

シミュレーションを用いた地区防火区画支援システムに関する基礎的研究*

A Study on Fire Preventive Planning in District Supported by Simulation System

二神 透*, 財間圭史**, 木俣 昇***

by Tohru FUTAGAMI*, Keiji ZAIMA**, Noboru KIMATA***

1. はじめに

わが国では、防災上の危険性が懸念される木造密集市街地が全国に多数散在している。平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災は、わが国で初めての近代都市直下型の地震であり、社会基盤整備が遅れた密集市街地において、甚大な延焼被害をもたらした。一方、戦災復興区画整理事業等により、道路・公園等の社会基盤が比較的整備された地域では、焼失面積・倒壊率において防災上の効果が確認されている¹⁾。さらに、ポケットパークや樹木等の小さな空間が延焼を阻止したことも報告されている²⁾。焼け止まり線に着目すると、空地で2割、道路で4割、耐火建物で3割、消防活動で1割であったと報告されている¹⁾。

平成9年に制定された、「密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律」は、住民の合意形成を図りながら密集市街地の再開発を早急かつ計画的に進める事を目的としている。これは、これまでの市街地再開発事業・土地区画整理事業では、複雑な権利関係の輻輳や、狭小な敷地、住民の高齢化等により住民との合意形成が困難なため、抜本的な面的整備が期待できないという問題を含んでいる。今後、密集市街地の解消を早急に図るためには、

新法に基づく円滑な住民合意形成が肝要となる。

従来、市街地の地震火災危険性を軽減するために整備すべき地区を分析する手法として、不燃領域率（不燃領域面積/地区面積）が用いられている¹⁾。そして、この値が70%未満の地区については、木造建物の立て替えや、道路・公園等の空地率の向上等、都市計画事業を進める必要がある。しかし、前述したように、面的な整備を行なうためには住民のコンセンサスを得ることが必要であるが、私権を主張する住民と行政間の対立関係が様々な都市計画事業に見られる。例えば、昭和62年から平成10年度にかけて施行された愛媛県今治市駅西地区土地区画整理事業後の住民意識調査結果³⁾を見ると、“行政からの事業計画に対する情報量”について22%の住民が満足するが、47%が不満足であるという回答を得た。特に、住民側から見れば“計画の全体像がよく分からない”といった意見が多く、計画そのものの認識不足、裏返せば、行政側の説明不足が指摘されよう。

密集法は、防災を公共の福祉と位置づけ、老朽住宅の建て替えや、ポケットパーク、生活道路の整備のような、線的、点的整備による修復的・段階的な整備を制度化したものである。今後、法的制度を活用しながら密集市街地の整備を行なうためには、上述した事例が示すように、それらの整備効果を具体的に認識し、かつ評価可能な支援システムが合意形成の上で有効な手段とならう。

そこで本研究では、シミュレーションを活用することにより、住民と行政が一体となり防災街づくりを進めるための支援システムの開発を目的とする。具体的には、都市防災上の脆弱な地域の分析に基づく地区レベルでの防災対策支援と、それらの評価を提示可能なシステムを構成する。そして、最後に松山市を事例に、構成したシステムを適用して問題点

キーワード：防災計画，地区計画，市街地整備

* 正会員 学博 愛媛大学講師 工学部環境建設工学科
(〒790-8577 松山市文京町 3)

Tel 089-927-9837 Fax 089-927-9837

** 学生員 愛媛大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻
同上

*** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

を整理する。

2. 既存研究と支援システムの構成

火災の延焼に関する研究は、従来から活発に行なわれていたが、大別すると1) 延焼速度に関する研究、2) 延焼遮断に関する研究、3) 消防力に関する研究、4) 延焼シミュレーションに関する研究に分類されよう。1) の延焼速度に関する研究は、過去の大火事例、木造実験等のデータより建物間の延焼モデル化を行なった、浜田⁴⁾・堀内⁵⁾の延焼速度式が早くから知られている。その後、都市の建物構造が多様化するに従い、室崎⁶⁾、保野⁷⁾、建設省建築研究所⁸⁾、消防庁⁹⁾、糸井川¹⁰⁾が独自の延焼速度式を開発している。2) の延焼遮断に関する研究は、大火事例において、河川・道路・緑地等の不燃領域による焼け止まりに着目し、延焼領域を算定することを目的とする。これらの研究は、東京都防災会議¹¹⁾、建設省建築研究所⁸⁾、東京消防庁¹²⁾が行なっている。

