

## マイクロモデルに基づく地震時火災延焼シミュレーションに関する研究

### Study on simulation on spread of earthquake fire by the micro model

和田麻理子 †, 宮永良一 ††, 正木和明 †††

Mariko WADA, Ryoichi MIYANAGA, Kazuaki MASAKI

**Abstract :** At the time of large-scale earthquake generating, many fires are predicted to generate simultaneously on a scale of exceeding fire-fighting power far. Many fires which cannot extinguish the fire will break out. Therefore, It is required to carry out the simulation of the fire spread form, to carry out damage prediction, and to take the measures according to damage immediately after earthquake generating. In this study, the micro model fire spread simulation method for every house has been developed. In order to verify the validity of this simulation method, reappearance of the fire of the Mikura-Sugawara, Nagata-ku, Kobe-shi area in the Hyogoken-Nanbu earthquake of 1995 was tried. Moreover, the fire generated in the past in Nagoya-shi was investigated. It, the influence of building collapse by earthquake damage, fire-extinguishing activities, and jumping fire were taken in for the simulation. Establishment of the more accurate fire spread simulation method was aimed at. The process of a simulation in this study is described. It is the beginning first, the simulation region is elected. A position, building form, building structure, and the number of stories are file-ized about the building in the region. Calorific function, distance between buildings, wind velocity, direction of the wind are given to the file-ized date, and a simulation is performed. The result, the simulation of the form near the actual spread of a fire was able to be carried out. The obtained fire spread speed became actually near as compared with the conventional formula. The fire spread situation of an earthquake fire and the fire-fighting effect were predicted in the Habashita, Nishi-ku, Nagoya-shi area with the application of this simulation method.

#### 1. はじめに

我が国はこれまで、大規模地震により多大な被害を被ってきた。地震による被害は、建物倒壊はいうまでもなく、二次的被害である火災が被害をさらに拡大させることは周知のことである。我が国の都市の多くは、人口や産業が集中し、木造家屋が密集して形成された。このような都市構造は、大規模地震発生時には、消防力をはるかに上回る規模で同時多発的に火災が発生し、消火しえない火災が相当数発生すると予測される。

地震時火災による被害はきわめて大きな人的・物的被害を及ぼすため、地震発生後すぐに延焼形態をシミュレーショ

ンし、被害予測をして被害に応じた対策を講じるリアルタイム対応が必要とされる。一方長期的には、地震時火災による被害の軽減を目的としたシミュレーションを実行し、地域ごとに火災危険予測を評価し、その危険性に応じた対策を日常から行うことが重要である。

#### 2. 研究の目的と展開

これまで本研究では、建物一軒一軒の形状・構造・階数(建物データベース)を考慮し、風向・風速・出火点(パラメータ)などをさまざまに変更して設定できるマイクロモデル火災延焼シミュレーションを開発してきた。この火災延焼シミュレーション法の有効性を検証するため、兵庫県南部地震(1995)時の神戸市長田区御蔵・菅原地区の火災の再現を試みた。地震被害による建物倒壊の影響・消火活動をシミュレーションに取り入れることにより、実火災により近い延焼過程の再現

---

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻  
†† 愛知工業大学大学院 生産・建設工学専攻  
††† 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

を目指した。また、過去に名古屋市で発生した実火災(被害棟数が数棟)を調べ、建物間の燃え移り状況を再検討した。

このように、突発的かつ非定常的である火災という現象に平常時に発生した火災の延焼状況や兵庫県南部地震といった比較的観測・調査が可能な情報を火災延焼シミュレーションに取り入れることにより、より精度の高い火災延焼シミュレーションの確立を目指した。

図 1 に本研究の基本的な流れを示す。個々の建物についての位置・形状・構造等を調べて建物データベースを作成し、発熱関数・風向・風速・放射熱距離減衰等の各パラメータを与えることで火災延焼シミュレーションを実行する。延焼シミュレーション結果と実態(実火災)とを比較・検討し、各パラメータを構築しなおす。この過程を繰り返し行うことによって、延焼シミュレーションを確立する。

### 3. 既往の延焼シミュレーション研究

我が国では、地震時の出火件数予測の研究や市街地火災の延焼速度を分析した火災延焼拡大予測の研究がなされてきた。1951 年に浜田が構築した延焼速度式が代表的なものとして挙げられる。これらの研究は、市街地を 500m または 250m といったメッシュに区切り、そのメッシュを一つの単位として危険度を予測していた。その後、道路・河川等の線的不燃領域で囲まれた街区を延焼計算の単位とした、延焼シミュレーション法が構築された。

しかし、これらの手法では市街地状況を平滑化されたものとして扱っているため、詳細な市街地状況に応じた延焼状況が十分に表現することができない。そのため、建物 1 棟ごとを延焼計算の単位とした延焼シミュレーション法が開発された。

