

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 Probabilistic Risk Evaluation of Evacuation in case of Post-Earthquake Fire considering Fire Break-out Time Distribution

○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前期課程
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.

The purpose of this study is to analyze the characteristics of the evacuation risk after the post-earthquake fire considering the fire break-out time distribution. First, we constructed the probabilistic model of the evacuation risk under virtual urban space assumed that risks of break-out and spread of fires are homogeneous everywhere respectively. Second, we estimated fire break-out time distribution with exponential distribution and Weibull distribution on the basis of break-out time data of the Kobe earthquake. Finally, we evaluated the evacuation risk and discussed the difference of the characteristics of evacuation risks between these two estimated distribution models mentioned above.
Keywords :post-earthquake fire, evacuation risk, break-out time distribution, probabilistic risk

1. 研究の背景と目的

大都市における木造密集市街地を代表に、我が国の現代都市が抱える大地震時のリスクの1つとして、地震直後の同時多発火災に対する人的、物的な脆弱性が挙げられる。今後発生するとされる首都直下地震の深刻なケースでは、東京都を中心に、多くの住民が同時多発火災に対して避難困難となり、甚大な人的被害が生じるとされている。小出¹⁾は、同時多発火災のランダム性に着目し、ある避難経路に対して、通過前に火災によって遮断され通過不能となる確率として、避難リスクを定式化した。石井²⁾は小出¹⁾のモデルを応用し、被災距離に関する解析を行い、避難リスクの特性を明らかにしている。小出¹⁾や石井²⁾の研究では、同時多発火災が、地震発生直後にすべての出火が同時(0分後)に生じると仮定しているのに対して、図1に示す兵庫県南部地震の出火件数推移にみられるように、地震発生直後だけでなく、数分から数時間にわたり、時間遅れで多数の出火が生じている³⁾。時間遅れで出火が生じることで、避難リスクの特性が異なるだけでなく、ある時点の火災状況で安全と判断された避難経路であっても、その後の出火により予期せぬ火災の

遭遇による避難困難に陥る可能性も考えられる。このような、時間遅れの出火が及ぼす避難リスクへの影響を評価することは、地震発生時の安全な避難を検討する上で重要である。

本研究は、兵庫県南部地震でみられた時間遅れの出火を考慮して、同時多発火災における避難リスクの特性を明らかにすることを目的とし、石井のモデル²⁾を応用した確率的な避難リスクのモデル化および、避難リスク評価を行う。2章で石井のモデル²⁾を紹介し、出火時刻分布を考慮した避難リスクのモデル化の方針を示す。第3章で、避難リスク評価の問題設定を行い、出火時刻分布を考慮した避難リスクの定式化を行う。その後、第4章において、兵庫県南部地震の出火データに基づき、出火時刻分布の推定を行い、第5章において、推定した出火時刻分布を用いて、避難リスク特性の分析を行う。

2. 先行研究

石井²⁾は、地震発生と同時に密度 ρ [件/ m^2]でランダムに出火が生じ、一定の速度で同心円状に延焼拡大すると仮定したような仮想市街地を想定し、図2に示す出火が生じた場合に避難者が避難経路を通過する前に火災が経路を遮断してしまう領域Dを幾何学的に導出した。その領域内に出火が生じない確率を評価することで、避難場所に到達可能となる確率(以下、避難可能確率)として避難リスクをモデル化した。

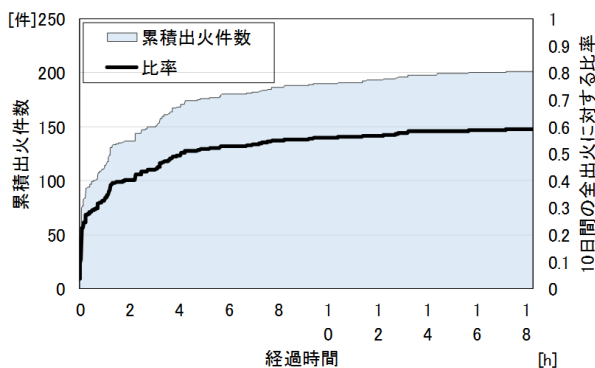


図1 兵庫県南部地震の当日における累積出火件数の推移 (文献 3) を基に筆者が作成)

