

地震火災における延焼予測のばらつきに対して安全な避難経路の最適化 —不完全情報下におけるリアルタイム避難誘導のための提案—

Optimization of Safe Evacuation Route
considering Uncertainty of Firespread Estimation under Post-Earthquake Fires
- Idea for Real-time Evacuation Guidance based on Incomplete Information-

鈴木 雄太¹, 糸井川 栄一²

Yuta SUZUKI¹ and Eiichi ITOIGAWA²

¹筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

²筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

Under the post-earthquake fires, one of the effective strategies for securing inhabitants' safe is guiding them to an evacuation space in real-time with the forecast of firespread based on fire information gathered by the public sector. However, the firespread estimation includes the errors between the forecasted fire speed and the actual one. In this study, we suggested the optimization method of a safe route considering the uncertainty of the fire spread estimation. First, we modeled the safety index called "safe margin of evacuation". This index intends the maximum tolerance on the deviation between the forecasted fire speed and the actual one. Second, we develop the method how to maximize the index on the route. Finally, we discussed the characteristics of the optimal route with the computer simulation.

Keywords: post-earthquake fire, real-time system, evacuation, route optimization, uncertainty, incomplete information

1. 研究の背景と目的

(1) 地震火災における事前対策の限界

近年、首都直下地震や南海トラフ巨大地震等の大地震が30年以内に相当な確率で発生することが危惧されている¹⁾。我が国の現代都市には、木造住宅密集地域と呼ばれる火災に対する脆弱性の高い地域が今なお多く存在しており²⁾、地震時には甚大な火災被害が懸念される。平常時の市街地火災事例では、2016年12月22日に新潟県糸魚川市で発生した糸魚川市大規模火災³⁾が記憶に新しいが、地震時となると、木造住宅密集地域内の至る所で同時多発的に火災が発生し、多方向から市街地を覆うように延焼拡大する火災が予想されている。特に、東京都では木賃ベルト地帯と呼ばれる木造住宅密集地域が広く分布しており、東京都が発表した首都直下地震被害想定⁴⁾では、人的被害のうち地震火災による最大被害として、負傷者約18万人・死者約4,100人に及ぶとされ、地震火災対策は喫緊の課題である。

これに対して、東京都を代表とする大都市では、大地震時における減災を目指し、ハード・ソフトの双方による総合的な防災まちづくりが行われている⁵⁾。延焼遮断帯の形成や市街地の不燃化・難燃化というハード整備⁵⁾を促進するとともに、ソフト対策として、各地域の火災リスクに対して安全確保を目指した避難場所とその圏域を指定する避難計画⁶⁾が実施されている。ハード整備による減災効果、避難場所の収容人数や避難時のマネジメント等、防災上、いくつかの課題が残されているものの、

効果的な事前対策として期待される。しかしながら、上記の事前対策は完遂までに非常に時間を要するため、首都直下地震の切迫性を考慮すると、火災リスクの低減や住民避難の安全確保は現時点では限界があると言える。このような事前対策の限界を補完するためには、地震後の火災状況に応じて、“その時に”火災に対して危険な住民を、安全な場所へ・安全な避難経路で誘導する応急対策の検討が、上記の事前対策のフェールセーフ機構として重要であると考えられる。

(2) リアルタイム避難誘導に関する既往研究

これまでに、以上の要請に対して、地震後に住民の通報や消防機関の活動等によって収集される出火・延焼拡大情報を集約し、これに基づき住民の避難リスクを評価し、効果的に住民の避難誘導を行う体制が検討されており⁷⁾⁸⁾(以下、収集された出火・延焼拡大情報を「覚知火災情報」と呼び、覚知火災情報に基づいて避難誘導を行う体制を「リアルタイム避難誘導」と呼ぶ)、リアルタイム避難誘導の核となる避難経路情報に関してそれぞれ考察している。

建築研究所⁷⁾は、地震時の情報処理システム(以下、RTS)の一部として、覚知火災情報に基づき避難情報を整備し、住民へと伝達する方法を検討している。RTSでは、増山・李・梶の一連の研究¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾で提唱された最遅避難理論に従い、覚知火災に基づく延焼予測に対して、居住・就業地に最も遅くまで留まることができる避難開始時間と避難経路を計算している(以下、それぞれ「避難限

界時間」「避難限界経路」と呼ぶ)。建築研究所⁷⁾は、個人財産の保全や地域の共助活動のための時間確保、一斉避難による混雑の防止を意図しており、避難限界時間を迎えた地域の住民より順々に、避難限界経路に従って避難させる“安全限界に沿った避難誘導”を提案している。安全限界の特性上、避難の遅れや経路選択の間違いにより、直ちに避難不能に陥る危険性がある。一方、東京消防庁⁸⁾では、第23期火災予防審議会において、避難勧告が必要な地域の特定を目的として、地域に残存する避難経路の危険性評価方法を検討している。各地域で、複数の避難経路を探索し、検索した経路全体に対して、火災が存在していると危険に晒される領域を計算することで、その領域へ覚知火災が存在するか否かを判断する方法を提案している。複数の避難経路のうち、一部が危険と判断された時点で避難危険と判断するため、建築研究所のRTSとは異なり、非常に安全側の評価が特徴である。上記の既往研究では、発生した全火災を覚知していること、覚知した火災の延焼予測を正確に行えることを前提とする完全情報の仮定の下、リアルタイム避難誘導について検討されている。

これに対して、鈴木・糸井川⁹⁾は、避難誘導の意思決定時よりも遅れて出火・覚知する火災(以下、併せて「未覚知火災」と呼ぶ)及び延焼予測のばらつきが存在が考慮された不完全情報下において、リアルタイム避難誘導における避難リスクを考察している。図1に鈴木・糸井川による考察の模式図を示す。この研究の考察の概要は次の通りである。完全情報下では、図1の①完全情報下で安全に避難できる条件に示すように、道路ネットワーク上の各道路の閉塞時間よりも早く通過できるように避難開始することで、安全に避難可能である。一方、不完全情報下では、②不完全情報下の避難リスクに示すように、未覚知火災及び延焼予測のばらつきが存在によって、予測される道路の閉塞時間が不確実性を有するため、覚知火災を迂回するように避難経路を定めても、予期せぬ火災に遭遇するリスクが存在する。これに対して、この研究では、火災に遭遇しにくい頑健な避難経路として、未覚知火災の存在確率の低い経路を選択する方針である「最大避難可能確率経路」と、延焼予測のばらつきに対して十分に余裕を持って通過できるように避難経路を選択する方針である「最大余裕経路」という2つの方針を提案している(③不完全情報下における頑健な避難経路の方針)。しかしながら、この研究では、上記の方針を示すのみに留めており、Suzuki and Itoigawa¹³⁾において避難リスク指標の定量化を試みているものの、具体的な経路最適化方法及び各方針における避難経路の安全性は明らかにされていない。

(3) 研究の目的と本論の構成

本研究は、鈴木・糸井川⁹⁾の不完全情報下におけるリアルタイム避難誘導の枠組みに従い、上述のうち、第2の方針である最大余裕経路の具体的な導出方法及びその特徴について定量的に明らかにすることを目的とする。

まず、第3章・第4章において、避難経路の最適化方法について論じる。第3章では、Suzuki and Itoigawa¹³⁾で提案された Safe margin of evacuation (以下「避難余裕性」と呼ぶ)について、出火時間を考慮したモデルに拡張して示し、マクシミン原理によって、避難経路上の避難余裕性を最大化する方針を提案する。第4章では、A*探索法¹⁴⁾を応用した最大余裕経路の具体的な探索方法について構築する。

次に、第5章・第6章において、避難シミュレーションモデルを用いて、最大余裕経路の特徴について分析する。第5章では、リアルタイム避難誘導を再現する避難

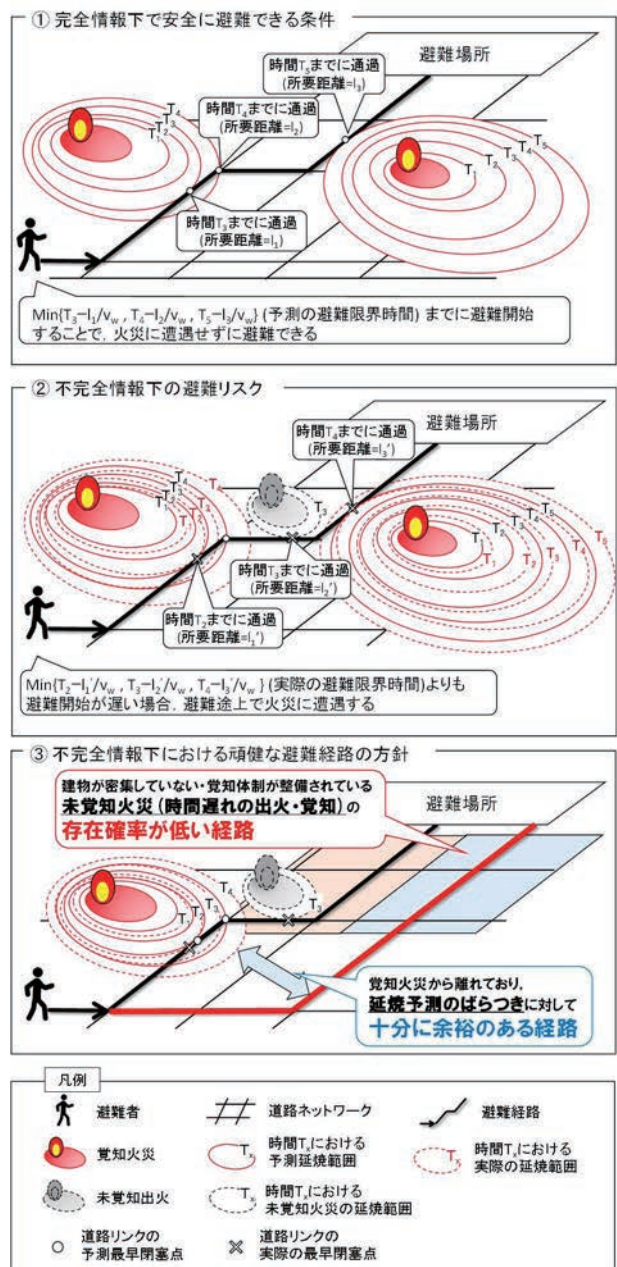


図1 鈴木、糸井川(文献9)による考察

シミュレーションのフレームワークを示し、本研究で仮定するモデルを構築する。第6章では、大井競馬場・しながわ区民公園の避難圏域を対象とした避難シミュレーション実験を行い、最大余裕経路と最短経路の比較分析より、最大余裕経路の特徴を考察する。

