

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06722

研究課題名（和文）階段内避難予測モデルの構築に基づく順次避難シナリオの最適化手法の開発

研究課題名（英文）Study on Optimization Method of Phased Evacuation using Mathematical Model of Pedestrian Traffic Flow on Stairs

研究代表者

水野 雅之（Mizuno, Masayuki）

東京理科大学・理工学研究科国際火災科学専攻・准教授

研究者番号：40366448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高層事務所ビルでの全館避難において、順次避難を効果的に実施する手法を開発することを目的とした。ここに、順次避難において目標とする解は、過度な混雑（長時間の滞留状態）を避け、また避難階での階段からの避難流動が途切れないことである。また、縦穴を介した煙流動に配慮して、出火階及び直上階の次に、建物上層階などの避難を優先させることである。

本研究では、2つの高層事務所ビルでの全館避難訓練の調査の実施、調査によって撮影した画像で避難流動を分析するための画像認識ツールの開発、エージェントモデルによる階段避難シミュレーションのプロトタイプの開発、階段避難流動予測手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実際の全館避難訓練で順次避難を効果的に実施できた。また、避難訓練における階段内の避難流動に関するパラメータを抽出し、階段避難流動予測手法を開発した。開発した手法を用いて階段内の避難流動を予測し避難シナリオ（各階のフェイズ分けと、各フェイズ対象階への避難指示を出すタイミングの設定）を評価できる。階段の寸法や扉配置により避難流動に関するパラメータが多少変わるため、避難訓練を調査することで適用可能である。

画像認識ツールや階段避難シミュレーションのプロトタイプは、改善の余地があるが、それぞれリアルタイムでの階段内避難流動の把握や避難流動予測を俯瞰的に可視化するツールとして活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a method to effectively perform phased evacuation from a high-rise office building. Here, the target solution in phased evacuation is to avoid excessive congestion (long-term waiting state in stairwell) and to keep the evacuation flow from the stairs on the evacuation floor uninterrupted. In addition, in consideration of the smoke flow through the vertical shafts such as elevator shafts and ducting spaces, prioritize the evacuation of the upper floors of the building next to the fire floor and the floor right above. In this study, we conducted a survey of the evacuation drills in two high-rise office buildings, and developed an image recognition tool to analyze the evacuation flow from the images captured by the survey, a prototype of evacuation simulation in stairwell using an agent-based model, and an evacuation flow calculation method using a spreadsheet.

研究分野：火災工学

キーワード：階段避難 順次避難 避難流動予測 避難訓練 画像認識 避難シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

従来、各階から階段に入る群集と階段内を下りる群集との合流比を調査する被験者実験等が行われてきた。この合流比は、各階からの避難が完了する時間を予測する上で重要な要素である。また、近年では、高層事務所ビルの避難訓練時の階段内の様子をビデオ撮影し、避難流動の分析が行われている。研究代表者もこの研究グループに参画し、訓練調査の企画や実施、調査データの分析を実施してきた。この訓練では、全館一斉に避難するのではなく、混雑による二次災害や身体的、心理的負担を和らげる目的で複数階毎に避難開始をすらず順次避難を採用している。

防火対策の充実により火災は抑制されるはずだが、何らかの原因で全館避難が必要になる場面はある。火災時の高層建築物から全館避難は、出火階とその近傍階からの避難を優先し、その後で他の階から避難するとされているが、「他の階」の避難方法について具体的な言及はないため、通常は一斉同時避難に近い様相を呈することになる。これでは大変な混雑を来し、中には避難を始めてから30分以上途中で待ち状態が発生する可能性も指摘できる。従って、順次避難を採用し、混雑緩和と共に火災等の危険要因の状況に応じた避難誘導を実現する必要がある。

2. 研究の目的

階段内の空間特性に応じて詳細に避難行動モデルを構築した避難シミュレーションはない。また、階段内の避難行動の特徴を捉えれば、エージェントの移動で人の動きを再現する避難シミュレーションを用いなくとも、階段内の人々の流動量や滞留人数を数式で表し、これらを逐次計算で求める避難流動予測手法を構築できる。本研究では、高層事務所ビルの全館避難訓練時の階段踊り場の映像記録を用いて、避難流動予測手法を開発する。また、階段幅や踊り場面積、扉配置などが異なる階段における避難流動予測への応用を考慮し、エージェントによる階段内の避難シミュレーションのプロトタイプを開発する。避難流動予測手法は、全館避難における順次避難シナリオに応じた階段内の滞留時間を評価することによって避難誘導の高度化を図る。

