

# MASを用いた在館者分布を考慮した避難誘導に関する研究

## A Study on Evacuation Guidance Considering the Distribution of People Using MAS

○山邊 友一郎\*<sup>1</sup>、福村 知隼\*<sup>2</sup>  
Yuichiro YAMABE\*<sup>1</sup> and Chihaya FUKUMURA\*<sup>2</sup>

\*1 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士 (工学)

Association Professor, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

\*2 鹿島建設株式会社

KAJIMA CORPORATION

キーワード：MAS; 在館者分布; 避難誘導

Keywords: Multi Agent Simulation; Distribution of People; Evacuation Guidance.

### 1. はじめに

高層建物では、火災や地震の発生により在館者の全館避難が必要となった場合、避難の方法が課題となる。全館避難方法のうち、すべての階の避難者が同時に避難する「一斉避難」では、階段室内における滞留が発生し、群集事故などの二次災害や、出火階などの避難の優先度の高い階からの避難が遅れるといった恐れがある。また、使用不能な階段が生じた場合、避難者に対し使用すべき階段の周知が必要である。そのため、各階の避難者に対して、使用階の指定や待機および避難開始を呼びかける「誘導付き避難」を実施し、階段室内の混雑状況を適切に制御することで、安全な避難を実現することが求められる。しかしながら、災害が発生した際に、建築物内部に設置された防災センターの職員が、在館者の分布や使用不能な階段といった建築物内部の状況を把握し、階ごとの待機時間や避難開始の順序を短時間で適切に決定することは困難である。

近年、IoT 技術を建築物に活用する動きが進み、建物内部の状態や人の動きに関する情報をリアルタイムに得ることが可能となっており、得られた情報を予測シミュレーションや避難誘導に活用することが期待されている<sup>1)</sup>。非常時の避難誘導に用いるために建築物内部の在館者分布を把握する研究は既に行われており、防犯カメラと画像認識技術を組み合わせる方法<sup>2)</sup>や、赤外線人感センサを用いた方法<sup>3)</sup>が提案されている。また、得られた情報をシミュレーションに基づき避難経路の自動立案に活用することについての研究例もある<sup>4)</sup>。しかし、高層建物の避難上の課題である階段室内滞留を考慮した避難誘導方法の自動立案の方法については、十分に研究されていない。

本研究では、上記の背景を踏まえ、非常時の高層事務所建築物において、建物内部の状況を反映して効果的な避難誘導方法を自動立案するシステムを提案することを目的とする。避難誘導においては、高層建物の全館避難で支配

的な要素となる階段室内の流動性に注目し、在館者の人数情報をもとに滞留の発生を抑制することで安全性を確保しながら、同時に避難の迅速性にも配慮する。また、提案する方法によって実現される避難について、マルチエージェントシミュレーション (MAS) を用いた実験を行い、その有効性を検証する。システムの構築にあたっては、階段室内における避難者の行動特性を考慮する。

### 2. 対象建物

対象建物は地上 20 階建ての高層事務所建築物とする。平面計画は、階段室を階エリアの両端部に 1 か所ずつ、計 2 か所設けたダブルコア型を想定する (図 1 参照)。2 階から 20 階までの階 (「基準階」と呼ぶ。) は同一の平面計画とし、各階に滞在する標準的な人数を 100 人とする。階高は全ての階で 3760[mm]とする。

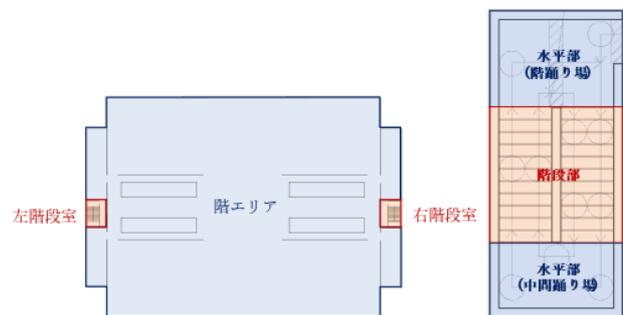


図 1 対象建物

全ての居室から、主要な廊下を通じて、両端部に設けられた「左階段」と「右階段」を使用することができる。各階段室は最上階から 1 階まで折り返し階段により直通し、1 階の階段室の出口は建築物外部の地上に通じる。避難は、各居室から階段室に至るまでの部分と、階段室を下る部分に分けられる。本研究では、前者の階段室以外にあたる部

分を「階エリア」、後者を「階段室」と呼ぶ。避難シミュレーションでは、避難経路上の平坦な部分と階段状の部分での歩行速度の違いを考慮する必要がある。本研究では主に階段室内の避難者行動をシミュレーションの対象とし、段差を有する部分を「階段部」、それ以外の踊り場（階エリアより接続する「階踊り場」と、中間部の折り返し部分に設ける「中間踊り場」を含む）の部分で「水平部」と呼ぶ。ただし、「階段部」は最上段の段鼻より開始し、各段の段鼻を結ぶ斜線が踊り場と交わる位置までとする。