最後に、第7章において、本研究の結論と今後の展望を示す。

2. 最大余裕経路のモデル化

(1) 利用可能なリアルタイム情報の仮定

本研究では、リアルタイムで避難経路探索を行うことを目的としているため、その時点で利用可能な情報に基づき避難経路の安全性を評価する方法が要求される。そこで、避難余裕性の定式化及び最大余裕経路のモデル化に当たり、火災の覚知及び避難行動に関する仮定を設定し、利用可能なリアルタイム情報を仮定する。

まず、火災の覚知に関する仮定を示す。地震後に発生

表 1 記号の定義

記号	定義 [単位]
v_f	実際の平均延焼速度 [m/h]
\hat{v}_f	予測に基づく平均延焼速度 [m/h]
Δv^*	延焼速度誤差の許容限界 [m/h]
v_f^*	許容限界における平均延焼速度 [m/h]
t_f	出火時間 [h]
\hat{t}_c	予測に基づく閉塞点の閉塞時間 [h]
t_p	避難者が閉塞点を通る時間 [h]
l	出火点から閉塞点までの距離 [m]
Fr	覚知火災の集合
M	避難余裕性
t_s	避難者の避難開始時間 [h]

した火災は、出火点の位置と出火時間の 2 つの確定情報として覚知される。地震発生後のある時間に火災が覚知されると、その出火点を起点とした延焼シミュレーションが任意の延焼予測モデルに従い実施され、各道路上の最も早く閉塞する地点(以下「閉塞点」と呼ぶ)が求まり、その閉塞時間が計算される。なお、本研究では単純化のため、火災は風向に関わらず出火点を中心に円形に一定の速度で延焼拡大するモデルを用いる⁽¹⁾。

次に、避難者の避難行動に関する仮定を示す。避難者は、ある避難開始時間に現在地を出発し、避難場所に到達するまで立ち止まることはなく、等速度で避難経路上を移動するものと仮定する。すなわち、避難者の避難開始時間と歩行速度より、避難者が避難経路上の各地点を通過する時間が計算される。

以上より、利用可能と仮定するリアルタイム情報は次の通りである。覚知火災情報として、出火点の位置及び出火時間が確定情報として利用でき、各道路の閉塞点及び閉塞時間の予測が可能とする。また、避難者情報として、避難開始時間、避難開始地点及び歩行速度が得られ、避難者が道路を通過する時間が確定的に計算可能とする。

(2)一つの道路リンクにおける避難余裕性

まず、一つの覚知火災と道路リンクを考え、避難余裕性を定式化する。本研究では、延焼予測のばらつきを、任意の予測モデルに基づく平均延焼速度⁽²⁾と実際の平均延焼速度の差(以下「延焼速度誤差」と呼ぶ)で表す。この時、避難者が避難可能であるために許容される延焼速度誤差の限界値(以下「延焼速度誤差の許容限界」と呼ぶ)を導出することで、避難余裕性を定式化する。

延焼速度誤差の許容限界に対する火災前線の模式図を図2に、本節で登場する記号の定義を表1に示す。なお、本節以降の記号については、適宜定義を示す。完全情報であれば、延焼予測における通過時の火災前線が閉塞点に交わらなければ避難可能である。一方、実際には延焼速度誤差によって、予測よりも早期に閉塞する可能性があるため、避難者が安全に閉塞点を通るためには、延焼速度誤差を考慮した分だけ拡大した火災前線が、閉塞点に交わらないことが条件となる。すなわち、火災前線が閉塞点に丁度接する場合の延焼速度が、延焼速度誤差の許容限界に対応する平均延焼速度である。

許容限界の平均延焼速度 v_f^* は、予測平均延焼速度 \hat{v}_f と延焼速度誤差の許容限界 Δv^* の和として[1]で表される。

$$v_f^* = \hat{v}_f + \Delta v^* \quad [1]$$

ここで、出火時間を t_f 、出火点と閉塞点の直線距離を l (以下「延焼距離」と呼ぶ)と置き、火災前線による閉塞時間と避難者による閉塞点の通過時間 t_p の等式より、 Δv^* は[2]で求められる。

$$t_f + \frac{l}{v_f^*} = t_p \Leftrightarrow t_f + \frac{l}{(\hat{v}_f + \Delta v^*)} = t_p \quad [2]$$

$$\Leftrightarrow \Delta v^* = \frac{l}{t_p - t_f} - \hat{v}_f$$

一方、予測される閉塞時間 \hat{t}_c と延焼距離 l の関係より、[3]が得られる。

$$\hat{t}_c = \frac{l}{\hat{v}_f} + t_f \Leftrightarrow l = \hat{v}_f(\hat{t}_c - t_f) \quad [3]$$

ここで、[3]を[2]に代入し、両辺を予測平均延焼速度で除すると、[4]が導かれる。

$$\frac{\Delta v^*}{\hat{v}_f} = \frac{\hat{t}_c - t_p}{t_p - t_f} \quad [4]$$

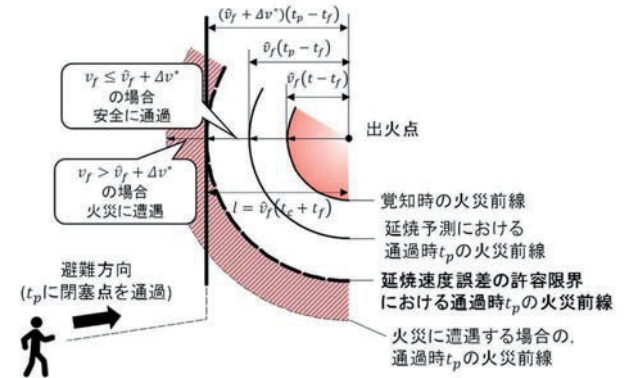


図 2 延焼速度誤差の許容限界に対する火災前線

[4]の値が意味することを考察する。[4]の左辺は、予測平均延焼速度に対する延焼速度誤差の許容限界の比(以下「許容誤差比」と呼ぶ)である。例えば、予測平均延焼速度が 100 [m/h]、[4]の値が 1 である場合、200 [m/h]までの延焼速度が避難可能なために許容される。一方、[4]の右辺は、分母に、出火後に避難者が閉塞点を通るまでの猶予時間、分子に、通過から道路閉塞までの猶予時間である。すなわち、[4]は左辺の許容誤差比という延焼速度誤差に対する安全性を、リアルタイム情報によって評価できることを表している。以上より、本研究では、本指標の右辺を覚知火災に対する避難の余裕を表す指標という意味として「避難余裕性」と呼び、避難余裕性を最大化する避難経路を「最大余裕経路」と呼ぶ。

次に、全覚知火災に対する道路リンク (i, j) の避難余裕性を定義する。覚知火災の集合を Fr 、そのうち一火災を f と置く。ある時間 t_{si} に道路リンクの始点 i へ到達したときの避難余裕性 $M_{ij}(t_{si}, Fr)$ は、[5]で定義する。

$$M_{ij}(t_{si}, Fr) \equiv \min_{f \in Fr} \frac{t_{cij}(f) - (t_{si} + t_{pij}(f))}{t_{si} + t_{pij}(f) - t_f(f)} \quad [5]$$

ただし、 $t_f(f)$ 、 $t_{cij}(f)$ 、 $t_{pij}(f)$ はそれぞれ、ある覚知火災 f の出火時間、覚知火災 f による道路リンク (i, j) の閉塞時間、ノード i から閉塞点を通るまでの所要時間である。すなわち、それぞれの覚知火災に対して計算される避難余裕性のうち、最小値を全覚知火災に対する避難余裕性とする。

(3)避難経路の避難余裕性と最大余裕経路の最適化方針

各道路リンクで求められた避難余裕性を用いて、避難経路の避難余裕性を最適化する方針をモデル化する。本研究では、避難経路上における避難余裕性の最小値を最大化する、マクシミン原理による最適化を行う事で最大余裕経路を得る。マクシミン原理を採用することで、最も遭遇しやすい覚知火災に対する安全性を最大化することを意図している。

図3に、避難経路上の避難余裕性と最大余裕経路の考え方の模式図を示す。地点①を避難開始地点とすると、各道路リンクの始点*i*への到達時間 t_{si} は、避難開始時間 t_s とノード*i*までの移動時間の和で表される。この到達時間 t_{si} を用いて、各道路リンクで[5]の避難余裕性を計算し、その最小値を避難経路上の避難余裕性とする。ゆえに、避難経路の避難余裕性 $M(t_s, Fr, L_{se})$ は[6]で定義される。

$$M(t_s, Fr, L_{se}) \equiv \min_{(i,j) \in L_{se}} M_{ij} \left(t_s + \sum_{(k,l) \in L_{si}} \frac{d_{kl}}{v_w}, Fr \right) \quad [6]$$

