

地震火災時のリアルタイム避難誘導における危険性に関する考察 - 覚知火災情報の不完全性に着目して - The Risk of Incompleteness of Fire Information on Real-time Evacuation Guidance under Post-Earthquake Fires

○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.

We study the real-time evacuation guidance method, especially in case of simultaneous multiple fires under the large-scale earthquake, which informs the residents of an evacuation start time and a safe route to an evacuation site based on fire information gathered by fire services. In this paper, for the purpose of understanding the risk of evacuation guiding based on incomplete information, we considered the influences of undetected fires and some errors on the fire spreading forecast. As a result, we pointed out the following. (i) An estimation of limit time for evacuation safety has uncertainty. (ii) It is difficult to find the reliable route which an evacuee never encounters fire. In addition, we suggested the two evacuation policies of “maximizing evacuation possibility” and “securing a margin for evacuation”.

Keywords : post-earthquake fire, realtime evacuation guidance, incompleteness of information, evacuation risk

1. 研究の背景と目的

近年、首都直下型地震等の大地震の発生が危惧されており、木造密集住宅地域と呼ばれる火災に対する脆弱性が高い地域において、同時多発的な市街地火災による甚大な被害が予想される。東京都を代表とする大都市では、ハード対策として、延焼遮断帯の整備や市街地の不燃化・難燃化による地震火災に対して強いまちづくりが推進されている。また、ソフト対策として、それぞれの地域で想定される火災に対して安全が確保された避難場所とその圏域を指定する避難計画²⁾が策定されている。ハード整備による減災効果や、避難場所へ辿り着くまでの安全性の検証等の課題が残るものの、ハードとソフトの双方による総合的な事前対策が行われている。

一方、内閣府の被害想定³⁾では、首都直下型地震が30年以内に70%程度の高確率で発生することが予測されており、地震発生までの切迫性を考慮すると、時間を要する事前対策の進行途上による発災における応急対策が重要である。一般に、災害時の応急対策の一つとして住民の緊急避難が挙げられる。地震火災時の緊急避難では、至るところに発生した火災の複雑な延焼によって、避難経路が経たれる前に、避難開始し、火災を迂回する安全な経路で避難する必要がある。

筆者ら⁴⁾は以上の要請に対して、消防機関等によって収集される火災情報(以下、覚知火災情報)に基づき、火災に対して安全な避難経路と適切な避難開始時刻で住民の避難を支援するリアルタイム避難誘導方法について検討している。これまでも、覚知火災情報に基づいたリアルタイム避難誘導について、いくつかの研究がなされている。建築研究所⁵⁾は、地震時の情報処理システムの一部として、最遅避難理論⁶⁾⁷⁾⁸⁾に従い、火災に対して安全に避難可能な最も遅い限界時間(以下、避難限界時間)

とそれを実現する避難経路による避難誘導を提案している。また、東京消防庁⁹⁾では、第23期火災予防審議会にて、行政の避難勧告支援を目的として、覚知火災情報を活用した地域の避難リスク評価方法が検討されている。いずれも、正確な延焼予測と全出火の覚知という完全情報下を前提として、対応策が検討されている。

一方、阪神・淡路大震災の火災情報の収集状況や延焼予測の検証¹⁰⁾を考慮すると、覚知されていない火災や延焼予測のばらつきが存在しており、避難限界時間や地域の避難リスクの計算に考慮できない“未知の火災リスク”が存在すると考えられる(以下、覚知火災情報に考慮されない火災リスクの存在可能性を不完全性と呼ぶ)。この不完全性を有する覚知火災情報下で避難誘導を行う場合、誘導者の意図しない危険に避難者を晒してしまうリスクが考えられる。これを回避するためにも、十分に安全な時間での避難開始と、安全な避難経路への誘導が重要である。安全について検討するためには、リスクの理解が不可欠であるが、不完全情報下のリアルタイム避難誘導における避難リスクについて、十分に検討されていない。