### 3. シミュレーションの設定

#### 3.1. 行動ルール

図2に避難者の行動ルールを示す。避難者は、幅58[cm]、厚み30[cm]の大きさを持つ。平均歩行速度は平均で1.2[m/s]、標準偏差0.033[m/s]とする正規分布に従う疑似乱数を用いて設定した。避難では階段のみを利用するとし、階段室内では2列になって移動し、歩行速度の大小に応じて列を移動する動線乗換を実装した。また、進行方向の混雑状況に応じて減速や停止を行う設定とした。なお、階段避難時の避難者の行動については、文献<sup>5)</sup>を参考に設定した。

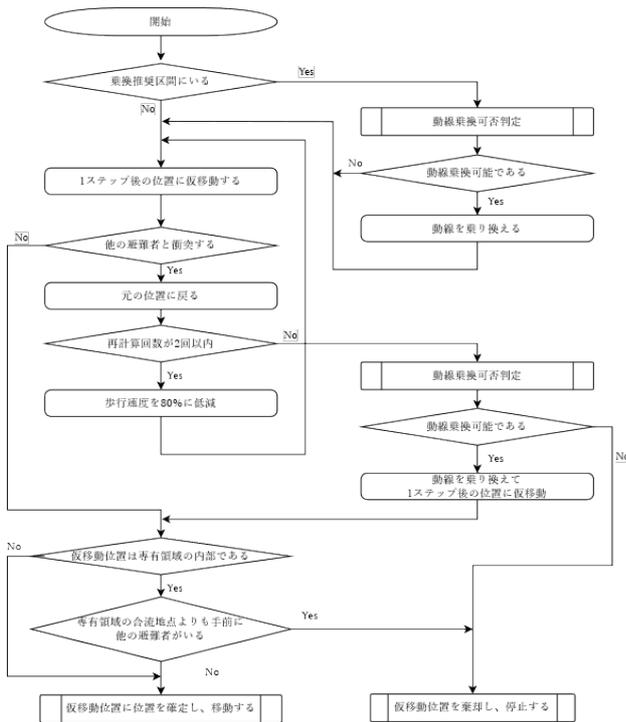


図2 避難者の行動ルール

#### 3.2. 実行環境

シミュレーション実行環境はJavaを用いてGUI環境で構築した(図3参照)。避難者や動線、出入口、壁等のモデル化された要素の位置は、二次元平面上の座標で管理される。タイムステップは0.1[s]とした。実行画面上では、階

段室と避難者が描画され、シミュレーション空間上の避難の進行状況を確認できる。階段室は、左階段室と右階段室に分けて上階から下階の順に並べて、実行画面の中央部に表示する。避難者は通常の状態では、黒く縁取られた白塗りの楕円形で描画される。ただし、減速や動線乗換などで前の避難者を回避できず、停止しているステップでは、黒塗りで表示される。

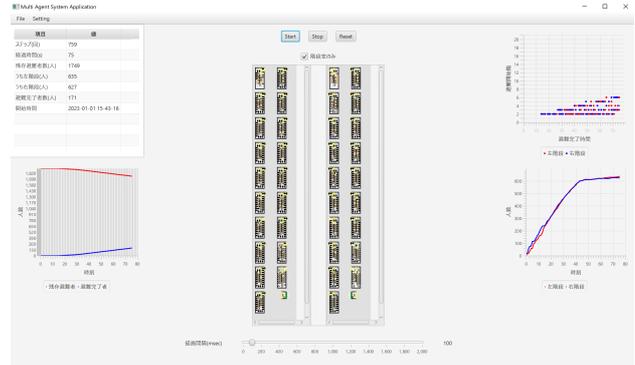


図3 シミュレーション実行画面例

#### 3.3. 避難開始判断法

階段には最大収容人数が存在し、滞留は上階へ伝播する。本方法により避難開始を判断する階は、在館者分布情報から階段室内の避難者の人流を予測し、当該階から避難者が階段室へ流入した場合に、階段室内滞在人数が階段室の収容能力に対して一定の余裕度を保てると判断した場合に避難を開始することにした。図4に流入可否判定法基本フローを示す(k階: 本判断を行う対象階)。

