

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：82115

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18852

研究課題名（和文）避難安全計画に関するエキスパートジャッジメントのヒートマップによる可視化手法

研究課題名（英文）Heatmap Visualization of Expert Judgment on Evacuation Safety Planning of Buildings

研究代表者

樋本 圭佑（Keisuke, Himoto）

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号：90436527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：建物の避難安全検証の枠組みにおいては、通常、最低限の安全性の有無が検証されるだけで、仮に安全でないとの結果が得られたとしても、どのような改善を行えば安全性の向上を図ることができるのか、設計上のフィードバックが得られない場合が多い。そこで本研究では、建物の避難安全計画の分析結果をヒートマップにより可視化することで、避難安全に係る平面計画上の課題を分かりやすく提示し、設計への反映を図るための手続きについて検討した。また、平面計画をヒートマップにより分析する上で考慮すべき設計要件を網羅的に抽出するため、それらが有する特性を新たに導入した4R概念により分類・整理した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築基準法で要求される安全水準は最低限のものでしかなく、それを上回る性能の付与を促すことが、より安全な社会を実現するための課題となっている。そこで本研究では、避難安全に係る平面計画上の特徴をヒートマップにより可視化し、平面計画において改善が必要な点を抽出することで、設計案の向上を促すための手続きを提案している。

研究成果の概要（英文）：In the context of building evacuation safety verification, evaluations often focus solely on meeting minimum safety standards (e.g., building code compliance). Even when a design fails to meet these standards, feedback on potential modifications for improvement is typically lacking. This study proposes a method for visualizing the analysis results of building evacuation safety plans using heatmaps. This approach aims to clearly identify evacuation safety issues within floor plans and facilitate their incorporation into the design phase. Additionally, to extract design requirements suitable for analysis with heatmaps, we introduce the 4R concept to delineate the characteristics of these requirements.

研究分野：火災安全工学

キーワード：避難安全計画 ヒートマップ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2000年の建築基準法防火規定の一部性能規定化以降、避難安全検証法などの法適合性を検証するための計算手法の整備が進められた。一部規定の適用緩和を受けられることと、比較的簡便な計算手続きを採用していることで、避難安全検証法の普及は順調に進んだ。しかし、同検証法では、平面図上の階段配置、出入口の視認性、日常動線と避難動線の関係性など、本来であれば避難安全上の影響が小さくない平面計画上の要因を適切に評価できない場合がある。このため、建築物の避難安全計画上の問題点を抽出し、設計段階で修正する機会を提供できるような平面計画分析手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

建物の避難安全検証の枠組みにおいては、通常、最低限の安全性の有無が検証されるだけで、仮に安全でないとの結果が得られたとしても、どのような改善を行えば安全性の向上を図ることができるのか、設計上のフィードバックが得られない場合が多い。そこで本研究では、建物の避難安全計画の分析結果をヒートマップにより可視化することで、避難安全に係る平面計画上の課題を分かりやすく提示し、設計への反映を図るための手続きについて検討した。また、平面計画をヒートマップにより分析する上で考慮すべき設計要件を網羅的に抽出するため、それらが有する特性を新たに導入した4R概念により分類・整理した。

3. 研究の方法

ヒートマップを利用した平面計画の分析のため、本研究では以下の課題を検討した。

(1) 避難安全性能評価の新しい評価尺度

一般的な避難安全検証の枠組みにおいては、在館者が安全な空間に避難を完了するまでに要する「避難所要時間(RSET)」と、火災の影響によって空間内部に在館者が滞在できなくなるまでの「避難余裕時間(ASET)」の大小関係に基づいて、建物が安全であるのか否かが評価される(以下、RSET/ASET概念と呼ぶ)。しかし、建物が避難安全上保持すべき各種特性が、この2つの指標に適切に集約されていなければ、避難安全計画上の設計要件が検証から漏れる可能性がある。平面計画をヒートマップにより分析する上では、避難安全性能を評価する上で考慮すべき設計要件を網羅的に抽出した上で、それらが有する特性を分類・整理しておく必要がある。ここでは、避難安全に寄与する設計要件を既往文献などから抽出し、性能規定化された法体系を説明するために利用されるNKB5レベルシステムを利用して分析した。