3) の消防力に関する研究は、保野⁷⁾が注水量と焼失面積の関係を、ロジスティック曲線を用いてモデル化している。4) の延焼シミュレーションに関する研究には、確定的モデルを用いた研究、確率論的モデルを用いた研究に大別できる。前者の研究として、藤田¹³⁾、建設省建築研究所⁸⁾のシミュレーション・モデルが知られている。後者については、飛火過程を取り入れた糸井川モデル¹⁴⁾が知られている。一方、高井¹⁵⁾らは、阪神・淡路大震災の建物延焼動態調査を実施し、消防力等を考慮した新たな理論モデル式の開発と、GIS 上での視覚的シミュレーション・システムの開発を行なっている。

著者等は、開発を行っている火災延焼シミュレーション・システムを基礎とした地震時火災危険分析システムを構成し、防災計画への適用についての検討を試みている¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。本稿では、著者等のシミュレーション・システムを基礎として、地区防火計画支援システムを、図1に示すように構築した。本システムの特徴は、都市全体の延焼危険性と延焼遮断のマクロ戦略の効果を視覚的に把握可能である点と、地区レベルの沿道整備と効果をポリゴン上で把握できる点にある。本システムで採用している延焼速度式は、上述した浜田・堀内らのモデルに立脚してい

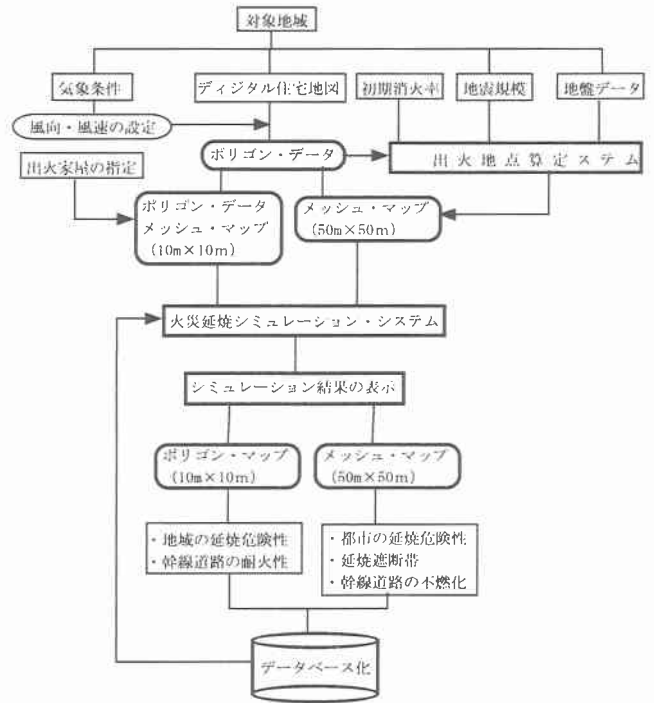


図1 システムの基本フロー

る。また、延焼遮断の判定は、文献「8」による輻射熱と対流熱モデルを用いて判定を行なっている。

つぎに、図1に従って、システムの実行手順について述べる。まず、対象地域を指定し、シミュレーション用の都市構造データ採取する。具体的には、デジタル住宅地図に建物属性を入力し、ピクセル画像処理によって、50m×50mのメッシュ・マップを作成する。同様にメッシュデータに、地盤データ、メッシュ内木造建物棟数を入力する。ここで、気象条件（風向・風速）、地震規模を与えると出火点が確率的に指定され、シミュレーションが実行される。アウトプットである延焼動態は、単位時間毎にカラーでコンピュータ画面に出力されるため、住民にも火災危険の大きい地域を容易に把握することが可能である。さらに、図1に示すように、様々な条件で行なったシミュレーション結果は、全てデータベース化され、クエリーをかければ瞬時に表示可能である。都市の延焼危険性の分析を行なうマクロシミュレーションでは、幹線道路の延焼遮断効果が小さく延焼危険性が高い地域について、幹線道路を整備した代替案を提示し、シミュレーションを再実行することにより焼失面積の低減効果を具体的に提示可能である。さらに、ポリゴン・マップを10m×10mの

メッシュ・データに変換し、延焼動態をポリゴンに表示するという形で、マイクロ・シミュレーションを構成している。マイクロ・シミュレーションでは、ポリゴンデータを用いて、どこをどのように整備すればどの程度の防災効果が期待できるかを輻射熱・対流熱モデルを用いて視覚的に提示できる。

