

地震火災時のリアルタイム避難誘導における 住民の安全確保に必要な火災覚知率に関する基礎的研究 —未覚知火災を考慮した避難可能確率に着目して—

Fundamental Study on Required Detection Rate of Fires for Securing Residents' Safety on Real-time Evacuation Guiding under Post-Earthquake Fires: Focus on Evacuation Probability Considering Undetected 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

Measures of residents' evacuation guiding is important issue for simultaneous multiple fires after a major earthquake such as Tokyo metropolitan earthquake. We are developing a real-time evacuation guidance method that derives safe evacuation routes based on fire information collected by public sector (i.e. fire department). In this paper, we formulated the risk model that evacuees encountering an undetected fire not included (called evacuation probability), and evaluated the fire detection rate necessary for securing evacuees' safety. It clarified that under a sufficiently high awareness rate, as long as the evacuation routes can be found, it is possible to prevent decreasing the evacuation probability due to delay of starting the evacuation.

Keywords : post-earthquake fires, real-time, evacuation, evacuation probability

1. 背景・研究目的

首都直下地震等の大規模地震後に、木造密集市街地を中心として発生が危惧されている同時多発火災において、住民の避難対策が喫緊の課題として挙げられる。これに対して、東京消防庁では、地震後に住民通報や職員による巡回によって収集される火災情報(以下、覚知火災情報)に基づく効果的な住民の避難誘導(以下、リアルタイム避難誘導)について、体制づくりが進められている¹⁾。

筆者らはこれまでに、誘導時よりも時間遅れで出火若しくは覚知する火災(以下、未覚知火災)の存在する不完全情報に着目し、不完全情報下の避難リスク評価及び住民にとって安全な避難経路の導出方法について、開発・研究を行っている^{2,3)}。不完全情報下でリアルタイム避難誘導に従って避難する場合、未覚知火災の存在により、導出された避難経路で避難する際、思わぬ火災へ遭遇する危険を有する。したがって、避難経路を導出する場合、この未覚知火災の存在可能性が低い避難経路を優先することが安全確保に繋がると考えられる。また、リアルタイム避難誘導において、覚知火災情報が充実しているほど効果的であると考えられるが、阪神・淡路大震災の覚知状況より、全火災を覚知することは困難であると予想でき、覚知率の目標水準を定めることは、今後のリアルタイム避難誘導の体制整備上、重要である。

本稿では、上記の避難経路の安全指標として後述する避難可能確率を検討する。従来のモデル^{2,4)}を応用し、火災に対する迂回と未覚知火災のリスクを考慮した新たな避難可能確率モデルを構築し、これを用いて、避難リスクの評価及び覚知率の目標水準について検討する。

2. 未覚知火災を考慮した避難可能確率

(1) 問題設定と記号の定義

まず、避難可能確率のモデル化にあたり、本研究の問題設定を説明する。問題設定と出火警戒領域のイメージ図及び記号の定義をそれぞれ図1、表1に示す。市街地上の出火・延焼リスクが同様であり、出火密度 ρ 、出火件数の累積分布 $F(t)$ に従ってランダムに出火が発生し(図1：出火件数密度の時間推移)、出火後、等速かつ同心円状に延焼する(図1：出火点の空間分布のイメージ)と仮定した仮想市街地を想定する。この時、発生した出火のうち、幾つかの出火は、覚知率 r 、覚知の所要時間の累積分布 $G(t)$ に従って覚知される。

本研究では、ある判断時間 t_j に、避難開始時間 t_s に避難する場合の地点 O から地点 P までの避難経路が発見されたとき、その避難経路に従って避難する際、火災に遭遇しない確率(以下、避難可能確率)を導出する。