(2) 確率的経路選択を考慮した避難行動モデル

RSETおよびASETの評価では、在館者が安全な空間へ移動するまでの時間さえ分かれば、建物内の移動経路は必ずしも明らかにする必要はなかった。しかし、ヒートマップを利用した平面計画の分析では、避難時に滞留が起こりやすい場所、見通しが悪く避難階段に辿り着きにくい場所など、避難安全上の問題が起こりやすい場所を具体的に特定する必要がある。そこで、在館者同士の相互作用を考慮し、避難中の在館者の移動経路の追跡が可能なマルチエージェント型の避難行動モデルを開発した。なお、同モデルでは、各時点において在館者が得た情報に基づき、確率的に避難経路を選択するモデルとなっている。こうした在館者の意思決定モデルの根拠となるデータを取得するには、模擬された火災環境の中での避難行動を問う被験者実験を行う必要がある。しかし、火災環境の真实性と被験者の安全性を両立させることは容易ではないため、より信頼性の高い回答を得ることは、避難行動調査における課題となっていた。こうした問題意識の下、本研究では、VR動画を利用したアンケート調査の利用可能性について検討を加えた。

(3) ケーススタディの実施

ヒートマップによる可視化が、避難安全性能に係る平面計画上の特徴を分析する上で有効であることを確認するため、(2)の避難行動モデルを利用したケーススタディを行った。検討対象とした建物は、基準階の床面積が1,144m²の事務所建物である。同建物の平面配置は、長方形の平面の片側に2つの階段やエレベーターが集約された片コア型であり、執務空間は大きく2つの居室(居室アが320m²、居室イが560m²)に分かれている。ここでは、建物内部で火災が発生したことを想定した避難行動シミュレーションを行い、この結果を利用して平面計画を分析することとした。比較した平面計画は以下の4条件である。

条件A: 居室の扉の数1, 階段の数2

条件B: 居室の扉の数2, 階段の数2

条件C: 居室の扉の数1, 階段の数3

条件D: 居室の扉の数2, 階段の数3

図1は、このうち条件Bの平面図を示している。居室アおよび居室イには、廊下に通じる扉が2つずつ設けられている。在館者の避難は、居室からこの扉を通して廊下に出て、さらに廊下に面した階段に到達した段階で完了するものとした。上記の4通りの検討条件では、居室に設けられ

た扉の数，および居室イの廊下とは反対側に設けられた階段の有無を変えてある．

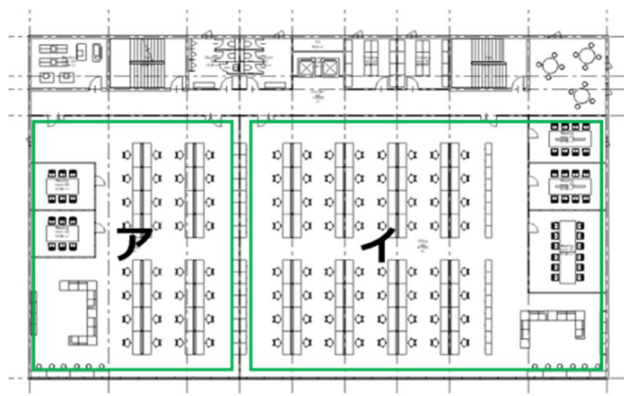


図1 検討に使用した建物の基準階平面（条件B）

4. 研究成果

(1) 避難安全性能評価の新しい評価尺度

表1には，NKB5 レベルシステムを利用して避難安全に寄与する設計要件を分析した結果のうち，第2階層の機能要件，第3階層の性能要件，第5階層の技術的解決方法・仕様を示してある．この結果，RSET/ASET 概念の評価対象は，性能要件のうち「避難場所への迅速な到達」と「避難場所への安全な到達」の一部に留まることが分かった．評価対象となっていない項目を含め，避難安全に寄与する設計要件を網羅的に整理するにあたり，表1では，迅速性（Rapidty），頑健性（Robustness），冗長性（Redundancy），信頼性（Reliability）という4つの評価尺度を新たに導入している（以下，4R 概念と呼ぶ）．こうした整理の結果に基づけば，RSET/ASET 概念に基づく評価では，迅速性と頑健性の一部のみが対象となっており，包括的な評価には，頑健性の残りの一部，冗長性，および信頼性の各項目に着目する必要があることが分かった．なお，技術的解決方法・仕様の全ての項目に対して信頼性の観点からの評価が必要となっている理由は，空間・設備が所与の機能を発揮することが各項目の目的を達成するために必要だからである．

