住民参加のための大震時火災延焼シミュレーション・システム開発

Development of Fire-Spreading Simulation System aimed at Residents' Participation under a Big Earthquake

二神透¹・木俣昇²

Tohru Futagami, Noboru Kimata

抄録： 本論文では、著者らが開発を行っている大震時火災延焼シミュレーションの改良を行った。具体的には、住民・行政が自らデータを採取できるようシミュレーション・データの自動採取化を図った。さらに、シミュレーション結果を基に、耐火・不燃化といった都市計画や、防火樹木の配置効果といった、具体的な諸対策の効果を把握するためのシステム開発を試みた。開発したシステムは、住民・行政が防災意識を高めるとともに、避難計画の策定や、避難訓練の実施にも活用できるであろう。最後に、今後の課題を整理している。

Abstract: In this paper, the fire spreading simulation at the time of large earthquake in which authors have been developing was improved.

Specifically, automatic extraction of simulation data was attained so that residents and administration could extract data by themselves. Furthermore, we developed the system which enables to grasp the effect of many concrete measures based on the simulation, such as city planning, fire-resistance and incombustibility of building, and the arrangement effect of fire prevention trees were applied. The developed system will be utilizable for decision of an evacuation plan, and implementation of a fire drill as well as raises awareness of disaster prevention for the residents and administration. Finally, the future subject is arranged.

キーワード： シミュレーション、情報利用、地震火災、防災意識、防火樹木、合意形成

Keywords : simulation, information use, earthquake fire, awareness of disaster prevention, fire prevention trees, consensus building

1. はじめに

わが国では、木造住宅嗜好が強く、木造密集市街地が、各地に存在する。各自治体の地震時被害想定を見れば、これら市街地での火災延焼被害が必ず取り上げられており、地震時火災リスクへの認識は広く行き渡っているかに見える。しかし、その認識は、地震時火災リスクを回避したり、軽減したりする行動計画へと具現化させ、さらに実効性のあるものへの改変を促進させるレベルのものではない。

具体的には、防災計画書の指定避難場所の多くは校区単位の指定であり、被災者への救護や生活支援での利便性面に重心があり、地震時火災の特性である同時多発性、消火力の低下性への配慮はほとんど見られないのが現状である。避難訓練面でも、多くの場合、指定避難場所への移動体験に留まっている。近年、ボードを用いて、火災や建物倒壊による通行障害情報を付与するという試みがなされるようになったが、試みレベルに留まっている。例えば、2007年に愛媛県新居浜市防災安

全課が実施した小学校区単位の避難訓練では、“家屋の倒壊”、“火災の発生”といったカードを事前に玄関先に置き、“避難時に発見者が回収してください”という広報で、事前周知を図ったとしているが、一枚の回収さえ行われなかった。このことは、住民側のみならず、計画者側の認識レベルにも問題があることを示唆しているだろう。

本論文では、著者らが開発を行っている大震時火災延焼シミュレーション¹⁾⁻⁷⁾を改良し、住民・行政が自らデータを採取し、地域の地震火災危険性を評価可能なシステムを提案する。すなわち、住民自ら、耐火・不燃化といった都市計画や、防火樹木の配置効果といった、具体的な諸対策の効果を把握するためのシステム開発を試み今後の課題を整理している。

2. 都市構造データ採取のシステム化

(1) 従来のシステムにおけるデータ入力

大震時の火災延焼速度式に関するモデルは、浜田・堀内、室崎、東消式など様々なモデルが開発

1：正会員 学博 愛媛大学 講師 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)

2：正会員 工博 金沢大学名誉教授

図-1 ポリゴン建物とメッシュモデル化

されている。著者らの開発している大震時の火災延焼シミュレーション・システムは、著者らが実火災との整合性検証^{1),2)}を行った浜田らの延焼速度式⁶⁾に基礎を置いた、図-1に示すようなメッシュ型モデルを採用している。すなわち、図上の面積 S_i と S_j ポリゴン間の隣棟間隔 d_{ij} は、図-1の下側の正方メッシュ建物 S_i (建物長 a_i) と S_j (建物長 a_j) との距離 d_{ij} で定義される。ポリゴン建物は、木造建物、防火木造建物、耐火造建物に区別している。メッシュ間の延焼時間は、上述したパラメータと、メッシュ内の建物混成比ならびに気象条件(風向、風速)を与えてシミュレーションを実行する。ダイナミックな延焼ならびに鎮火の状態は、メッシュの延焼状態をポリゴン建物へ反映化して表示している。