3. 研究の方法

2つの高層事務所ビルにおける全館避難訓練を対象に、階段内にビデオカメラを設置し、主に入出口のある踊り場を上部より撮影し、避難者の階段の降下状況を把握する。撮影した映像から人の通過人数を経過時間と紐付けてデータセットを作成する。データセットは、各階の踊り場における①各階から階段踊り場への進入、②上階からの段部から踊り場への進入、③踊り場から下階への段部への進入の3つの境界における人の通過を読み取って作成された。この作成作業の効率化を目的に画像認識による人の通過を認識するソフト開発を外注した。

避難訓練における階段内避難流動データセットを用いて、各境界の流動量(人/s)や各階の踊り場及びそれ以外の部分(中間踊り場とその上下の段部)に存する避難者人数の推移を把握した。この分析を通して、階段内を各階の踊り場とそれ以外の部分(各階の踊り場をつなぐ領域)に領域分割してそれらの一連の計算領域において人の流動量を規定した階段避難流動予測手法を開発した。この手法における避難流動に関するパラメータ(各境界の避難者の流動量の容量、踊り場やそれ以外の部分の避難者滞在人数の容量、上階から踊り場と各階から踊り場へ進入する合流比率など)は、前述の避難訓練調査データセットより分析した結果を用いる。開発した階段避難流動予測手法を用いた計算結果と避難訓練調査データセットとの比較によりその妥当性を確認する。また、滞留時間の評価を行うため、流動量が一定以下になった時間帯を抽出する。

エージェントによる階段内の避難シミュレーションのプロトタイプの制作は、階段をひとつながりの通路と仮定した空間構成とし、その中を避難者が順次避難するポテンシャル法に基づくシミュレーションモデルを外注した。

4. 研究成果

(1) 階段踊り場における避難流動状況の把握

図2に示すように、避難訓練において各階の階段踊り場を撮影し、避難流動状況を把握した。

(2) 画像認識による避難流動の把握

撮影した映像は1秒間につき30フレームの画像で構成されており、その動画を機械学習によって人の頭(頭髪の色等、ヘルメットの着用等の条件を学習させた)を認識し、階段踊り場での移動軌跡を把握できるプログラムを導入した(図3)。人の検出精度は100%ではないため、検出に失敗した人の通過を補正してデータセットを作成した。

(3) 建物Aでの順次避難シナリオの改善例

2017年の避難訓練においては、過度な滞留の発生を効果的に抑制できる避難シナリオを設定することに成功していた。しかしながら、次のように避難階における階段出口からの避難流動が途切れる時間が発生したため、これを改善するように2018年の避難訓練では図4に示すように避難フェイズ分けはそのままに第3及び第4フェイズの避難開始をそれぞれ1分早めることで改善を図った(図4)。

建物Aにおける2017年及び2018年に実施した避難訓練において、階段の1階出口を通過する避難者数をカウントした(図5)。時間経過に伴い避難者数は増大したが、概ね900秒で点線と実線が交差している。これは2018年の実線は時間経過に応じて累積避難者数が上昇し続けたのに対して、2017年の点線は900秒辺りで一度避難者数の上昇が停滞したことを表している。

このように2018年の避難シナリオを見直して効果的に順次避難を実施できたことを確認した。

(4) 避難訓練における各階からの避難と階段降下状況の把握

各避難訓練では、放送により避難指示を与え、在館者が避難した。建物Aの避難シナリオは前節に示したとおりであり、建物Bの避難訓練では基本的に出火階とその周辺の階からまず避難し、その次にそれよりも上にある全ての階から避難した(図6)。2019年は出火階を2階と設定し、第2フェイズが5~20階の16階層(一部の階は参加者が少ない)から同時に避難した。2018年も第2フェイズで14~20階の7階層が同時に避難した。それ以降は、出火階より下の階で上階から最大4階層ずつ順に避難した。