ここで、 L_{se} 、 L_{si} はそれぞれ、避難開始地点から避難場所までの避難経路、避難開始地点から經由ノード*i*までの途中経路であり、 d_{kl} は道路リンク(k, l)の長さ、 v_w は歩行速度である。ただし、各閉塞点の閉塞時間よりも早期に通過する必要があるため、避難経路の制約条件として[7]が与えられる。

$$t_{cij}(f) - \left(t_s + \sum_{(k,l) \in L_{si}} \frac{d_{kl}}{v_w} + t_{pij}(f) \right) > 0 \quad [7]$$

$(f \in Fr, (i, j) \in L_{se})$

最後に、[7]の条件の下[8]のように $M(t_s, Fr, L_{se})$ を最大化する経路探索を行うことで、最大余裕経路が得られる。

$$M(t_s, Fr, L_{se}) \rightarrow \max \quad [8]$$

以降、簡略化のため、変数のリストから Fr は省略する。

3. 最大余裕経路の探索方法

(1) A*探索法¹⁴⁾による最大余裕経路探索の概要

前章において、覚知火災の延焼予測のばらつきに対する安全な避難経路として、避難余裕性を最大化する最大余裕経路をモデル化した。本章では、具体的に最大余裕経路を探索する方法について論じる。[5]の $M_{ij}(t_{si})$ は、各道路リンクの閉塞点における通過時間の関数であるため、ノード*i*への避難者の到達時間 t_{si} に応じて値が変動する。これにより、ノード*i*に到達するまでに辿った経路によって値が定まるため、ダイクストラ法を代表とするゴールノード(本問題では、避難場所)から順々に各ノードまでのコストを逆算していく方法は、最大余裕経路には適用困難である。

三好ら¹⁵⁾は、石井・腰塚¹⁶⁾のモデルを応用し、通過時間で変動する避難可能確率の最大化問題の解法として、予め最短経路におけるコストを計算し、そのコストを実際のコストの代わりとすることで、ダイクストラ法を適用する方法を検討している。しかし、道路リンクの通過時間が大きく影響する本問題において、適切な解が得られるか疑問であり、新たな経路探索方法が必要である。本研究では、A*探索法¹⁴⁾と呼ばれる手法を応用し、避難余裕性が通過時間に対して単調減少である特徴を利用し、オリジナルなヒューリスティック関数を検討することで、最大余裕経路の最適解を得られる手法を開発した。

A*探索法¹⁴⁾とは、ゴールまでのコストを推定値により評価し、推定値が低い経路から優先的に探索していく経路探索アルゴリズムである。

あるノード*n*を通過する経路のうち、コストが最小となる経路のコストを $f(n)$ と置くと、ノード*n*までのコスト $g(n)$ とノード*n*からゴールまでのコスト $h(n)$ の和として、[9]で表される。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad [9]$$

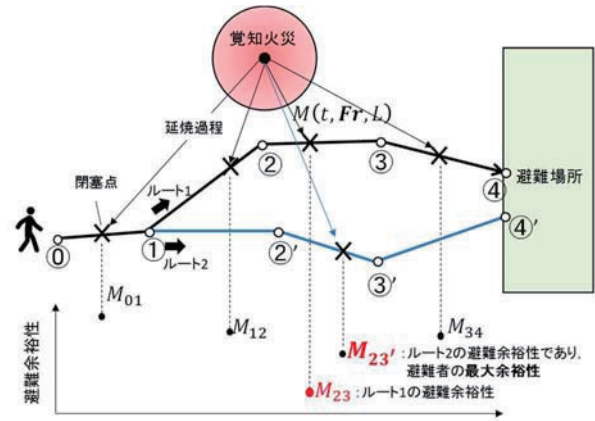


図3 避難経路の避難余裕性と最大余裕性の考え方

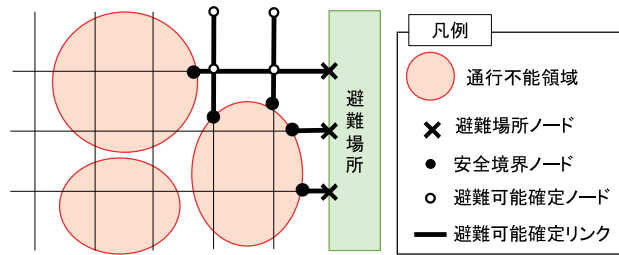


図4 避難ネットワークの模式図

通常、 $h(n)$ は*n*を選択する時点では確定されない。ここで、 $h(n)$ の推定値を計算するヒューリスティック関数 $\hat{h}(n)$ を用いて、最小コスト経路の探索を行っている。このとき、以下の条件[10]を満たす場合、計算は収束し、探索された経路が最適解であることが保証される。

$$\begin{cases} \hat{h}(n) \leq h(n) \quad (\text{許容的であること}) \\ \hat{h}(n) \leq \text{cost}(n, m) + \hat{h}(m) \quad (\text{無矛盾であること}) \end{cases} \quad [10]$$

ここで、 $\text{cost}(n, m)$ はリンク(n, m)のコストである。

本研究では、このA*探索法を応用する。最大余裕経路問題はマクシミン原理であるため、コストの和を \min 演算で表し、[11]で書くことができる。

$$f(n) = \min\{g(n), h(n)\} \quad [11]$$

ここで、最大余裕経路では、 $g(n)$ は通過点*n*までの避難余裕性、 $h(n)$ は通過点*n*から避難場所までの避難余裕性であるため、[12]で置き換えられる。

$$g(n) = M(t_s, L_{sn}), \quad h(n) = M(t_n, L_{ne}) \quad [12]$$

ここで、 L_{sn} 、 L_{ne} はそれぞれ、避難開始地点から*n*までの経路及び*n*から避難場所までの経路、 t_n はノード*n*への到達時間である。また、ヒューリスティック関数が満たす条件は、コストの和を \min 演算で表し、不等号を逆にすることで[13]となる。

$$\begin{cases} \hat{M}(t_n, L_{ne}) \geq M(t_n, L_{ne}) \quad (\text{許容的であること}) \\ \hat{M}(t_n, L_{ne}) \geq \min\{M_{nm}(t_n, Fr), \hat{M}(t_m, L_{me})\} \quad (\text{無矛盾であること}) \end{cases} \quad [13]$$

[13]を満たす避難余裕性のヒューリスティック関数 $\hat{M}(t_n, L_{ne})$ を導出することが本章の課題である。

(2) 避難ネットワークの設定と準備

$\hat{M}(t_n, L_{ne})$ を導出する前に、避難経路探索を行う前提となる避難ネットワークの設定と、安全境界ノードと呼ぶ、避難余裕性の推定値を求めるのに必要なノードを定義す

る。図 4 に避難ネットワークの模式図を示す。本研究では、避難圏域を「領域」「リンク」「ノード」の 3 つの要素で構成されるものとする。

まず、市街地を「通行不能領域」「安全領域」「避難場所」の 3 種類の「領域」で定義する。通行不能領域は、出火・延焼が生じる領域である。加藤ら¹⁷⁾の延焼クラスタや洪水・糸井川¹⁸⁾の避難不能クラスタのように、火災の輻射熱が避難者へ影響する範囲で設定される。「安全領域」は、通行不能領域の外側であり、出火・延焼が生じず、いつまでも留まり続けられる領域である。ただし、避難場所とは異なり、避難生活機能は有さないため、避難場所への避難が必要な領域である。「避難場所」は避難の目標地であり、出火・延焼が生じない安全な領域である。

次に、道路ネットワークについて、交差点を表す「ノード」と道路を表す「リンク」で定義する。ノードおよびリンクは前述の 3 つの領域上に位置する。リンクは通行不能領域内外それぞれに存在し、1 つのノードによって 2 つのリンク同士が接続される。ノードは、通行不能領域内外及び境界点のノード、避難場所と接する「避難場所ノード」が存在する。避難場所ノードから通行不能領域の境界に接するまでリンクを辿ると、その過程で通過したノード及びリンクは、いつまでも避難可能であることがわかる。これらのノード及びリンクを「避難可能確定ノード」「避難可能確定リンク」と呼ぶ。また、その境界点は、その通行不能領域上で発生した火災延焼がその地点に到達するまでに避難開始すれば避難可能なノードである。このノードを「安全境界ノード」と呼ぶ。

この時、避難可能確定ノード及び安全境界ノード以外のノードから出発した避難者が避難可能である条件は、いずれかの安全境界ノードを通過し、避難可能確定ノードへ到達することである。したがって、各ノードから避難場所までの避難経路において、避難余裕性の推定値を計算する場合、代わりに、各安全境界ノードまでの推定値を計算すればよい。以上の方針に基づき、次節において、避難余裕性のヒューリスティック関数を導出する。