表1 避難安全性能の評価尺度

| NKB5システムに基づく分類 | | | 避難安全性能の評価尺度 | | | |
|------------------|------------------|---------------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Level 2: 機能要件 | Level 3: 性能要件 | Level 5: 技術的解決方法・仕様 項目 | 迅速性 Rapidty | 頑健性 Robustness | 冗長性 Redundancy | 信頼性 Reliability |
| 避難場所の確保 | 安全な一時避難場所の確保 | 火災の影響からの隔離 | | | | |
| | | 十分な滞在容量の確保 | | | | |
| | | 地上との連絡手段の確保 | | | | |
| | 安全な最終避難場所の確保 | 火災の影響からの隔離 | | | | |
| | | 十分な滞在容量の確保 | | | | |
| | | 避難後の自由な行動の確保 | | | | |
| 避難経路の確保 | 避難場所への迅速な到達 | 早期の火災発見と情報伝達 | | | | |
| | | 連続かつ明快な避難経路の確保 | | | | |
| | | 重文な通過容量の確保 | | | | |
| | 避難場所への安全な到達 | 適切な避難誘導・介助の担保 | | | | |
| | | 避難経路の安全の確保 | | | | |
| | | 少なくとも一つの避難経路の確保 | | | | |
| | | 逃げ遅れ時の脱出手段の確保 | | | | |

表1からも分かるように，平面計画の冗長性は，RSET/ASET 概念の評価対象となっていない．そこで，火災時における「二方向避難経路の維持率」を冗長性の性能評価指標とみなし，代表的な被害尺度である「避難不能者発生率」との関係性を，複数の建物を対象として実施した避難シミュレーションにより調べた結果を図2（左）に示す．この結果は，階段の数に応じて二方向避難経路の維持率が上がるほど，避難不能者発生率が下がることを示している．ただし，避難行動モデルによるシミュレーションでは一意には定まらない多数の不確実要因の取り扱いが避けられず，計算の負担が小さくない．そこで，建物内で発生した火災の拡大をベイジアンネットワークによりモデル化し，二方向避難経路の維持率を評価した結果を図2（右）に示す．こうした簡易な評価であっても，比較的良好に避難行動モデルによる評価結果を再現できていることは，迅速性や頑健性などと同様の手続きに従って，平面計画の冗長性を評価することが可能であることを示している．

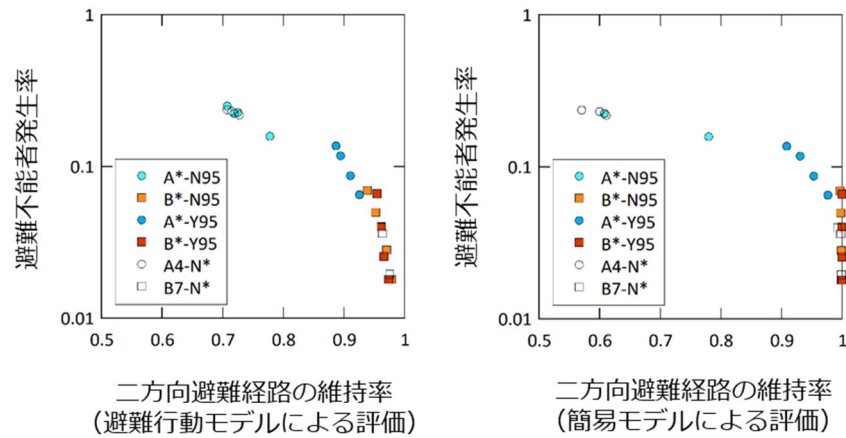


図2 二方向避難経路の維持率と避難不能者発生率の関係

(2) 確率的経路選択を考慮した避難行動モデル

本研究では、Social Force モデルの考え方に倣って火災時における在館者の避難行動を定式化した。Social Force モデルでは、以下に示す自己駆動力と周囲から力を受ける物体の運動方程式を解くことで、在館者の避難行動を予測する。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_{0,i}(t)e_{0,i}(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{j,i} + \sum_k f_{W,i}$$

ここで、右辺第1, 2, 3項は、それぞれ、在館者が移動目標に近づく際の自己駆動力、他の在館者から受ける力、壁等の障害物から受ける力を表しており、 m_i は在館者の質量、 t は時刻、 v_i は移動速度ベクトル、 $v_{0,i}$ は目標速度、 $e_{0,i}$ は移動目標への単位方向ベクトル、 τ_i は自己駆動力の調整パラメータ、 $f_{j,i}$ は他の在館者から受ける力、 $f_{W,i}$ は壁等の障害物から受ける力を表している。ただし、Social Force モデルの使用は、ある室内の任意の場所から出口となる扉までの移動の予測に限定している。建物出口までの室をまたぐ移動経路については、ダイクストラ法により複数の候補を抽出した上で、それらの中から確率的に選択する手続きを採用している。

図3は、VR動画を利用した避難行動調査の設問の例を示している。ここでは、非出火階における避難の際に、避難誘導灯の有無、他の避難者の有無が、避難者の避難経路の選択にどのような影響を及ぼすのかを調べた。被験者は、Webブラウザを利用してVR動画を視聴し、設問に回答できるようになっている。このため、被験者に対する安全上の問題は発生しない上、物理的に火災環境を模擬する必要がないため、比較的短い期間で、多数の被験者からの回答を得ることが可能な仕様となっている。ただし、こうしたVR動画を利用したアンケート調査により、どの程度、実際の火災状況に即した回答が得られるのかについては、十分な検証を行っていないため、今後の継続した検討が必要である。



