

地震時火災リスクシミュレーションの開発と適用法のシステム分析*

Study on system analysis of development of the fire risk simulation and the applying method in case of a big earthquake,*

二神 透**、木俣 昇**

By Tohru FUTAGAMI, Noboru KIMATA

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、発生時間が早朝であったため家屋の倒壊により多くの住民が自宅で犠牲となった。この災害を契機として、建物の耐震制度の見直しや、公共建物の耐震化が進み一定の成果を挙げている。しかし、一般住宅の耐震化については、補助制度を活用しても多くの金銭的負担が個人に委ねられるため、必ずしも進展していない。その結果、依然として地震に対して脆弱な木造家屋を抱える市街地が尚多く存在している現状がある。それらの危険性は、阪神・淡路大震災において、294件の火災が発生し、66haもの市街地が焼失したことからも推測できよう。地震火災で死亡した犠牲者の数は、焼失した倒壊建物内の犠牲者の数とは、必ずしも対応しないが全体の犠牲者の約1割が火災によるものと推定されている。一方、阪神・淡路大震災発生日の風速に着目すると、ほぼ無風状態であったため、66haの焼失被害と600人弱の火災犠牲者で済んだという見方もできる。いずれにせよ、地震時の市街地における同時多発火災の発生による被害を軽減する対策は、わが国の地震対策の主要な課題となっている。平成9年5月に施行された密集法（密集市街地における防災街区の整備促進に関する法律）も、市街地の火災危険性を総合的に軽減するための施策の一つである。

地震火災による被害想定は、数十年前より東京消防庁によって実行されている。具体的には、地震の発生場所・規模と、発生時刻、気象条件をシナリオ（例えば、冬の夕刻、北風、風速:5m/s）を想定し、焼失建物数と火災による死者数を推定するものである。地方自治体においても、阪神・淡路大震災以降、地域防災計画を策定する上で、発生する地震シナリオ（発生場所、規模、時

間帯）のもと、津波や、建物倒壊、火災の被害などの被害想定を行い、それぞれに対する被害対策を提案している。それらの多くは、数値といった定量的な評価や、500mメッシュ上での危険性の提示である。情報のレベルからいえば、行政・住民がマクロな災害リスクを把握するための情報といえよう。

著者らは、メッシュ型の火災延焼シミュレーション・システムを開発するとともに、各種の都市防災計画への適用研究を行っている²⁾⁻⁹⁾。本論文では、各種の地震火災リスクを分析するために、個々に開発してきたシミュレーションの適用要件を整理するとともに、火災現象である、輻射・対流・着火・炎上・延焼と工学的な延焼速度式の関係性を整理し、地震火災リスクの「目的」と「要素」とそれらの「関係」を、「燃焼体」、「促進」、「阻害」、「遮断」の関係よりシステム論的に考察する。すなわち、シミュレーションの目的論的開発要件を整理し、目的論的使用方式を検討し、今後の火災リスクシミュレーション開発要件と課題を整理する。

2. 火災拡大過程とモデル化

図1に、火災拡大過程の記述モデルを示す。図左上に1棟の建物の出火、炎上、類焼可能、鎮火といった1棟建物の火災の拡大過程を表わしている。図上中ほどの類焼可能状態から、隣接する建物へ着火すると、同様な火災

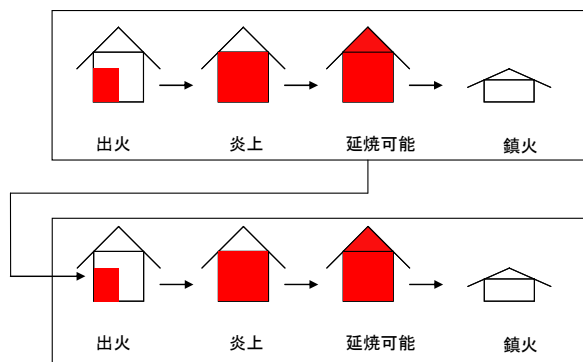


図1 火災拡大過程の記述モデル

*キーワード：火災リスク分析、計画手法論、システム分析、防災計画、

**正員、学博、愛媛大学総合情報メディアセンター
(〒790-8577 松山市文京町3、

Tel.089-927-9837 Fax. 089-927-9837)