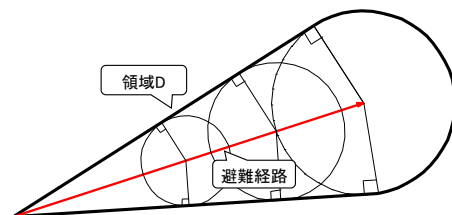


図2 避難が可能のために出火が生じてはならない領域D

本研究では、時間遅れによる出火を考慮することで、避難者が避難経路を通過する前に火災が経路を遮断してしまうような出火が生じる確率が、避難経路および避難場所との距離に応じて、図2の領域内の各地点で異なることに着目し、出火時刻分布を考慮した避難可能確率を導出する。すなわち、避難場所や避難経路に近い地点ほど、地震発生後より遅れて出火しても、避難者が避難経路を通過する前に火災が経路を遮断するため、避難場所や避難経路に近い地点では、避難者が延焼領域に入るような出火が発生する確率が高くなることを利用する。

3. 出火時刻分布を考慮した避難可能確率の導出

(1) 問題設定と記号の定義

仮想市街地の想定および、本研究で用いる記号の定義を、図3、表1に示す。本研究では、すべての地点で、出火密度 ρ 、出火件数の累積分布 $F(t)$ に従って出火が生じる可能性があり、出火後、等速かつ同心円状に延焼すると仮定した、一様な仮想市街地を想定する。本仮想市街地の片側には避難場所があり、地震発生後、ある地点から避難場所まで直線上に等速で避難を行う場合を考える⁽³⁾。したがって、本研究の問題は、“ある出発時刻 T_w に速度 v_w で距離 l の直線経路上を避難したとき、避難途上で火災に遭遇せずに避難完了する確率”の導出である。

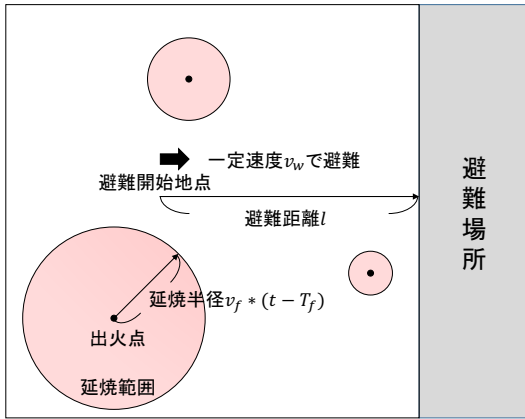


図3 仮想市街地の想定と問題設定

表1 記号の定義

記号	定義
ρ	出火密度[件/ m^2]
$F(t)$	時刻 t までに発生する確率
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	出火時刻[h]
T_w	避難開始時刻[h]
t	経過時刻[h]
$P_{eva}(t)$	時刻 t に避難開始した場合の避難可能確率
$Prob\{A\}$	Aである確率

(2) 避難可能確率の導出

a) 地震発生直後に出発する場合 ($T_w = 0$)

地震発生直後に、直線経路上を避難開始した避難者が避難可能となるには、避難者が避難場所に到達する前に、避難者の前方の経路を遮断するような出火が生じなければよい。図4に、時間経過に伴う避難者の位置 O_n と、 O_n に到達した時点で出火が生じてはならない領域

$O_n A_n B_n$ の模式図を示す。図4は、避難者が出発してから、到達するまでの時間を Δt で分割したとき、避難者は $n\Delta t$ 後に、 O_n に到達しており、この時点で $O_n A_n B_n$ に出火が生じていなければ、 $n\Delta t$ 時点で避難不能になっていないことを意味する。つまり、避難場所に到達するまでの各時間 $n\Delta t$ において、領域 $O_n A_n B_n$ で出火が生じなければ、避難可能となる。したがって、避難可能確率は、各領域 $O_n A_n B_n$ で時刻 $n\Delta t$ までに発生しない確率となる。

このとき、 $O_{n+1} A_{n+1} B_{n+1}$ は $O_n A_n B_n$ の内部に存在することから、 $O_n A_n B_n$ と $O_{n+1} A_{n+1} B_{n+1}$ の間の領域が、時刻 $n\Delta t$ までに発生しない領域である。この領域の面積を $\Delta S(n\Delta t)$ と置く。