前述したように、防災街区事業を推進するためには、これまでの住環境の整備主体の事業目的と合わせて、防災上危険な地区を整備することにより、地区のみならず街の防災性が大きく向上することを具体的に提示し、住民の防災意識を高めていくことが重要となろう。換言すれば、行政は事業を担保するために、計画支援システムによる住民との情報の共有化により、合意形成を円滑に図っていくかが大きなポイントとなる。本研究では、図2に示すように、都市計画制度における密集法の制定、地区計画により期待される、段階的・修復的市街地整備を支援するために、上述した図1に示したシミュレーション・システムの適用を試みる。適用事例として松山市を対象としたシステムの適用を行い、都市全体の延焼危険性の把握と、幹線道路の延焼阻止効果についての基本的分析を試みる。つぎに、実験計画法を用いて幹線道路と市街地の延焼危険性要因の定量的分析を行う。最後に、火災の延焼動態に伴う輻射熱・対流熱リスクと、幹線道路沿道建物の整備効果について検討を行なう。

3. 松山市の地震火災分析

松山市は、平成11年度現在、人口46万人を有する、地方中核都市である。戦後の復興土地区画整理事業と道路整備事業の推進により、市街地中心部は建物の耐火・不燃化が進んでいる。また、城山を中心とする緑地空間が存在し、市民の憩いの場ともなっている。一方、中心市街地周辺部では都市化が進み、多くの木造密集市街地が形成されており、市街地火災の危険性が高い。そこで、シミュレーション・システムを用いて松山市の地震火災分析を行う。まず、松山市の中心市街地（4km四方）の都市構造データ（建物種別・緑地・道路・オープンスペース）を採取した。これらのデータは、メッシュ・マップ作成システムを用いて、50m四方のメッシュ・データとして処理した。つぎに、表1に示すように地震規模（M7.2）の都市直下型地震を想定し、風向（西風）、風速（8m/s）を設定した。

表1 シミュレーション条件と延焼危険度

| 地震規模 | 風向・風速 | 出火点 | 平均焼失面積 | |
|------|-----------|-----|---------|--------|
| | | | 現状 | 不燃化 |
| M7.2 | 西風 (8m/s) | 4.3 | 179.8ha | 84.5ha |

本シミュレーション・システムでは、確率的に出火点を発生させているため、一応、200回のシミュレーション実験を行った表1に示すように、出火点の平均値は4.3となり、3時間後の焼失面積の平均値は179.8haとなり、この時点で、昭和51年の酒田大火の最終的な焼失面積の8倍弱もの面積に相当する。図3に、200回のシミュレーション結果の中で最大焼失面積を与えた延焼図（出火後3時間）を示す。同図には、対象地域の道路ネットワーク（リンク数160）も合わせて表示している。本事例では、対象地域の7箇所が出火した火災は、3時間後には345.4haとなり木造市街地の約30%を焼失している。この図より、市街地中心部は、耐火建物が集中し、延焼危険度が小さいこと、幹線道路を突破して延焼が拡大していることが分かる。特に、市街地南部の木造家屋が密集する地域では焼失面積が多きいことが容易に把握できる。図4は、一連のシミュレーション実験の結果、延焼突破したリンクを太線で示している。

