目指す出口は、出口を変更する際の自身の位置から最寄りの出口とする。本研究で扱う来街者数は、事前調査で得られた結果から基本的には 10,000 人とし、避難完了時間などの分析結果は、各避難シミュレーションを 10 回ずつ実行し、その平均値を用いている。

### (2) 複数の避難誘導方策が与える群衆避難への影響分析

#### ①誘導無し

誘導無しの場合、避難完了時間は 22 分 36 秒となった。全体の来街者のうち、90%が約 7 分で避難完了しており、残りの 10%が避難完了時間を遅らせていることがわかった。つまり、残りの 10%の来街者は出口で待ち行列を構成しており、その待ち行列の解消に時間を要している。このことから誘導により待ち行列の解消や待ち行列を発生させない取り組みが重要であるといえる。また、現在地から遠い出口へ避難しようとしている来街者も存在しており、避難完了に時間を要していることが確認できた。

#### ②指差し法

指差し法として、地下街通路の交差点部に誘導員を配置し、配置された交差点から最寄りの階段へ来街者を誘導する方策を設定した。まず、誘導員の配置数と誘導の開始時間を最適化するため、指差し法の誘導員の配置数を増減させることで最適な誘導員の配置数の検討を行うことと、誘導開始の時間を変化させ、誘導開始時間の違いが避難完了時間に与える影響の分析を行った。誘導員の配置数を増減させるにあたっては、誘導無しのシミュレーションの結果から、通過者の少ない交差点の誘導員から順に数を減少させ、全地点配置する 100%から、87.5%、75%、62.5%、50%、37.5%、25%、12.5%までと、誘導員 0%（誘導無し）の全 9 パターンで比較を行った。

誘導員の配置数を増減させることで避難完了時間は、誘導員配置割合が 0%（誘導無し）であれば 24 分 08 秒であったが、37.5%では 13 分 15 秒まで減少していることがわかった。このことから、少しの誘導員を配置し、避難誘導を行うだけで、避難完了時間の短縮が期待できることがわかった。また、誘導員を 37.5%以上配置した場合でも、避難完了時間は約 13 分で推移しており、それ以上の短縮効果を期待できない。誘導員が多く配置されることで避難先となる階段や津波避難ビルまでの移動は短くなっているものの、来街者が誘導された先での階段の処理能力を

超える来街者が集まっていることが原因である。

誘導開始の時間を変化させることで、避難完了時間は、誘導開始時間が 0 秒後（避難と同時に誘導開始）の場合、15 分 14 秒となり、誘導開始時間が 420 秒後までは約 15 分で推移する。誘導開始時間が 480 秒後あたりから避難完了時間が遅くなりはじめ、0 秒後と比較すると約 1 分の差が生じる。960 秒後以上になると急激に避難完了時間が遅くなり、1,200 秒後では 20 分 53 秒と 0 秒後と比較すると約 6 分の差が生じる。このことから、指差し法による誘導員の誘導開始時間は遅くとも 420 秒後までに行うことで効果が得られると考えられる。

### ③引き連れ法

引き連れ法として、出口の前で待ち行列が 100 人以上に達したときに、待ち行列が発生した出口へ誘導員が向かい、誘導員が待ち行列にぶつかった地点から半径 7.2m に存在する来街者を引き連れ、待ち行列の少ない最寄りの出口へ誘導する方策を設定した。ここで、誘導員は最寄りの交差点から発生し、出口へ向かうこととした。また、引き連れて誘導する先となる出口は、誘導を開始する時点で、待ち行列が 33 人以下（誘導員が誘導を始める待ち行列が 100 人としており、その 3 分の 1 の人数を設定）の最寄りの出口とした。来街者数を 10,000 人とした場合、21 分 53 秒となり、誘導無しの場合に比べ 40 秒ほど短縮された。