ところで、時刻 t までに $\Delta S(t)$ で発生する確率は、時刻 t までの出火密度 $\rho F(t)$ のポアソン分布に従い、式[1]で表される。

$$\frac{(\rho F(t)\Delta S(t))^x}{x!} e^{-\rho F(t)\Delta S(t)} \quad [1]$$

ゆえに、領域 $\Delta S(t)$ に、時刻 $t + \Delta t$ までに発生しない確率は、式[2]で表される。

$$Prob\{t\text{までに}\Delta S(t)\text{で発生しない}\} = e^{-\rho F(t)\Delta S(t)} \equiv p(t, 0) \quad [2]$$

避難者が避難場所に到達できるには、避難が完了するまでの各時刻 nt までに、 $O_n A_n B_n$ と $O_{n+1} A_{n+1} B_{n+1}$ の間の領域で発生しないように、避難可能確率 p_{eva} は式[3]となる。

$$Prob\{T_w = 0 \text{ で避難可能}\} = \prod_{k=0}^{N-1} p(k\Delta t, 0) = \prod_{k=0}^{N-1} e^{-\rho F(k\Delta t)\Delta S(k\Delta t)} = e^{-\sum_{k=0}^{N-1} \rho F(k\Delta t)\Delta S(k\Delta t)} \equiv p_{eva}(0) \quad [3]$$

ここで、 $N\Delta t = l/v_w$ である。また、 $\Delta S(k\Delta t)$ は式[4]で表される。

$$\Delta S(k\Delta t) = (A_1 t + A_2)\Delta t + o(\Delta t) \quad [4]$$

ただし、

$$\begin{cases} A_1 = -2v_w^2 \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha^2 \arccos \sqrt{1 - \alpha^2} \right\} \\ A_2 = 2lv_w \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha^2 \arccos \sqrt{1 - \alpha^2} \right\} \end{cases} \quad [5]$$

式[4]を式[3]に代入し、極限 $n \rightarrow \infty$ をとると式[3]の右辺の指数部はリーマン積分で表され、避難可能確率 $p_{eva}(0)$ は式[6]のように表される。

$$p_{eva}(0) = e^{-\rho \int_0^{l/v_w} (A_1 t + A_2) F(t) dt} \quad [6]$$

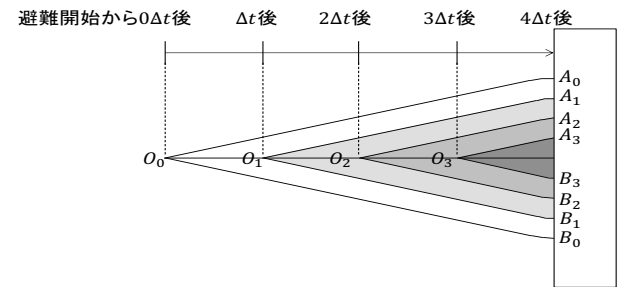


図4 避難者の位置 O_n と領域 $O_n A_n B_n$ の模式図

b) 時刻 T_w に出発する場合 ($T_w > 0$)

避難開始時刻 $T_w = 0$ の場合と同様な考え方で避難可能確率を求めることができる。ここで、避難開始時刻 $T_w = t_1$ の前後で、面積 $\Delta S(t)$ の式が異なり、避難開始前の $\Delta S(t)$ を $\Delta S_1(t)$ 、避難開始後の $\Delta S(t)$ を $\Delta S_2(t)$ とおくと、避難可能確率 $P_{eva}(t_1)$ は、式[7]で表される⁽²⁾。

$$P_{eva}(t_1) = e^{-\left\{\sum_{k=0}^{N-1} \rho F(k\Delta t) \Delta S_1(k\Delta t) + \sum_{k=0}^{M-1} \rho F(t_1 + k\Delta t) \Delta S_2(t_1 + k\Delta t)\right\}} \quad [7]$$

ここで、 $N\Delta t = t_1$ 、 $M\Delta t = l/v_w$ である。また、 $\Delta S_1(t)$ 、 $\Delta S_2(t)$ は、式[8]で表される。

$$\begin{cases} \Delta S_1(t) = (B_1(t_1 - t) + B_2)\Delta t + o(\Delta t) \\ \Delta S_2(t) = (B_3(t - t_1) + B_2)\Delta t + o(\Delta t) \end{cases} \quad [8]$$