既往システムでは、対象とする地域の住宅地図あるいは航空写真を用いて、ポリゴン座標を採取し、ポリゴン座標データを採取するとともに、単位メッシュ長:UL にドット網を重ね合わせ、各構造種別毎のドット占有率をカウントして建物混成比のデータを採取していた。そのため、対象地域が広域となるとデータの採取に多大な時間と労力を費やしていた。その結果、誰もが容易にインプットデータを採取することは困難であった。そこ

で、次節で述べるように、データ入力システムの化を行い、データ採取の効率化を行った。

(2) データ入力のシステム化

本節では、著者らが改良を行った、都市構造データ入力のシステム化について述べる。前述したように、従来のデータ採取法は、ポリゴン座標の入力データ、ポリゴン属性データ、ドットカウントより算定されるメッシュデータ(属性、各種構造混成比、建ぺい率)のデータファイルを作成していた。ドットのカウントは手作業で行い、さらに、それぞれ独立にデータファイルを作成していたため、エラーの修正にも時間を要することがしばしばであった。そこで、図-2に示すように、a)ポリゴンデータファイル作成システム、b)任意の単位メッシュ長:ULを与えたとき c)pixel 値をカウントすることにより、メッシュ内の建物占有率を算定する一連の入力システムを開発した。一連の操作については、4.の適用事例で述べるが、手作業の部分は、ポリゴンの端点をマウスでクリックすることと、ポリゴンの建物属性をマウスでクリックするのみである。この結果、誰でも容易に、シミュレーションのインプットデータである都市構造データを採取することが可能となった。

3. 都市計画・防火樹木配置効果の評価システム

(1) 開発システムのフロー

著者らは、住民・行政が地域のデータを自ら採取し、地域の地震火災危険性を提示するとともに、沿道建物の耐火化や、防災樹木の配置の効果を即時評価可能なシステムの開発を目的としている。

そのために、2.で述べたように、都市構造データの採取ならびに、シミュレーション・パラメータの作成の効率化を図った。この段階で、住民・行政は、気象条件と出火点を入力すれば、設定し

図-2 シミュレーション・インプットデータ作成のシステム化

た単位時間:UT 毎の延焼リスクを視覚的かつダイナミックに認識できる。その結果、避難路の火災リスクや、地域の延焼危険性が明確になるとともに、“何らかの対策が必要となる”といった意識が高まるであろう。

本節では、具体的な対策とそれらの効果を即時反映可能なシステムの開発を行った。図-3に開発システムの全体フローを示す。

図-3の上側は、2.で概説した、都市構造デー

図-3 開発システムの全体フロー

表-1 緑地焼け止り率に関するデータ⁹⁾

大火の名称	発生年	風速(m/sec)	緑地焼け止まり率(%)
関東大震災火災	大正12	11.3～21.8	33.3
静岡大火	昭和15	18.0～22.0	25.4
那珂湊火災	昭和22	2.2	33.3
福井大震災火災	昭和23	3.0	48.1
熱海火災	昭和25	2.2	38.5
鳥取火災	昭和27	7.9～10.8	50.0
岩内火災	昭和29	4.2～21.7	21.3
新潟火災	昭和30	5.0～20.0	20.4
能代火災	昭和31	11.5～14.5	33.7
酒田火災	昭和51	10.0～26.4	10.5

表-2 樹木の耐火力データ

	常緑広葉樹	落葉広葉樹	針葉樹	木材
発火限界 輻射熱 (kcal/m ² h)	13,400	13,900	12,000	4,000
引火限界				
有炎口火	5,400		5,800	2,500
無炎口火	5,700			

タの作成システムである。左側は、web 住宅地図を背景画像としてシステムに取り込み、マウスでポリゴンデータの端点を入力し、建物種別も合わせて入力する。以上の処理で、ポリゴンデータファイルが作成される。右側の部分は、延焼計算に必要なパラメータ作成部分である。任意の単位メッシュ長:ULを与えると、ポリゴンデータファイルを参照しながら、pixel 値をカウントすることによってメッシュデータが自動的に作成される。