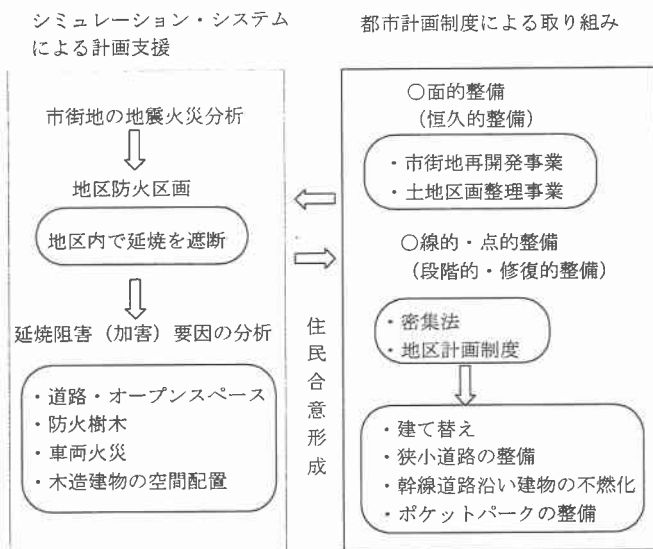
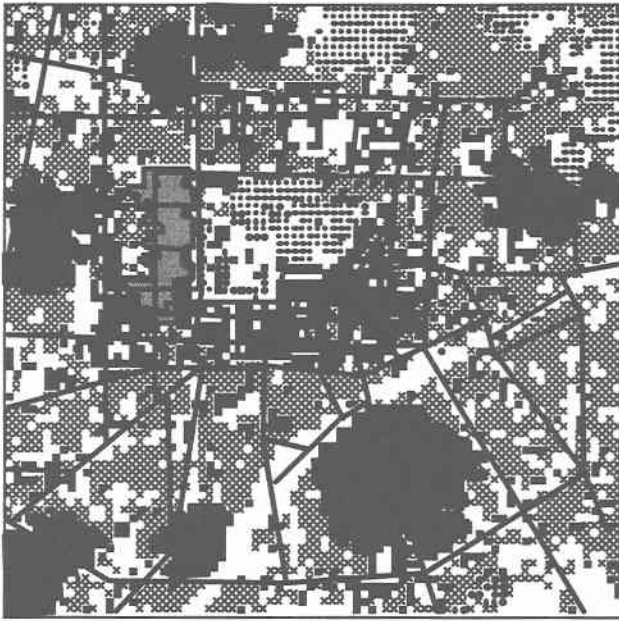
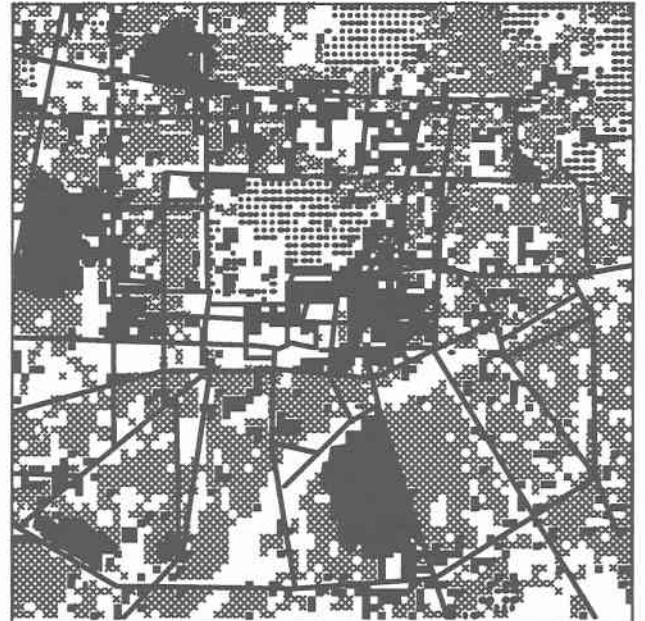


図2 防災街区事業支援の位置づけ



- ⊗ 可燃メッシュ ■ 延焼メッシュ
- 耐火造メッシュ □ 空地メッシュ
- 緑地メッシュ — 道路

図3 松山市の地震火災分析 (3時間後)



- ⊗ 可燃メッシュ ■ 延焼メッシュ
- 耐火造メッシュ □ 空地メッシュ
- 緑地メッシュ — 道路

図5 幹線道路不燃化による評価 (3時間後)