## 4. 延焼シミュレーションモデル

### 4.1 延焼シミュレーションとは

市街地延焼シミュレーションとは、市街地での火災拡大過程や延焼危険性の評価をシミュレートするためのプログラムである。具体的には、市街地の建物構造比率や建蔽率等を基礎情報として、出火点・気象条件を想定して指定時間内の焼失面積・延焼速度の算定を行うものである。これは、大きく確定的延焼モデルと確率的延焼モデルに分類できる。前者は、延焼速度の評価と延焼拡大過程の計算手順が重要となっている。また、後者は、他の延焼単位(建物・街区等)へ延焼拡大する確率の大きさの評価や延焼機構の動的・確率的表現が基本となっている。本研究の延焼シミュレーション法は、後者に分類される。

### 4.2 マクロモデル

500mメッシュ、街区を一つの単位として用いて火災延焼

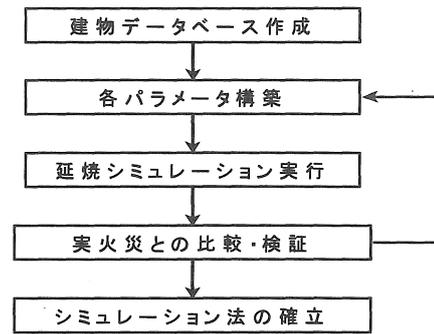


図 1 本研究の流れ

シミュレーションを行う方法。都道府県や市単位の、かなり広い地域を対象とした火災延焼シミュレーションを行うときに用いる。区切り単位がかなり大きいため、建物の分布の偏りや幅の広い道路による延焼阻止力といったものをシミュレーションに取り入れることが難しい。

災害時に備えた都市の消防体制のあり方や、その確立といった都市防災計画の目安になる。

### 4.3 ミクロモデル

建物一軒一軒の形状や構造のデータを与えて、建物から建物への延焼過程を詳しくシミュレーションしていく方法。それゆえ、扱うデータが膨大であり、建物の形状や構造、データの作成に多くの時間と手間を費やすという欠点がある。

あるモデル地区を限定し、数千棟程度を対象としたシミュレーションには有効な手法といえる。消防活動や延焼予測の目安となる。

## 5. 火災延焼シミュレーション

### 5.1 シミュレーションの流れ

図 2 に本研究の火災延焼シミュレーションフローチャートを示す。

まず、火災延焼シミュレーションを行う対象となるモデル地区を選出する。選出したモデル地区の国土基本図、数値地図を用いて、モデル地区内の個々の建物の位置・形状・重心位置を求め、建物面積等を算出する《建物形状》。また、現地調査・航空写真等から建物構造(裸木造・防火木造・非木造)・階数等のデータを収集する《建物属性》。これらから作成された建物データベースに、出火点・風速・風向・発熱関数などのパラメータを与えることで、延焼シミュレーションを実行する。

### 5.2 隣棟間隔

火災の延焼過程をシミュレーションするには、建物間の距離が必要である。延焼対象となる建物は、出火建物の重心から半径 40m 以内に重心をもつ建物である。火元建物と対象建物との間に遮蔽物(建物)が存在する場合は、延焼しな

いものとする。また、遮蔽建物が存在しない場合は、出火建物と対象建物の切片の最短距離を隣棟間隔とする。図3に隣棟間隔例図を示す。

5.3 延焼限界距離

風向は、延焼方向に影響を与え、風速は、延焼速度や延焼限界距離を変化させる要因となる。無風時では、火災延焼区域は火源を中心にほぼ円形となって拡大する。有風時には、延焼区域は卵形に風下方向へと伸びる。ある時間における延焼限界距離モデルを図4に示す。

図4より、風向別の延焼増加距離は次式で求まる。

$$K_d = \frac{1.6(a+d)(1+0.1v+0.007v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{8d}{1.15(5+\frac{v}{2})}}$$

$$K_s = \frac{1.6(a+d)(1+0.1v+0.005v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{8d}{1.15(5+\frac{v}{4})}}$$

$$K_u = \frac{1.6(a+d)(1+0.002v^2)}{3+\frac{3}{8}a+\frac{8d}{1.15(5+\frac{v}{5})}}$$

として、

$$L_s = \frac{K_s}{K_d} \cdot L_d$$

$$L_u = \frac{K_u}{K_d} \cdot L_d$$

ただし、

- L<sub>d</sub> : 風下方向延焼増加距離 (m)
- L<sub>s</sub> : 風横方向延焼増加距離 (m)
- L<sub>u</sub> : 風上方向延焼増加距離 (m)
- a : 正方形と仮定したときの建物一辺の長さ (m)
- d : 隣棟間隔 (m)
- v : 風速 (m/s)

図4のように、北を0°方向として右回りに角度をもたせると、延焼増加距離Zは、

0° ≤ θ ≤ 90°, 270° ≤ θ ≤ 360° のとき

$$Z = \sqrt{\frac{L_s^2 \cdot L_u^2}{L_s^2 \cdot \cos^2 \theta + L_u^2 \cdot \sin^2 \theta}}$$