(3) 避難余裕性のヒューリスティック関数の導出

図 5 に最大余裕経路における避難余裕性のヒューリスティック関数の模式図を示す。ノード①を通り、安全境界ノード k までの最大余裕経路を考える。避難余裕性の最小値は経路上のいずれかで計算されるため、最大余裕経路の避難余裕性は、必ず、ノード①までの経路上、ノード①、安全境界ノード k の各避難余裕性よりも低い又は等しい値である。また、安全境界ノードの集合を S_b とすると、最終的に選択される最大余裕経路は、 S_b に含まれる安全境界ノード x それぞれへの最大余裕経路のうち、最も避難余裕性の高い経路が選択される。以上より、ある地点 i を t_i に通過する時の避難余裕性 $M_i(t_i)$ を用いると、ノード n 及び安全境界ノード x の避難余裕性と最大余裕経路の避難余裕性 $M(t_n, L_{ne})$ の関係は、[14]の不等式で表される。

$$M(t_n, L_{ne}) \leq \min \left\{ M_n(t_n), \max_{x \in S_b} M_k \left(t_n + \sum_{(k,l) \in L_{nx}} \frac{d_{kl}}{v_w} \right) \right\} \quad [14]$$

ただし、 $M_i(t_i)$ はノード i を通過する時の避難余裕性であり、[5]より[15]で表される。

$$M_i(t_i) \equiv \min_{f \in FR} \frac{t_{ci}(f) - t_i}{t_i - t_f(f)} \quad [15]$$

[14]の右辺と常に等しいかより大きな値をとる関数を検討すれば、それがヒューリスティック関数となる。

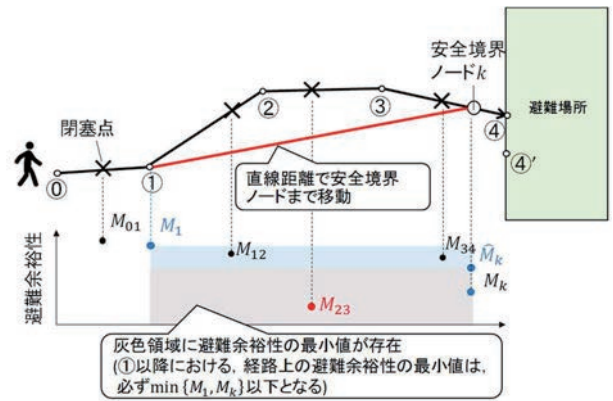
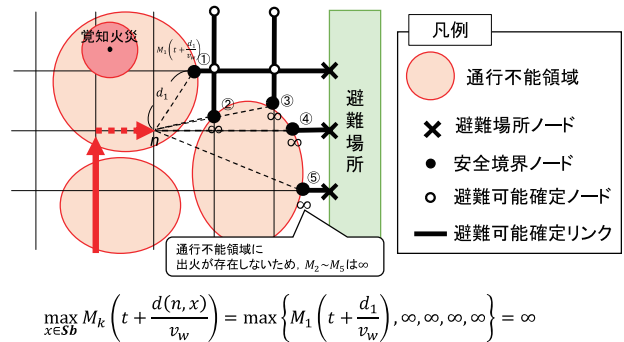


図 5 最大余裕経路のヒューリスティック関数の求め方



$$\max_{x \in S_b} M_k \left(t + \frac{d(n,x)}{v_w} \right) = \max \left\{ M_1 \left(t + \frac{d_1}{v_w} \right), \infty, \infty, \infty, \infty \right\} = \infty$$

$$\hat{M}(t, L_{ne}) = \min \{ M_n(t), \infty \} = M_n(t)$$

図 6 ヒューリスティック関数の計算例

ところで、[15]を t_i で微分すると、[16]のように常に正であり、ノード i への到達時間に対して避難余裕性が単調減少であることが示される。

$$\frac{d}{dt_i} M_i(t_i) = - \frac{t_{ci}(f) - t_f(f)}{(t_i - t_f(f))^2} \leq 0 \quad [16]$$

($\because t_{ci}(f) - t_f(f) \geq 0$)

そこで、道路ネットワークを無視し、地点 n から安全境界ノード k までの移動距離に、地点 n から安全境界ノード k までの直線距離を代入することで、[13]の条件を満たす避難余裕性のヒューリスティック関数[17]が得られる。

$$\hat{M}(t, L_{ne}) = \min \left\{ M_n(t_n), \max_{x \in S_b} M_k \left(t_n + \frac{d_{nx}}{v_w} \right) \right\} \quad [17]$$

ここで、 d_{nx} はノード n から安全境界ノード x までの直線距離である。

[17]の関数を用いた避難余裕性の推定値の算出例を図 6 に示す。ノード n 以前の経路(図内の太矢印)は、確定した上流の経路であり、地点 n を通過する経路(図内の破線太矢印)の避難余裕性の推定値を求めている。地点 n が含まれる通行不能領域には、覚知火災(図中、赤い領域)が存在するため、地点 n 及び安全境界ノードには、有限の避難余裕性が計算される。一方、右下の通行不能領域内には、覚知火災が存在しないため、人間の火災覚知に基づく計算上では、それぞれの安全境界ノードの避難余裕性は正に無限となる。したがって、計算される地点 n 以降の避難余裕性の推定値は、地点 n については $M_i(t)$ 、安全境界ノードにおいては ∞ となる。両者のうち低い値が避難余裕性の推定値であるため、 $M_i(t)$ が地点 n を通過する避難経路の避難余裕性の推定値である。

以上のようにヒューリスティック関数[17]を用いて避難余裕性の推定値を求め、A*探索法による経路探索を行うことで、最大余裕経路が導かれる。

4. リアルタイム避難シミュレーションの開発

(1) 概要

前章で構築した最大余裕経路の有効性を検証するべく、最大余裕経路に従い避難を実施する、リアルタイム避難のシミュレーションを行う。図 7 に避難シミュレーションモデルのフレームを示す。本シミュレーションモデルは、建物現況や道路ネットワーク等の市街地データを基盤として、出火・延焼および道路閉塞を再現する「地震火災レイヤー」、地震火災に対して、火災覚知・延焼予測及び道路閉塞予測の状況を再現する「覚知状況レイヤー」、覚知状況に基づき避難誘導情報を計算し、各ノードに存在する住民が避難誘導情報に従い避難を実施し、その避難の安全性評価を行う「手法の検証レイヤー」によって構成される。

本研究では、地震火災レイヤー及び覚知状況レイヤーより、所定の避難開始時間のリアルタイム情報を設定し、予め設定した避難開始地点の最大余裕経路及び比較対象の最短経路を計算し、それぞれの経路の安全性を評価する。本実験を繰り返し実施することで、モンテカルロ法による期待値評価を行う。

(2) 本研究で前提とするモデル

まず、それぞれのレイヤーについて、本研究で扱うモデルを設定する。

a) 市街地データ

本研究では、東京消防庁²⁰⁾の東京都の市街地状況調査報告書(第9回)の地理情報データより、以下のデータを用いる。

- ・建物現況
- ・道路ネットワーク(ノード, リンク)
- ・避難場所
- ・避難圏域

上記のデータを用いて、第 3 章(2)で定義した避難ネットワークを構築する。まず、避難圏域を 3 つの領域に分割する。本研究では、洪水・糸井川¹⁸⁾に従い、任意の風速における延焼クラスタ及び避難不能クラスタを生成する。ただし、加藤ら¹⁷⁾に基づき、延焼拡大係数は 1.5 とする。この避難不能クラスタの内側を、通行不能領域とする。次に、道路ネットワークのノードおよびリンクに対して、通行不能領域内か否か、そして避難場所内か否かの判別を GIS 上で行い、フラグを付与する。また、通行不能領域と交差するリンクは、交差部分で分割し、ノードとリンクを再生成する。その後、避難場所に隣接するノードより、避難場所の入口部分に該当するノードを避難場所ノードとして手動で設定し、避難場所ノードからネットワーク探索を行う事で、避難可能確定ノード・避難可能確定リンク及び安全境界ノードを設定する。

b) 地震火災レイヤー

本研究で用いる出火点の生成・出火時間の設定・延焼拡大を表すモデルを説明する。所定の出火件数を平均値とするポアソン分布に従い出火件数を確率的に定め、その出火件数だけ、耐火造建物の重心に出火点を無作為に生成する。すなわち、出火件数分布は出火件数密度 ρ_f [件/m²]、市街地面積 S [m²] をパラメータとした[18]によって求められる。

$$Prob[\text{出火件数} = x] = \frac{(\rho_f S)^x}{x!} e^{-\rho_f S} \quad [18]$$

出火時間は、地震発生より時間遅れで出火するとした鈴木・糸井川¹⁹⁾の指数分布モデルを用いる。したがって、各出火点の出火時間は、[19]に従い確率的に設定される。

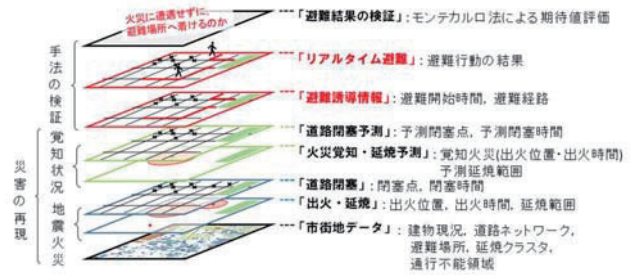


図 7 避難シミュレーションモデルのフレーム

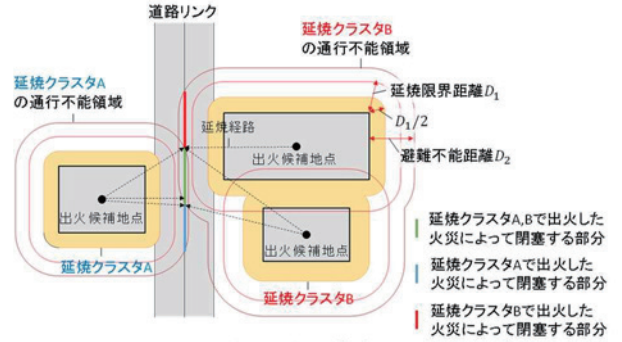


図 8 通行不能領域と道路リンクの閉塞

$$Prob[t_f \leq t [h]] = 1 - e^{-0.733t} \quad [19]$$

ただし、2 件目以降の位置と出火時間は、すでに定めた出火との位置関係及び出火時間を考慮する必要がある。i 件目の出火時間を設定するに際し、i-1 件目までの各出火点へ各出火時間前に延焼が及ばないように、かつ、i 件目の出火が生じる前に i-1 件目までの各延焼が i 件目の出火点へ及ばないように設定しなければならない。本研究では等速同心円状に延焼拡大するモデルを採用するため、i 件目の出火時間は、i-1 番目までの出火点に対して[20]を満たす必要がある。

$$|t_{fi} - t_{fk}| < \frac{|x_i - x_k|}{v_f} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, i-1) \quad [20]$$