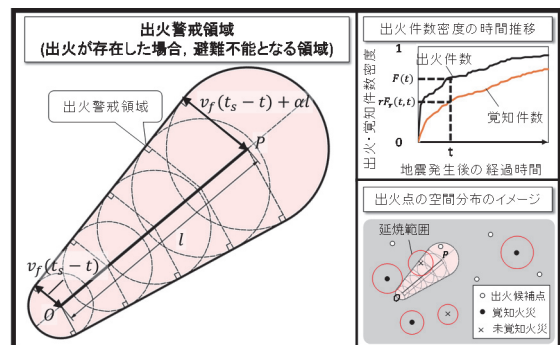


図1 問題設定と出火警戒領域のイメージ

ある時間 t の出火状況において避難者が火災に遭遇しないためには、出火時間 t_f が t 以下の出火点が、図1のような出火警戒領域に1つも存在しない確率として表され、ポアソン分布を用いて[1]で表される。

$$e^{-\rho * F(t) * S} \quad [1]$$

ただし、 S は出火警戒領域の面積である。鈴木、糸井川²⁾では、この出火警戒領域が地震発生後の時間経過に伴って推移することを利用し、出火時間分布を考慮した避難可能確率を求めている。本研究では、鈴木、糸井川²⁾のモデルを応用し、ベイズの定理によって、覚知火災を回避する効果を考慮した避難可能確率 $p_e(t_s, t_j)$ を導出する。

(2) 避難可能確率の導出

覚知火災を回避する避難経路の避難可能確率は、「避難経路の出火警戒領域に覚知火災が存在しない事象」(以下、 A)を条件とした「避難完了までに火災へ遭遇しない事象」(以下、 B)の条件付き確率で表される。したがって、避難可能確率 $p_e(t_s, t_j)$ はベイズの定理を用いて、[2]で表される。

$$p_e(t_s, t_j) \equiv \text{Prob}[B|A] = P[B] * \frac{P[A|B]}{P[A]} \quad [2]$$

ここで、覚知火災は全出火の一部分の火災であるため、 $P[B|A]$ は1である。 $P[B]$ は、時間遅れの出火を考慮した避難可能確率そのものであるため、鈴木、糸井川²⁾より、[3][4][5]で表される。

$$P[B] = e^{-\rho S(t_s, l, v_w, \alpha)} \quad [3]$$

$$S(t_s, l, v_w, \alpha) = \int_0^{t_s} 2(Alv_w + Bv_w^2)(t_s - t)F(t)dt + \int_0^{\frac{l}{v_w}} 2A\left(\frac{l}{v_w} - t\right)F(t + t_s)dt \quad [4]$$

$$\begin{cases} A = \alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos\alpha)\alpha^2 \\ B = \pi\alpha \end{cases} \quad [5]$$

ただし、 $\rho S(t_s, l, v_w, \alpha)$ は、地震発生から避難完了までの出火警戒領域 D の推移(図2)を考慮し、各出火警戒領域の経過時間に対応する出火密度 $F(t)$ で重み付けした期待出火件数である。

$P[A]$ は、時間遅れの出火と同様に、覚知火災に対する出火警戒領域 D の推移(図3)と覚知時間分布に基づいた覚知出火密度より求まる。覚知出火が初動対応内で覚知される確率(以下、覚知確率)を r と置くと、ある経過時間 t の出火警戒領域に覚知火災の出火点が存在する確率は、[6]で表される。

$$e^{-\rho * r * F_r(t, t_j) * S_r} \quad [6]$$

ここで、 S_r は出火警戒領域の面積であり、 $F_r(t, t_j)$ は「 t までに出火し、かつ初動対応内で覚知される火災が、 t_j までに覚知される確率」であり、[7]で表される。

$$F_r(t, t_j) \equiv P[t_f \leq t, t_f + t_r \leq t_j] = \int_0^t \frac{dF(t)}{dt} G(t_j - \tau) d\tau \quad [7]$$

計算過程は紙面制約の都合上省略するが、 $P[A]$ は、鈴木、糸井川²⁾と同様な方法で、出火警戒領域における覚知火災の存在確率を計算することで[8][9][10]のように求まる。