E-mail : futagami@dpc.ehime-u.ac.jp

***正員、工博、金沢大学大学院自然科学研究科
社会基盤工学専攻

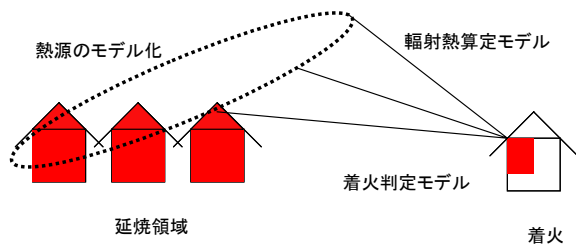


図2 放射熱モデルによる火災拡大過程

拡大過程を経て再帰的に火災の延焼が拡大する記述モデルである。図中の出火については、地震時の出火モデルとして、地震動、木造建物の倒壊率、火器使用率（季節・時刻）、市民初期消火率から算定するモデルが一般的である。この延焼過程を記述する延焼モデルとして浜田の延焼速度式が、多くの自治体で用いられてきた。浜田は、図1の火災拡大過程を記述するために、戦時中に行われた実大木造家屋の火災実験に基づいて、火災の発生建物から、隣接する建物までの延焼速度（延焼時間）を説明している。浜田の式は、図1の火災拡大過程では、燃焼体である建物が、連鎖しながら延焼促進し、個々の燃焼体は、鎮火するといった一連の記述モデルである。建物間の延焼判定は、風速をパラメータとする延焼限界距離を用いて判定している。浜田の式は、都市構造の構成の変化に対応して、防火木造、耐火木造など、補正係数（延焼速度比や2階建て建物の考慮）による改良が行われてきた。しかし、浜田式を用いた実火災の再現性の検証として、昭和51年の酒田大火に適用した結果、延焼速度が過大となることが指摘されている¹⁾。一方、阪神・淡路大震災では、倒壊建物が多く存在する地域の延

焼速度式が小さく、建物倒壊を伴う延焼の緩慢化が指摘されている¹⁾。東京消防庁は、都内の全焼火災データを分析した結果、新しい延焼速度式「東消新式」を提案している¹⁾。さらに、倒壊建物の影響と大規模火災の予備熱を考慮した、「東消式97」、耐火建物への着火延焼を考慮した「東消式2001」を提案している¹⁾。東京消防庁の延焼モデルは、図2に示すように、火災の延焼過程を物理現象として捕らえたモデルである。

著者らは、浜田の延焼速度式をメッシュモデル化し、火災延焼シミュレーション・システムを開発してきた。そして、放射熱モデルを用いた樹木の防火効果や樹木延焼モデル・車両の火災延焼モデルをシステムに拡張化している。すなわち、目的に応じて、工学的な帰納モデルと、物理的な現象モデルのハイブリッドモデルを構成している。次章では、その開発システムと特長について述べる。

3. 火災リスクシミュレーション開発と適用の整理

木俣・二神らは、浜田の延焼速度式が広域な市街地の火災延焼危険箇所を評価するため、500mといったメッシュサイズで運用され、市街地構造が平均的に取り扱われてきたのに対して、10～50mのサイズによるメッシュ型化を提案し、メッシュ内構成に対応する仮想建物を想定し、かつ延焼速度式を8方向に拡張化し、その諸パラメータを再定義したシミュレータを構成している。そして、酒田・福光大火の再現性実験を行い、良好な結果を得ている。

