

既成市街地における延焼シミュレーションモデルの開発

DEVELOPMENT OF THE FIRE SPREAD SIMULATION MODEL IN KOBE CITY

高井広行*, 伊藤秀昭**, 松井武史**, 上村雄二***

Hiroyuki Takai, Hideaki Itou, Takeshi Matsui, and Yuji Uemura

1. はじめに

兵庫県南部地震により火災は175件(地震発生から10日間)発生し、焼損延べ床面積(以後、焼損面積)は81万㎡を超え、建物の焼失は7,386棟に及んだ。しかし、地震火災の原因および延焼動態を明らかにするには十分な資料がなく、詳細に把握できていない。そこで、神戸市消防局を中心に、各種の調査を行い当日のデータを現存する消防隊員の活動記録と、消防局およびマスコミの映像記録等から読解可能な資料を収集、解析し、最も現実に近い延焼動態について推測してきた。しかし、それらの推測した動態は非常に複雑であり、従来の延焼速度では推定あるいは説明できないものが殆どである。それは、現在の複雑な都市構造(道路の拉幅、建物の不燃化、植樹や塀等による防火帯の設置等)を有している街区に従来の木造建物を中心に考え延焼理論(延焼速度式)を実際に適用することは適当ではない。さらに、今回のように、多くの建物の倒壊や耐火構造物等の延焼阻止特性等の影響により複雑な動態を示している。それらをモデル化するためには、現実に即した延焼動態を説明する新しい理論が必要となる。そこで、本論文では実際の地区の特性(建物配置、建物構造、道路幅員等)を考慮し、街区に存在する家屋一棟毎に着目し延焼動態を推測するシミュレーションを開発したのでここで報告する。

2. システムの考え方とその機能

(1) システムの考え方

阪神大震災においては火災は同時多発的に発生し、また、ライフラインの寸断による断水および建物の倒壊等による道路の寸断のため、十分な消火活動が

出来ず、広範囲に延焼し数万～十数万平方メートルにも及ぶ大規模な火災となった。

火災の延焼は接炎、輻射熱、風下域における気流温度上昇、飛び火等の要因の相乗効果によるものであると考えられる。また、これらの要因の比重は風速によって決まる。たとえば、強風下では輻射熱、風下域における気流温度上昇、飛び火の影響が大きくなり、逆に弱風下では、炎が高く、接炎による影響が大きくなるものと考えられる。

また、延焼速度を決定する要因としては、建物の間隔、建物の構造・建物の高さ・建物の火災荷重、風向・風速・消防力等が考えられる。建物構造は建物の着火のしやすさを表すパラメーター、建物高さは火災の高さを決定する要素であり、輻射熱量を表すパラメータとなる。また、火災荷重は建物の発熱量、風速は気流による熱伝搬及び火の粉や飛び火による延焼のしやすさを表し、消防力は延焼の阻止力を表すパラメーターとなる。

ここでは、震災による火災の延焼状態を模擬する延焼モデルを構築し、サンプルとして抽出した街区での延焼状態についての分析を試みた。延焼モデルは、個々の地域の詳細な建物状況、特性や、倒壊による影響が反映されるように、建物一棟ごとに延焼を拡大させるモデルとした。例えば、建物の倒壊は、建物の高さの低下、隣接距離の減少、着火条件の変化等としてモデルに反映される。このモデルでは火災の延焼状況を建物の燃焼過程、隣接建物等との関係で定まる伝搬過程及び着火過程に分けて捉えた。

(2) システムの機能

本システムは次の3つの機能を有している。

1) データ作成支援機能

① ベース地図データの作成

ベース地図は神戸市より提供されている1/2500地形図を基本とするベクタデータ(神戸市デジタルマッピングデータ)をGIS構築ツールであるGeoBaseの地図フォーマットに変換したものを用いる。変換に際しては地図要素の種類による変換の有無の選択、色の指定や複数の図面レイヤへの振り分けが可能である。

② 建物属性データ作成

災害弱者、病院等の災害重要施設を含む建物属性データ(建物構造、種類、床面積、階数、用途、焼

キーワード: 延焼理論、市街地、シミュレーション

* 工博 近畿大学工学部 教授

(〒739-2115 東広島市高屋うめの辺1番

電話:0824-34-7000, E-mail: takai@hiro.kindai.ac.jp)