表1 記号の定義

記号	定義
ρ	出火密度[件/m ²]
$F(t)$	地震発生後、 t [h]後までに 出火する確率 (出火時間の累積分布)
r	覚知確率
$G(t)$	出火後、 t [h]後までに 覚知する確率 (覚知時間の累積分布)
$F_r(t, t_j)$	t までに出火し、かつ初動 対応内で覚知される火災が、 t_j までに覚知される確率
v_f	延焼速度[m/h]
v_w	歩行速度[m/h]
α	v_f/v_w
l	避難距離[m]
t_f	出火時間[h]
t_r	出火後、覚知までの所要時間[h]
t_s	避難開始時間[h]
t_j	避難経路の判断時間[h]
t	経過時間[h]
$P[X]$	事象 X である確率

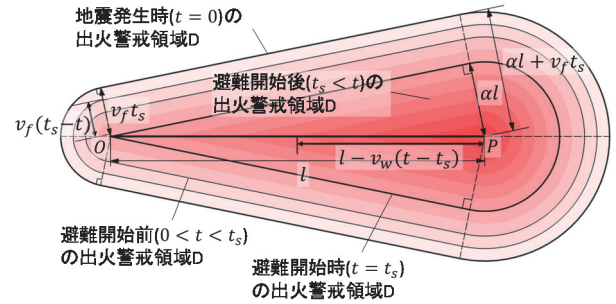


図2 地震発生から避難完了まで時間遅れの出火に対する出火警戒領域 D の推移

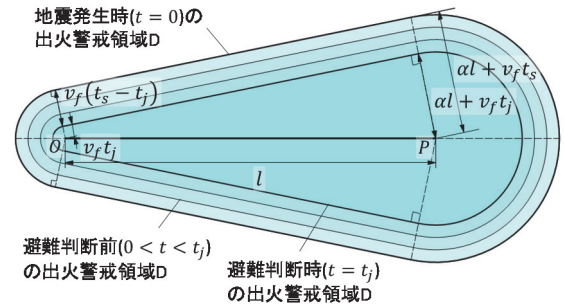


図3 地震発生から避難判断までの覚知火災に対する出火警戒領域 D の推移

$$P[A] = e^{-\rho * r * S_r(t_s, t_j, l, v_w, \alpha)} \quad [8]$$

$$S_r(t_s, t_j, l, v_w, \alpha) = \int_0^{t_j} 2(Alv_w + Bv_w^2)(t_s - t)F_r(t, t_j)dt + C(t_j)F_r(t_j, t_j) \quad [9]$$

$$C(t_j) = A * (l^2 + 2lv_w t) + B * (v_w t)^2 \quad [10]$$

以上より、避難可能確率 $p_e(t_s, t_j)$ は[11]のように求められる。

$$p_e(t_s, t_j) = \frac{P[B]}{P[A]} = e^{-\rho \{S(t_s, l, v_w, \alpha) - r * S_r(t_s, t_j, l, v_w, \alpha)\}} \quad [11]$$

3. 住民の安全確保に必要な覚知確率水準の検討

(1) パラメータの条件

第2章で導出した避難可能確率モデルより、覚知確率の影響を定量的に評価する。本研究では、出火時間の累積分布[12]は鈴木、糸井川²⁾のポアソン分布モデルを、覚知時間の累積分布[13]は藤井⁵⁾の確率モデルを用いる。

$$F(t) \equiv \text{Prob}[t_f \leq t] = 1 - e^{-0.733t} \quad [12]$$

$$G(t) \equiv \text{Prob}[t_r \leq t] = \frac{r_{119}}{r_{119} + r_{run}} P_{119}(t) + \frac{r_{run}}{r_{119} + r_{run}} P_{run}(t) \quad [13]$$

ただし、 r_{119} 、 r_{run} はそれぞれ、阪神・淡路大震災において119番通報及び駆け付け通報で覚知された割合⁶⁾として、0.25 および 0.3 を設定した。また、 $P_{119}(t)$ および $P_{run}(t)$ は 119 番通報及び駆け付け通報で覚知した場合の覚知時間分布であり、[14]で表される。

$$P_{119}(t) = 1 - e^{-\frac{0.0558 \cdot 60 \cdot t}{v_w(t-b)}}, \quad P_{run}(t) = 1 - e^{-\pi \rho_f 1.3 \cdot (1 + a v_w)} \quad [14]$$