木俣・二神らは、メッシュ型の大震時火災延焼シミュ

表1 火災リスクシミュレーションの開発と成果

目的	使用モデル・手法	分析効果
システム特性分析	実験計画法	各パラメータの特性の把握
都市の地震火災分析	メッシュモデル(50m) 地震規模・地盤条件 出火率モデル・初期消火率 放射熱算定モデル 緑地メッシュ防火判定モデル	地震外力・地盤・倒壊率の影響分析 焼け止まり・延焼危険区域の抽出 緑地帯の防火効果提示
地区防火区画計画	メッシュモデル(10～20m) 放射熱算定モデル 緑地メッシュ防火判定モデル	不燃区画領域の計画支援
車両火災危険分析	メッシュモデル(10m) 放射熱算定モデル 車両延焼モデル	車両火災による延焼危険の提示
倒壊家屋を考慮した火災危険分析	メッシュモデル(10m)・ポリゴン表示	倒壊家屋による延焼遮断効果の低減
樹木防火効果分析	メッシュモデル(10m)・ポリゴンモデル 放射熱算定モデル 樹木防火効果モデル	1本単位の樹木の防火効果の提示

レーション・システムを基礎として、各種の防災計画への適用を行っている。表1に、開発システムと、手法、効果について整理している。以下、開発システムの目的、手法、得られた分析の成果を述べる。

(1) システム特性分析

メッシュモデル化と浜田式との対応化において、メッシュサイズを最大50m程度であれば、両者の延焼速度の乖離が問題とならないことを明らかにした。つぎに、シミュレーションのパラメータである、風向、風速、建蔽率、木造建物混成比等の水準を変えて、実験計画法による分散分析を行った。その結果、各パラメータのシステムの影響度を定量的に把握した。

(2) 都市の火災危険分析

4km四方の地域を対象として、地震規模・地盤・木造建物をパラメータとする出火件数推定モデル、火器使用率、季節・時間係数、市民消火率を考慮した確率的出火モデルを構成した、都市の地震火災分析システムを開発した。その結果、都市の延焼遮断帯構成のための、基礎情報を得ることができた。さらに、具体的な延焼遮断帯として、樹木帯の防火効果判定モデルを組み込み、防火効果の判定をダイナミックに提示することができた。

(3) 地区防火区画計画

メッシュ長を10mにとり、(2)の延焼遮断帯に囲まれた地区単位のマクロシミュレーションを実施し、空地、道路の延焼阻止効果をダイナミックに提示することができた。さらに、沿道建物の整備による火災リスクの低減効果など、都市計画的な整備の定量的評価を提示することができた。

(4) 車両火災危険分析

メッシュ長を10mにとり、沿道建物の火災延焼が車両(1台ずつポリゴンデータとして採取)に与える影響並びに、車両の延焼速度式を提案し、車両火災が木造建物の延焼を促進するリスクをダイナミックに提示することができた。

(5) 倒壊建物を考慮した火災危険分析

メッシュ長を10mにとるとともに、建物ポリゴンデータを採取し、延焼計算をメッシュで行い、延焼建物の表示をポリゴン上に反映させた。その結果、道路上に倒壊した建物形状パターンによる火災リスクをダイナミックに提示することができた。

(6) 樹木防火効果分析

実市街地を対象として、ポリゴン単位で建物データを採取し、ポリゴン間の延焼速度を定義し、火災延焼動態をメッシュモデルと比較した。その結果、大きな乖離はないが、メッシュモデルに比較してデータ採取のコストが莫大になることが判明した。樹木の防火効果は、各ポリゴン建物からの輻射・対流熱をサンメンションして判定する物理現象モデルを採用した。

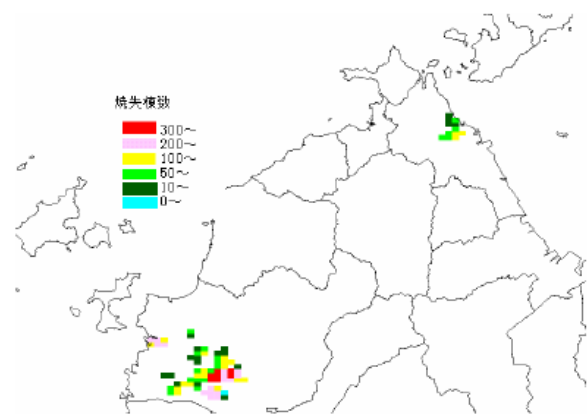


図3 愛媛県地震火災被害想定(500mメッシュ)