建物Bにおける2019年の避難訓練の調査結果を図7~8に示す。西階段では、第2フェイズにおいて早い段階で避難した5~6階、11~12階は比較的スムーズに階段に避難したが、例えば16階や18階、19階はある時点から階段への避難が停滞したことが分かる(図7)。計測者の階段降下状況を見ると、上層階ほど階段降下に要した時間が長くなった傾向が見られた(図8)。

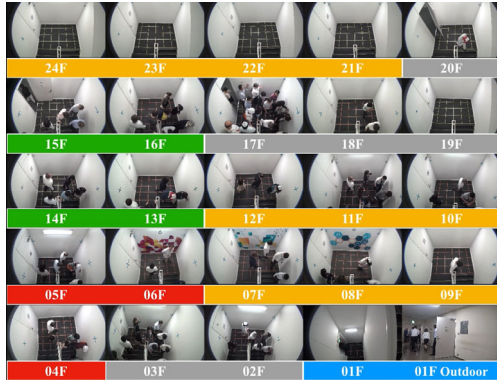


図2 建物Aにおける各階の階段踊り場を撮影し同期させた映像のキャプチャー画像

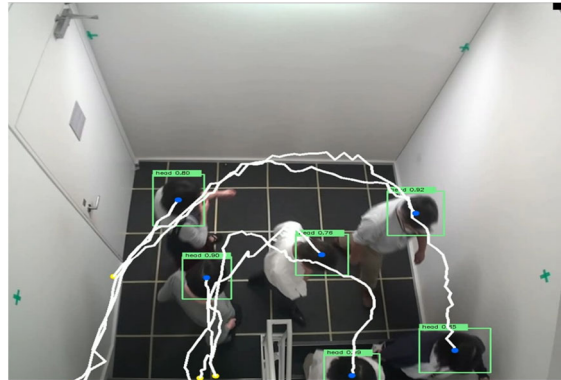
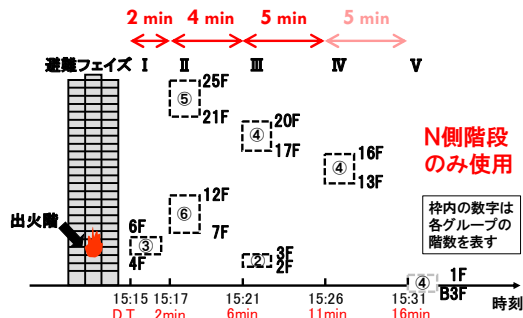


図3 画像認識による避難者の検出例

□ 4階を出火階(低層階での出火想定)



□ 4階を出火階(低層階での出火想定)

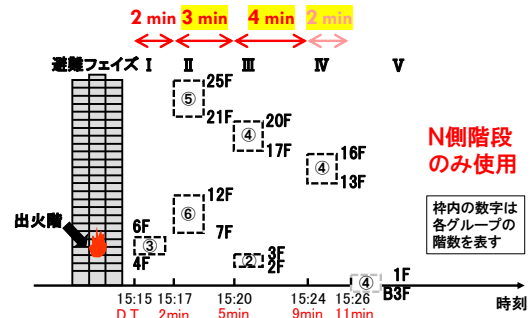


図4 建物Aにおける避難訓練のシナリオ(左:2017年,右:2018年)

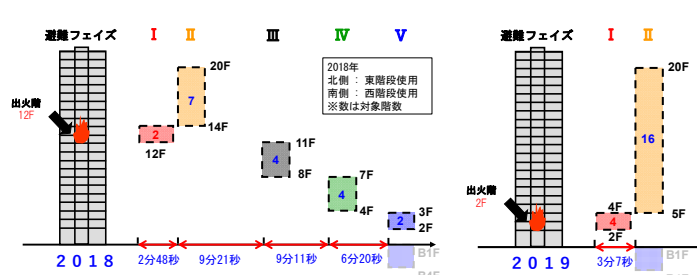
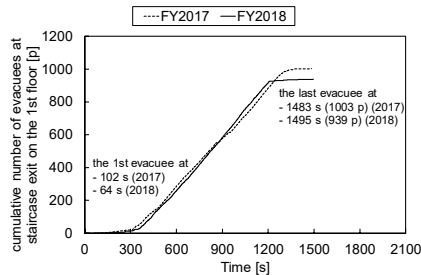


図5 階段出口の避難累積人数(建物A) 図6 建物Bの避難訓練(左:2018年,右:2019年)