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。

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

図4に、[12]及び[13]で計算された、地震発生後の経過時間に対する出火件数比率及び覚知確率別・覚知件数比率を示す。また、一部のパラメータは、出火密度 $\rho = 3.0 \times 10^{-6} [\text{件}/\text{m}^2]$ 、延焼速度 $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$ 歩行速度 $v_w = 4000 [\text{m}/\text{h}]$ 、判断時間 $t_j = \text{避難開始時間 } t_s$ とした。

(2) 避難可能確率に与える覚知確率の影響

図5に、覚知確率別・避難開始時間に対する避難可能確率の変化を示す。覚知確率が低いケースでは、鈴木、糸井川²⁾のモデル同様、避難開始時間の遅れに伴い、避難可能確率が著しく低下している様子が見られる。一方、覚知確率=0.9のケースでは、一時的に低下傾向が緩やかになる部分が見られ、覚知確率=1.0のケースでは、避難開始時間=約0.5時点を境に避難確率の上昇が見られる。

未覚知火災は、避難判断時よりも時間遅れで出火する火災(以下、時間遅れ出火火災)と、避難判断時には覚知されていない火災(以下、時間遅れ覚知火災)に分けられる。覚知確率が低い場合、時間遅れ覚知火災が市街地空間に大きく広がり、火災に遭遇する可能性が高くなると考えられる。一方で、覚知確率が非常に高いケースでは、避難開始時間が早期の時点では、時間遅れ出火火災の増加によって、一時的な避難可能確率の低下が見られるものの、十分経過した時点での避難であれば、出火した火災の多くが覚知されているため、覚知火災を回避している避難経路であれば、早期の避難開始よりも逆に避難可能確率が高くなると考えられる。

上記の避難可能確率へ与える覚知確率の影響を観察するために、避難開始時間別・覚知確率に対する避難可能確率の変化を図6、図7に示す。避難開始時間=0.1[h]、0.2[h]のケースのように、比較的早期に避難を開始するケースでは、覚知確率に関わらず、避難可能確率は殆ど一定である。これは、早期の避難開始では、時間遅れ出火火災への遭遇可能性が支配的に影響していることを示唆している。一方、避難開始時間が遅いケースでは、覚知確率が高くなるほど、避難可能確率が上昇する傾向にある。ただし、その上昇傾向が大きくなるためには、避難開始時間が遅いほど高い覚知確率を必要とし、加えて、早期の避難開始よりも避難可能確率が高くなる逆転現象は、覚知確率=0.9を超えるような非常に高い覚知確率が必要であることがわかる。

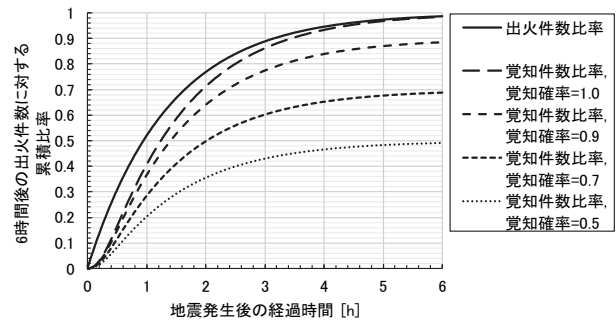


図4 地震発生後の経過時間に対する出火件数比率及び覚知確率別・覚知件数比率 (6時間後の出火件数に対する累積比率)

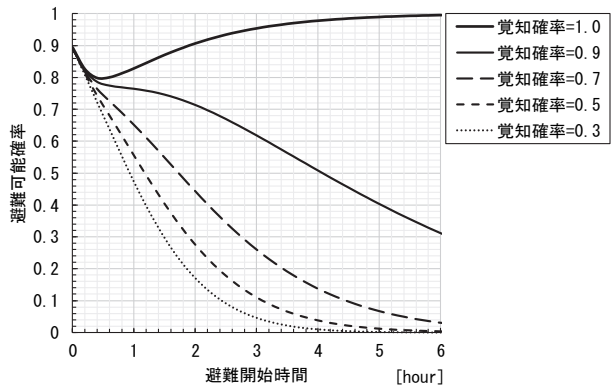


図5 覚知確率別・避難開始時間に対する避難可能確率 (避難距離 $l = 3000 [\text{m}]$)