**正会員 応用技術株式会社解析事業部

(〒530-0038 大阪市北区紅梅町6-18

電話:06-6354-5433, E-mail: hideaki@sea.apptec.co.jp)

***正会員 神戸市消防局予防部

(〒650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1

電話:078-325-8511, Email: yuji_uemura@office.city.kobe.jp)

損程度等)をデータベースに登録するとともに、地図データ上の建物(ポリゴン要素)との関連付けを行う機能である。これらの属性データの内容は地図画面上でポリゴンをマウスクリックすることにより参照可能であるとともに画面上での編集、印刷が可能である。

③気象データの登録

気象データ(風向、風速)をデータベースに登録するとともにデータの編集、印刷を行う。

④消防施設データの作成

消火栓、防火水槽及び指定水利の消防施設を地図上にシンボルマークとして定義するとともに、その属性データ(名称、容量、能力等)をデータベースに登録し、シンボルマークとの関連付けを行う。これらの属性データの内容は地図画面上でシンボルマークをマウスクリックすることにより参照可能であるとともに画面上での編集、印刷が可能である。

⑤建物隣接関係データの作成

延焼計算を行うにあたり、対象地区内の建物相互の位置関係を隣接関係データとして計算し、データベースに登録する。隣接関係データは隣接する建物ID、最短距離及び見通し角(始まり、終わり)であり、建物の位置座標データより計算する。なお、建物の隣接関係データについては地図画面上で識別表示、参照が可能である。

2)延焼シミュレーション機能

作成した地図データ上で、延焼シミュレーション対象地区の設定を行い、この地区に対する、諸条件の設定を行う。設定条件としては気象条件、出火条件(出火点、出火時刻)、延焼パラメータ条件(建物構造別の焼け落ち時間、火炎吹き出し時間、風速補正係数、燃焼関数の傾き係数、延焼最盛期までの時間比率等)及び消防条件があげられる。これらの条件に基づいて延焼計算を行い、その結果は計算条件とともに結果ファイルとしてデータベースに登録する。

3)結果表示機能

計算結果に基づき、出火からの時間経過に伴う建物の延焼状態の変化を地図画面上に表示する機能である。個々の建物はその燃焼状況や焼損程度に応じて識別表示される。また、対象地域に消防力が投入されている場合には消火活動に伴う筒先の展開状況をシンボルマークにより表示する。

3. 本シミュレーションの考え方

本シミュレーションの考え方は次の4段階の過程を総合して理論化している。

(1)燃焼過程

燃焼過程は建物の燃焼状態を燃焼力の観点からモデル化を行った。燃焼力は建物高さ、単位時間の燃焼力と

建物の燃焼荷重で表し、その燃焼荷重は建物の基準火災荷重と延べ床面積で表した。

$$B_p = W \times \angle P \times \sqrt{h} \quad (1)$$

B_p : 燃焼力

W : 建物の燃焼重量(Kg)

$$W = Q \times A_f$$

Q : 建物の火災荷重(基準火災荷重

「非木造: 20Kg/m²、木造120Kg/m²」)

A_f : 建物延べ床面積(m²)

h : 建物高さ(基準高さ3m)

$\angle P$: 単位時間での燃焼比率の差

$$(P(t) - P(t - \angle t))$$

$P(t)$: 着火から t 分後の燃焼比率

(全消失面積に対する燃焼割合)

燃焼比率は建物の着火からの t 分後の燃焼割合を示し、

下記に示すロジスティック型関数で近似した。

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-a(t-p-c)}} \quad (2)$$

a : ロジスティック関数の傾き係数(7.8)

c : 燃焼が最も盛んになる時間比率(0.4)

tp : 燃焼時間比

$$tp = \frac{t}{ts} \quad (3)$$

t : 出火から現在までの時間

ts : 建物の燃焼を鎮圧させるまでの時間
(消失面積の95%時)

$$ts = T_o \times V^a \times \sqrt{A/A_o} \quad (4)$$

T_o : 風速1m/sの場合の燃え落ち時間

(基準燃え落ち時間 木造50分、防火造80分、耐火造120分(100m²))

V : 風速(ただし、風速1m未満は1m/秒)

a : -0.43

A : 総床面積

A_o : 基準床面積(100m²)