ただし、

$$\begin{cases} B_1 = \pi v_f^2 \\ B_2 = 2lv_w \left(\alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha^2 \arccos \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \\ B_3 = -2v_w^2 \left(\alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha^2 \arccos \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \end{cases} \quad [9]$$

最後に、式[8]を式[7]に代入し極限 $n \rightarrow \infty$ をとると、式[7]の右辺の指数部はリーマン積分として表され、避難可能確率 P_{eva} は式[10]となる。

$$P_{eva}(t_1) = e^{-\rho \left\{ \int_0^{t_1} (B_1(t_1 - t) + B_2) F(t) dt + \int_{t_1}^{t_1 + \frac{l}{v_w}} (B_3(t - t_1) + B_2) F(t) dt \right\}} \quad [10]$$

式[10]に $F(t) = 1$ (時刻0で同時出火)を代入することで、式[11]となり、石井のモデル²⁾と一致する。

$$e^{-\rho \left\{ \frac{1}{2} B_1 t_1^2 + B_2 \left(\frac{l}{2v_w} + t_1 \right) \right\}} \quad [11]$$

4. 出火時刻分布の推定

本研究の避難リスク評価で用いる出火時刻分布は、兵庫県南部地震の火災データ³⁾に基づいて推定する。兵庫県南部地震の累積出火件数の特徴は、地震発生直後に、揺れに伴う多くの出火が生じ、その後、電気系統の復旧等によってゆるやかに出火件数が増加する点である。本研究ではこの特徴を表す分布として、指数分布およびワイブル分布⁴⁾を仮定し、最小二乗法によるパラメータ推定を行った⁽³⁾。それぞれの累積分布の推定式を式[12]、式[13]、実データとの比較を図5に示す。指数分布は、各観測時刻から出火までの時間分布が等しいことを仮定しているため、地震発生直後の出火件数の急増を再現できていない。一方、ワイブル分布は、地震発生直後の出火件数の上昇を再現できている。ワイブル分布は故障現象を表す分布⁴⁾と知られており、地震発生後の出火を地震の揺れに対する建造物及び収納火気器具・電気関係等出火要因の故障と捉えられ、地震発生直後の出火がなければ、その後の出火確率が著しく低下することが表されている。

$$F_e(t) = 1 - e^{-0.733t} \quad (R^2 = 0.9396) \quad [12]$$

$$F_w(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{0.644}\right)^{0.464}} \quad (R^2 = 0.9458) \quad [13]$$

5. 避難リスクの特性分析

本章では、4章で推定した出火時刻分布に基づく避難可能確率の分析を行う。ただし、一部のパラメータについては、出火密度($\rho = 3.0 \times 10^{-6}$ [件/m²])、歩行速度($v_w = 2800$ [m/h])で一定とした。

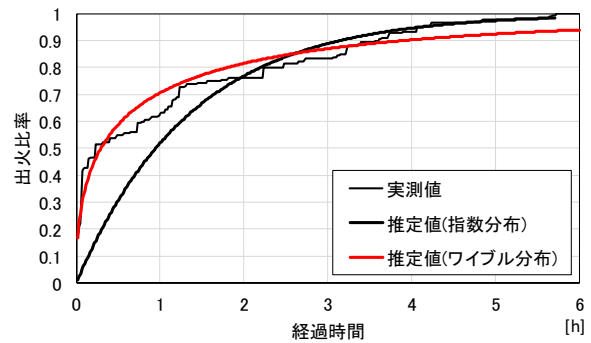


図5 阪神淡路大震災の出火比率と推定値

(1) 出火時刻分布による比較

まず、出火時刻分布の違いによる避難可能確率の特性の違いについて分析する。出火時刻が、4章で推定した出火時刻分布式[11]、式[12]に従う場合と、地震発生直後に同時出火する場合(石井のモデル²⁾)における、避難距離に対する避難可能確率について、図6に示す。同時出火、ワイブル分布、指数分布の順に避難可能確率が低く、時間遅れの出火を考慮することで、石井のモデル²⁾よりも、避難リスクは低く見積もられる。しかし、出火時刻の遅れを考慮しても、避難距離が大きい場合、相当な避難リスクが見積もられる。