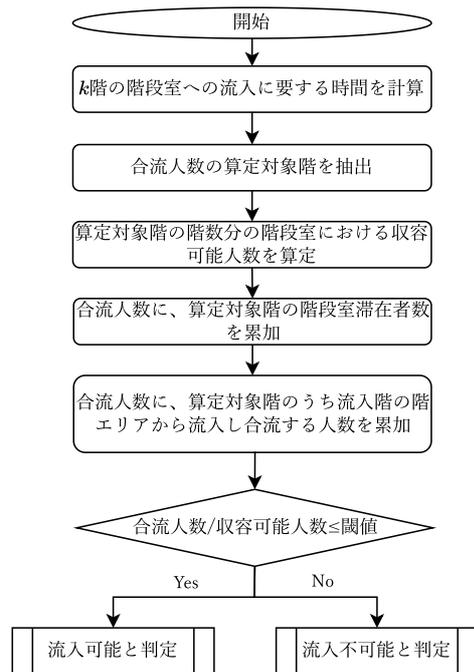


図4 避難開始順序のコーディング

### 3.4. 避難開始順序の最適化

避難開始判断法に基づき各階の避難開始時間が制御されることを前提としたとき、全館避難完了時間を最小化する各階の避難開始順序を GA<sup>6)</sup>で探索する。本研究では 20 階建ての建物を想定しており、避難階である 1 階を除く 2~20 階の順列と使用階段のグループ分けを規定する補助遺伝子によりコード化する (図 5 参照)。

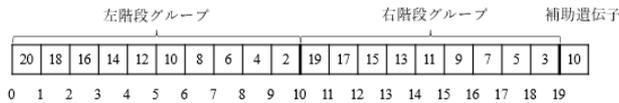


図 5 避難開始順序のコーディング

## 4. 実行結果

### 4.1. ケーススタディの設定

階段室内での避難者の行動を考慮して、表 1 に示す 4 パターンの実験を行った。各実験の概要を以下で説明する。

表 1 ケーススタディの設定

実験	実験 0-a	実験 0-b	実験 1	実験 2
避難方法	一斉避難	一斉避難	誘導付き避難	誘導付き避難
使用階段の指定	なし	あり	あり	あり
避難優先階の指定	なし	なし	なし	あり (10, 11)

**実験 0 一斉避難**：全ての階の避難者が実験開始と同時に階段室流入を開始する。使用階段の指定の有無を変えて、0-a と 0-b の 2 種類の実験を行う。

**実験 0-a 一斉避難・使用階段指定なし**：使用階段を指定しない一斉避難のシミュレーションを行う。避難者は左右にある避難階段のうち、近い方の階段を利用する設定とした。

**実験 0-b 一斉避難・使用階段指定あり**：使用階段を指定する一斉避難シミュレーションを行う。つまり、偶数階に存在する避難者は左階段を利用し、奇数階に存在する避難者は右階段を利用する設定とした。

**実験 1 避難優先階指定なしでの最適化**：避難開始判断法 (閾値 0.3) を導入する誘導付き避難を行う。さらに、全館避難完了時間の最小化を目的関数として、避難開始順序を最適化する。

**実験 2 避難優先階指定ありでの最適化**：実験 1 と同じく避難開始判断法 (閾値 0.3) を導入する。さらに、避難優先階 (10 及び 11 階) を設定するため、生成される解の避難順序の 1 位となるよう固定して最適化する設定とした。これは、特定の階に優先すべき避難者がいる状況に対応できるかを検証する条件である

### 4.2. 実行結果

4 ケースのシミュレーションの実行結果のまとめを表 2 に示す。表中の混雑度は、式(1)で計算され、避難者の流動性が悪化するほど大きな値となる。また、各ケースにおける混雑度の推移を図 6 に示す。

表 2 実行結果まとめ

実験	実験 0-a	実験 0-b	実験 1	実験 2
全館避難完了時間(s)	538.9	571.1	579.2	578.7
最大混雑度	0.638	0.590	0.315	0.295
平均混雑度	0.249	0.223	0.125	0.122

$$\text{混雑度} = \frac{\text{階段室内停止人数}}{\text{階段室内避難者数}} \quad (1)$$

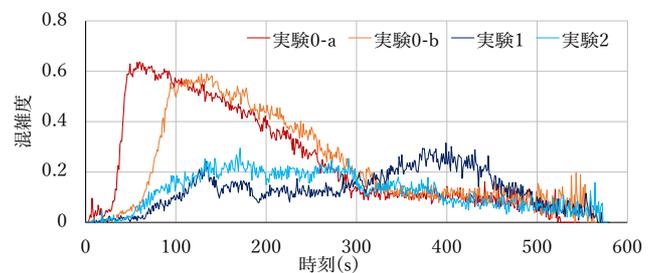


図 6 混雑度の推移

## 5. 考察

### 5.1. 各ケースについて

実験 0-a の結果より、0~50[s]では、ある階から流入した避難者が下階の避難者と合流するようになると、外側の動線の合流部を起点に停止した避難者の群が形成されて、急激に混雑度が上昇する。50[s]以降は、避難完了者が増加することに伴い、階段室の混雑度は順調に減少する。300[s]以降は、新たな避難者の流入がなく、合流による停止がなくなるため、混雑度は低く推移していく様子が確認できた。

