公益財団法人大林財団

研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	タワー建築における避難情報システムの構築に関する研究
研究者名※	山邊 友一郎
所属組織※	神戸大学大学院　工学研究科　准教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	令和４年度 日本建築学会　近畿支部研究発表 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道） 2022 年 9 月

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

（研究報告-様式 2）

大林財団２０２１年度研究助成実施報告書

所属機関名　　神戸大学
申請者氏名　　山邊友一郎

研究課題	タワー建築における避難情報システムの構築に関する研究

（概要）※最大 10 行まで
本研究は、神戸ポートタワーを対象として、地震や台風などの災害発生時に、施設利用者の避難の必要性を判別し、避難させる際には施設利用者の安全かつ迅速な避難を支援する情報システムの構築を目的とする。そのために、①構造特性の把握、②避難行動実験によるエージェントモデルの作成、③マルチエージェントシミュレーションによる避難誘導システムの提案、の 3 つの研究課題を実施した。その結果、対象建物の固有振動モードを明らかにし、避難者の歩行モデルを作成し、また、「安全性」と「迅速性」を共に満足するためには順次避難が有効である、などの知見を得た。

１．研究の目的　　（注）必要なページ数をご使用ください。

神戸ポートタワーは、高さ約 100 メートルの観光タワーであり、現在、耐震補強他改修工事が実施されている。耐震補強は、タワー中間部へのオイルダンパーの設置及び、タワー頂部への TMD の設置などが予定されている。本研究では、神戸ポートタワーを対象として、地震や台風などの災害発生時に、施設利用者が避難する必要があるか否かを判別し、避難が必要であれば、入館者を迅速かつ安全に避難させることを支援する、避難情報システムの構築を目的とする。なお、本研究は神戸ポートタワーという個別の建物を対象としているが、適用する手法は一般性を有するものであり、他の様々な建物に対しても適用可能であるので、各建物へ本手法を適用することにより、災害時の避難・誘導を支援するシステムを構築することが期待できる。

本研究の特徴は、双曲面構造である特殊な形状・用途を持つ神戸ポートタワーを対象としている点にある。また、構造ヘルスモニタリングによる避難の必要性の判断と、情報システム技術による入館者の避難誘導システムを組み合わせて、日常から非日常までを連続的にモニタリングし、観測した情報を活用するシステムを構築しようとする点にも特色がある。研究対象とする神戸ポートタワーの展望 5 階平面図（地上約 90 メートル）を図 1 に、避難階段の様子を写真 1 に示す。避難階段は各階に 1 か所しかなく、形状は半円形であり、階段及び通路幅は人が一人通れる程度しかなく、避難に時間を要することが想像できる。そのため、災害発生時の避難計画を入念に準備する必要があるが、入館者の人数や各階の分布状況は確定的に予測することは不可能であるため、様々な状況を想定したマルチエージェントシミュレーション（MAS）を実施して、人流のボトルネックなどの、避難の弱点になる場所を把握する必要がある。また、避難階段は螺旋階段であり慎重に避難する必要がある。そこで、実際の避難を想定した歩行実験を行って、適切

な歩行速度や誘導方法を検証する必要がある。

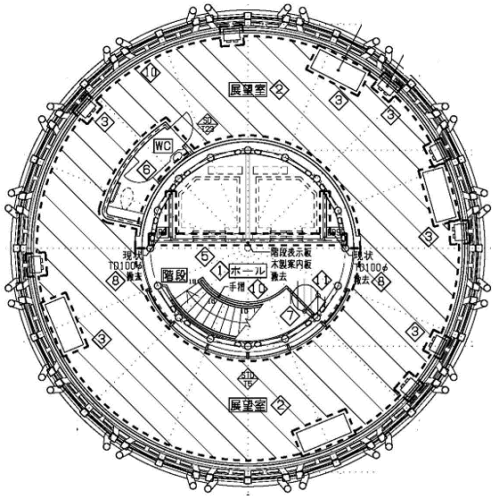


図 1　展望 5 階平面図

写真 1　幅の狭い避難階段

２．研究の経過　　（注）必要なページ数をご使用ください。

本研究では以下に示す①～③の研究を実施した。

①構造特性の把握

避難判断システムの構築に先立ち、本研究では改修工事前に常時微動計測、風応答観測を行うとともに、約 2 か月間（強風や地震による揺れを経験した。）、加速度計を展望 5 階と地上階に設置して継続計測を実施した。これらの計測データをもとに、神戸ポートタワーの振動特性の分析、減衰定数の推定を行うことにより、対象建物の構造特性の把握を行った。

②避難行動実験によるエージェントモデルの作成

精度の良い MAS を実施するためには、避難者の行動を精度良く再現する歩行モデルを作成する必要がある。そこで、先行事例の調査や歩行実験を行なって、避難者の歩行速度や歩行方法を検証し、避難者を模擬したエージェントの歩行モデルを作成した。また、対象建物のこれまでの利用状況を調査して、災害発生時の合理的な滞在者数を設定した。