ここで、 t_{fi} 、 x_i はそれぞれ、i 件目の出火時間および出火位置のベクトルであり、 $|x_i - x_k|$ は i 件目と k 件目の出火点間の距離である。ただし、i 件目と k 件目が異なる通行不能領域に位置する場合、 $|x_i - x_k|$ は無限の値をとる。[20]を満たすまで、繰り返し出火時間を設定する。

延焼モデルは等速度かつ同心円状に延焼拡大する単純なモデルを仮定する。図 8 に通行不能領域と道路リンクの閉塞の模式図を示す。本研究では、出火時間を迎えた各出火は、その火災が存在する通行不能領域内の道路リンクに対して直線経路で到達し、道路リンクへの到達時間が最も早い火災が道路リンクを閉塞させるものとする。すなわち、各道路リンクの閉塞時間は、延焼距離と延焼速度の関係式として[21]より求められる。

$$\text{道路リンク } i \text{ の閉塞時間} = \min_{f \in Pr} \left(t_f + \frac{d_i(f)}{v_f} \right) \quad [21]$$

ただし、 $d_i(f)$ は出火点 f から道路リンク i までの直線距離であり、 v_f は延焼速度である。

c) 覚知状況レイヤー

藤井ら²¹⁾と同様に、住民による 119 番通報又は駆け付け通報の 2 手段のいずれかによって、出火後に時間遅れで覚知するものとする。すなわち、出火後の覚知所要時間 t_{det} の累積分布は[22]で表される。

$$Prob[t_{det,i} \leq t] = p_{det} \left(\frac{r_{119}}{r_{119} + r_{run}} P_{119}(t) + \frac{r_{run}}{r_{119} + r_{run}} P_{run}(t) \right) \quad [22]$$

ただし、 p_{det} は初動対応で覚知される確率(以下「覚知確率」と呼ぶ)、 r_{119} 、 r_{run} は 119 番通報及び駆け付け通報を手段として覚知する割合である。藤井ら²¹⁾が集計した阪神・淡路大震災の覚知手段割合より、 r_{119} に 0.25、 r_{run} に 0.30 を設定した。また、 $P_{119}(t)$ 、 $P_{run}(t)$ は 119 番通報及び駆け付け通報による覚知所要時間の累積分布であり、藤井ら²¹⁾より[23]で表される。

$$P_{119}(t) = 1 - e^{-0.0558 \cdot 60 \cdot t}$$

$$P_{run}(t) = 1 - e^{-\pi \rho_f \frac{v_w(t-b)^2}{1.3 \cdot (1 + a v_w)}} \quad [23]$$

ただし、各種パラメータは非線形回帰分析より、以下の通り。

$$\rho_f = 3.14 \times 10^{-7} [\text{件}/\text{m}^2], v_w = 4458 [\text{m}/\text{h}], a = 0.018, [\text{m}/\text{h}], b = 0 [\text{h}]$$

図9に、覚知確率別・6時間後の出火件数を1とした出火件数比率、覚知件数比率及び未覚知率(出火件数比率と覚知件数比率の差分)を示す。時間経過に対して出火件数が増加する中、最大余裕経路で避難した時に、未覚知火災に遭遇しない可能性も避難の安全性として重要である。

なお本稿では、延焼予測は、地震火災レイヤーと同じモデルで正確に行われると仮定する。延焼速度誤差によって覚知火災に遭遇するか否かの検証は今後の課題として、避難開始時に見積られる避難余裕性のに基づき、最大余裕経路の安全性の評価及び特性の考察を行う。

d) 手法の検証レイヤー

覚知状況レイヤーで計算された結果に基づき、予め設定した避難開始時間・避難開始地点における最大余裕経路及び最短経路の探索を試みる。この時、避難経路が見つかる場合を「避難経路発見」とする。その後、各避難経路について、[5]の避難余裕性及び避難距離を評価する。ただし、避難余裕性が無限の場合、緊急的に避難する必要がないと評価し、「避難不要」とする。その後、避難者が設定された歩行速度で避難経路に沿って避難した時に、未覚知火災に遭遇するか否かの判別を行う。避難場所まで火災に遭遇しない場合を「避難成功」とする。本実験を十分な回数試行し、避難開始時間別・避難開始地点別にモンテカルロ法による期待値評価を行う。

本研究では、以上の試行結果に対して、避難開始時間別・避難開始地点別に以下の安全性指標の評価を行う。安全性指標は、避難実行可能性を表す「経路発見率」、避難開始時の見積もり評価を表す「平均避難余裕性」「平均避難距離」、避難の実施結果を評価する「避難成功率」「避難不要率」の3種類5項目を定義する。

経路発見率は、試行回数に対する「避難経路発見」回数の割合であり、[24]で評価する。経路発見率が高いほど、地震後遅くまで、避難可能と判断される割合が高いことを意味する。

$$\text{経路発見率} = \frac{\text{「避難経路発見」回数}}{\text{試行回数}} \quad [24]$$

平均避難余裕性は、有限な避難余裕性が計算された試行における避難経路の避難余裕性の平均値であり、[25]で評価する。平均避難余裕性が高いほど、覚知火災に対して、避難余裕性の高いと評価された避難経路で避難開始していることを意味する。

$$\text{平均避難余裕性} = \frac{\sum \text{避難余裕性}}{\text{「避難経路発見」回数} - \text{「避難不要」回数}} \quad [25]$$

平均避難距離は、避難経路が発見された試行における避難距離の平均値であり、[26]で評価する。平均避難距離が小さいほど、避難場所へ早く到達する避難経路で避難開始していることを意味する。

$$\text{平均避難距離} = \frac{\sum \text{避難距離}}{\text{「避難経路発見」回数}} \quad [26]$$

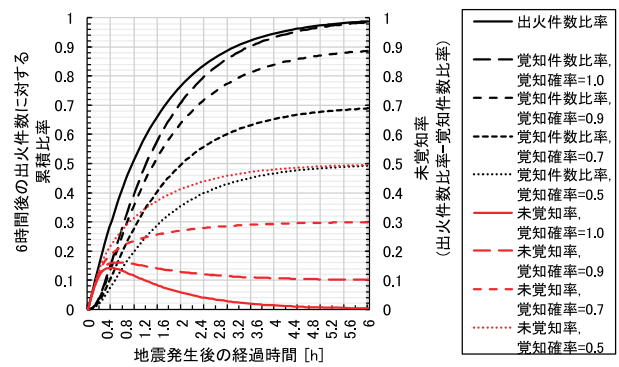


図9 地震発生後の経過時間に対する出火件数比率、覚知件数比率及び未覚知率

避難成功率は、「避難経路発見」回数に対する「避難成功」回数の割合であり、[27]で評価する。避難成功率が大きいくほど、未覚知火災に遭遇しにくい経路で避難していたことを意味する。

$$\text{避難成功率} = \frac{\text{「避難成功」回数}}{\text{「避難経路発見」回数}} \quad [27]$$

避難必要率は、「避難経路発見」回数に対する「避難不要」ではない回数の割合であり、[28]で評価する。避難必要率が低いほど、覚知火災に対して、緊急的には広域避難をする必要がない(避難余裕性=∞)ように、避難経路が確保されていたことを意味している。

$$\text{避難必要率} = 1 - \frac{\text{「避難不要」回数}}{\text{「避難経路発見」回数}} \quad [28]$$

5. 最大余裕経路の特徴分析

(1) 対象地とシミュレーション条件の設定

大井競馬場・しながわ区民公園の避難圏域を対象として、リアルタイム避難シミュレーションを実施し、ケーススタディによる最大余裕経路の特徴について分析を行う。図10に、シミュレーションを実施する避難圏域の市街地データ及び避難開始地点を示す。各町丁目の重心への最寄り道路のノードを避難開始地点として、大井競馬場までの避難経路の特徴について考察する。