延焼はフラッシュオーバー後に開始するものとした。

(2)伝播過程

本モデルでは伝播過程の要因を伝播係数で表し、伝播係数を二つの建物の隣接状態、建物高さと風向・風速の関数で定義する。隣接関係を表す項目として、二つの建物の最短距離及び見通し角の大きさをを用いている。風向・風速影響項は、見通し角と風向の最小角度と風速の関数

で表している。

$$Tp = \frac{\gamma}{\gamma_o} \times \frac{Hp}{Ho} \times \frac{1}{d} \times \frac{1}{(1 - b \times \cos \theta)} \quad (5)$$

Tp : 伝播力

γ_o : 基準条件の見通し角 (2.94 ラジアン)

γ : 見通し角の大きさ (ラジアン)

Hp : 隣接建物高さ

H : 基準建物高さ (1階 3m)

d : 建物間の最短距離

θ : 見通し線と風向のなす角

b : 風係数

$$b = 1 - V^\alpha \quad (6)$$

α : 定数 (現在は -0.43 に設定)

V : 風速 (1m/s 以下の時 1m/s)

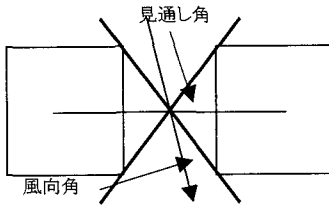


図1 見通し角と風向角

(3) 着火過程

着火は隣接建物からの延焼影響量が一定の大きさを超える時に着火するとした。すなわち隣接建物 1 棟から単位時間に受ける延焼影響量であり、その計算式は、以下に示す通りです。

$$Sf = Bp \times Tp \quad (7)$$

Sf : 延焼影響量

Bp : 燃焼力

Tp : 伝播力

着火判定は、上式で求められた値が下記のいずれかの値を越えたときに着火すると判定する。

- ① 累積延焼影響量 (全隣接建物から受けた総延焼影響量)
- ② 単位時間延焼影響量 (単位時間に全隣接建物から受けた総延焼影響量)
- ③ 単位時間最大延焼影響量 (単位時間に各建物から受けた最大の延焼影響量)

(4) 消防力

本モデルにおいて消防力は建物の燃焼重量を減少させ、伝播力を弱めるものとして表現する。

a. 燃焼重量の減少

燃焼重量の減少は、放水量 1 トンあたりで焼け残る火災重量を設定し (ここでは 60 kg/t とした)、建物に対して投入されている放水量から焼け残り重量を計算する。

$$P(t) = \frac{1 - S}{1 + e^{-a(tp-c)}} \quad (8)$$

S : 消防力

$$S = (R \times N \times W) / Wg \quad (9)$$

R : 水 1 t あたりで焼け残る火災重量 (kg/t)

N : 簡先の本数

W : 簡先からの単位時間あたりの放水量 (t)

Wg : 建物燃焼重量 (kg)

b. 伝播力に対する影響

$$\varepsilon = \frac{N1}{N2} \quad (10)$$

ε : 充足率

$N1$: 簡先投入本数

$N2$: 必要簡先投入本数

$$N2 = \frac{4.5 \times \sqrt{A1}}{10.0}$$

$A1$: 建物 1F 面積

τ : 消防による伝播抑制係数

$$\tau = 1.0 - 0.5 \sqrt{\varepsilon} \quad (11)$$

この τ を伝播係数にかけて、延焼影響量を算出する。

いま、燃焼時間比 0.4 の時に消防隊が到着し消火活動を行った例を図 2 に示した。

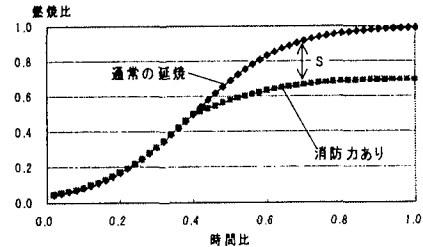


図2 消防力の表現

(5) 転戦判定・転戦先の決定方法

転戦は、消火活動中に周りの建物に着火し、燃焼建物に囲まれた場合に発生します。計算式は、「燃焼中の隣接建物の1階床面積合計」が「全隣接建物の1階床面積合計」の値が0.6を超えた時点で転戦する。転戦した筒先の再配置先は、延焼力の強さ、延焼建物の大きさ、隣棟間隔、隣接建物で未着火の木造建物の総面積、転戦するまで居た位置からの距離、風向[4m以上吹いている場合]、充足率から決定する。