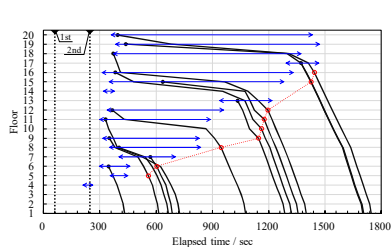
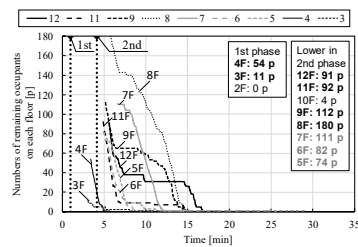
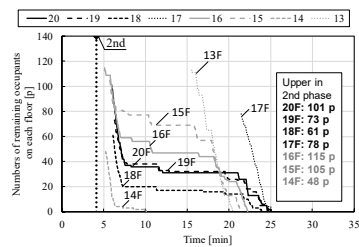


図9 各階の階段への避難未完了者の推移(建物B,東階段,2019年)

図8 各階からの先頭集団と階段を降下した計測者の階段降下状況

(5) 階段避難流動予測手法の開発

避難訓練における調査データより、①各階から踊り場に流入する避難流動、②上階からの段部より踊り場に流入する避難流動、③各階の踊り場から下階への段部に流出する避難流動の3つの境界における流動量の上限值と、各階の階段踊り場とそれ以外の部分（中間踊り場とその上下の段部）の滞留人数の上限值を設定した（図10）。図10では、建物Aの調査データに基づいて設定したパラメータを示したが、階段の仕様（寸法や扉の配置）によってこれらは異なる値を設定する必要がある。例えば、建物Bでは、踊り場とそれ以外の部分の条件設定において、上述の①と②の境界での流動量は0.95 p/s、③の境界での流動量は1.0 p/sとし、滞留時の容量は踊り場で9人、それ以外の部分で25人を採用した。なお、①と②の合流に伴う流動量は、それぞれの流動量の比で分配されることとした。

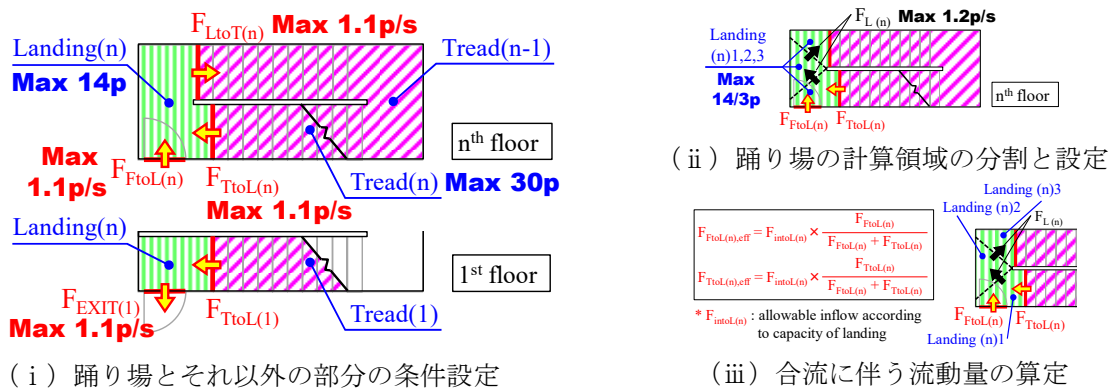


図10 階段踊り場及びそれ以外の部分での滞留容量と各境界における流動量の設定（建物A）

建物Bの2019年の東階段を対象とした計算結果と避難訓練における調査データとの比較を図20～21に示す。段部から踊り場への流動量を見ると、調査結果に対してやや早い段階で流動が高い値を示したことで早く避難が完了した結果を示した（図11）。避難訓練では階段内で長時間滞留した後に徐々に避難流動が回復したが、その回復の流動量の上昇が15階より上の階において計算では高く算定されてしまった結果が表れたと考えられる。

階段踊り場における滞在人数においては、上層階においてやや過小評価となった階があったものの概ねその増減傾向は捉えられている。5～8階で見られたような徐々に踊り場の滞在人数が減少する傾向は追従できなかった（図11）。