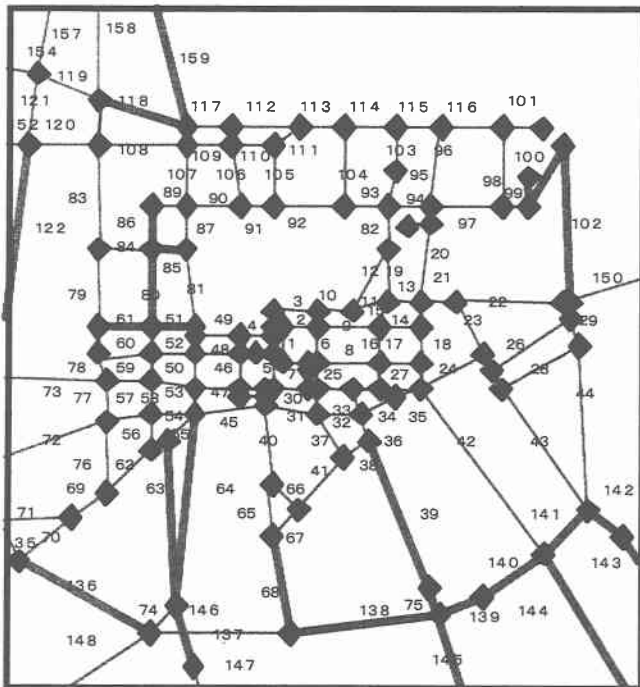


図4 延焼突破幹線道路の抽出

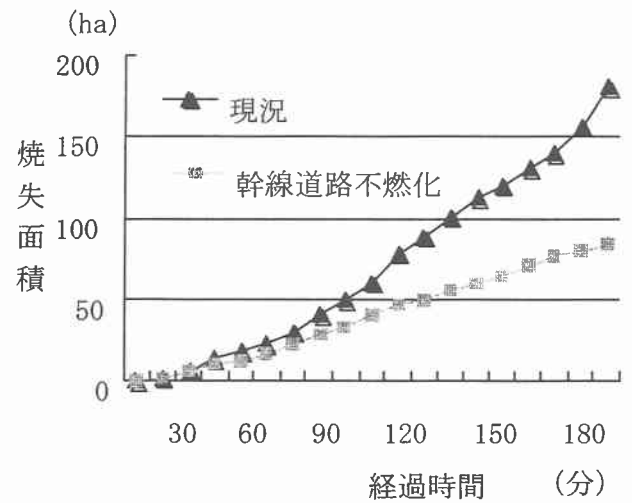


図6 都市全体の延焼危険低減効果

これらの延焼突破したリンク24本の全てにおいて、延焼突破が発生しないような道路整備を行うと仮定すると、表1に示すように、焼失面積の平均値は、84.5 ha となり、焼失面積は53%も低減することが明らかになった。図6は、幹線道路の整備効果を200回のシミュレーション実験の焼失面積の平均値と時

間の推移を示している。この図より、時間の経過とともに両者の焼失面積の開きが大きくなることが分かる。ちなみに、個々のリンクの整備効果を序列化するために24本のリンクをそれぞれ1本ずつ整備し、同条件下でシミュレーション実験を行なった結果、最も大きな整備効果となるリンクは、図5のリンク番号39で、8%の焼失面積低減効果が見られた。

4. 気流熱モデルによる延焼遮断判定

本稿では、従来の輻射熱算定モデルに代わり、気流熱をも考慮したモデルを採用している⁸⁾。一般に、輻射熱のみで建物炎上特性を表現する際、風下で卓越する熱気流や火の粉による伝搬過程（近傍飛び火、遠方飛び火）の効果が、風下方向での許容限界輻射熱の減少や輻射受熱量の割り増しという暗黙的な形でしか反映できない上、立体的延焼遮蔽物を取り扱えないという欠点を抱えていた。気流熱を考慮したモデルを用いると、建物炎上特性を輻射熱、気流熱の相乗効果として表現することが可能となる。この手法の特徴は、火災の加熱によって風下の気流温度が上昇する効果を評価する手法を組み込み、風下では輻射受熱量と気流温度の相乗効果による着火の許容限界を、風上、風下では輻射受熱量による着火の許容限界を定めていることである。また、この手法は立体的延焼遮蔽物による輻射熱の遮蔽や、熱気流の跳ね上げによる温度の低減を評価することが可能となっている。以下に概要について記す。

$$R = E \cdot \sqrt{\varphi} \sum_{i=1}^n \tau_i e_i f_i(x) \quad \dots(4-1)$$

R : 輻射熱 (kcal/m²・hr)

E : 輻射発散強度 (44000kcal/m²・hr)

φ : 市街地係数

$$\varphi = (1 - 0.6c)m$$

c : 耐火率

m : 建ぺい率

$f_i(x)$: 距離 x 範囲の形態係数

τ_i : 遮断壁 i の平均透過率

e_i : $f_i(x)$ に対応する炎面の平均輝面率

$$e_i = \frac{h'_i + h'_{i+1}}{2H_0}$$

h'_i, h'_{i+1} : 対象となる炎面の上限・下限高さ(m)

$$T_1 = 209 \sqrt{\varphi} \frac{DU}{X} \left(\frac{1}{X + D/2} \right)^{0.8} \quad \dots(4-2)$$

T_1 : 気流温度 (°C)

D : 同時延焼奥行 (m)

U : 風速 (m/s)

X : 火災域からの距離 (m)

φ : 市街地係数

ここで、式(3-1)及び式(3-2)より

$$T_1 + R/20 + 20 < 200 \quad \dots(4-3)$$

であれば、延焼遮断効果が得られるものとし、これが200を超えた場合、風下へ延焼着火するものとする。本モデルの特性を把握するため、後述のシミュレーション事例のデータを用いて、風下建物の風上炎上建物から受ける各風速下での受熱量（受熱位置は距離20m 高度6mの地点とする）に占める輻射熱、気流熱それぞれの支配率を算定した。それらの結果を図7に示す。図7より、風速が強くなっても風下建物の輻射受熱量に著しい変化は見られないが、気流温度は風速に比例する形で上昇していくことがわかる。これは、風速の増加に伴い風下に対して気流熱が卓越することを示す。また、同モデルを用いて求めた受熱分布を図8に記す。