そこで、本研究では、不完全情報下を想定したリアルタイム避難誘導における避難リスクの理解を目的とし、避難開始時間と避難経路に着目して、過去の地震時出火・覚知データやシミュレーションを参考に考察を行う。まず、リアルタイム避難誘導時の覚知火災情報として出火と延焼予測を挙げ、それぞれで考えられる不完全性を整理する。その後、整理した不完全性によって生じる避難リスクとして、避難限界時間の不確実性と避難経路の信頼性について考察する。次に、避難シミュレーションを用いて、避難限界時間について定量的な評価を行う。最後に、避難経路の選択に関する、安全なリアルタイム避難誘導のための方針を提案する。

2. 覚知火災情報の不完全性と避難危険性

本章では、覚知火災情報として、出火および延焼予測に着目し、避難誘導に与える影響を定性的に考察する。

(1) 出火情報の不完全性と閉塞時間の不確実性

図1に示す阪神・淡路大震災における出火および覚知件数の推移によると、出火件数は時間経過とともに次第に増加しており、地震発生に対して時間遅れで発生している。また、出火と覚知の間には常に差がみられ、出火時間と覚知時間には一定のタイムラグが存在することがわかる。このように、誘導時よりも遅れて出火・覚知する避難情報に考慮できない火災(以下、併せて未覚知出火と呼ぶ)が存在する。図1の事例では、2時間後の時点で約80件の未覚知出火の存在が確認できる。この未覚知出火がランダムに存在することで、周辺地域の道路閉塞は不確実性を有し、閉塞時間にばらつきが生じると考えられる。

(2) 延焼予測の不完全性と閉塞時間の不確実性

東消式2001¹¹⁾を代表とする延焼速度式は、出火点を火元としたシミュレーションにおいて、酒田耐火や阪神・淡路大震災等の過去の市街地火災に対して、一定の予測精度を有している。一方、建物データが二次元の矩形で表されていたり、構造の分類は高々4分類であったりとデータの精度には限界がある。加えて、建物倒壊や気象状況は不確実であるため、それらのデータに基づく延焼予測も不確実であると考えられる。

この延焼予測の誤差が道路の閉塞時間に与える影響を簡単に示す。延焼予測における平均延焼速度を \hat{v} 、真の平均延焼速度を v と置くと、両関係は予測誤差 Δv を用いて式(1)で表される。ある経路までの延焼が延焼経路長 L で及ぶとすると、閉塞時間の誤差は式(1)を用いて式(2)となる。式(2)より、閉塞時間の誤差延焼速度の誤差率 ε_v に比例していることがわかる。前述の考察では、延焼予測が不確実性を有するため、延焼速度の誤差率は一定ではなく、延焼予測による道路の閉塞時間にもばらつきが生じてしまう。

$$v = \hat{v} + \Delta v \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{L}{\hat{v} + \Delta v} - \frac{L}{\hat{v}} = \frac{L}{\hat{v}} \cdot \frac{\Delta v}{(\hat{v} + \Delta v)} = \frac{L}{\hat{v}} \cdot \varepsilon_v \quad \text{式(2)}$$

ここで、 ε_v は誤差率であり、 $|v - \hat{v}|/v$

(3) 不完全情報下の避難リスク

前述の未覚知出火の存在、延焼予測の限界による閉塞時間の不確実性が及ぼす避難リスクを考察する。

a) 避難限界時間の不確実性

まず、既往研究⁹⁾のように、避難限界時間に基づく避難勧告に対して避難開始することを想定する。完全情報下において安全に避難できる条件を図2に示す。避難経路の遮断時間は、各道路における閉塞地点を通過するための所要時間と閉塞時間の猶予時間の最小値より導出される。増山・李・梶が提唱した最遅避難理論では、本時間を最大化するように避難経路を選択することで、避難限界時間が計算される。完全情報下では、各道路の閉塞時間が確実であるため、避難限界時間までに適切な経路で避難開始することで避難者の安全が確保される。