90° < θ < 270° のとき

$$Z = \sqrt{\frac{L_s^2 \cdot L_d^2}{L_s^2 \cdot \cos^2 \theta + L_d^2 \cdot \sin^2 \theta}}$$

風速 v (m/s) のときは風下方向に 0.2v だけ延焼限界距離が増加する。

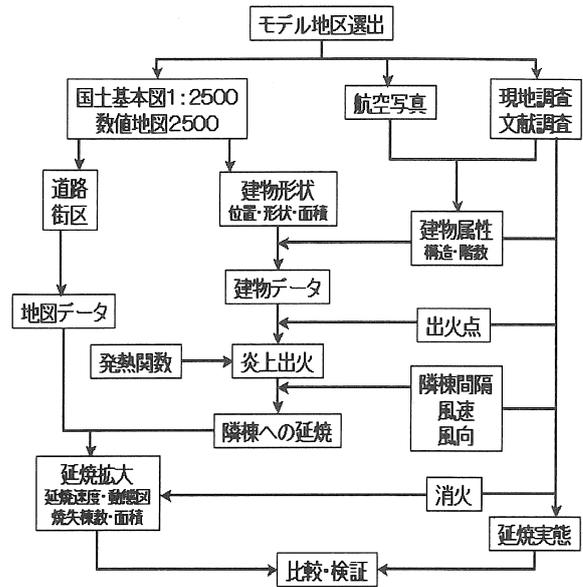


図2 シミュレーションフローチャート

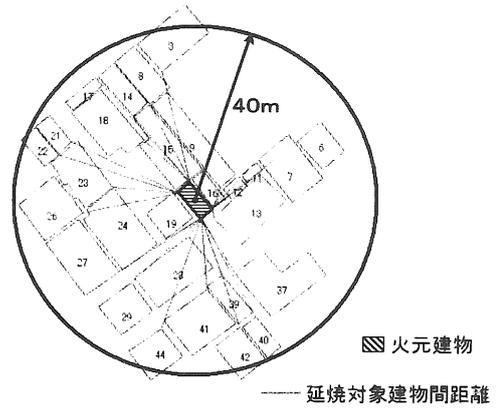


図3 隣棟間隔

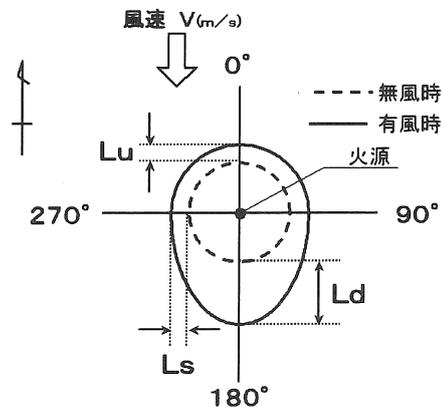


図4 延焼限界距離モデル

5・4 建物の延焼過程モデル

出火とともに戸内温度は上昇し、 $t_a$ 分後に最高温度に達する。しばらく高温状態がつづき、火盛り期に入る。非木造家屋は、木造家屋に比べて最高温度は多少低い値となる。その温度は、木造建物で約  $1100^{\circ}\text{C}$ 、非木造建物で約  $800^{\circ}\text{C}$  である。高温継続時間は、建物の大きさによって異なる。火盛り期を過ぎると( $t_b$ 分後)、建物は焼け落ち、火の勢いも衰えて鎮火( $t_c$ 分後)へとむかう。その戸内温度の時間変化における延焼過程をモデル化したものを図 5 に示す。

5・5 輻射による延焼

表面温度が互いに異なる 2 固体面が向き合っていると、高温面から低温面へ輻射によって熱が移動する。これは、建物間の火災時も同様である。建物から建物へと火災が延焼していく過程で、火炎はとどかなくとも輻射により延焼することがある。輻射による熱の移動には、隣等間の距離が大きいかかわっている。すなわち、隣棟間の距離が近ければ、輻射受熱量は大きいし、遠ければ少ない。この熱の運搬方法には、上昇気流による運搬、炎による風下への水平方向への運搬、輻射熱による運搬等が考えられる。しかし、これらの運搬の割合は、気象条件、構造物の形態等により、その時々で複雑に異なるので決定することは困難である。

建物は、出火して燃え上がると熱を持つ。戸内温度の上昇とともに発熱するのである。この熱量を出火建物が発生する発生熱量とする。発生熱量は、出火後の温度上昇とともに増加し、火盛り期を過ぎると戸内温度の低下とともに減少する。この発生熱量の時間変化状況モデルを図 6 に示す。本研究では、この関数を発熱関数と呼ぶことにする。