### ④出口封鎖法

出口封鎖法として、誘導無しのシミュレーション結果から各出口における待ち行列の人数を把握し、人数の多い順に出口を封鎖（幅員が 3.6m 以上の出口を除く）し、封鎖した出口に来街者が到達した場合は、最寄りにある封鎖されていない出口へ誘導する方策とした。出口封鎖法では、封鎖する出口の数を最適化するため、全体の出口のうちの 2%、4%、6%、8%、10%の出口を封鎖し封鎖した出口の数が避難完了時間に与える影響を分析した。

封鎖する出口の数を変化させることで、避難完了時間は、封鎖する出口の数が 0%（誘導無し）で 13 分 35 秒、2%で 10 分 59 秒と約 2 分半の短縮がみられた。しかし、4%以降になると避難完了時間は約 12 分で推移し、それ以上の避難完了時間の短縮はみられなかった。

### ⑤各避難誘導方策の比較

各避難誘導方策の影響について、指差し法の誘導員配置割合を 100%、誘導開始時間を 0 秒後、出口封鎖法の出口封鎖割合を 2%の場合について、比較する。

図-2 に示すように、総来街者数を 2,000 人から 13,000 人まで増減させ、各避難誘導方策が避難完了時間に与える影響をみると、指差し法が最も効果的であることがわかる。誘導無しの場合、総来街者数が 10,000 人を超えると急激に避難完了時間が遅くなっているが、その理由は、来街者数が増加することで待ち行列が増加し避難完了時間に影響を与えていると考えられる。引き連れ法では待ち行列の解消を目的とした避難誘導方策であることから総来街者数が 10,000 人以上になると避難完了時間に与える効果がみられる。出口封鎖法においても引き連れ法と同じく総来街者数が 10,000 人以上になると比較的避難完了時間の短縮効果がみられるが、他の誘導方策と比較すると効果が小さいことがわかった。

待ち行列の解消にかかる時間の比較と待ち行列発生人数の比較を図-3、4 に示す。図-3 に待ち行列の発生人数を示す。待ち行列が最大に発生している人数は、指差し法の場合 5,899 人、誘導無しの場合 5,172 人、引き連れ法の場合 5,154 人、出口封鎖法の場合 3,795 人となった。図-4 に、来街者 10,000 人における 100 人以上の待ち行列が発生した出口番号と待ち行列の解消にかかった時間を示す。100 人以上の