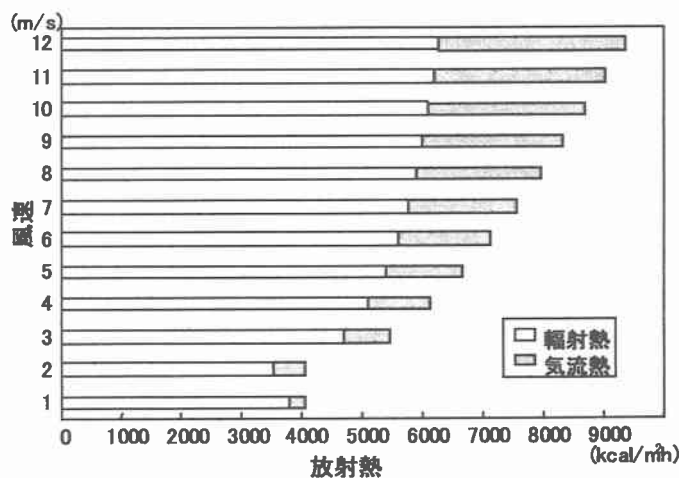


図7 各風速下における熱量支配率

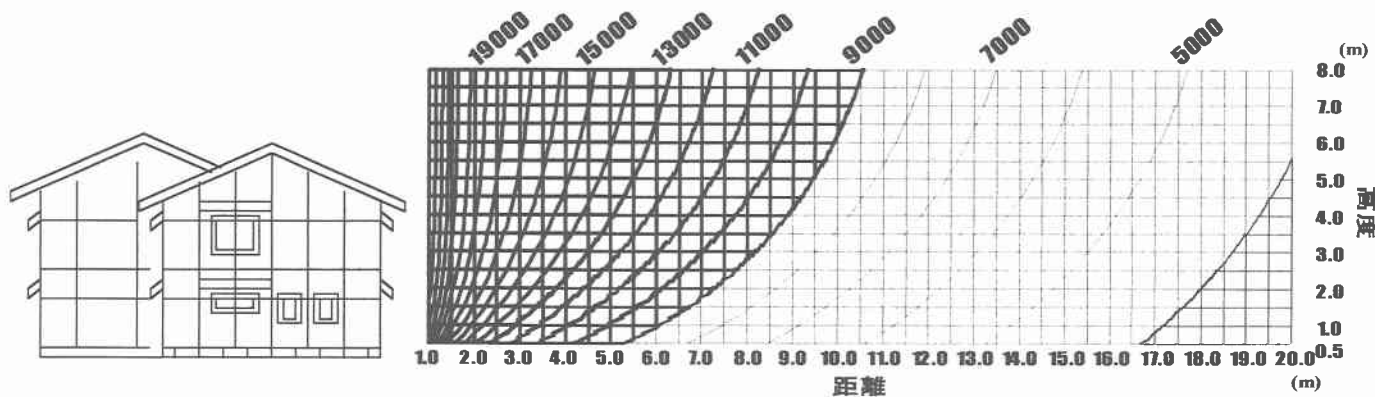


図8 シミュレーションによる熱量分布例（風速1m/s時）

5. 沿道整備による防火計画の支援

(1) 実験計画法による延焼リスクの分析

幹線道路を地区の防火線として想定する場合、延焼速度を遅延することも重要であるが、焼失面積の拡大につながる延焼突破の可否が最も問題となる。すなわち、幹線道路は、市街地火災からの輻射熱を遮蔽する十分な機能を有することが望まれる。当然、火災規模や気象条件等により、幹線道路の防火性状は異なるが、どのような要因が火災の突破に影響を与えるかを定量的に分析することは、計画情報の観点からも重要である。そこで、実験計画法による規定要因の分析を行い、沿道不燃化計画への基本情報についての考察を試みる。

はじめに、火災規模を規定する要因である、風速、建ぺい率、同時火炎幅、同時炎上奥行きを規定要因として取り上げる。表1に各規定要因と各水準を示す。気象条件である風速については、強風から弱風を想定し、他の要因についても整備効果が現れる形で水準化を想定した。特性値については、幹線道路を20mと想定し、沿道建物から20m離れた風下建物の受熱量とする。

本実験に基づく分析結果を表3に示す。この結果、全ての要因が1%の棄却率で有意となった。ここで、寄与率に着目すると、同時炎上幅が約50%の寄与率を持つ第1位の要因で、つづいて風速が42%の寄与率を持ち、これら両要因で、92%を占めている。これらの結果より、都市計画的な観点から言えば、沿道の耐火・不燃化がいかに重要であることを示唆していると言えよう。

表2 規定要因と水準化

| 要因 | 水準1 | 水準2 | 水準3 |
|-----------|-----|-----|-----|
| 風速(m/s) | 8 | 5 | 2 |
| 建ぺい率(%) | 80 | 70 | 60 |
| 同時炎上幅(m) | 40 | 30 | 20 |
| 同時炎上奥行(m) | 40 | 35 | 30 |