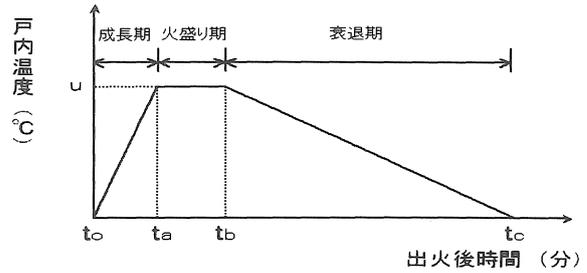
本研究では、延焼の要因として、基本的には輻射熱を考えている。木造建物における発生熱量を 100 と仮定し、この発生熱量に関する発熱関数を出火に至るためのパラメータと考えた。

火元建物の燃焼によって生じる発生熱量は、隣棟建物へ輻射する。隣棟建物は、輻射されてきた熱(輻射受熱量)を蓄積し、ある蓄積量に達した時に出火に至る(図 7)。

本研究では、発生熱量をパラメータと考えているため、発生熱量の単位は任意である。したがって、輻射受熱量の単位についても任意単位となる。また、この発熱関数は、地震時火災や実火災事例と本研究のシミュレーションにおける延焼速度を合致させて設定している。本研究において、出火に至る輻射受熱量は、概ね 38 程度となった。

5・6 輻射熱距離減衰

燃焼中の建物から発散される輻射熱は、距離とともに減衰される。減衰の割合は、距離の二乗に反比例する。ただし、隣棟間隔が  $0.5\text{m}$  以下では、接炎も考慮して必ず出火するものと仮定し、 $20\text{m}$  以上の場合には、輻射熱による延焼はないものと仮定した。図 8 に輻射熱距離減衰曲線モデルを示す。



$t_0$ : 出火時間	
$t_a$ : 最高温度到達時間	裸木造建物; 8 分 防火木造建物; 10 分 非木造建物; 20 分
$t_b$ : 鎮火開始時間	
$t_c$ : 鎮火時間	
$u$ : 最高温度	木造建物; $1100^{\circ}\text{C}$ 非木建物; $800^{\circ}\text{C}$

図5 出火建物戸内温度性状モデル

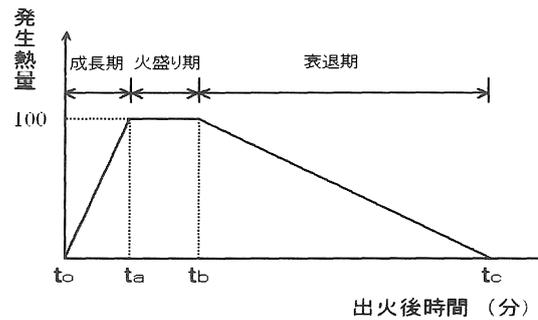


図6 発生熱量の時間変化状況モデル(発熱関数)

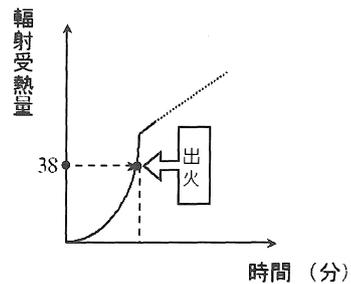


図7 出火に至る輻射受熱量蓄積モデル

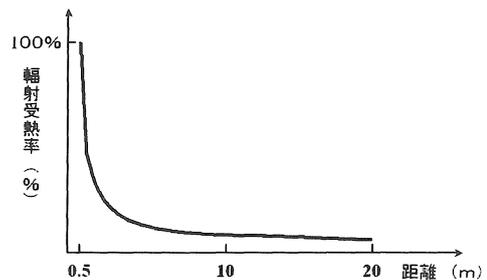


図8 輻射熱距離減衰曲線モデル

5.7 建物倒壊と消火についての考慮

兵庫県南部地震では、地震による建物倒壊による影響などにより、通常火災より延焼速度に遅れがみられた。地震により家屋が倒壊した場合、通常火災に比べて発生熱量は少なくなると考えられる。そこで、兵庫県南部地震時に発生した実火災と本研究の延焼シミュレーションの延焼速度を合致させることで、地震被害による建物倒壊の影響を考慮した発熱関数のパラメータ値を得た。建物倒壊モデルの発熱関数は、通常火災の90%程度となった。また、過去に名古屋市で発生した実火災事例から、消防力の発熱関数パラメータを導き出した。

図9に地震被害による建物倒壊と消防力を考慮した発熱関数を示す。消火Iは、消火活動により発生熱量が抑えられた場合のモデルである。通常火災発熱関数の約38%となった。消火IIは、消火活動により、発熱する時間が遅くなった場合を想定したモデルである。