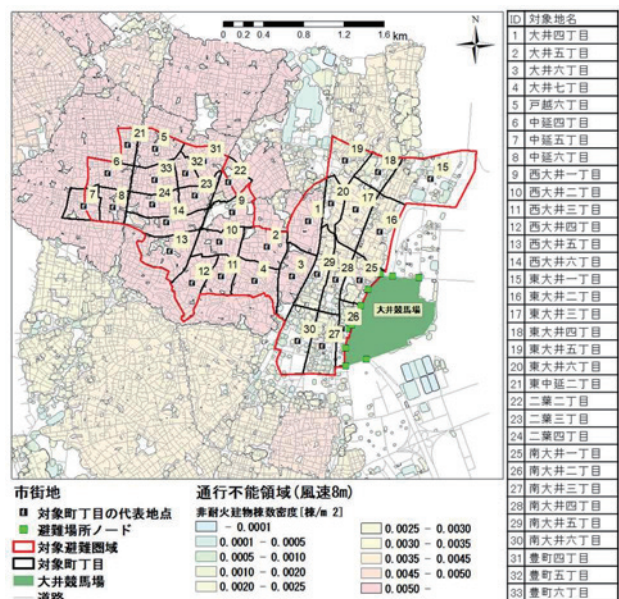


図10 大井競馬場・しながわ区民公園の避難圏域

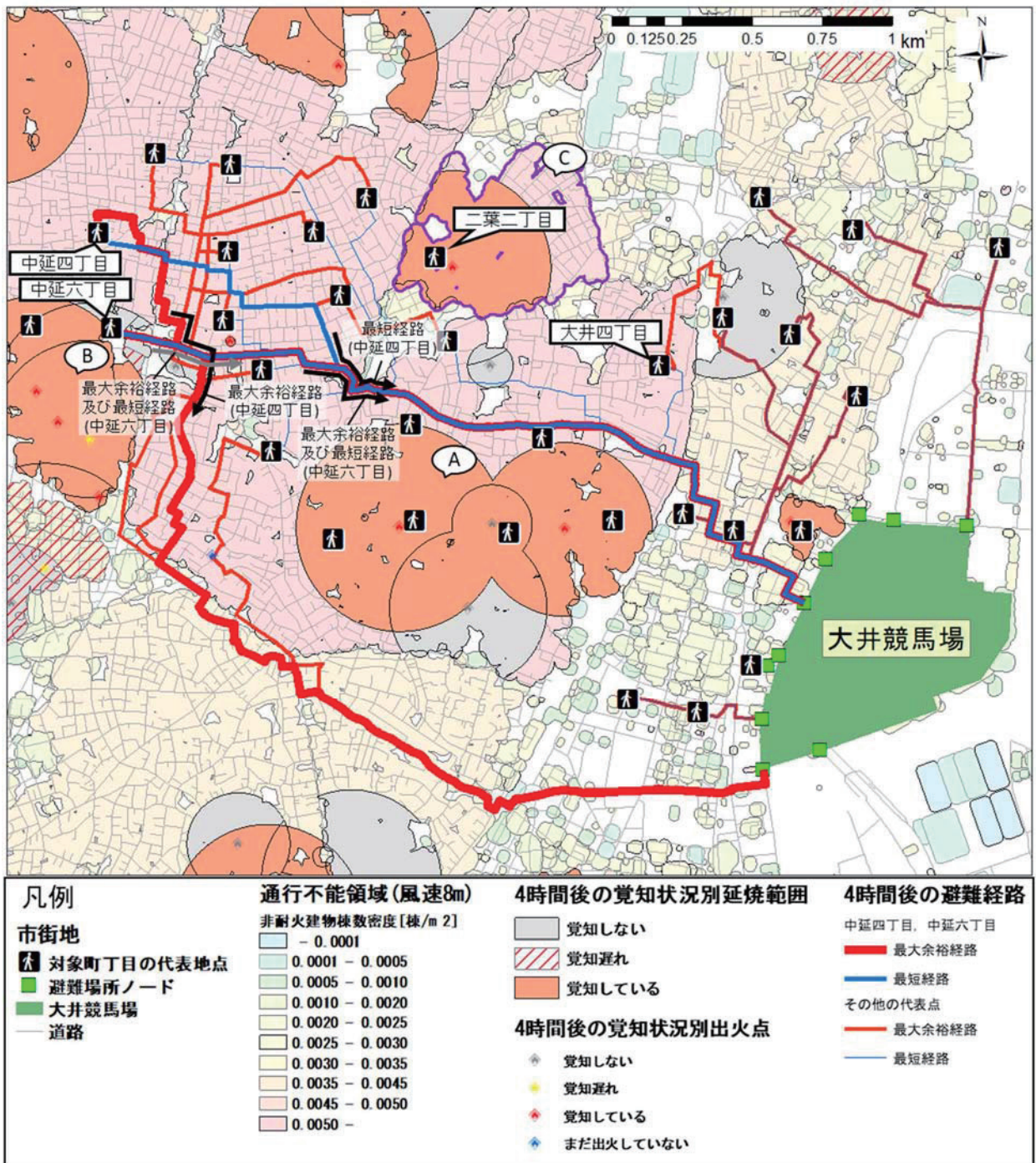


図 11 4 時間後の覚知状況に対する避難経路(覚知確率=0.5 の 1 ケース)

表 2 に実験パラメータの設定値を示す。パラメータには、気象条件として風速、火災リスクとして出火件数密度・延焼速度、覚知状況として覚知確率、避難者の行動として歩行速度・避難開始時間、加えて、モンテカルロ法の試行回数がある。本研究では、風速8mの延焼クラスタに対する避難不能クラスタを生成した。また、火災リスク及び避難者のパラメータは、通行不能領域や地域によらず、一律の値として、東京都被害想定等を参考にして表 2 の値を設定した⁽³⁾。覚知確率は、藤井ら²¹⁾の集計結果を元に、阪神・淡路大震災における住民による通報割合に近い0.5を基本ケースとして、住民の協力強化を想定し0.7,0.9,1.0を設定した。試行回数は、前章で定義した各安全指標の期待値が十分収束する回数かつ、計算時間を考慮し、1000回を設定した。

表 2 実験パラメータの設定

パラメータ名	設定値	関係レイヤー
風速	8 [m/sec]	市街地データ
出火件数密度	3.0×10^{-6} [件/m ²]	地震火災
延焼速度	100 [m/h]	地震火災・覚知状況
覚知確率	0.5, 0.7, 0.9, 1.0	覚知状況
歩行速度	4000 [m/h]	手法の検証
避難開始時間	0, 1, 2, 3, 4 [h]	手法の検証
試行回数	1000回	手法の検証

(2) 結果と考察

a) 選択される経路の空間的特徴

覚知確率=0.5の場合の1000回のシミュレーションケースのうち1ケースについて、4時間後の避難経路を図11

のように GIS 上で可視化した。最短経路を青線，最大余裕経路を赤線で示す。いずれの避難経路も，4 時間後の時点で，各町丁目の代表点から避難場所まで，火災を迂回するように避難経路が導かれているが，それぞれ異なる経路が選択されていることがわかる。

中延四丁目の避難経路に注目すると，最短経路では，覚知火災の間を縫うように一直線に経路が選択されており，覚知火災(図中 A)の近傍を通過するため，覚知火災に対して，非常に切迫した避難経路であることがわかる。一方で，最大余裕経路では，南方へ，覚知火災(図中 A)を大きく遠ざかるように避難経路が選択されている。覚知火災(図中 A)の延焼が及ばない，南方に位置する別の通行不能領域へいち早く抜けるように経路選択が行われることで，覚知火災に対して避難余裕性を確保しているように見える。

しかし，避難経路選択が適切に行われない例も存在する。中延六丁目の避難経路に注目すると，最短経路と最大余裕経路が完全に一致している。本来ならば，中延四丁目と同様に，南方へ迂回する経路が選択されるべきである。しかし，中延六丁目の代表点の近傍に覚知火災(図中 B)が存在するため，代表点における避難余裕性が最小値となり，その他の覚知火災に対する避難余裕性が考慮されず，最短経路と同様な経路が導かれたと考えられる。

また，すでに未覚知火災の延焼が及んでいるにも関わらず，避難経路が発見されていたり，未覚知火災を横切っていたり等，至るところで，未覚知火災への遭遇が散見される。一方，大井四丁目の最大余裕経路のように，未覚知火災へ遭遇後も，避難途上で，新たな迂回経路を再探索することで，未覚知火災を回避できるとされる状況も見られ，経路更新の重要性が示唆される。

b) 安全性指標の特徴

安全性指標の特徴について定量的評価を行う。本研究では，避難場所から遠方に位置し，比較的风险が高いと考えられる中延四丁目を例として考察する。

まず，避難の実行可能性として，覚知確率別・避難開始時間に対する経路発見率の推移を図 12 に示す。避難開始時間が遅くなるほど，経路発見率が低下していることがわかる。4 時間後の時点で，0.95 以上と非常に高いものの，4 時間以内には，覚知確率=1.0 のケースで 0.3 を下回っており，1 時間以内の早期の避難誘導が重要であることが示唆される。また，覚知確率=0.5 のケースと 1.0 のケースでは，経路発見率に大きな乖離があり，すでに避難不能になっているにも関わらず，経路が発見されているという誤認識に陥る危険性が考えられる。したがって，リアルタイム避難誘導を行うためには，早期の時点での避難誘導と覚知確率の確保が非常に重要であると言える。

次に，発見された避難経路の安全性指標について，平均避難余裕性・平均避難距離・避難成功率および避難必要率の分析・考察を行う。図 13，図 14，図 15，図 16 に，それぞれ，左側に経路別・覚知確率別・避難開始時間に対する平均避難余裕性・平均避難距離・避難成功率及び避難必要率の推移(中延四丁目の例)，右側に地域別・最大余裕経路と最短経路の四時間後の指標を比較した散布図を示す。

まず，平均避難余裕性を比較する(図 13)。最大余裕経路では，避難開始時間が 1 時間後や 2 時間後の場合，1 を優に超えており，予測平均延焼速度の 2 倍以上の速度の火災延焼まで許容できると評価されている。やや過大な安全性の確保ではあるが，最大余裕経路で避難することで，覚知火災に対して十分な避難余裕性が確保することができる。一方，最短経路では覚知確率=1.0 のケースにおいて，1 時間後の時点で 1 未満であり，覚知火災に対して避難余裕性が確保されにくいことがわかる。地域別に