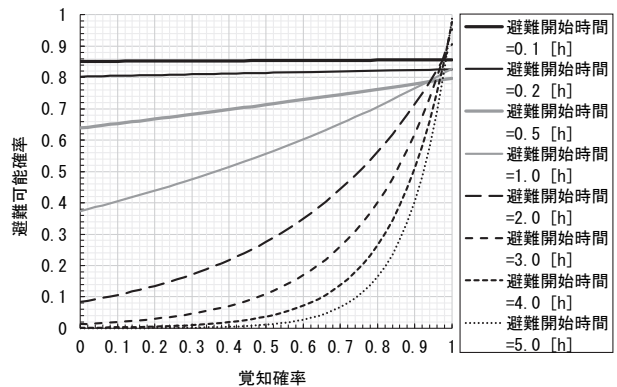


図6 避難開始時間別・覚知確率に対する避難可能確率 (避難距離 $l = 3000 [\text{m}]$)

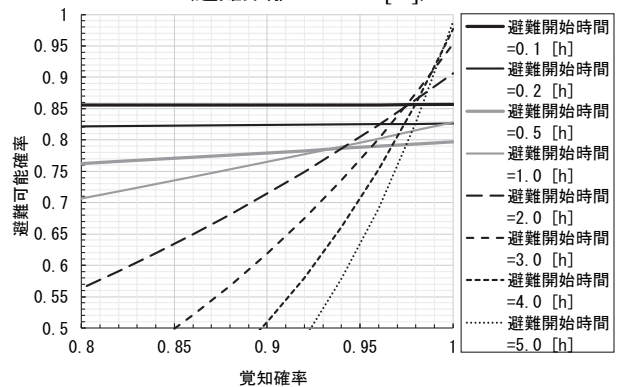


図7 避難開始時間別・覚知確率に対する避難可能確率 (覚知確率 ≥ 0.8 について拡大表示) (避難距離 $l = 3000 [\text{m}]$)

以上より、覚知確率を高い水準で確保することで、リアルタイム避難誘導時の避難可能確率を上昇させ、住民の安全確保に重要であると言える。

(3) 必要覚知確率の検討

前節において、高い覚知確率を確保することで、避難可能確率が向上し、ある水準以上であれば、時間経過後の避難が早期の避難よりも避難可能確率が高くなることが明らかとなった。そこで、住民の安全確保のための覚知確率の水準として、このような逆転現象が生じる覚知確率(以下、必要覚知確率)を考え、導出を試みる。

まず、必要覚知確率を、避難開始時間がある時間 Δt だけ遅れたとき、遅れる前の避難可能確率を維持できる覚知確率と定義する。すなわち、 $t_s = T$ の避難可能確率と $t_s = T + \Delta t$ の避難可能確率が等しくなるような覚知確率 r^* である。またここで、問題を簡略化するために、 $t_j = t_s$ (避難開始時に最新の情報で経路判断がされる)の場合のみ考えると、[15]のように必要覚知確率が求まる。

$$p_e(T, t_j) = p_e(T + \Delta t, t_j)$$

$$\Leftrightarrow r^* = \frac{\frac{S(T + \Delta t, l, v_w, \alpha) - S(T, l, v_w, \alpha)}{\Delta t}}{\frac{S_r(T + \Delta t, t_j, l, v_w, \alpha) - S_r(T, t_j, l, v_w, \alpha)}{\Delta t}} \quad [15]$$

又は、 $\Delta t \rightarrow 0$ のように極限をとると、[16]となる。

$$r^* = \frac{\partial S(T, l, v_w, \alpha) / \partial t_s}{\partial S_r(T, t_j, l, v_w, \alpha) / \partial t_s} \quad [16]$$

$S(t_s, l, v_w, \alpha)$ 及び $S_r(t_s, t_j, l, v_w, \alpha)$ は、それぞれ出火件数比率、覚知件数比率で重み付けされた、避難者が火災に遭遇しうる出火点の存在領域である。すなわち、[15][16]の分子・分母は、このような領域の広がり速度であると理解できる。したがって、必要覚知確率は、全出火点の存在領域の広がり速度(避難危険の要因)と覚知火災の存在領域の広がり速度(避難経路の信頼性)の比であることを意味している。