これらのパラメータを火災延焼シミュレーションに取り入れることで、実際の状況に近い形態のシミュレーションが可能となった。

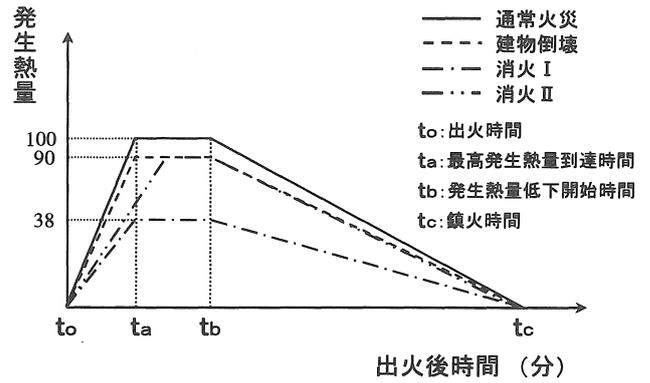


図9 建物倒壊と消防力の発熱関数

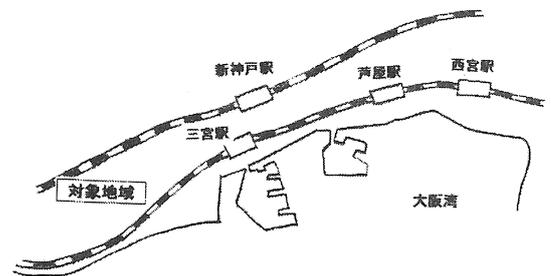


図10 対象地域周辺概略図

6. 火災延焼シミュレーション結果

6.1 シミュレーション対象地区

対象地域は、神戸市長田区御蔵・菅原地区の1547棟とした。古い木造建物が密集し、鉄工所や商店街、市場がある。木造率約64%で、平均隣棟間隔は2.3mと狭い。この地区の焼損棟数の約8割は木造建物で占められている。図10対象地区周辺の概略図を示す。また、図11に対象地域図を示し、その構造別(裸木造・防火木造・非木造)の建物分布図を図12に示す。

6.2 実火災状況

図13に地震当日に発生した実際の火災延焼拡大状況を示す。地震当日、この地区からは地震発生直後の5時47分に2ヵ所から同時出火し、その後3ヵ所に飛火が発生した。○は出火点、▲★◆は飛火点を示す。地域内には、小学校の校庭・公園・幅員10~30mの道路があり、これらは焼け止まりとしてはたらいだが、全体的には、古い木造家屋や鉄工所などが密集しているため、街区内の生活道路の幅員が狭く、容易に延焼拡大したと考えられる。

6.3 通常時火災延焼シミュレーション

通常時とは、地震当日と同じ出火点、風速、風向を設定し、地震被害による建物倒壊、消防力、飛火を考慮しない場合を想定して延焼シミュレーションを行ったものである。その結果図を図14に示す。図13と比較して、消防力等を考慮していないためにA地区東側、B地区南側で、特に延焼範囲がかなり広がっている。



図11 シミュレーション対象地域

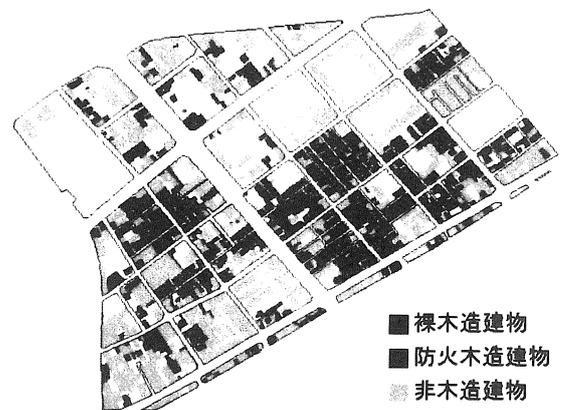


図12 構造別建物分布図

6・4 建物倒壊を考慮した延焼シミュレーション

図 15 は, 地震被害による建物倒壊を考慮したシミュレーション結果である. 兵庫県南部地震では, 建物倒壊等の影響により通常火災より延焼速度に遅れがみられた. そこで, 発生熱量を通常火災の約 90% にすることで, 建物倒壊の影響を取り入れた. 図 14 と比較すると, A 地区において若干延焼速度が遅くなっている.

6・5 建物倒壊・消防力を考慮した延焼シミュレーション

図 16 は, 建物倒壊モデルに消防力を取り入れた延焼シミュレーション結果図である. 消防力は, 地震当日に実際に消火活動が行われた場所に, 消火を考慮した発熱関数(図 9 の消火 I, 消火 II)を加味した.

A 地区東側, B 地区南側ともに延焼が抑えられた. しかし, まだ図 13 と比較すると違いがみられる.

6・6 建物倒壊・消防力・飛火を考慮した

延焼シミュレーション

図 13 と図 16 の違いは, 地震当日の飛火の影響であると考えられる. このため, 図 16 に飛火を取り入れてシミュレーションを行った. 飛火は, 地震当日と同じ場所, 同じ時刻に設定して取り入れた. その結果図を図 17 に示す. 図 13 と比較して, B 地区での延焼に違いがみられる. これは, 実火災では街路に倒壊した建物を経由して延焼が拡大したためと考えられる. しかし, こうした特殊なケースを除けば, 実火災により近いシミュレーション結果が得られたといえる.