表3 分散分析結果

| 要因 | SS | DF | F | 判定 | 寄与率 |
|-----------|------------|----|---------|----|------|
| 風速(m/s) | 14,548,734 | 2 | 727,437 | ** | 42.0 |
| 建ぺい率(%) | 2,371,883 | 2 | 118,594 | ** | 6.9 |
| 同時炎上幅(m) | 17,274,488 | 2 | 863,724 | ** | 49.9 |
| 同時炎上奥行(m) | 411,564 | 2 | 20,578 | ** | 1.2 |
| 誤差 | 100 | 10 | | | 0.0 |
| 合計 | | 18 | | | |

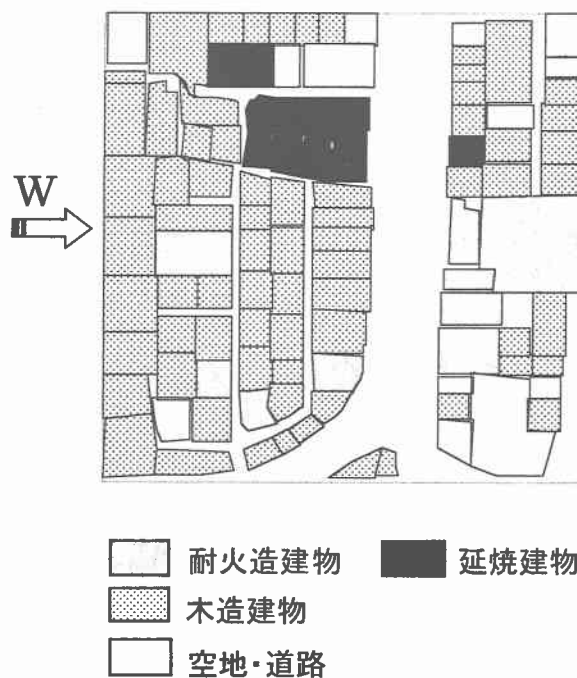


図9 延焼突破事例

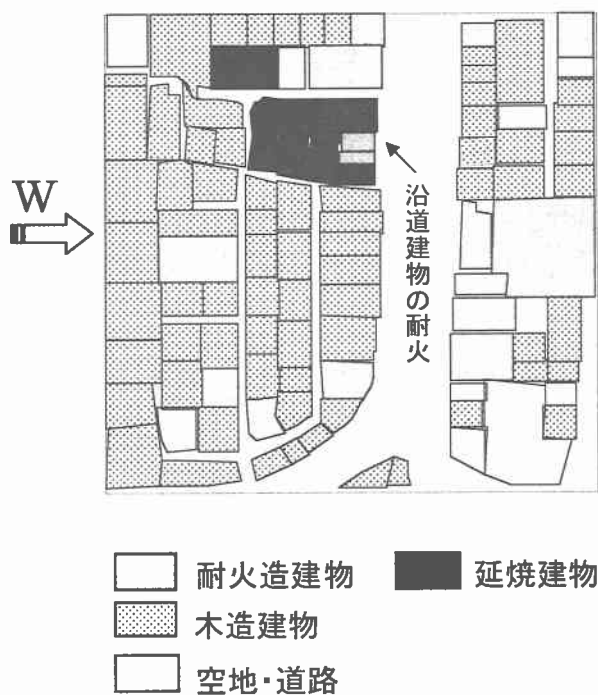


図 10 沿道整備による防火効果事例

(2) 沿道建物の整備による防火計画

3. のシミュレーション結果を基に、整備による防火効果が最も高い幹線道路をピックアップし、沿道建物の耐火・不燃化による防火効果について、マイクロ・シミュレーション実験を実施する。気象条件は、マクロ・シミュレーションと同様に、西風、風速(8m/s)を設定した。図9、10は、幅員20mの幹線道路の一部である。同図より、道路東側地区では比較的建物の耐火・不燃化が行われているが、西側の地域では道路沿いに木造建物が連担するとともに、木造建物が広範囲に及んでいることが分かる。本マイクロ・シミュレーションの結果、図9に示すように、幹線道路風下木造建物への延焼が認められた。つぎに、図10に示すように、風上側の沿道建物の二棟について、これらを耐火・不燃化構造物への変更を行い、シミュレーション実験を行った。その結果、これらの建物が輻射熱の遮蔽物となり、風下木造建物への延焼を阻害している状況を示すことができた。