③マルチエージェントシミュレーションによる避難誘導システムの提案

対象建物における避難行動を再現する MAS を、様々なシナリオを想定して実施することにより、安全かつ迅速に避難を実現するための戦略を提案する。そこで本研究では、避難誘導方法として以下に示す 3 種類のシナリオを設定して検証を行った。

a)　一斉避難：全避難者が同時に避難を開始する。
b)　順次避難：避難停止階を設け、その階の避難者は自身より上階に存在する避難者の全てが、避難停止階を通過するまで待機する（図 2 参照）。
c)　優先避難：「標準避難者」または「低速避難者」のどちらか一方を優先的に避難させる。

検証シミュレーションでは、まず a)と b)を実施して結果を考察し、得られた知見を c)のシナリオに反映させて、さらに結果を考察することで、適切な避難方法を提案することにした。なお、各シナリオの優劣の判断は、「安全性」と「迅速性」の観点から評価する。ここで「安全性」は、階段部での将棋倒しの発生を抑制するため、一時停止回数が少ないほど高く評価する。また「迅速性」は、全ての避難者が避難完了するまでにかかった時間が短いほど高く評価するものとした。

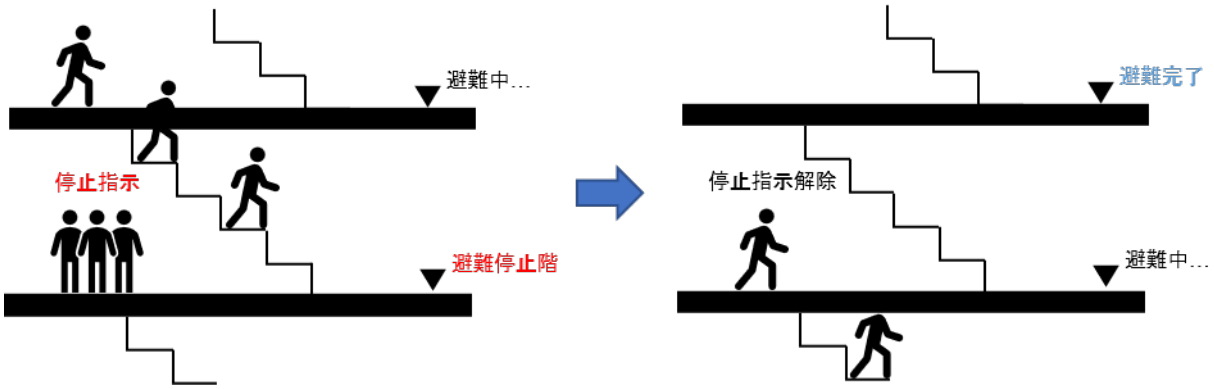


図 2　順次避難のイメージ

３．研究の成果　　（注）必要なページ数をご使用ください。

①構造特性の把握

神戸ポートタワーでは、10Hz までの振動数域に 6 つの固有振動モードが存在することを確認した（表 1 参照）。特に、1～3 次固有振動数ではフーリエ振幅のピーク値と、応答値間のコヒーレンス値が高く、神戸ポートタワーにおける支配的な振動であると考える。

表 1　固有振動モードの推定結果

次数	振動数 (Hz)	主要な振動モード
1 次	0.61	並進運動（X, Y 方向共通）
2 次	1.39	ねじれ回転運動
3 次	2.17	並進運動（X, Y 方向共通）
4 次	4.44	ねじれ回転運動
5 次	7.62	上下運動
6 次	9.16	並進運動（X, Y 方向共通）

約 2 か月間の観測中に経験した強風時の風応答と、近畿地方を震源とする小規模地震時の応答記録を用いて、減衰定数の同定を行った。その結果、計測期間中に得られた風応答記録により同定された減衰定数については、振幅依存性はあまり見られず、X（東西）方向よりも Y（南北）方向のばらつきの方が大きかった。また、減衰定数の平均値は、Y（南北）方向では、風応答から推定した値よりも、地震応答から推定した値の方が大きかった。