次に、図-3の下側左部分は、出火点の入力並びに、風向、風速の設定、右部分はシミュレーションの実行部分である。当該地域の卓越風や、最大風速など、シナリオに応じた条件を設定する。例えば、風向、風速、出火点を変えることにより、延焼リスクが大きく異なることが即時に提示される。シミュレーション実行部分の下側は、具体的な対策（建物の不燃化、防火樹木の配置効果）を即時評価するためのインターフェースの開発を行っている。建物の不燃化を行う場合は、単にポリゴンデータの属性の変更を行えばよい。建物の配置換えや、オープンスペースの追加等の場合は、ポリゴンデータを修正あるいは削除すると、自動的にメッシュ・パラメータも修正される。それらのデータを用いて、シミュレーションを再実行することにより、対策効果を即時に見ることが出来る。樹木の配置効果については、次節で概説する。

(2) 防火樹木配置支援システム

住民参加と合意形成に基づき、都市計画的な防災対策を進めるためには、住民・行政が自らデータを採取し、地域の危険性を認識し、防災対策とそれらの効果を視覚的かつ定量的に分析可能なシステムが有効であると考えている。防火樹木の配置による不燃化計画は、環境や景観、実行可能性の点でも魅力ある計画であると考えている。そこで、防火樹木の配置計画支援のインターフェースを開発し、計画の即時評価システムを提案する。

a) 防火樹木の耐火効果

緑地の防火効果については、表1に示す過去の地震火災、都市火災における緑地関連の焼け止まりデータを論拠の一つとしている。表1より、多くの大火は強風時に発生していること、そして、緑地で焼け止まり効果が、10.5～50.0%と大きな効果があることが分かる。焼け止まり率のばらつきについては、当然火災の形状や、樹木の種類・状態によるものと考えられる。この樹木の耐火力に関する研究は、「岩河」^{9),10)}が、

防火樹木の耐火力の判定は、図-4に示すように、メッシュ型シミュレーションによる火炎面と樹木帯の位置関係を基にして、輻射受熱量の計算を行い、表2の

著者が開発してきた防火樹木配置効果システム^{4), 5)}は、岩河の研究^{9), 10)}をベースに、構成している。すなわち、図-4では、■で表示されたメッシュが延焼中のメッシュであり、それが同時延焼領域となり、この領域から火炎領域(火炎高さ・幅・傾き)を定め、そこからの受熱量を算定している。具体的には、図-5に示すように、風速 $U(\text{m/sec})$ によって、火炎領域($H_g \times B \times D_g$)が θ 傾いた輻射面から $X(\text{m})$ 離れた位置の受熱量を、輻射熱 R_g と対流熱 T_{as} の和として算定している。この輻射面と受熱地点の間に防火樹木を配置すれば、熱量の遮蔽効果が期待できる。本研究では、常緑広葉樹であるサンゴジュ(成木:高さ5~7m)を配置するとして、図-6に示す配置パターンと樹木高さを入力データとして与えることとする。これらの配置パターンによる熱量の遮蔽率は、表3の岩河らの文献^{9), 10)}に基づいている。

隙 間	遮蔽率(%)
無し	73.1
葉張 1/2	48.7
葉張 1	24.3

4. 適用事例

3. では、住民・行政が地域の地震火災危険性を評価し、都市計画的な対策や、防火樹木の整備

対策の効果を確認できるシステム開発を行った。本章では、適用事例を通して、システムの操作性

図-7 ポリゴンデータ入力システム

図-8 ポリゴンデータの拡大機能

図-9 ポリゴン端点座標入力(建物 ID.No.1)

図-10 ポリゴンデータの登録完了

図-11 メッシュ分割(UL=10m)とインプットデータ生成

図-12 メッシュ分割(UL=15m)とインプットデータ生成

並びに実効性の検証を行う。

(1) 都市構造データ作成事例

図-7に、ポリゴンデータ入力システムを示す。背景の住宅地図は東京都墨田区の木造密集市街地で、web上の住宅地図のbitmap画像を用いている。図-7の右側インターフェイスは、ポリゴンIDの登録と位置座標登録のための画面である。具体的には、当該ポリゴンの端点座標をマウスでクリックしながら一軒ずつデータ化する。このとき、図-8に示すように、画面の拡大・縮小ボタンをクリックしながら作業を効率的かつ正確に行えるように工夫している。ポリゴンの属性は、画面の下の建物状態（木造、防火木造、準耐火構造、耐火構造）をマウスで指定する。図-10は、対象エリアの全てのポリゴンデータを入力した画面である。図より、対象地域は、木造、防火木造の建物が主であり、道路沿道建物も殆ど耐火化されていないことがわかる。図下の、“保存して次へ”をクリックするとポリゴンデータファイルが生成される。一般的に、住宅地図からのみでは、ポリゴンの