6・7 平常時火災延焼シミュレーション

兵庫県南部地震の対象地域において, 地震被害による影響がない平常時に火災が発生した場合を想定して, 消火活動のみを考慮したシミュレーション結果を図 18 に示す. 平常時には, 消火活動が速やかに行われるため, 消防力のみをシミュレーションに取り入れた. この結果, 平常どおり消火活動が行われた場合, 最悪でも各出火点とも 3 棟の延焼であったのではないかと考えられる.

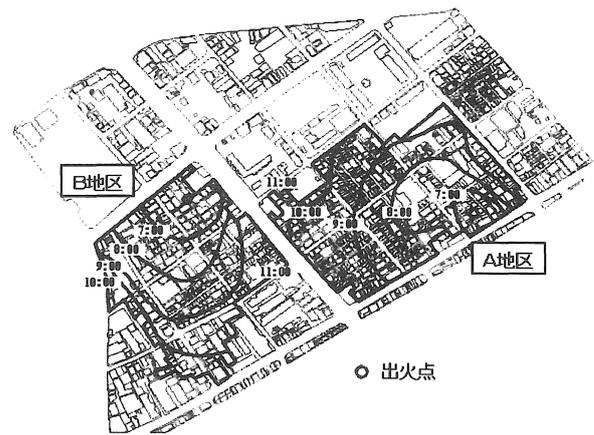


図14 通常時火災延焼シミュレーション結果

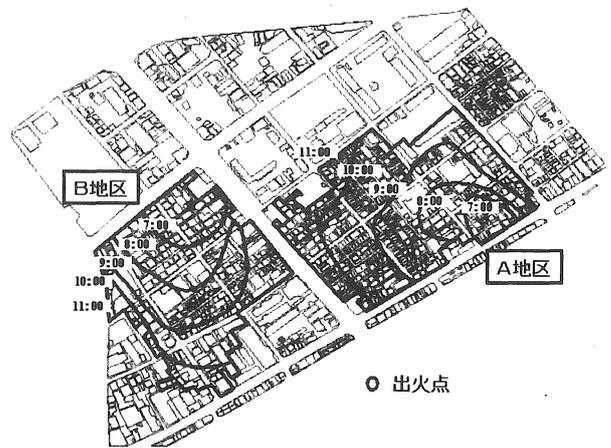


図15 建物倒壊を考慮した延焼シミュレーション結果

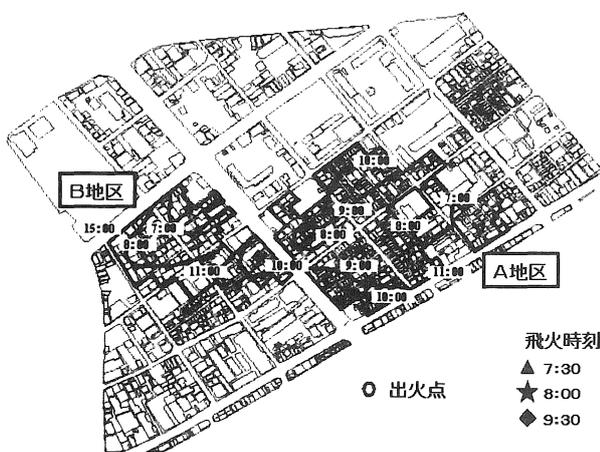


図13 実火災延焼拡大状況

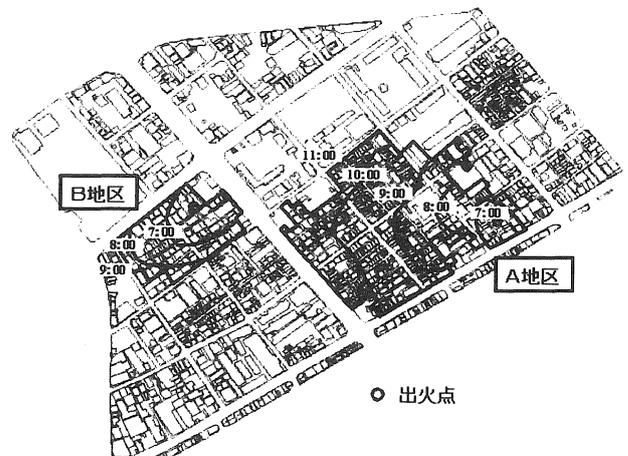


図16 建物倒壊・消防力を考慮した延焼シミュレーション結果

6・8 延焼速度についての比較

延焼速度については、過去、さまざまな研究が行われ、延焼速度式が考案されてきた。表1に、地震当日の延焼速度の観測値、本研究の延焼シミュレーション結果から求めた延焼速度、各延焼速度式による延焼速度の計算結果を示す。