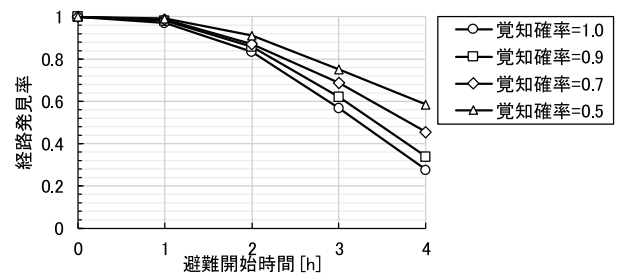


図 12 覚知確率別・避難開始時間に対する経路発見率 (中延四丁目の例)

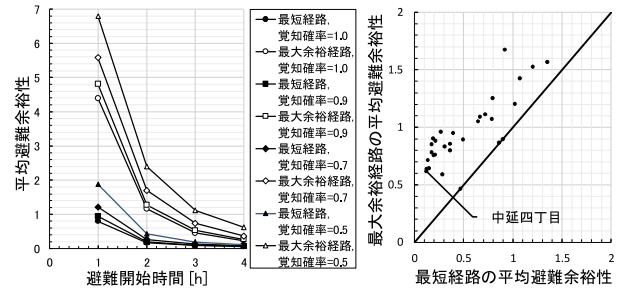


図 13 覚知確率別・避難開始時間に対する避難余裕性 (左: 中延四丁目の例，

右: 地域別・4 時間後の最大余裕経路と最短経路の比較)

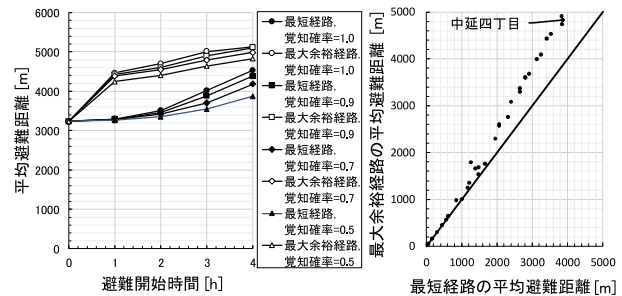


図 14 覚知確率別・避難開始時間に対する避難距離 (左: 中延四丁目の例，

右: 地域別・4 時間後の最大余裕経路と最短経路の比較)

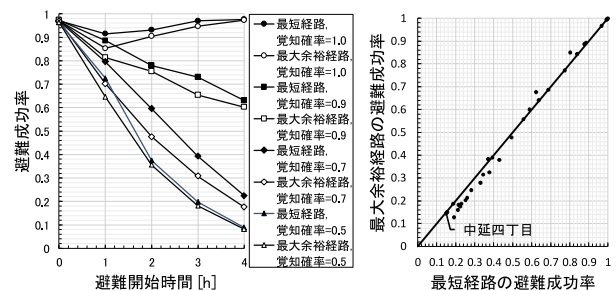


図 15 覚知確率別・避難開始時間に対する避難成功率 (左: 中延四丁目の例，

右: 地域別・4 時間後の最大余裕経路と最短経路の比較)

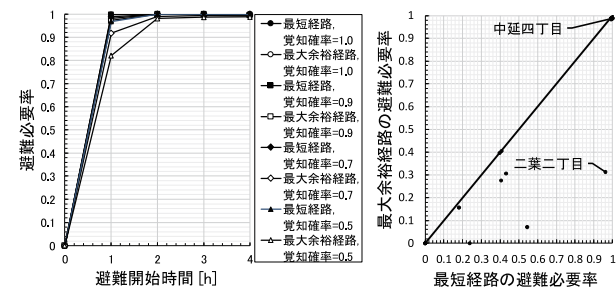


図 16 覚知確率別・避難開始時間に対する避難必要率 (左: 中延四丁目の例，右: 地域別・4 時間後の最大余裕経路と最短経路の比較)

4 時間後の平均避難余裕性を比較した散布図を見ると(図 13 右), 殆どの地域において, 最短距離よりも最大余裕経路の方が, 非常に大きな避難余裕性を確保していることがわかる。ただし, いずれの経路も, 避難開始時間の遅れに対して反比例的に避難余裕性が低下している。3 時間後や 4 時間後の避難のように, 避難開始が遅れると, 急に切迫した避難経路での避難になることがわかる。

次に平均避難距離を比較する(図 14)。最大余裕経路では, 避難開始の遅れに伴い距離は急激に増大し, 最短経路と異なり, 大きな避難距離を要してしまう。これは, 火災に対して避難余裕性を十分に確保するために, 火災に対して大きく迂回するように経路が選択されるためであると考えられる。

一方, 避難成功率を比較すると, 最大余裕経路と最短経路に大きな差がないことがわかる(図 15)。最大余裕経路は, 覚知火災を迂回するように経路が設定されるため, 自ずと避難場所に到達するまでの避難距離が長くなり, 避難距離が長い分だけ, 未覚知火災へ遭遇する可能性が高くなる。一方で, 覚知火災を迂回する際, 覚知火災が存在しやすいため火災リスクの高い地域の道路が回避されるため, 避難距離が長くなることによって増大した未覚知火災への遭遇可能性が相殺され, 結果的に最短経路の避難成功率と殆ど変わらなかったと考えられる。図 11 の中延四丁目の最大余裕経路に着目すると, 迂回先の通行不能領域は, それ以前の領域と比較して, 建物棟数密度が低く, 火災リスクが低い道路が選択されていることがわかる。

また, 覚知確率による避難成功率の違いに着目すると, 覚知確率=1.0 のケースとそれ以外のケースにおいて, 避難成功率の推移の特徴が異なる。覚知確率が 1.0 未満のケースでは, 避難開始時間の遅れに伴って避難成功率が低下する傾向が見られ, 覚知確率が低いほどその傾向は顕著になる。一方, 覚知確率=1.0 のケースでは, 地震発生直後においては, 時間経過に伴い避難成功率は低下していくものの, 避難開始時間が 1 時間の時点に境に, それ以降, 避難成功率が上昇している。図 9 より, 地震発生直後では, 覚知確率に関わらず, 未覚知率が上昇しているが, 覚知確率=1.0 のケースの場合では, 経過時間 0.5 [h] を境に, 時間の経過とともに減少し, いずれ未覚知率は 0 に収束している。一方, それ以外のケースでは未覚知火災の件数が増大もしくは停滞し, 一定数の未覚知火災が地域に残存する。したがって, 覚知確率=1.0 のケースのみ, 未覚知火災の影響が減少していくため, 避難成功率に上述の傾向が見られると考えられる。加えて, 覚知確率が 1.0 未満のケースでは, 覚知確率が低いほど延焼拡大し続ける未覚知火災が多くなるため, 覚知確率が低いほど避難成功率の低下に影響すると考えられる。

最後に, 避難必要率を比較する(図 16)。中延四丁目の例では, 最短経路よりも最大余裕経路の方がやや低いことがわかる。ただし, いずれ避難限界時間が定まるため, 避難必要率は避難開始の遅れに伴い 1 に収束している。火災が存在する通行不能領域を迂回するように避難経路が選択することで, 避難余裕性が無限に保たれることが理由として考えられる。ただし, 避難必要率の特性は地域によって異なる。地域別に 4 時間後の避難必要率を比較したグラフ(図 16 右)を見ると, 二葉二丁目のように, 最短経路では 1 に近いのに対して, 最大余裕経路では 0.3 程度である。二葉二丁目は, 大きな通行不能領域に隣接する領域上に位置しており(図 11 中 C), 自身の通行不能領域に出火が存在しなければ, 最大余裕経路探索の際, 覚知火災が存在しない通行不能領域に向かうように, 南北東方向のいずれかへ経路を選択することで避難余裕性が無限に維持されていると考えられる。

c) 最大余裕経路の特徴に関するまとめ

以上の考察より, 最大余裕経路の特徴を整理する。

最大余裕経路は, 覚知火災に対して十分に避難余裕性を確保するように覚知火災を迂回した経路を選択するため, 最短経路と比較して遠回りの経路になる。したがって, 非常に高い避難余裕性を確保できるメリットの一方で, 避難距離が増大するデメリットが存在する。ただし, 迂回する際, 比較的建物棟数密度が低い地域を通過するため, 避難成功率は最短経路と比較して殆ど変わらない。ゆえに, 最大余裕経路は, 避難者の体力的に許容される範囲において, 最短経路程度の未覚知火災に対する安全性を維持しながら, 避難余裕性を確保できる有効な避難経路であると言える。加えて, 避難余裕性を確保する際, 覚知火災が存在する通行不能領域を避けるように経路を選択するため, 避難必要率も低くなる。

ただし, 本研究における最大余裕経路の導出において, 適切な避難余裕性の確保に関する以下の問題点が残される。まず, 避難開始地点の付近に覚知火災が存在する場合, 常に避難開始地点で避難余裕性が最小値となり, 経路選択でその他の地点の避難余裕性が反映されない点である。もう一つは, 早い段階での避難の場合, 確保される避難余裕性が過大となる問題である。避難開始時間が 1 時間の場合, 4 以上の避難余裕性が確保されている(図 13)。これは, 予測延焼速度の 5 倍の速度まで許容できることを意味している。本研究のシミュレーションでは, 平均延焼速度を 100[m/h] で計算しているため, 予測に対して 5 倍の延焼速度は考えにくく, 過大な避難余裕性であると言える⁽⁴⁾。したがって, 延焼予測モデルの精度に依存するものの, 確保できる避難余裕性が非常に大きい状況では, 確保すべき避難余裕性の下限値を制約として, 避難距離の短縮を図る方法が望ましいと考えられ, 今後の検討課題であると言える。