実験 0-b の結果より、混雑度が 0 になる時間は避難が完了する時間を示す。実験 0-a と 0-b を比較すると、0-b は避難完了時間が約 30[s]長くなった。これは、各階の階段室への流入口が 1 か所に限定され、流入効率が低下したことによる。同じ理由で、初期のピークを迎えるまでの時間も 50[s]程度遅くなるとともに、最大混雑度が減少していることがわかる。使用階段を指定することで、避難完了時間は伸びるが、混雑度を抑える点では効果があることが確認できた。これを踏まえて、以降の実験 1、2 では、実験 0-b と同様に階ごとに使用する階段を指定する設定でシミュレーションを行うこととした。

実験 1 では、避難開始判断法による誘導付き避難を導入するとともに、GA を用いて最適な避難開始順序を探索し

た結果、避難完了時間は実験 0-b よりも約 8[s]増加したが、混雑度を半分程度にまで減少させることができた。避難開始判断法に基づく制御により、階段室流入の時機が調整され、混雑度の急上昇や最大混雑度が抑えられたことによる。一般に、待機を要する避難は流入に至るまでのタイムロスを生じるため、一斉避難と比べて全館避難完了時間が長くなる。しかし本手法では、安全性を向上させるとともに、避難時間の増加を 8[s]程度の増加にとどめている点で効果的であったと考える。

実験 2 では、実験 1 の設定に加えて 10、11 階を避難優先階として指定する設定でシミュレーションを実施した。その結果、実験 1 と同様、全館避難完了時間が一斉避難より長くなる代わりに、混雑度を低く抑えた避難を実現できた。また、実験 2 では避難優先階として指定した 10・11 階が階段室内滞留の影響をほとんど受けず、集団的に流入できていることがわかった。

## 5.2. 全体を通して

本研究で提案する避難開始判断法による誘導付き避難を導入した実験 1、2 では、一斉避難を行う実験 0-b と比較して、混雑度を半分程度まで低下させるとともに、全館避難完了時間の増加を 8 秒程度にとどめる結果が得られた。また、各階の避難者（特に、避難優先階の避難者）が階段室の滞留により、長い時間、流入を見合わせずに済む避難誘導を実現することができた。これより、本研究の目的はある程度達成されたものと考えられる。

ただし、実験 1、2 の結果を詳しく観察すると、合流部を起点とする滞留が生じていた。これは、避難開始判断法の制御で定義した閾値 0.3 の影響が大きいと考える。各階の待機時間を短縮すると、階段室に多くの避難者が集中することになり、合流や高密度状態による混雑が生じる。よって、全館避難完了時間と混雑度は、トレードオフの関係にあると考える。混雑度を緩和することを優先すると、避難開始判断法の閾値を、より小さな値にすることが有効であるが、そうすると、各階の待機時間が増加し、全館避難完了時間も長期化することになる。そこで、最適化の設計変数に閾値を含めるとともに、混雑度と避難完了時間の両者を目的関数とする多目的最適化問題へと発展させることが効果的であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、高層事務所建物における効果的な避難誘導方法の立案について、在館者分布をもとに決定する方法を提案し、階段室の特性を考慮した避難シミュレーションによって、安全性と迅速性に配慮した誘導付き避難方法を示した。

今後は、全館避難完了時間に加えて混雑度を評価に含めた多目的最適化の検討や、煙の流動や使用不能経路の発生等を考慮した検討を行う予定である。

## 【参考文献】

- 1) 朴聖経, 水野雅之, 藤井皓介, 門倉博之, 佐野友紀, 田中俊成, 関澤愛: 高層事務所ビルの避難訓練時の階段避難流動分析に基づく順次避難の改善～高層建築物からの全館避難を円滑化するリアルタイム技術の可能性～, ライフサポート学会誌 Vol.32 No.4, pp.118-125, 2020
- 2) 馬場賢二, 榎原孝明, 湯浅裕一郎: 画像処理による人流計測システム, 東芝レビュー Vol.61 No.12, pp. 35-38, 2006
- 3) 大佛俊泰, 吉行菜津美, 岸本まき, 沖拓弥, 伊山潤, 福島佳浩: 赤外線人感センサを用いた階段室内歩行者数の推定, 日本建築学会計画系論文集 第 87 巻 第 799 号, pp.1699-1707, 2022
- 4) 安藤慧, 飯島正: IoT センサ情報とシミュレーションに基づく屋内避難経路の自動立案と通知, 情報システム学会 第 13 回全国大会・研究発表大会, [S1-A.4]pp.1-6, 2017
- 5) 門倉博之: 高層ビルの大規模防災訓練実測データに基づく階段避難シミュレーションモデルの開発, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻 博士論文, 2016
- 6) Holland, J.: Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan, 1975, and MIT Press, 1992