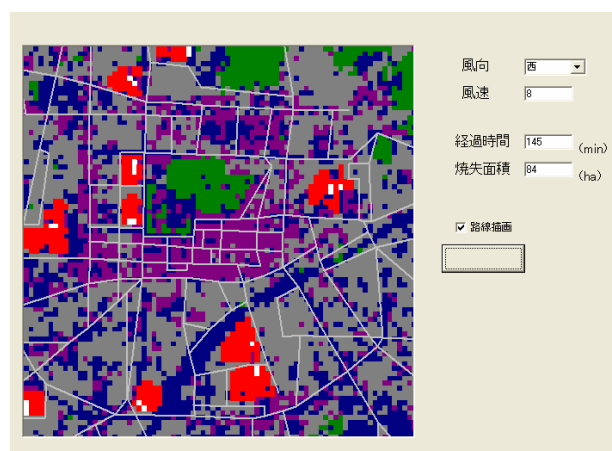


図4 地震火災分析システム(松山市中心市街地)

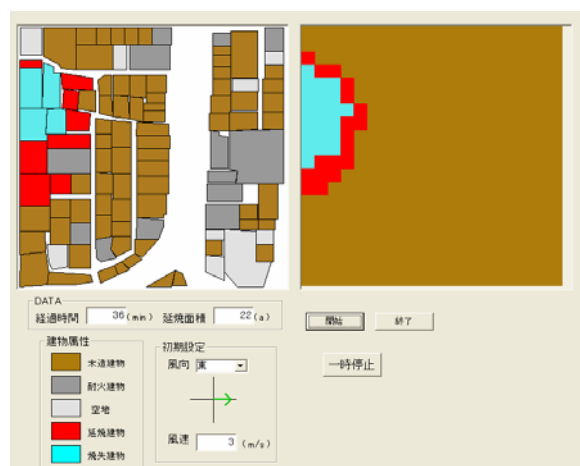


図5 地区防火区画計画支援システム(松山市)
(メッシュ・ポリゴン表示)

以上、著者らは、浜田の延焼速度式をメッシュモデル化し、システムパラメータの特性を踏まえた上で、各種防災計画の目的に対応したシステム開発を行ってきた。

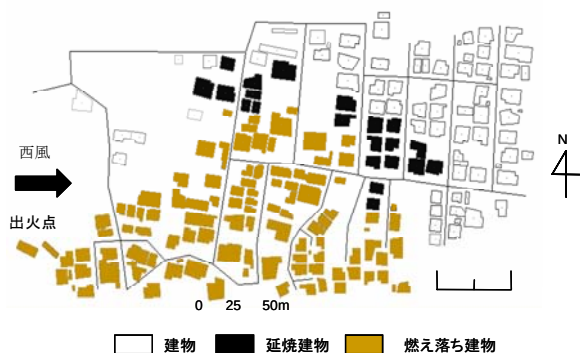


図6 ポリゴンデータによる延焼シミュレーション
(松山市)

ポリゴン建物の延焼領域

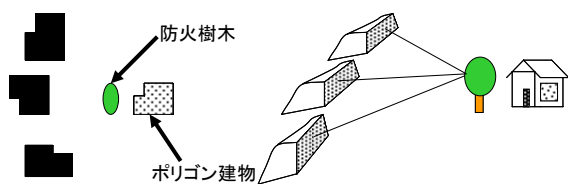


図7 ポリゴン延焼建物の輻射・対流熱による樹木防火効果の算定モデル

その過程で、シミュレーションの表示方法をメッシュからポリゴンへ変えていったのは、地震時の車両停止のあり方や、地区防災計画を促進するための手段として、沿道建物の耐火化や、防火樹木の効果を分かりやすく住民にも提示するためである。(6)では、メッシュデータではなく、ポリゴンデータを用いた延焼速度式を提案したが、十分な検証は行われていない。