次に、避難開始時刻に対する避難可能確率について、出火時刻分布の違いを比較する。図7に、避難開始時刻に対する避難可能確率を示す。避難開始時刻に対する避難可能確率も同様に、同時出火、ワイブル分布、指数分布の順で避難リスクは高い。

本分析で想定されるケースは、長くても地震後4時間程度で避難が完了する。ゆえに、地震発生直後の累積出火件数が多く見積もられる出火時刻分布であるほど、避難リスクが高くなるため、同時多発、ワイブル分布、指数分布の順でリスクが大きく評価されていると考えられる。

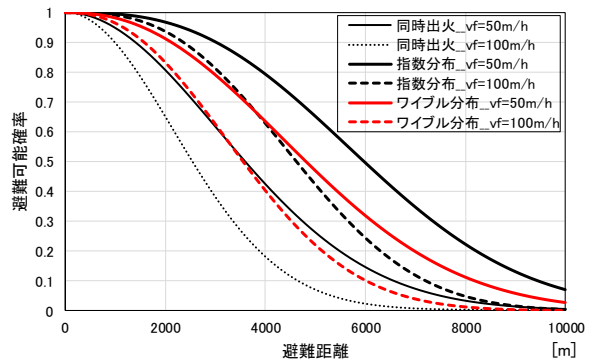


図6 避難距離に対する避難可能確率

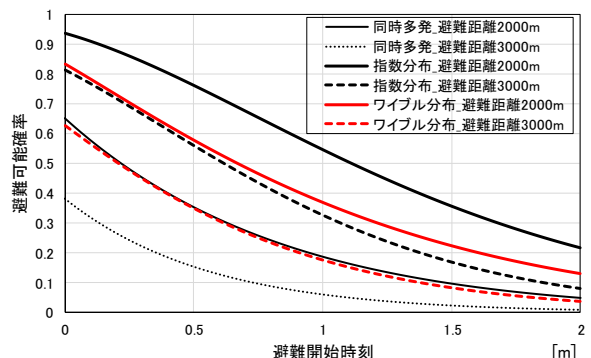


図7 避難開始時刻に対する避難可能確率($v_f = 100$ [m/h])

(2) 避難開始時に安全な避難経路の避難可能確率

時間遅れによる出火が生じなければ、ある時刻において、地震発生後の出火状況に対して避難可能な経路は、その時点で避難開始することで確実に避難ができると考えられる。しかし、時間遅れによる出火の可能性があることで、避難開始以降に発生した出火によって、避難経路が遮断され、避難困難となる可能性を有している。本節では、このような、ある時刻において、出火状況に基づき安全と判断された避難経路で避難したときの避難可能確率(以下、安全判断後の避難可能確率とする)について評価する。ただし、本論文では、単純化のため、避難可能な経路の判断と同時に避難開始することを想定する。

安全判断後の避難可能確率は、3章で導出した避難可能確率式[10]を用いて、条件付き確率で表すことができ、各時刻($t \geq T_s$)において、判断時刻 T_s までに領域 $\Delta S(t)$ で出火が生じない条件(条件A)の下で、時刻 t までに出火が生じない確率によって、式[14]で表される。

$$\begin{aligned} & \text{Prob}\{t\text{までに}\Delta S(t)\text{で出火が生じない}|条件A\} \\ &= \frac{p(t,0)}{p(T_s,0)} = e^{-\rho\{F(t)-F(T_s)\}\Delta S(t)} \end{aligned} \quad [14]$$

式[3]の $p(t,0)$ を式[14]に置き換えることで、安全判断後の避難可能確率が求まる。

図8に、出火時刻分布を指数分布およびワイブル分布で仮定した場合の、避難開始時刻に対する安全判断後の避難可能確率を示す。指数分布、ワイブル分布いずれにしても、避難距離が1km以内であれば、安全判断後の避難可能確率は比較的高く、地震発生後の火災状況に対して安全な避難経路を選択すれば、安全な避難が可能といえる。一方、避難距離が2kmや3kmの場合に着目すると、地震発生後1時間以内の避難開始では、ある程度の避難リスクを有しており、安全に避難できるとは限らない。