一方、不完全情報下では、未覚知出火の存在可能性および延焼予測の限界による閉塞時間の不確実性により、真の避難限界時間も不確実になる(図3)。ゆえに、計算された避難限界時間と真の避難限界時間の間に、避難開始

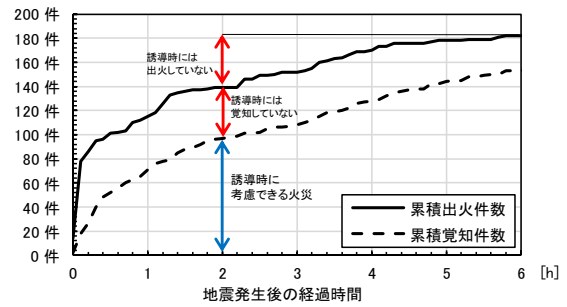


図1 阪神・淡路大震災における出火・覚知件数の推移 (参考文献10)を基に、筆者が作成)

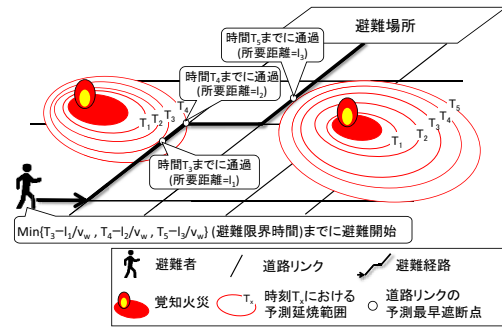


図2 完全情報下において安全に避難できる条件

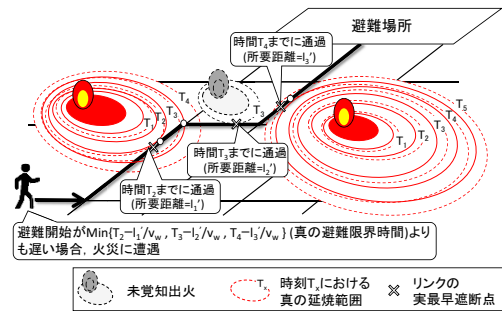


図3 不完全情報下における避難リスク

時間を設定してしまうと、避難経路が存在しないため、避難不能になってしまう。避難勧告は、住民の避難開始にとって重要なトリガーであるため、避難限界時間を避難勧告の一指標とすることは、不完全情報下において非常に危険である。一方、避難限界時間の見極めは住民の安全限界として重要な指標であり、無視できない。

そこで本稿では、避難シミュレーションによって避難限界時間を定量的に評価し、計算された避難限界時間が真の避難限界時間に対してどの程度遅れるのかを検証する。

b) 避難経路情報に対する信頼性の低下と逃げ惑い

次に、スマートフォン等の携帯端末へ発信される避難経路情報に従いながら、住民が避難することを想定する。閉塞時間が不確実であるということは、たとえ早期避難であっても、避難者が決して火災に遭遇しない信頼性の高い避難経路情報の提供は困難と考えられる。

避難者は、避難途中で火災に遭遇した時点で、再度、火災を迂回する避難経路を探索し、避難を再開する必要がある。しかし、一度、火災に遭遇した後に、避難経路情報の信頼性は低下し、避難者が情報に従う可能性は低いと考えられる。そのため、避難経路を見失い、逃げ惑いによる避難困難に陥る危険性が考えられる。ゆえに、避難経路情報は、火災に遭遇しにくい信頼性の高い頑健な経路情報を慎重に発信する必要があると考える。

3. シミュレーションによる避難限界時間の評価

(1) シミュレーションの概要

前章で考察した計算による避難限界時間が真の避難限界時間よりも遅れる可能性の定量的評価を行うために、仮想市街地を想定した避難シミュレーションを実施した。

想定する仮想市街地と本シミュレーションの流れを図4に示す。まず、格子状市街地の通行不能領域と呼ばれる出火・延焼が生じる領域に、ランダムに出火点を発生させる。それぞれの出火点は、出火時間分布に従って設定された時間より、等速同心円状に延焼を始める。各出火点に対する延焼速度を設定し、対象避難開始地点に対して、金井、梶¹²⁾の手法を援用し、以下の4種類の避難限界時間を計算し比較する。