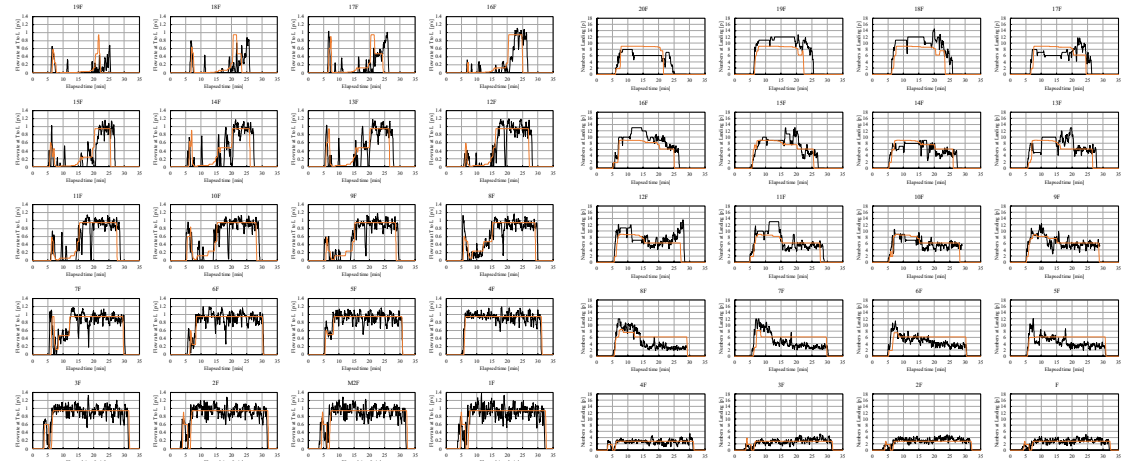


図11 調査結果と計算結果の比較（建物B，東階段，2019年。左：段部→踊り場の流動量，右：踊り場人数。黒：調査結果の移動平均，橙：計算結果）

(6) 階段内の滞留時間の評価手法

階段内における滞留時間を評価することを目的に、避難流動が停滞する時間を抽出する手法を開発した。具体的には、避難訓練における調査データや避難流動予測計算手法から得られた避難流動に関するデータを対象に、例えば8秒間に1人未満の通過となった時間帯を抽出することで滞留時間を評価する。ここに、何秒間に何人未満という部分の設定は、任意に設定することが可能であるが、ここでは3階層において同時に合流し、その間の階段が滞留した状態を仮定した場合の流動状況を想定して設定した。具体的には、大雑把な検討として1秒間に1人が通過可能な状態が、合流によって通過容量が半減すると仮定すれば2秒間に1人となり、3階層で連続した滞留状態と合流が発生した場合下から3階層目の合流では8秒間に1人の通過しか生じな

いこととなり、この状態を滞留の定義の境界条件と採用した。

図 12 に滞留時間帯を調査した結果の一例を示す。避難訓練における調査データを対象としたものでは、滞留が続いた中でも断続的に移動が発生した状況が伺える（図 12 左）。一方、階段避難流動予測手法による計算結果においては、断続的な移動は表現されず滞留時間帯が明確に表現された（図 12 右）。精緻に滞留状態を予測するには改善の余地はあるが、避難シナリオを評価する上で滞留発生時間帯を一定時間以下に制限することを目的とした場合、計算結果は調査結果における特に混雑が集中した時間帯を捉えられていると考えられる。