東京消防庁式は、適用限界が出火後1時間以内であることも影響して、観測値よりも遅い結果となっている。浜田式、糸井川式は、予測値が観測値よりも速い結果となっている。これらの予測式と比較して、本研究の延焼速度計算結果は、観測値により近い値が得られた。

表1 延焼速度の計算結果

延焼速度観測値	44.0 m/h
浜田式による計算値	65.8 m/h
東京消防庁式による計算値	26.1 m/h
糸井川式による計算値	73.3 m/h
本研究結果	40.9 m/h

7. 火災延焼シミュレーションの応用

7・1 対象地域

本研究の火災延焼シミュレーション法の応用として、名古屋市西区幅下地区の約400棟を対象として延焼シミュレーションを行った。

この地域は、敷地率(総床面積/ブロック[街区]面積)が51%と高い。また、木造家屋が全家屋の41%と多く、延焼危険度の高い地域である。地域内には、小学校の校庭、公園があり、これらは焼け止まりとしてはたらくと考えられるが、全体的には小さな住宅や店舗が密集し、道路幅も4(m)~8(m)と狭い。

図19に幅下地区構造別建物分布図を示す。

シミュレーションの気象条件は、風速3.0(m/s)、風向は北北西に設定した。この値は、名古屋市における平均的な数値であるために採用した。

7・2 通常時火災延焼シミュレーション結果

地震被害による建物倒壊や消防力を考慮しない場合を想定して延焼シミュレーションを行った。出火点は1地点とし、出火延焼の危険性の高い木造家屋密集地域に近い地点を任意で選出した。

図20に通常時火災を想定した延焼シミュレーション結果図を示す。幅の広い道路・公園が焼け止まりとなった。全体的に東側へ延焼が及んだ。

7・3 建物倒壊を考慮した延焼シミュレーション結果

この地域で地震が発生した場合を想定して、地震被害による建物倒壊を考慮した延焼シミュレーションを行った。建物倒壊パラメータは、図9の建物倒壊モデルを用いた。

図21に建物倒壊を考慮した火災延焼シミュレーション

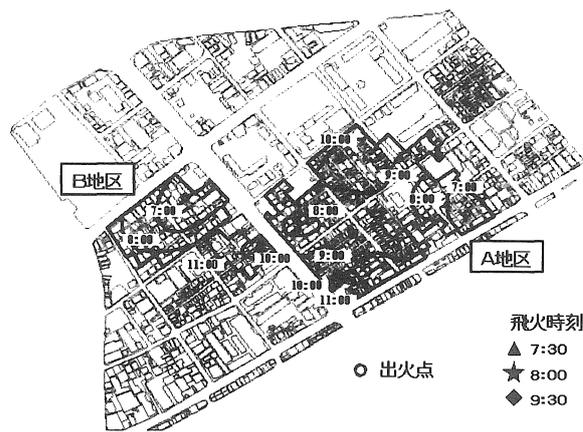


図17 建物倒壊・消防力・飛火を考慮した延焼シミュレーション結果

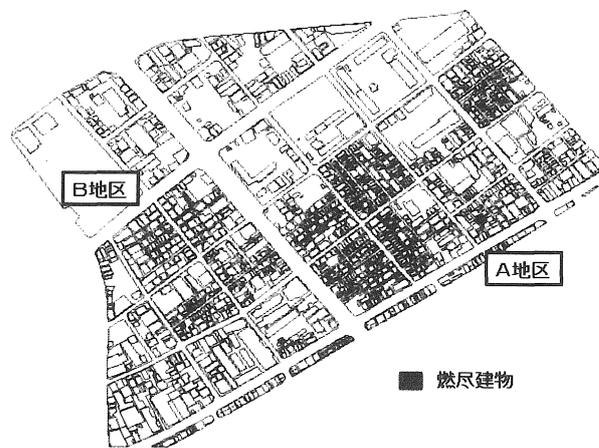


図18 平常時火災延焼シミュレーション結果

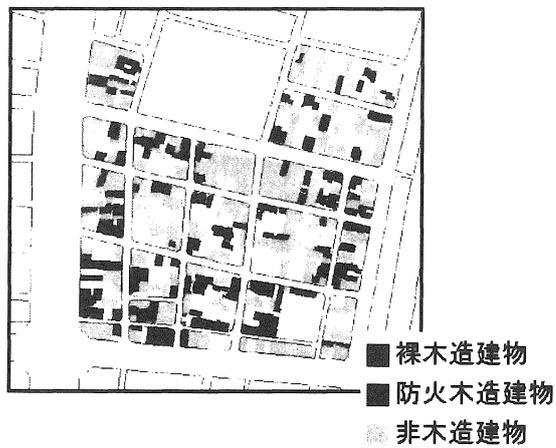


図19 幅下地区構造別建物分布図

結果図を示す。図20と比較して、出火点の東南側の延焼範囲が狭くなった。しかし、この地域では、東方向へと延焼が進むことがわかる。

#### 7.4 消火活動を想定した延焼シミュレーション

地震時には、消防力の低下がみられる。少ない消防力で、いかに延焼拡大をくい止めるかをシミュレーションにより検討する。この地区の場合、東方向への延焼拡大が見込まれるため、出火点の東側に消防力を取り入れることが効果的であると考えられる。