また, 図 11 で見られるように, 未覚知火災の延焼範囲を横切る経路が至るところで選択されており, 避難途上における未覚知火災遭遇後の経路更新も今後の課題として重要である。火災遭遇時, 避難余裕性を確保する避難経路で避難しているならば, 少なくとも覚知火災は密に存在していない領域での遭遇であるため, 経路更新も比較的容易になると予想する。

6. 結論と今後の展望

(1) 結論

本研究では, 延焼予測のばらつきに対して安全な避難経路である最大余裕経路の導出に当たり, 避難余裕性の定式化及び最大余裕経路のモデル化を行い, A*探索法による最適化方法の開発を行った。また, リアルタイム避難シミュレーションを実施し, 以下の結論が得られた。

a) 避難余裕経路の特徴

最大余裕経路は, 覚知火災を大きく迂回するように選択されるため, 高い避難余裕性を確保できるが, 避難距離の増大に繋がる一方, 避難成功率は最短経路と殆ど変わらず, 覚知火災が存在しにくい地域を通過するように経路選択が行われるため, 未覚知火災への遭遇リスクも同時に低減されていると考察した。以上より, 避難者の体力が許される距離の制約の下, 最大余裕経路で避難誘導を行うことで, 延焼予測のばらつきに対して高い安全性で避難可能であることが示された。

b) 適切な避難余裕性の確保のための課題

本研究では, マクシミン原理で避難余裕性を最大化したが, これに伴う技術的な問題として, 適切な避難余裕性が確保されないケースの存在が判明した。

- ・避難開始地点の近くに覚知火災が存在する場合、避難開始地点で避難余裕性の最小値が計算され、その他の覚知火災に対する避難余裕性が考慮されないこと。
- ・避難開始が早い段階で避難余裕性を最大化すると、過大な避難余裕性確保につながる。

以上に対して、マクシミン原理に加えて、それぞれの覚知火災に対して確保すべき避難余裕性の下限値の制約を与えることで、全ての覚知火災に対する避難余裕性を考慮する工夫を施し、また、避難余裕性が大きい場合には、避難距離の短縮を図る方法が望ましいと指摘した。

c) 未覚知火災の対応に関する限界

本研究では、時間遅れの覚知を考慮することで、避難経路への未覚知火災の影響を考察した。結果、覚知確率が1.0の場合のみ、全ての火災がいずれ覚知されるため、避難開始時間に応じて火災を迂回する安全な避難経路が得られる。しかし、覚知確率が1.0未満である限り、未覚知火災が残存するため、未覚知火災を横切る経路が計算される可能性があり、覚知火災の迂回のみでは確実な避難は実現困難であることが判明した。これに対して、未覚知火災への対応には、避難途上における火災遭遇後の経路更新が今後の課題として重要であることを指摘した。

(2) 今後の展望

本研究では、避難余裕性モデルを構築するに当たり、多くの仮定を設けることで、リアルタイム情報を単純化した。今後は、本モデルの特徴をより深く分析した後、実際に収集されるリアルタイム情報に基づいて評価する方法へ拡張するとともに、本モデルを応用したリアルタイム避難誘導の体制確立に注力する。

謝辞

なお、本研究の一部は、総務省消防庁消防防災科学技術研究推進制度による「地震火災時の不完全な覚知火災情報に基づくリアルタイム避難誘導支援に関する研究」によるものである。

補注

- (1) 本研究では、全方位を風下とみなした同心円状に延焼するモデルを想定し、より危険な延焼状況に対して確保される避難余裕性を、計画的な安全側で評価することを目的としている。
- (2) 平均延焼速度は、火災前線が出火点から閉塞点へ到達するまでの延焼速度の平均値と定義する。
- (3) 風速は、東京都の被害想定⁴⁾に従い8 [m/sec]を設定した。期待出火密度は、東京都の被害想定⁴⁾に従い設定した。東京湾北東京都の被害想定⁴⁾における、東京湾北部地震(冬18時、風速8 [m/sec])のケースでは、区部全体の約165万棟のうち最大754件で出火が発生し、出火率は0.000459 [件/棟]となる。建ぺい率を0.5、建物一辺長を8 [m]と仮定し、期待出火密度を概算すると約 3.5×10^{-6} [件/m²]であり、この値に近い 3.0×10^{-6} [件/m²]を用いた。なお、阪神・淡路大震災では、1万世帯あたり平均約1.7件、多い地域では約4件の出火があり²³⁾、上記と同様に期待出火密度を概算すると、平均約 1.3×10^{-6} [件/m²]、多い地域で約 3.13×10^{-6} [件/m²]であり、今回のケースは、阪神・淡路大震災における出火が多い地域と同程度である。延焼速度は、東京消防庁²²⁾によると、東消式2001を用いた場合に東京都23区の強風下において算出される延焼速度の最大値が100 [m/h]程度であり、深刻な状況を想定するため100 [m/h]とした。歩行速度は、文献²⁴⁾に従い、水平移動時の標準的な歩行速度1.0 [m/sec]から2.0[m/sec]に近い4,000 [m/h]とした。
- (4) 現代市街地において、放任火災の延焼速度は、相当の強風下でも300 [m/h]程度と考えられる²⁵⁾。本研究では、予測平均延焼速度を100 [m/h]で一様に設定し避難余裕性を算出している

ため、現実的に考えられる延焼速度誤差は高々200 [m/h]である。したがって、本研究のシミュレーション実験において、避難余裕性は2から3程度確保すれば十分であると言える。

参考文献

- 1) 内閣府：首都直下地震対策検討ワーキンググループ最終報告、中央防災会議、http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg.
- 2) 国土交通省：「地震時等に著しく危険な密集市街地」について、報道・広報、http://www.mlit.go.jp/report/press/house06_hh_00102.html, 2012.
- 3) 新潟県：平成28年新潟県糸魚川市における大規模火災に関する情報、<http://www.pref.niigata.lg.jp/kikitaisaku/2016itoigawashikasai.html>(最終閲覧日:2018年1月16日).
- 4) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定、東京都防災ホームページ、http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_001/000/401/20120418gaiyou.pdf.
- 5) 東京都都市整備局：防災都市づくり推進計画、<http://www.toshi-seibi.metro.tokyo.jp/bosai/bosai4.htm>.
- 6) 東京都：避難所及び避難場所、東京都防災ホームページ、<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bosai/1000026/1000316.html>.
- 7) 糸井川栄一他：地震火災時のリアルタイム情報処理システムの開発—延焼拡大予測と避難情報処理に関する研究—、建設省建築研究所、建築研究報告、No.120, 1989.
- 8) 東京消防庁：第23期火災予防審議会資料, 2018.
- 9) 鈴木雄太, 糸井川栄一：地震火災時のリアルタイム避難誘導における避難リスクに関する考察, 地域安全学会, 地域安全学会梗概集, No.42, pp.179-182, 2018.
- 10) 増山格, 梶秀樹：大地震時広域避難計画検討のための最遅避難モデルの開発, 日本都市計画学会, 第19回日本都市計画学会論文集, pp.379-384, 1984.
- 11) 増山格, 梶秀樹：最遅避難モデルによる耐震火災時の広域避難計画の評価, 日本都市計画学会, 第20回日本都市計画学会論文集, pp.67-72, 1985.
- 12) 李載吉, 梶秀樹：拡張最遅避難モデルに基づく避難誘導からみた避難計画の評価, 日本都市計画学会, 一般研究論文, pp.72-77, 1992.
- 13) Yuta Suzuki and Eiich Itoigawa: Safety Evacuation Model of Evacuation Guiding in Real Time Response under Post-Earthquake Fires", Proceedings of 4thACUDR (USB-Memory), 2017.
- 14) Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael: A formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.
- 15) 三好孝典他：出火・延焼のリスクを考慮した広域避難計画に関する研究, 地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.10, pp.105-112, 2008.
- 16) 石井儀光, 塚塚武志：同時多発出火時における直線的避難距離の分布に関する理論的考察, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, No.33, pp.331-336, 1998.
- 17) 加藤孝明他：建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築, 地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.8, pp.1-10, 2006.
- 18) 渋谷孝行, 糸井川栄一：延焼クラスタを考慮した地震火災時における避難危険性評価に関する研究, 地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.29, pp.95-105, 2016.
- 19) 鈴木雄太, 糸井川栄一：大震火災時における出火時刻分布を考慮した避難リスク評価, 地域安全学会, 地域安全学会梗概集, No.40, pp.15-18, 2017.
- 20) 東京消防庁：東京都の市街地状況調査報告書(第9回), 平成27年3月に基づく地理情報システムデータ.
- 21) 藤井啓, 糸井川栄一：地震火災時における消防機関の情報収集活動による戦略的な消防運用に関する研究, 地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.7, pp.351-359, 2005.
- 22) 東京消防庁：地震火災に関する地域の防火特性評価手法の開発と活用方策, 火災予防審議会, 2001.
- 23) 日本火災学会, "1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書", p.398, 1996.
- 24) 堀内三郎：新版 建築防火, pp.93-95, 1994.
- 25) 岩見達也：市街地火災のリスク評価, 日本建築学会大会(近畿), 防火部門パネルディスカッション資料「マルチハザード下の広域避難」, 2014.

(原稿受付 2018.05.13)
(登載決定 2018.9.2)