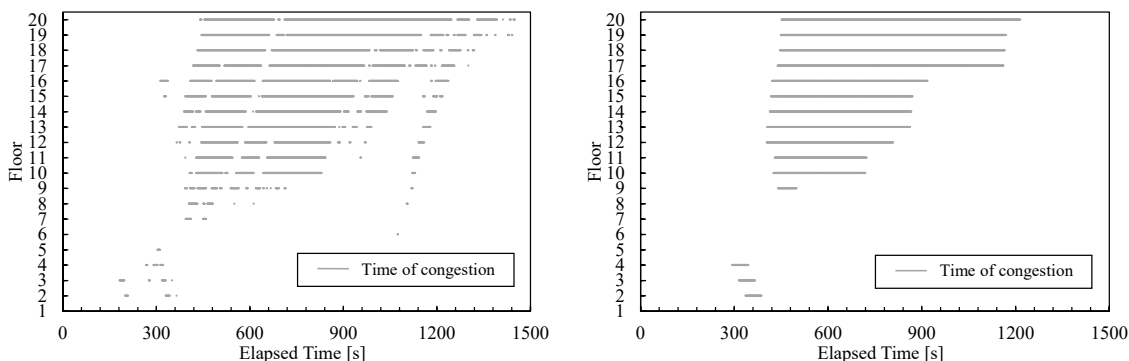


図 12 滞留発生時間帯の算定結果（建物 B，東階段，2019 年。左：調査結果，右：計算結果）

(7) エージェントモデルによる階段避難シミュレーションのプロトタイプの開発

階段室に前室を設けた空間モデルを構築し、その前室で避難者を指定した時間に指定した発生速度で発生させる仕様とした。こうした空間を対象に、周壁の境界面でのポテンシャル勾配と最終避難口である 1 階避難口のポテンシャルを 0 として設定し、空間全体のポテンシャル分布をポアソン方程式に基づいて求め、ポテンシャル勾配が低い方向にエージェントが移動することとした。エージェントの移動は、ポテンシャルが低い方向に移動するが、周壁や他者との衝突回避のため斜め 30° と 60° の方向にも移動可能なモデルとし、移動できなかった場合はパーソナルスペース（初期値は直径 1 m）を 0.3m ずつ減じて、それに応じて移動速度（初期値は 0.65 m/s）を比例して減じたモデルとした。

開発した階段避難シミュレーションでの解析結果の一例を図 13 に示す。このプロトタイプは、重要な解決すべき点があるため、引き続きその改善を図る必要がある。主な解決すべき点は次の 2 点である。各階からの避難流動と上階からの避難流動が合流した場合に、避難訓練では主に 2 列を形成し避難したが、1 列で避難している。また、アーチアクションによって停止した場合、強制的にこれを崩す操作を導入したが、停止状態の判定において階段内の停止状態に応じた強制介入としたため、各階の前室での避難者が停止した場合、各階の階段内の避難流動がなくなる限り前室から避難者が避難しない。これにより上階から避難が完了するが、これは避難訓練で見られたように上階ほど長時間滞留した結果と逆である。引き続きこれらを解決するためのアルゴリズムを導入し更新する計画である。