図8に、[15]より計算した基準となる避難開始時間別・避難開始時間からの遅れ時間に対する必要覚知確率を示す。いずれのケースでも、非常に高い覚知確率が必要とされることがわかる。本研究では、住民による通報のみを想定しているため単純比較はできないが、阪神・淡路大震災において、6時間後までに火災の出火のうち覚知時間が2時間以内の火災の割合(以下、覚知率)は、住民による通報以外も含めて約84%であり⁹⁾、図8における水準を満たしていない。また、図9に、[16]より計算した避難距離別・各避難開始時間に対する必要覚知確率を示す。図9の必要覚知確率、基準の避難開始時間からの遅れ時間を0へ極限を取った値であるため、図8よりも低い値であると考えられるものの、それでも0.9以上の非常に高いことがわかる。

以上より、住民の安全確保に必要な覚知確率の水準は0.9を超え、阪神・淡路大震災の覚知率と比較して非常に高く、現代の情報技術や当時の教訓を生かした覚知体制整備による、覚知能力の向上が必要であると言える。

4. 結論

本研究では、地震火災時のリアルタイム避難誘導における住民の安全性として、不完全情報下において覚知火災を回避した避難経路で避難したときの避難可能確率を

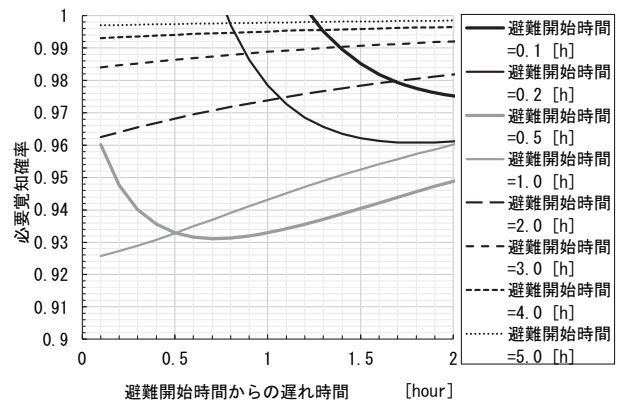


図8 基準となる避難開始時間別・避難開始時間からの遅れ時間に対する必要覚知確率 (避難距離 $l = 3000$ [m])

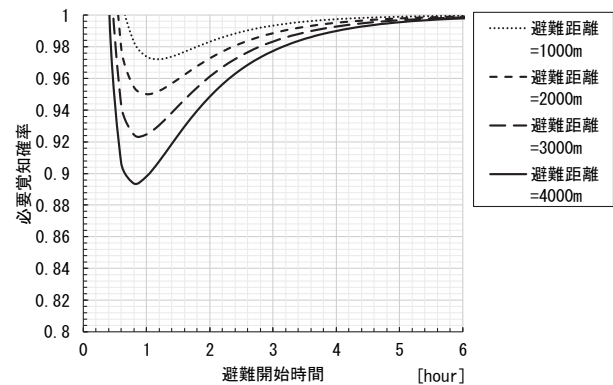


図9 避難距離別・避難開始時間に対する必要覚知確率

考え、そのモデルの構築と確保すべき覚知確率水準の検討を行った。結果、阪神・淡路大震災の覚知率と比較して、非常に高い覚知確率が必要であることが明らかとなり、覚知体制の充実化が重要であることを主張した。

今後は、覚知体制と覚知確率の定量的な関係を明らかにするとともに、本論で求めた必要覚知確率が満たされない状況下を想定した、避難経路の動的更新を行うリアルタイム避難誘導方法の検討が課題である。

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。

参考文献

- 1) 東京消防庁：第23期火災予防審議会資料, 2018.
- 2) 鈴木雄太, 糸井川栄一：大震災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.
- 3) 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.
- 4) 石井儀光, 腰塚武志：同時多発出火時における直線の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.
- 5) 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.
- 6) 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.