6. おわりに

密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律の制定に伴い、今後、地区レベルで密集市街

地を段階的に解消するための線的・点的整備の推進が期待される。しかし、例え法的な整備が整っても、密集市街地の建物の多くが住民の私権に属するものであり、具体的な防災上の危険性の認識の欠如においては、計画そのものを担保する事は困難であろう。著者等は、まず、計画の支援という視点からシミュレーション的手法を用いて、松山市の幹線道路の延焼突破危険性を提示すると共に、整備効果の大きなリンクの序列化を行った。つぎに、沿道木造建物の受ける輻射熱を特性値とする実験計画の分析結果より、同時炎上幅が50%を占め、第一位の要因であること、つづいて風速が、42%で第二位の要因であることを明らかにした。このことより、沿道建物の耐火・不燃化の重要性を示唆することができた。一方、マイクロ・シミュレーション実験では、幹線道路間の延焼突破の危険性を提示すると共に、沿道建物の耐火・不燃化により、その危険性を回避することを視覚的に示すことができた。最後に、住民の視点から考えれば、個々の対策が結果として地区、総じて都市全体の防災性を向上することを認識していくことが、今後の密集市街地整備推進のキーポイントとなると言えよう。今後の課題としては、ポケットパークのような小規模な公園や緑地、沿道の緑化配置といった、さまざまな地区レベルでの防災計画を組み合わせ、それらの支援・評価を行う必要がある。そのためには、景観や防災効果等をより具体的に提示可能なシステムへと改良する必要がある。

〈参考文献〉

- 1) 建設省都市局都市防災対策室監修：都市防災実務ハンドブック-地震防災編-、ぎょうせい、1997.
- 2) 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告(速報)、建設省建築研究所、1995.
- 3) (社)土木学会四国支部社会資本問題研究委員会：四国地方における社会資本整備の勧め方に関する事例研究と課題、1999.
- 4) 浜田稔：火災の延焼速度について、火災の研究、第I巻、相模書房、1951.
- 5) 堀内三郎：建築防火、朝倉書房、1972.
- 6) 室崎益輝：市街地の難焼化効果と新延焼速度式に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集22号、1982.

- 7) 保野健二郎ほか：ロジスティック曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，vol. 311，1982.
- 8) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト，都市防火対策手法の開発報告書，1982.
- 9) 東京消防庁：地震時の延焼シミュレーション・システムに関する調査研究，1989.
- 10) 糸井川栄一：市街地における出火・延焼危険評価手法に関する基礎的研究，東京工業大学学位論文，1990.
- 11) 東京都防災会議：東京区部における地震被害の想定に関する報告書，1978.
- 12) 東京消防庁：地震時における焼け止まり効果の測定に関する調査研究，1992.
- 13) 藤田隆史：地震災害のシミュレーションに関する研究，東京大学学位論文，1973.
- 14) 糸井川栄一ほか：地震火災時のリアルタイム情報処理システムの開発—延焼拡大予想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，No120，1989.
- 15) 高井広行ほか：既成市街地における延焼シミュレーションの開発，土木計画学研究・講演集 22(2)，pp. 139-142，1999.
- 16) 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. 151-158，1995.
- 17) 二神透、木俣昇：シミュレーションによる地震時市街地火災の延焼阻害要因の分析、第1回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集、pp. 261-264，1996.
- 18) 二神透、林昌宏：GISを用いた火災延焼シミュレーション・システムの開発と適用に関する研究、土木学会四国支部第4回技術研究発表会、pp. 318-319，1998.
- 19) 二神透、木俣昇：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・講演集、No. 21(1)，pp. 359-362，1998.

シミュレーションを用いた地区防火区画支援システムに関する基礎的研究

二神 透，財間圭史，木俣 昇

阪神・淡路大震災の後、密集市街地における防災街の促進に関する法律が平成9年5月9日に制定・公布された。しかし、財政の支援、制度の確立がなされても、住民のコンセンサスを如何に図るかが重要な課題となっている。そこで本研究では、シミュレーションを活用することにより、住民と行政が一体となり防災街づくりを進めるための支援システム開発を目的とする。具体的には、都市の脆弱な地域の分析に基づく地区レベルでの防災対策支援と、それらの評価を提示可能なシステムを構成する。そして、最後に松山市を事例に、構成したシステムを適用して問題点を整理する。

A Study on Fire Preventive Planning in District Supported by Simulation System

By Tohru FUTAGAMI, Keiji ZAIMA and Noboru KIMATA

After the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Act of Improvement of Densely Building-Up Area is established. The aim is financial help for rebuild and removal of old wooden houses to prevent the fire from spreading. It is crucial for the residents to improve their resident areas under the new act. Though it is very difficult the planner and residents to make consensus as well as other urban planning. We developed supporting system for district planning to be difficult against conflagration. The characteristics is interactive and visual to realize the risk of fire-spreading and the effective alternatives of fire-preventing planning.