図 13 解析結果における階段扉通過時の避難者の合流状況（建物 B，東階段，2019 年を対象）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 水野雅之, 野竹宏彰, 吉野攝津子	4. 巻 68(1)
2. 論文標題 超高層集合住宅における避難訓練の調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 火災	6. 最初と最後の頁 8-13
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 無
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 -
1. 著者名 門倉博之, 水野雅之, 関澤愛	4. 巻 68(1)
2. 論文標題 高層事務所ビルにおける全館避難訓練の実測調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 火災	6. 最初と最後の頁 2-7
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 無
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 -
1. 著者名 Hai Duy Bui, Masayuki Mizuno	4. 巻 68(2)
2. 論文標題 International Comparison of Fire Safety Regulations on Means of Escape among Vietnam and Other Countries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 45-62
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 -
1. 著者名 Guan-Yuan Wu, Masayuki Mizuno, Seongkyung Park	4. 巻 50 (6)
2. 論文標題 A brief introduction of emergency evacuation drill model and investigation method for high-rise buildings in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 POLICE SCIENCE BIMONTHLY	6. 最初と最後の頁 31-48
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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Seongkyung Park, 水野雅之, 土方佑一郎, 藤井皓介, 佐野友紀, 奥山将行
2. 発表標題 高層事務所ビルにおける全館避難訓練の実測調査
3. 学会等名 日本火災学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 MASAYUKI MIZUNO, KOSUKE FUJII, HIROYUKI KADOKURA, FUQIU WANG, TOMONORI SANO, and AI SEKIZAWA
2. 発表標題 Development of Mathematical Model of Evacuation Flow in A Staircase Based on A Survey Result of A Real Evacuation Drill in A High-rise Office Building
3. 学会等名 International Association for Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水野雅之, 藤井皓介, 門倉博之, 佐野友紀, 関澤愛
2. 発表標題 高層オフィスビルでの順次避難による全館避難訓練時の階段内の避難流動の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fuqiu Wang, Masayuki Mizuno
2. 発表標題 Analysis of Optimal Scenario of Total Evacuation in High-rise Office Buildings
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤井皓介, 水野雅之, 名角貫志, 田中教之, 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀
2. 発表標題 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行にカンする実測調査とその分析 その17 - 順次避難計画の作成と合流及び滞留の発生に対する計画の効果 -
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 名角貫志, 水野雅之, 田中教之, 王福秋, 藤井皓介, 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀
2. 発表標題 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析 その18 - 階段での混雑回避を目指した順次避難計画下の避難流動の分析
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 朴聖經, 水野雅之, 土方佑一郎, 関澤愛, 藤井皓介, 佐野友紀, 奥山将行
2. 発表標題 高層事務所ビルの全館避難訓練での避難誘導調査 その2 順次避難シナリオによる階段内避難流動
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野雅之, 朴聖經, 土方佑一郎, 鈴木駿太, 関澤愛, 藤井皓介, 佐野友紀
2. 発表標題 高層事務所ビルにおける全館避難訓練の実測調査 その3 避難訓練参加者へのアンケート調査結果
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朴聖經, 水野雅之, 土方佑一郎, 鈴木駿太, 関澤愛, 藤井皓介, 門倉博之, 佐野友紀, 奥山将行
2. 発表標題 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析 その19 階段室内に警備員を配置した避難誘導と順次避難シナリオの改善
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木駿太, 朴聖經, 水野雅之, 関澤愛, 藤井皓介, 門倉博之, 佐野友紀
2. 発表標題 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析 その20 階段踊り場での避難誘導に関する画像解析
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seongkyung Park, Masayuki Mizuno, Tomonori Sano, Kosuke Fujii, Ai Sekizawa, Hiroyuki Kadokura
2. 発表標題 Study on Pedestrian Flow Inducement Effect in Staircase at evacuation drill of a High-rise Office Building
3. 学会等名 13th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seongkyung Park, Masayuki Mizuno, Kosuke Fujii, Tomonori Sano, Ai Sekizawa
2. 発表標題 Evacuation Method in High-rise Office Building: Which would be better, simultaneous evacuation or phased evacuation?
3. 学会等名 10th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井皓介, 朴聖經, 水野雅之, 佐野友紀, 門倉博之, 関澤愛
2. 発表標題 階段室における観測調査方法および流動状況の概要, 一斉避難を採用した高層事務所ビルの避難訓練における避難行動の調査 その1
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鄭英博, 朴聖經, 水野雅之, 藤井皓介, 佐野友紀, 門倉博之, 関澤愛
2. 発表標題 避難者の合流や何らかの原因による滞留の発生と解消の伝播に関する分析, 一斉避難を採用した高層事務所ビルの避難訓練における避難行動の調査 その2
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朴聖經, 鄭英博, 水野雅之, 藤井皓介, 佐野友紀, 奥山将行, 関澤愛, 門倉博之
2. 発表標題 滞留の発生・解消時の階段内の密度と流動量の関係の変化, 一斉避難を採用した高層事務所ビルの避難訓練における避難行動の調査 その3
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朴聖經, 鄭英博, 水野雅之, 藤井皓介, 佐野友紀, 奥山将行, 関澤愛, 門倉博之
2. 発表標題 避難訓練参加者へのアンケート調査結果, 一斉避難を採用した高層事務所ビルの避難訓練における避難行動の調査 その4
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井皓介
2. 発表標題 超高層事務所ビルの避難訓練結果から得られた知見と課題
3. 学会等名 日本火災学会シンポジウム「高層避難の多様性から見る今後の課題」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomonori Sano, Enrico Ronchi, Yalong Wu, Ai Sekizawa, Masayuki Mizuno, SeongKyung Park, Kosuke Fujii, Hiroyuki Kadokura
2. 発表標題 DESCENDING EVACUATION ON STAIRCASES: HOW ACCURATE ARE MODELS IN REPRESENTING MOVEMENT WITHOUT MERGING?
3. 学会等名 15th international conference and Exhibition on fire science and engineering (INTERFLAM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	関澤 愛 (Sekizawa Ai)	東京理科大学	
研究協力者	佐野 友紀 (Sano Tomonori)	早稲田大学	
研究協力者	門倉 博之 (Kadokura Hiroyuki)	東北学院大学	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤井 皓介 (Fuji i Kosuke)	消防研究センター	
研究協力者	呉 貫遠 (Wu Guan-Yuan)	中央警察大学	