属性判別のための正確な情報は分らない。しかし、住民・行政が、自分の住んでいる地域のデータを採取するのであれば、属性の定義を明記すれば問題は少ないと考えられるが、インターフェースに工夫が必要であろう。

図-11は、単位メッシュ長：UL=10(m)でメッシュ分割（横方向37メッシュ、縦方向31メッシュの正方分割）している。単位メッシュ長：UL入力すれば、自動でメッシュが掛けられ、建物属性のpixel数を自動カウントして、図2で示したメッシュモデルの家屋長、隣棟間隔等のデータが自動生成される。図-12は、単位メッシュ長：UL=15(m)と入力した場合（横方向25メッシュ、縦方向21メッシュ）を示す。対象地域は、狭小な建物が多く存在するため、以後、UL=10(m)に設定する。図-11,12が示すように、図-10のポリゴンデータ座標と属性が入力されれば、実行単位のメッシュ長：ULを入力すれば、シミュレーションに必要なインプットデータが自動生成される。

以上より、従来、対象地域が広がるにつれて指数状に掛かっていた入力データの手間が大幅に

出火点1、西風、10m/sec、焼失面積 0.6ha
図-13 シミュレーション事例(30分後)

出火点1、西風、10m/sec、焼失面積 1.94ha
図-14 シミュレーション事例(60分後)

出火点1、北風、3m/sec
図-15 木造建物のオープンスペース化

出火点1、北風、3m/sec
図-16 風下二次近傍への延焼

短縮化されるとともに、ヒューマンエラーに伴うデータの信頼性の低下も解消されている。

(2) 都市計画・樹木配置計画と評価

図-13 は、出火点を画面中央に一個所設定し、風向を西風、風速を、10m/sec で設定した、30 分後の延焼動態図である。延焼面積は、0.6ha である。ちなみに、風速を 3m/sec で設定すると、同じ時間での焼失面積は 0.12ha と、風速が 10m/sec の 1/5 の値となった。このことより、強風時の地震火災の危険性は、非常に高く、近年発生した地震時の気象条件を考慮すると、火災に対しては不幸中の幸いだったといえよう。

図-14 の出火後 60 分の延焼動態図を見ると、地図上の左上から右下へ走る幹線道路を越えて火災が東側に延焼拡大している状況が分かる。このままでは、時間の進行とともに、東側の木造密集市街地も火災の延焼危険性があることが分かる。紙面の制約上割愛するが、出火後 152 分で、画面下側の全体マップの領域すべてを焼失した。

図-17 樹木配置効果(隙間無し)

図-15 は、地図上の右下部分のオレンジで囲まれた部分の建物 2 軒をオープンスペースに置き換えた図である。すなわち、オレンジのオープンスペース群で延焼の遮断効果の判定を行う。図-9 のポリゴンデータ作成部分に戻り、該当する建物を消去し、別の名前でデータファイルを作成する。沿道建物の属性の変更についても、図-9 のポリゴンデータ作成部分で修正をかければよい。新しく作成したポリゴンデータは、図-11 のメッシュ分割を行い、インプットデータを生成する。以後、これらのデータを用いてシミュレーションを実行すればよい。

図-16 は、図-15 のデータを用いて、出火点を図-15 に示す地図上中央右側に設置し、北風、風速 3m/sec の同じ条件でシミュレーションを実行した結果である。図-16 より、風下二次近傍への延焼が確認された。そこで、防火樹木の配置による延焼遮断対策を行う。

図-17 は 図-16 で風下二次近傍への延焼が確認された、の中の建物の前面に樹木を配置して延

図-18 樹木配置効果(葉張 1/2)

表-4 配置パターンと背面家屋受熱量

パターン	隙間無し	葉張 1/2	葉張 1
受熱温度(℃)	101.1348	221.0209	341.907

焼遮断効果を確認することにする。図-13 以降のシミュレーション実行画面の右側に、樹木の配置パターンの選択画面がある。樹木の配置パターンは、図-6 に示したように、パターン 1 が、隣接する樹木の葉長間隔無し、パターン 2 が、葉張の 1/2 間隔、パターン 3 が、葉張間隔である。図-17～19 に示すように、配置パターンをクリックすると、簡単な配置パターン図が左側に表示される。