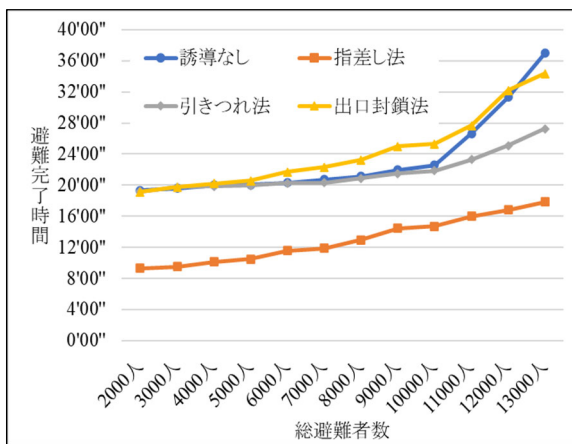


図-2 各避難誘導方策と避難完了時間

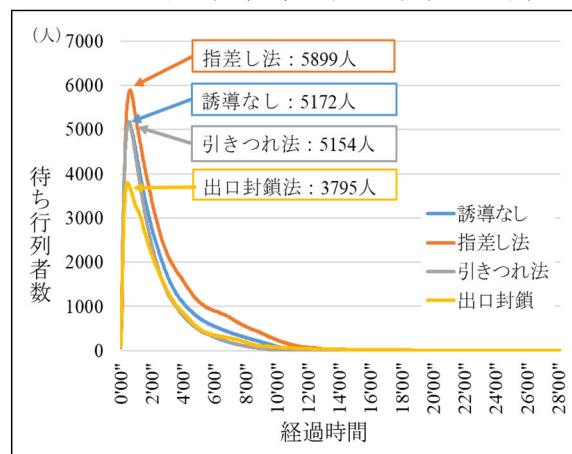


図-3 待ち行列発生人数

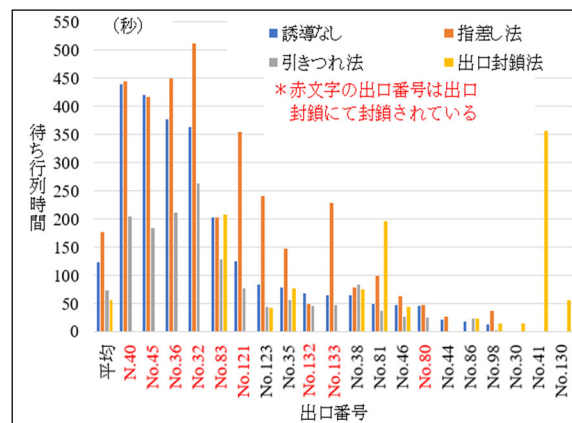


図-4 待ち行列の解消にかかる時間

待ち行列が発生した出口は、誘導無しの場合では17カ所、指差し法と引き連れ法の場合では16カ所、出口封鎖法の場合では11カ所となった。待ち行列の解消にかかる時間では、指差し法では平均2分55秒、誘導無しの場合は平均2分4秒、引き連れ法の場合は平均1分13秒、出口封鎖法の場合は平均55秒となった。

すべての避難誘導方策の場合で、避難開始してまもなく待ち行列のピークを迎え、徐々に減少していくことがわかった。また、ここでは、待ち行列が発生する出口における最大の待ち行列の人数や、解消に掛かる時間を比較しているが、発災時の位置から遠いものの、自分が知っているビルへ避難したい来街者の当該出口への到着時間も待ち行列の解消や避難完了時間にも影響していることがわかった。

誘導無しの場合、待ち行列が発生する来街者数になると避難完了時間まで時間を要する。来街者数が10,000人の場合、待ち行列が発生する出口数や待ち行列発生人数が多く、解消までの時間も長い。

指差し法の場合、避難完了時間については、各交差点で遠くへ移動しようとする来街者を近くの出口に誘導できていることが特に影響していると考えられる。誘導無しより多くの待ち行列発生人数が発生しているのは、多くの出口で来街者が同時に滞留していることが影響していると考えられる。

引き連れ法の場合、待ち行列の発生場所や待ち時間、最大待ち行列の人数も誘導無しより低くなっている。待ち行列が発生するタイミングで引き連れる点が、避難完了時間の短縮に影響があったと考えられる。

出口封鎖法の場合、避難完了時間が、最も低くなっているが、待ち行列の発生場所数や待ち時間は短く、また最大待ち行列発生人数も少ない。出口を封鎖することにより待ち行列の発生を防ぐことができるが、別の出口へ移動する時間を要していることや、その際に別の来街者と衝突し滞留が発生しているためと考えられる。

### (3) 機械学習による避難誘導方策の提案システムの開発

#### ①システムの概要

提案システムの概念図を図-5に示す。避難シミュレーションの結果を教師データとして用いて機械学習させ、発災時の来街者数に対して避難完了時間が最小となる避難誘導方策を出力させるものである。本システムでは、プログラムはPythonを使用し、機械学習の手法としてニューラルネットワークを用いた予測システムを構築している。入力と出力に用いる学習データには、避難シミュレーションにより得られた結果を用いる(表-1参照)。今回の予測に用いたデータ量は820件、学習回数は100回である。

#### ②実験内容と結果

ここでは、本システムの有効性を確認するため、避難誘導方策別に、シミュレーションの結果値と機械学習による予測値を比較した。図-6に、避難シミュレーションによる結果値と標準偏差、機械学習による予測値を示す。実験の結果、誘導無し、指差し法、引き連れ法の場合では比較的シミュレーションの結果値に近い予測値が得られた。一方、出口封鎖法においては、避難シミュレーションの結果値と提案システムの予測値の差が大きかった。このため、現状では、精度向上のためにさらに多くのデータの蓄積や改良が必要であるが、プロトタイプとしては活用可能であると考えられる。