a) 全出火点に対する避難限界時間

設定した全出火点に対して、避難限界時間を計算する。本避難限界時間は、完全情報下である真の避難限界時間を表しており、避難開始地点は本時間に避難不能となる。

b) 既出火点に対する避難限界時間

出火時間が評価対象の経過時間よりも早い出火点に対して、避難限界時間を計算する。本避難限界時間は、発生した出火を、時間遅れなく覚知できるとした場合の避難限界時間を表しており、実際に計算できる避難限界時間の中で、最も真の避難限界時間に近く、覚知出火情報の限界を意味する。

c) 覚知出火点に対する避難限界時間

経過時間に覚知している出火点に対して、避難限界時間を計算する。本避難限界時間は、実際の情報収集体制に対する避難限界時間である。本避難限界時間を上記2種類の避難限界時間に近づけることが目標となる。

d) 誤差率を考慮した全出火点に対する避難限界時間

設定した延焼速度に任意の誤差率分だけ加えた延焼速度について、全出火点に対する避難限界時間を計算する。避難シミュレーションを複数回実施し、上記のa), b), c), d)の避難限界時間の期待値をモンテカルロ法によって評価し、未覚知出火の存在および延焼速度の誤差率が避難限界時間に与える影響に関する比較評価を行う。

(2) 出火・覚知分布およびパラメータの設定

出火時間および覚知時間は、既存のモデルを援用して設定する。出火時間は、鈴木、糸井川¹³⁾の指数分布およびワイブル分布モデルを援用しランダムに設定する。また、覚知手段を住民による119通報および駆け付け通報を想定し、出火から覚知までの時間の分布を藤井、糸井川¹⁴⁾モデルを援用してランダムに設定し、出火時間との和をとることで、覚知時間を決定する。図5に、出火件数比率および覚知件数比率(6時間後の出火件数を1に基準化した比率)を示す。

また、表1に各種パラメータの設定値を示す。今回は比較のため、延焼速度を50m/hから200m/hの3段階、覚知確率を0.5から1.0までの4段階を設定し、それぞれ1000回のシミュレーションを実施した。

(3) 覚知出火情報の不完全性が計算時の避難限界時間に与える影響

まず、覚知状況が避難限界時間の計算に与える影響を評価するために、(1)で定義した全出火に対する避難限界時間に対して、既出火点に対する避難限界時間および覚知確率別の覚知出火点に対する避難限界時間を比較した。

図6に、経過時間に対する覚知状況と計算される避難限界時間の関係を示す。全ケースにおいて、1時間から2

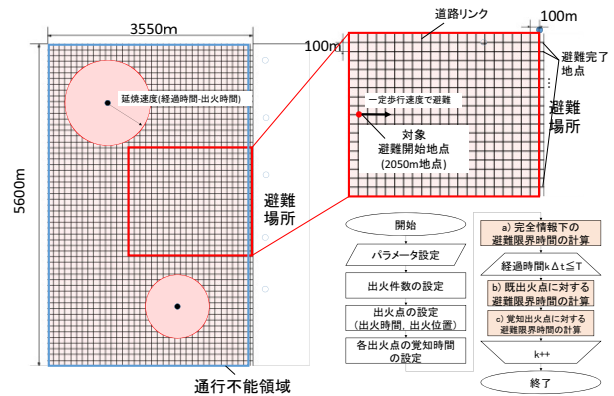


図4 仮想市街地の設定とシミュレーションの流れ

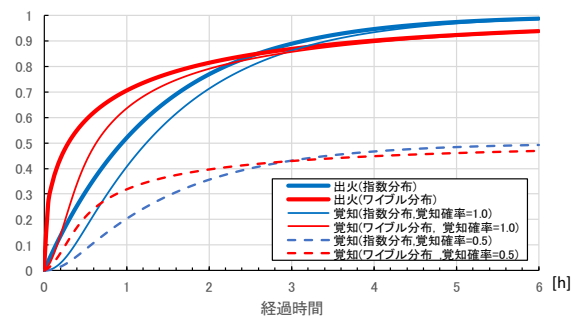


図5 出火件数比率と覚知件数比率の推移 (覚知確率=1.0, 0.5のケース)