4. 本シミュレーションの結果と評価

(1) 本シミュレーションの事例

①対象地区

シミュレーションの対象地区は神戸市兵庫区湊川2丁目周辺とした。この地区は震災発生直後に大規模火災が発生し、161棟(延べ床面積1万1,500㎡)が焼損した地域である。地区特性的には比較的本造建物が多く密集した地区である。延焼動態は実際の延焼をほぼ推測できた。

②計算条件

計算条件は以下に示すとおりである。出火時刻及び消防条件については震災時における神戸市消防局の記録に基づいて設定した。また、気象条件については毎時の詳細な記録が無いことや停電により、震災当日の対象地域付近の大気常時観測局データが欠測していることから当日の神戸海洋気象台のデータを基に最寄りの測定局となる兵庫局の過去5年間データを基に当日の風向風速を推測した(結果は相関係数0.95の値が得られた)。

参考文献

- 1)堀内三郎:建築防火、p.175～p.209 朝倉書店
- 2)高井広行:大震災を教訓とした都市防災計画、神戸市消防局、神戸消防の動き、平成7年版、1996年3月
- 3)坊池道昭、上村雄二、矢野公一、松井武史、高井広行:神戸市における震災火災の出火と延焼動態に関する一考察、土木学会震災シンポジウム、1996年1月
- 4)高井広行、矢野公一、松井武史、坊池道昭、上村雄二:神戸市における地震火災の発生と延焼メカニズムに関する研究、近畿大学工学部研究報告、No.30、1996年12月
- 5)矢野公一、松井武史:震災による延焼シミュレーション、応用技術株式会社、OGIテクニカルレポート、Vol.6、1995年12月
- 6)神戸市消防局編集、阪神・淡路大震災における火災状況(神戸市域)、東京法令出版株式会、1996年8月
- 7)矢野公一、松井武史、高井広行、上村雄二、坊池道昭:大規模震災火災の延焼シミュレーションに関する研究、

・出火時刻 5:47(出火建物は図面上の◎)

・気象条件

5～11時台 風向 ESE 風速 3m

12～24時台 無風

0時以降 風向 ESE 風速 2m

・消防条件(筒先投入時刻)

6:30,35 1本投入

7:10,20 2本投入

8:00 5本投入

③結果

シミュレーション結果によれば、消防力を投入しなかった場合、古い木造家屋が多数密集していることもあり街区のほぼ全域にわたって延焼が拡大し、焼け残っているのは耐火構造の建物だけであった(累積焼損棟数:231)。しかし、消防を投入することにより北西及び北東方向への延焼拡大が阻止され、最終的な累積焼損棟数は104となり、その効果がはっきりと現れている。なお、参考として出火からの時間経過に伴う累積焼損床面積の変化図を図に示した。

5. おわりに

本システムはさらに汎用的なモデルの完成を目的に現在も改良中であり、システムの操作性や有用性、延焼モデルの妥当性等についても詳細に評価、検討を行う予定である。これらの結果をもとにシステムのより一層の充実を目指していきたいと考えている。なお、本システムのより一層の充実を目指していきたい。最後に本システムの開発にあたり多大な協力をいただいた応用技術株式会社の矢野公一氏、神戸市消防局の木下茂信氏をはじめ株式会社ドーンの高野秀一氏に感謝の意を表します。

土木学会土木計画学研究発表会、1996年11月

8)神戸市消防局編集、神戸市における地震火災の研究、東京法令出版株式会、1996年11月

9)服部佳明、松井武史、高井広行、上村雄二:大規模火災の延焼とシミュレーション開発に関する一考察、土木学会土木計画シンポジウム、1997年9月

10)矢野公一、服部佳明、高井広行、上村雄二:神戸市における大規模火災に関する研究(延焼シミュレーションシステムの構築)、土木学会全国大会、1997年9月

11)服部佳明:火災時の延焼シミュレーションシステムの構築、応用技術株式会社、OGIテクニカルレポート、Vol.8、1997年12月

12)高井広行、矢野公一、松井武史、木下茂信:神戸市における消防計画支援システムの開発、土木学会土木計画学研究発表会、1998年11月

13)伊藤秀昭、服部佳明、高井広行、上村雄二:神戸市における消防計画支援システムの開発(延焼シミュレーション・部隊訓練システム)、土木学会土木計画学研究発表会、1998年11月