指数分布で評価した場合、判断する避難開始時刻の遅れとほぼ比例し安全判断後の避難可能確率は上昇する。一方、ワイブル分布の場合の避難可能確率は、地震発生後数分から十数分の間は、指数分布よりも低く評価され、その後、安全判断後の避難可能確率が急激に上昇するように評価される傾向にある。出火時刻分布がワイブル分布に従う場合、地震発生直後に火災が集中するため、出火の発生が集中する時期を過ぎても安全な避難経路であれば、避難リスクは非常に小さくなる。いずれにしても、時間遅れの出火が発生することで、ある時点の出火状況において安全な避難経路であっても、ある程度の避難リスクが残存し、地震発生後の避難誘導を行う場合、常に、新たに発生する出火に基づいて安全な経路を探索し続け、避難経路の更新を図る必要があることを示唆している。

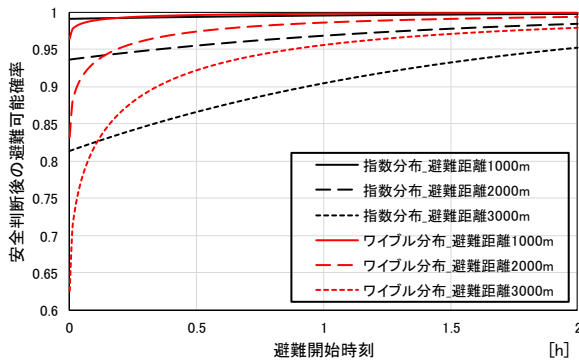


図8 避難開始時刻に対する安全判断後の避難可能確率 ($v_f = 100[m/h]$)

6. 結論

本研究では、出火・延焼リスクが均質な仮想市街地を想定し、避難リスクとして、時間遅れの出火の出火時刻分布を考慮した避難可能確率のモデル化および、その避難リスクの特性について分析を行った。結果、出火時刻分布を考慮することで、同時出火よりも避難リスクは小さく見積もられることを把握した。また、時間遅れの出火が生じることで、ある時間の火災状況に基づいて安全と判断された避難経路でも、それ以降の出火によって避難不能となる可能性がある程度存在し、地震発生後の避難誘導を行う場合、新しく生じた出火を基に、常に、安全な経路を探索し続け、避難経路の更新を図る必要性が示された。しかしながら、現実の地震発生時において、すべての出火状況を把握していることは難しく、把握していない出火によるリスクも存在し、このリスクを考慮することで避難リスクがより大きくなると推察される。以上より、火災情報の収集と活用体制を整備していくとともに、このような火災情報の不足による避難リスクの評価が重要となると示唆される。

本研究では、出火・延焼リスクが均質な仮想市街地を想定したが、現実の市街地では、土地利用規制による用途の偏在や、耐火建築物などによる不燃化が進んでおり、出火・延焼リスクは均質ではない。今後は、このような不燃化によって生じる出火・延焼リスクの不均質さを考慮して避難リスクを評価する方法を検討し、その特性を分析する必要がある。また、風下側において、飛び火によるさらなる延焼拡大による避難リスクも無視できない。これらの避難リスク評価に関して、今後の課題である。

補注

- (1) 実際の避難経路は、道路構成に従うため、直線経路とは限らないが、石井²⁾より、直線とみなして避難リスクを評価しても誤差が小さいことが知られており、本研究では直線経路による避難を問題として扱う。
- (2) 避難開始時刻が0分後ではない場合、避難可能なために出火してはならない領域の形状が異なる²⁾。しかし、紙面の制約上、領域の説明は割愛する。
- (3) 本研究では、地震発生後の避難に着目しているため、地震発生6時間後の出火件数を累積出火比率1とし、各時刻の累積出火比率を設定した。また、地震発生直後に急増する出火件数の再現を主としたため、地震発生から3時間後までの出火比率データを用いて、最小二乗法によるパラメータの推定を行った。このような、累積出火比率を1とする時刻や、推定するデータの範囲、推定手法については、議論の余地があるが、本研究の主題ではないため、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 小出治：ランダム分布による大震時火災被害予測の検討, 第17回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, 日本都市計画学会, pp.571-576, 1982.
- 2) 石井儀光：同時多発出火時における避難距離の分布に関する理論的考察, 筑波大学博士学位論文, 1999.
- 3) 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, pp.32-40, 1996.
- 4) T.ベッドフォード, R.クック(著), 金野秀敏(訳)：確率論的リスク解析基礎と方法, 丸善出版, pp.91-106, 2012.