表1 パラメータの設定

パラメータ	設定値
出火密度	3.0×10^{-6} [件/m ²]
延焼速度	50, 100, 200 [m/h]
歩行速度	2000 [m/h]
覚知確率	0.5, 0.7, 0.9, 1.0
経過時間	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 [h]
試行回数	1000回

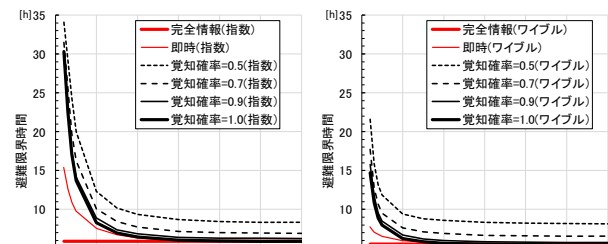


図6 覚知確率別・避難限界時間の計算に与える経過時間に対する覚知状況の影響

(出火時間は、左：指数分布、右：ワイブル分布延焼速度は50m/h)

時間後までは、完全情報下よりも非常に遅い避難限界時間が計算されており、早期における避難限界時間に従った避難勧告の困難さが示唆される。一方、3時間後には、計算される避難限界時間の変化は少なく、覚知確率が高いケース(覚知確率=0.9, 1.0)において、真の値に近い避難限界時間が計算されている。一方、覚知確率が低いケースでは、いつまでも未覚知出火が存在するため、真の値よりも一定時間だけ遅い避難限界時間が計算されている。以上より、覚知体制が非常に充実していない限り、低い覚知確率を見越した安全率の必要性が示唆される。

次に、延焼速度の予測誤差の影響を分析するために、延焼速度の誤差率を考慮した全出火に対する避難限界時

間について、誤差率を0%から100%まで変化させて比較した。図7に、延焼速度別の延焼速度の誤差率と避難限界時間の関係を示す。延焼速度に関わらず、延焼速度の誤差率が大きいほど、比例に近い傾向で真の避難限界時間が早まることがわかる。

以上のように、覚知火災情報の不完全性が避難限界時間に与える影響は無視できるものではなく、計算された避難限界時間に十分な安全率を考慮して避難勧告を行う必要がある。図7より、延焼速度が大きい場合、2時間程度で避難限界時間が1から2時間程度であるため、火災リスクの高い地域では、自主的な早期避難が求められる。

4. 不完全情報下における頑健な避難経路

第2章において、不完全情報下で火災に遭遇する要因として、未覚知出火の存在と延焼予測の限界によって道路の閉塞時間にばらつきが生じることを挙げた。したがって、未覚知出火の存在可能性が低く、かつ、延焼予測のばらつきが及ぶ範囲の道路を避けて避難経路を選択することで、火災に遭遇するリスクの低い頑健な避難経路が得られると考えられる。以上を実現するために、図8に示す2つの避難経路の最適化方針を提案する。

1つ目は、市街地特性から未覚知出火の存在確率を推定し、これが低い経路を選択する方法である。未覚知出火の存在可能性は、建物分布や覚知体制の整備状況に依存すると考えられる。したがって、出火率の高い、もしくは、出火が見逃されやすい地域を避けて避難経路を選択すればよい。筆者らは、既報⁴⁾において、出火率と覚知確率、延焼速度を変数とし、避難経路の通過可能確率として“避難可能確率”をモデル化した。この避難可能確率を最大化するように避難経路を選択することで、未覚知出火へ遭遇するリスクを最小化できると考える。