図3に、愛媛県の地域防災計画で想定される地震火災の被害予測を示す。図4～6に、著者らが従来開発してきた各目的のシミュレーション事例の一部を、図4～6に示す。図7は、樹木が延焼するポリゴンから受ける輻射・対流熱の関係をモデル化している。

図4～7は、開発した火災延焼シミュレーションを核として、目的に応じてモデルの追加・修正を図りながら開発を進めているシステムの適用事例である。著者らは、延焼速度式については工学的な経験式に基づく浜田の式を採用している。その一方で、避難や樹木といった評価項目を導入する中で、輻射熱といった物理現象モデルを取り込んでいる。

今後の課題としては、メッシュモデル化と風下の延焼への影響を分析するとともに、樹木の配置・樹種を考慮した支援システム開発、避難路の安全性を考慮した避難計画支援システムの開発を行いたいと考えている。さらに、メッシュデータ、ポリゴンデータ採取の効率化についても検討を行いたいと考えている。

5. おわりに

本研究では、著者らが開発してきた地震時火災リスクシミュレーションの基礎となる延焼モデルについて、工学的な経験式と現象的な物理モデルを目的に応じて開発してきたプロセスを整理した。その整理の中で、今後、延焼速度式そのものを、物理現象的なモデルとして検討する必要があるかもしれない。この点については、現段階では勉強不足であり、今後検討を行いたいと考えている。当面の課題としては、さらなるシステム分析、シミュレーション・システムの入力データの操作性の向上を図りたいと考えている。

上述した課題は、目的に対するシステム課題であるが、目的論の開発要件から言えば、地震時の同時多発火災のリスクを如何に減少させるかである。都市の耐震耐火化と言ったハード的な不燃都市建設を目指すのではなく、実効性あるオープンスペースや樹木の配置、ソフト対策である避難計画を合理的に評価できるシステムの開発が課題であると考えている。その意味で、3章で述べたように、シミュレーションに用いている速度式の特性・検証についての分析を開発目的に応じて検証したいと考えている。それらの結果を踏まえて、システムの課題の解決につなげていきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) 糸井川栄一：震災時の火災延焼シミュレーション～現状報告・将来の行方へ、予防時報 217, pp. 30-35, 2004.
- (2) 二神 透, 木俣 昇：火災延焼シミュレータを用いた防火樹木整備支援システムの開発, 土木計画学研究・論文集, No. 23, pp. 325-334, 2006.
- (3) 二神 透, 末廣文一：防火樹木を考慮した地震時火災シナリオシミュレータの開発, 第12回土木学会四国支部学術発表要集, pp. 298-299, 2006.
- (4) 二神透, 木俣昇, 末廣文一, 寺田一雄：火災延焼シミュレータを用いた防火樹木整備による防災まちづくり支援, 土木計画学研究・講演集, No. 32, (363), 4p, 2005.
- (5) 二神透, 木俣昇：倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析, 土木計画学研究・論文集, No. 21, pp. 341-348, 2004.
- (6) 二神 透, 財間圭史, 木俣 昇：シミュレーションを用いた地区防災計画支援システムに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 353-360, 2000.
- (7) 二神 透, 木俣 昇, 和田修司：路上車両火災を考慮した地震時火災シミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 16, pp. 349-356, 1999.
- (8) 木俣昇, 二神透：広域火災シミュレーション・システムによる地震火災危険の分析, 土木学会第13回電算機利用査読シンポジウム査読論文集, pp. 131-138, 1988.
- (9) 木俣昇, 二神透：大震災火災延焼シミュレーション・システムの要因分析による都市の耐火構造の研究, 土木計画学研究・論文集, No. 5, pp. 123-130, 1986.