こうしたシステムは、管理者の避難計画の検討などに活用が見込めるなどから社会的に大きな効果が得られると考えられる。

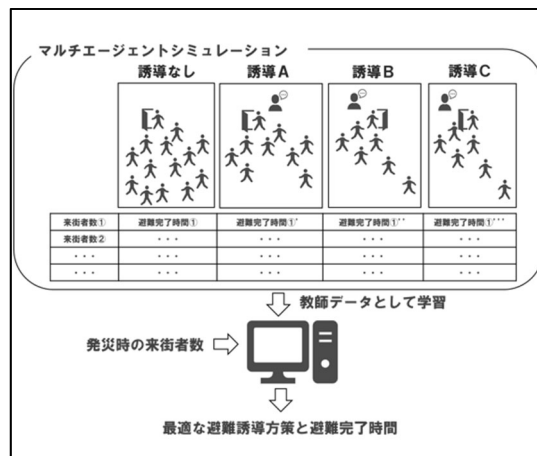


図-5 システムのイメージ

表-1 待ち行列の解消にかかる時間

学習データ (csv形式)			
項目	内容	項目数	
入力	エリアごとの避難者数	地下街を13のエリアに分け、避難開始時のエリアごとの避難者数を表す(単位:人)	13
	各誘導方策の有無	指差し法、引きつれ法、出口封鎖法のそれぞれについて、誘導を行う場合は1、行わない場合は0で表す。	3
	各誘導方策の開始時間	指差し法、引きつれ法、出口封鎖法のそれぞれについて、誘導を行う場合に、誘導の開始時間を表す。(単位:秒)	3
	指差し法の誘導地点	指差し法で誘導を行う場合に、誘導が可能な地点(全交差点144ヶ所)のうち、誘導を行う地点を1、行わない地点を0で表す。	144
出力	出口封鎖法の封鎖出口	出口封鎖法で誘導を行う場合に、全出口のうち、封鎖する出口を1、封鎖しない出口を0で表す。	247
	避難完了までの時間	避難開始時から、避難者全員が避難を完了するまでの時間を表す。(単位:秒)	1

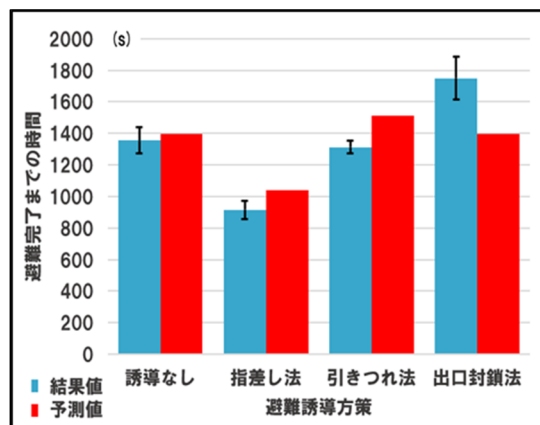


図-6 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 本井響貴, 山口行一	4. 巻 40
2. 論文標題 地下街における接続ビルの閉鎖と避難誘導方針が群衆避難に与える影響分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地域施設計画研究	6. 最初と最後の頁 pp.487-492
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 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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本井響貴, 久保山凌, 山口行一
2. 発表標題 地下街における個人の避難先選択意識と避難先の受入対応が群衆避難に与える影響分析 - マルチエージェントシミュレーションを用いて -
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集, vol.62, pp.321-324
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本井響貴, 渋谷優太, 高田悠斗, 山口行一
2. 発表標題 地下街での出口封鎖と引きつれによる避難誘導方針の効果分析
3. 学会等名 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, Vol.20, pp.37-40
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hibiki MOTOI, Yukikazu YAMAGUCHI
2. 発表標題 Analysis of the Effect of the Timing of Starting Evacuation Guidance in an Underground Shopping Mall on Crowd Evacuation During a Tsunami Disaster -Using multi-agent simulation-
3. 学会等名 39th IAHR World Congress
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本井響貴, 白井泰斗, 山口行一
2. 発表標題 地下街における来街者の避難誘導に関する検討 - マルチエージェントシミュレーションを用いて -
3. 学会等名 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, Vol.19, pp.101-104.
4. 発表年 2021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