もう1つは、覚知火災の延焼予測による閉塞時間に対して早く通過するように避難経路を選択し、閉塞時間のばらつきに対して余裕を確保する方法である。筆者らは、既報⁴⁾において、安全な避難のために許容できる延焼速度の最大誤差率を避難余裕性と呼び、モデル化している。この避難余裕性を、延焼予測の精度に合わせて十分に確保することで、安全な避難経路を選択できると考える。

実際のリアルタイム避難誘導において、上述の最適な避難経路は、覚知火災情報に基づいた暫定的な経路である。したがって、覚知火災情報が更新されるたびに、より安全性の高い経路へ逐次更新し続けることが重要である。

5. 結論

本稿では、リアルタイム避難誘導における不完全情報下の避難リスクに関する定性的な考察を行った。その結果、不完全情報下では道路の閉塞時間が不確実であるため、避難限界時間にも不確実性が生じること、また、個人の避難経路において途中で火災に遭遇する可能性があることの2つの避難リスクを指摘した。

次に、避難限界時間の不確実性の定量的な評価として、避難シミュレーションを実施した。結果、不完全情報下で計算される避難限界時間は、避難安全性のために無視できないほど真の避難限界時間より遅く、安全率を考慮した十分に早い段階での避難勧告の必要性が示唆された。

最後に、避難経路上で火災に遭遇するリスクを最小化するための方針として、避難に影響を及ぼす未覚知出火の存在確率が低い経路を選択する避難可能確率の最大化と、延焼予測の誤差に対して余裕のある経路を選択する

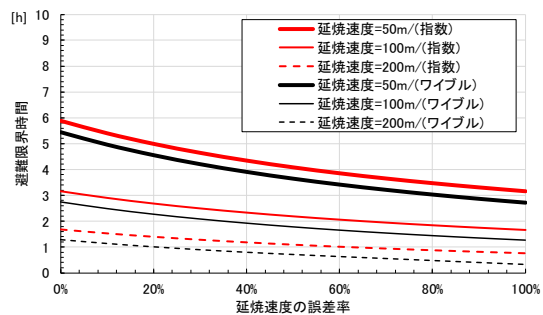


図7 延焼速度別・避難限界時間の計算に与える延焼速度の誤差率の影響
(全出火点の避難限界時間における比較)

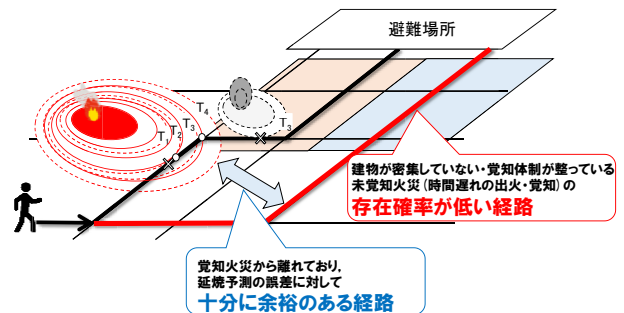


図8 不完全情報下における頑健な避難経路の最適化方針

避難余裕性の確保の2つの方針を示した。

不完全情報下のリアルタイム避難誘導において、一度の情報で確実に避難することは困難である。したがって、あくまでも暫定的な避難情報という視点が重要であり、新しい覚知のたびに、逐次、より安全性の高い避難情報への更新が重要であるとする。今後は、本稿で示した避難経路の最適化方針や、実際の誘導方法について具体化していく予定である。

参考文献

- 1) 東京都都市整備局, “防災都市づくり推進計画”<http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bonsai/bosai4.htm>.
- 2) 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/bousai/1000026/1000316.html>.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 糸井川栄一, “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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 東京消防庁, 第23期火災予防審議会資料, 2018.
- 10) 日本本火災学会, “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.
- 11) 東京消防庁, “地震火災に関する地域防災性能評価手法の開発と活用方策”, 火災予防審議会答申, 2001.
- 12) 金井淳子, 梶秀樹, “大震時の火災時による道路閉塞を考慮したリアルタイム避難誘導のための避難開始時刻決定に関する研究”, 地域安全学会論文集, No.4, pp.25-30, 2003.
- 13) 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.
- 14) 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.