そこで、地震被害による道路の不通を考慮して、出火後 30 分経過した時点で消火活動が行われたことを想定した場合のシミュレーションを行った。なお、地震による消防力の低下(消防車の不足)を考慮して、消火活動に駆けつけた消防車は 1 台とした場合を想定した。図 9 における消火 I モデルを消防車 1 台分の消防範囲を考慮して、30 分後の延焼線の東側建物に設定した。

そのシミュレーション結果図を図 22 に示す。図 22 における延焼阻止線は、出火後 30 分経過した時点のものである。この消火活動によって、大幅に延焼拡大阻止が見込まれる結果となった。

### 8. 結論

- ① 風速・風向・出火点を自由に設定でき、発熱関数の概念を導入したマイクロモデル火災延焼シミュレーション方を構築した。
- ② 発熱関数の形状を変化させることで、建物の構造・面積の違いが評価可能となった。
- ③ 地震被害による建物倒壊の影響、消防力の投入効果についても、発熱関数の形状を変化させることで評価可能となった。
- ④ 出火点に出火時間を与え、また、複数の出火点を設定することで、飛火についても評価可能となった。
- ⑤ 以上をシミュレーションに取り入れることにより、神戸市長田区御蔵・菅原地区の実火災の延焼状況により近い形態のシミュレーションができた。
- ⑥ 地震被害による建物倒壊の影響、消防力を評価したことで、延焼速度は従来の計算式に比べて遅く、より実際に近い延焼速度を再現できた。
- ⑦ 名古屋市西区幅下地区に、本シミュレーション法を適用し、地震時火災の延焼状況、消防効果を予測した。

#### 参考文献

- 1) 日本火災学会; 火災便覧, 理化書院, 1955
- 2) 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, 1996
- 3) 神戸市消防局; 阪神・淡路大震災における火災状況【神戸市域】, 1996
- 4) 東京消防庁; 兵庫県南部地震に伴う市街地大火の延焼動態調査報告書, 1995

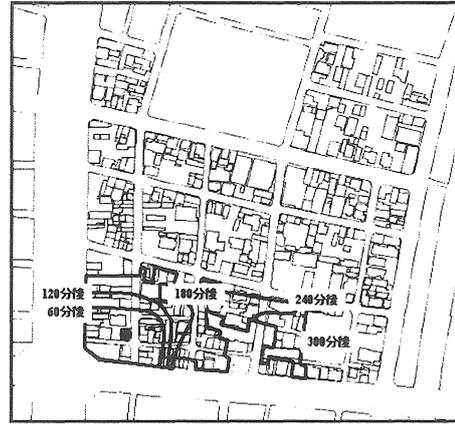


図 20 通常時火災延焼シミュレーション結果

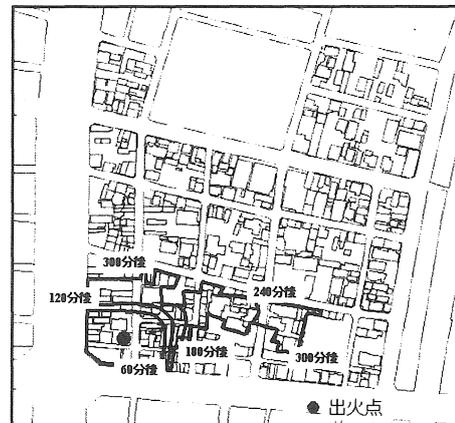


図 21 建物倒壊を考慮した延焼シミュレーション結果

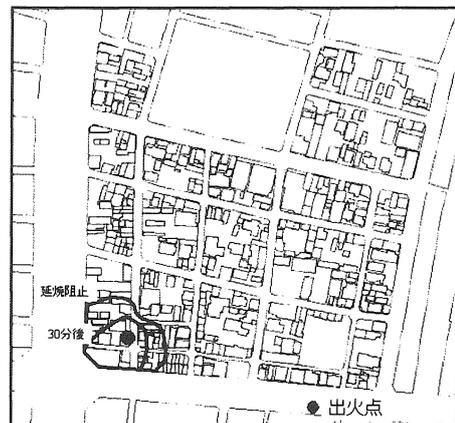


図 22 消防活動を想定した延焼シミュレーション結果

- 5) 国土地理院; 数値地図 2500, 1999
- 6) 宮永良一, 和田麻理子, 正木和明; 神戸市御蔵・菅原地区地震時火災延焼シミュレーション, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, pp. 588-589, 2000
- 7) 和田麻理子, 宮永良一, 正木和明; 地震時火災延焼シミュレーション(その 3), 土木学会中部支部平成 12 年度研究発表会講演概要集, pp. 89-90, 2001

(受理 平成13年 3月19日)