②避難行動実験によるエージェントモデルの作成

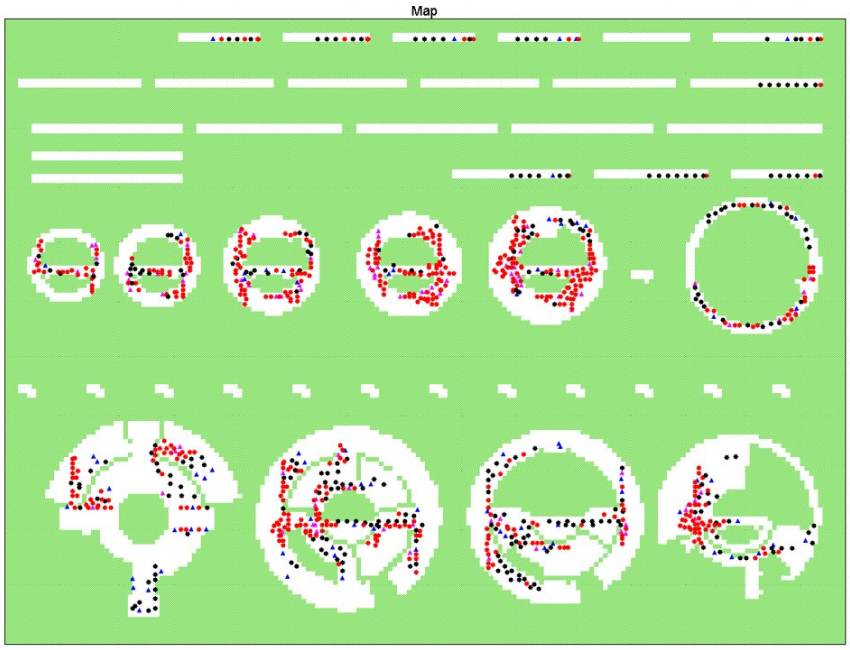
改修工事後、神戸ポートタワーは展望塔屋 2 階とテラスとして利用できる低層 4 階が追加され、

高さ約 100m、展望塔屋 2 層、展望層 5 層、中間層、低層 4 層の構成になる。避難者は、避難行動に支障がない健常者を想定した「標準避難者」（平坦部歩行速度：1.0m/s、階段部歩行速度：0.6m/s）と、老人や子供など避難行動に制約がある「低速避難者」（平坦部歩行速度：0.75m/s、階段部歩行速度：0.45m/s）の 2 種類を想定した。また、対象建物の避難経路は幅の狭い螺旋階段であり、歩行速度が低下する可能性がある。そこで、螺旋階段を有する別の建物で、通常の折り返し階段と比較する歩行実験を行ったが、歩行速度の差は小さかったため、階段部での歩行速度の低減は行わない設定とした。

次に、災害発生時の滞在者数を想定するため、施設管理者より神戸ポートタワーの供用開始（昭和 38 年 11 月）から改修工事による営業中止（令和 3 年 9 月）までの、入場者に関する資料を提供いただき、その内容を分析した結果、災害発生時の滞在者数を 400 名と設定し、展望部分及び低層部分の各階の床面積に応じて分散配置することにした。また、入場者に関する資料を分析することで、標準避難者と低速避難者の割合を 84:16 として MAS を実施することにした。

③マルチエージェントシミュレーションによる避難誘導システムの提案

図 3 にシミュレーションの実行画面例を示す。標準避難者、低速避難者の歩行／停止状態を色や記号の違いで表現している。なお、階段部は直線の通路形状に置換して表現している。



凡例：▲／▲：「標準」の歩行／停止
▲／▲：「低速」の歩行／停止

図 3　シミュレーション実行画面例

避難誘導方法、順次避難を行う際の停止階の設定、優先させる避難者の種類などをパラメータとして、MAS によるシミュレーションを実行した結果、以下の知見を得た。

- 避難誘導を行わない一斉避難では、避難完了時間は短縮できるが、総停止回数が他のケースよりも多くなる傾向があり、安全性は低下する。

- 順次避難を導入することにより、階段室に避難者が集中する現象を回避でき、安全性が向上した。
- 各種パターンでシミュレーションを実施することにより、対象建物に適した避難停止階の設定を見出すことができた。
- 優先避難を導入して避難者の歩行速度を揃えることで、安全性は向上した。

本研究課題による研究発表は以下の通りである。

1. 寺元晴紀、藤森達也、向井洋一、山邊友一郎、藤谷秀雄：神戸ポートタワーにおける振動特性評価に関する研究、令和４年度日本建築学会近畿支部研究発表会、206-208、2022.6.
2. 寺元晴紀、藤森達也、向井洋一、山邊友一郎、藤谷秀雄：神戸ポートタワーの振動特性評価に関する研究（その１　常時微動計測による振動モードの評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、261-262、2022.9.
3. 藤森達也、寺元晴紀、向井洋一、山邊友一郎、藤谷秀雄：神戸ポートタワーの振動特性評価に関する研究（その 2 風および地震応答計測による減衰定数の推定）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、263-264、2022.9.
4. 山邊友一郎 : MAS を用いた神戸ポートタワーの避難誘導方法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2023.9.（発表予定）
5. 川上真由、向井洋一、藤谷秀雄、山邊友一郎：神戸ポートタワーの振動特性評価に関する研究（その 3 常時微動計測による減衰定数の推定）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2023.9.（発表予定）

４．今後の課題　　（注）必要なページ数をご使用ください。

本研究で実施した 3 つの研究テーマをさらに深化させ、融合することにより、災害時の避難誘導をリアルタイムに支援する避難情報システムの構築を目指す。