図-19 樹木配置効果(葉張 1)

図-17～19 に示すように、配置パターンをクリックすると、簡単な配置パターン図が左側に表示される。その下側の入力画面に、樹木の高さ $H(m)$ と、配置する樹木までの垂直距離 $z(m)$ を入力する。図-17 は、高さ 5m のサンゴジュを、隙間無く配置したパターン、図-18 は、葉張の 1/2 の間隔で配置したパターン、図-19 は、葉張の間隔で配置したパターンである。各々の背面家屋が受けた最大を受熱量を表 4 に示す。この表より、いずれのパターンも木材の発火温度 400 よりも小さく、風下への延焼を防火樹木が阻害していることが分かる。

以上を整理すると、都市計画的な対策（可燃建物からオープンスペースの新設）を行っても、十分な火災リスクの低減に繋がっていないため、防火樹木の配置（3 パターン）の防火効果を検討した。その結果、全てのパターンで防火効果が認められた。ただし、本事例は一例であり、風速や出火点の設定によっては、十分な防火力を持たないことも想定されよう。今後、住民参加の下、種々のシナリオで、自らの代替案を評価・検討するツールとして、地震火災リスクを“自分の問題・地域の問題”として認識を深める効果が期待できよう。

5. おわりに

大震時の地震火災の危険性は、発生時の気象条件や出火の状況によって大きく異なる。一般認識として、近年、甚大な被害を出した地震火災は発生していない。しかし、このことは、地震の発生時間帯や気象条件が幸いしていたにすぎない。特に、木造密集市街地では、従来の長期的な面的整備のみならず、即時的な対策として、ポケットパークのようなオープンスペースや防火樹木の配置計画を進めていくことが肝要であろう。そのためにも、住民自らが地域の地震火災の危険性を認識し、対策の効果を検討するシステムが有効となろう。本研究では、著者らが開発を行ってきた大震時の火災延焼シミュレーション・システムの入力系・出力系の改良ならびに、具体的な防火対策のためのインターフェイスを開発した。

具体的には、住民・行政が自分たちの地域のデータ採取から、分析、対策とそれらの評価といった一連の適用を可能とするシステム開発を行った。適用事例を通して、web で提供される住宅地図を背景画像とし、ポリゴンデータと属性の入力による、シミュレーション用の都市構造パラメータ自動生成システム開発を行った。そして、建物のオ

ープンスペース化の効果や、防火樹木配置対策の組み合わせにより、延焼阻止効果を確認することができた。紙面の制約上割愛したが、沿道建物の耐火化によるブロック効果についても同様に評価できる。

以上は、火災の延焼リスクの提示、対策の効果・評価に関する視点であるが、今後、避難路・避難場所の火災熱リスクの提示、対策・評価システムを組み込みたいと考えている。さらに、著者らが開発している、ペトリネットによる避難計画支援システム¹¹⁾と連動したシステム開発を行いたいと考えている。後者の、避難計画支援システムについても、住民・行政が自ら操作可能なレベルまでのシステム開発、インターフェイスの改良を行う必要があると考えている。

今後のシステムの課題としては、開発したシステムを、実際に住民・行政に使っていただき、ワークショップ、アンケート・ヒアリングを通じて課題・問題点を抽出するとともに、実運用レベルでの汎用性を高めていきたいと考えている。

参考文献

- (1)木俣昇:大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証, JORSJ,30-1,pp.59~86,1987.
- (2)木俣昇, 二神透:福光大火のシミュレーションと復興計画の評価, 金大教育開放センター紀要 8, pp.73~84,1987.
- (3)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.
- (4)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.
- (5)二神透, 木俣昇:防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・システムの拡張化に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.12,pp.151-159, 1995.
- (6)日本火災学会編(第2版):火災便覧, 共立出版, 1984.
- (7)日本火災学会編(第3版):火災便覧, 共立出版, 1997.
- (8)糸井川栄一:震災時の火災延焼シミュレーションー現状報告・将来の行方ー, 2004予防時報217, pp.30-35,2004.
- (9)岩河信文:樹木の防災効果について, 公園緑地, 38-2, pp32-40,1977.
- (10)岩河信文:都市における樹木の防火機能に関する研究, 建築研究報告, No.105,1984
- (11)二神透, 木俣昇:中山間地域の救急・避難計画のためのシナリオシミュレーションの開発, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.89-96,2005.