図3 VR動画を利用したアンケート設問の例

(3) ケーススタディの実施

図4は、避難行動シミュレーションにより、居室内の在館者が階避難に要した時間の分布をヒートマップにより示している。これによると、条件Aでは、居室アに比べて居室イの避難所要時間が長くなっており、居室の規模の差が表れている。条件Bでは、階段が追加されたことで、付近の避難所要時間が短縮されているが、その効果は限定的である。各居室の扉を2つに増やした条件Cでは、居室イの避難所要時間が減ったものの、居室アについてはむしろ増える結果となった。これは、居室イに設置された2つの扉のうち1つが、居室ア側の階段近くに設けられているため、居室イからの避難者が流入したことが影響したものと考えられる。こうした結果は、

RSET/ASET 概念の下で計算される避難所要時間のみを利用して把握することはできず、ヒートマップを利用することで初めて明らかになる平面計画上の特徴である。条件 D では、階段が追加されたことにより付近の避難所要時間が短縮されているが、条件 B の場合と同様、その効果は限定的であった。

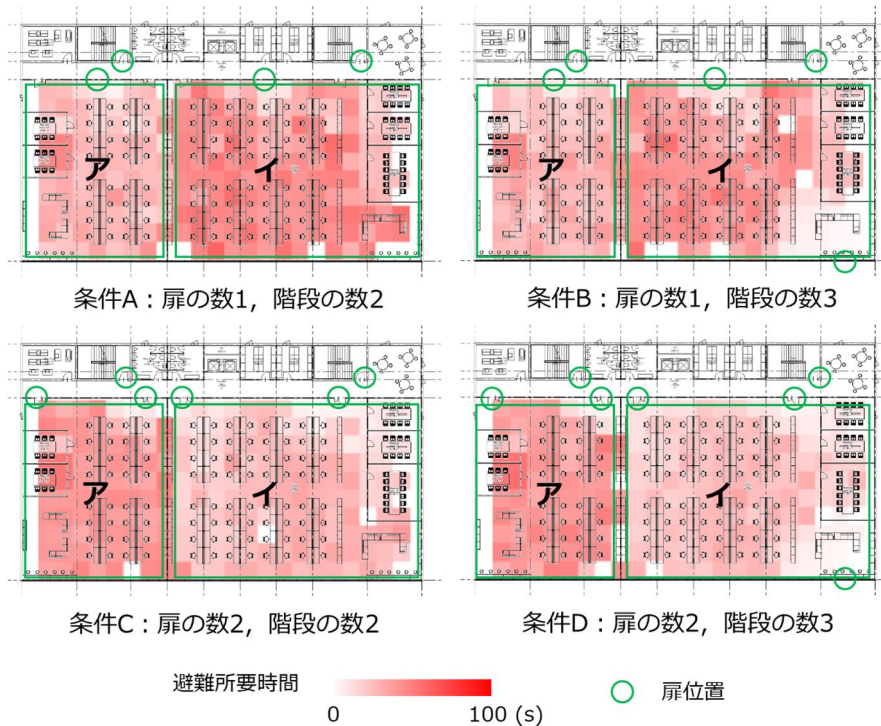


図4 避難所要時間（階避難）の分布

5. まとめ

本研究では、建物の避難安全計画の分析結果をヒートマップにより可視化することで、避難安全に係る平面計画上の課題を分かりやすく提示し、設計への反映を図るための手続きについて検討した。平面計画の課題抽出におけるヒートマップの有用性は、ケーススタディを通じて確認することができたが、分析対象とした課題は、ヒートマップの活用の余地があると考えられる課題の一部に留まっている。今後は、今回の検討から漏れた課題にも対象を広げるとともに、設計へのフィードバックを行えるようなツール作りを進める必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Himoto K, Suzuki K, Deguchi Y. |
| 2. 発表標題 Quantifying the multidimensionality of evacuation safety performance: 4R concept complementing the incompleteness of RSET/ASET concept |
| 3. 学会等名 14th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2023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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 鈴木 圭一 (Suzuki Keichi) (80416817) | 清水建設株式会社技術研究所・その他部局等・主任研究員 (92605) | |
| 研究分担者 | 出口 嘉一 (Deguchi Yoshikazu) (90398818) | 国土技術政策総合研究所・建築研究部・防火基準研究室長 (82115) | |

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 |
|---------|---------|