



Kobe University Repository : Kernel

タイトル Title	地震動による建物構造被害と火災加熱による損傷の進行を考慮した地震火災延焼性状予測モデル(A model for post-earthquake fire spread considering structural damage of buildings caused by seismic motion and its progression due to heating of fire)
著者 Author(s)	樋本, 圭佑 / 向坊, 恭介 / 秋元, 康男 / 黒田, 良 / 北後, 明彦 / 田中, 哮義
掲載誌・巻号・ページ Citation	日本建築学会環境系論文集,75(653):543-552
刊行日 Issue date	2010-07
資源タイプ Resource Type	Journal Article / 学術雑誌論文
版区分 Resource Version	publisher
権利 Rights	
DOI	
URL	http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/90001607

Create Date: 2017-12-20



地震動による建物構造被害と火災加熱による損傷の進行を考慮した 地震火災延焼性状予測モデル

A MODEL FOR POST-EARTHQUAKE FIRE SPREAD CONSIDERING STRUCTURAL DAMAGE OF BUILDINGS CAUSED BY SEISMIC MOTION AND ITS PROGRESSION DUE TO HEATING OF FIRE

樋本圭佑*¹, 向坊恭介*², 秋元康男*³, 黒田 良*⁴
北後明彦*⁵, 田中喙義*⁶

*Keisuke HIMOTO, Kyosuke MUKAIBO, Yasuo AKIMOTO,
Ryo KURODA, Akihiko HOKUGO and Takeyoshi TANAKA*

A physics-based model for post-earthquake fire spread was developed by modifying the prototype model previously proposed by the authors. In the new model, seismic motion and heating of fire are both considered as the causes of damage upon building members. The damage results in the change of fire behavior for individual building and criteria for building-to-building ignition. Indices representing the structural damage of a building are as follow: inclination angle of columns; falling ratio of exterior claddings; and deficit ratio of partitioning walls. Charring of wooden column gradually reduces its bearing capacity along with the decrease in its area of cross section. This may yield buckling of the column as well as collapse of the entire building. As to the falling of exterior claddings and burn-through of partitioning walls, the rates of degradation are assumed to be proportional to the cumulative heat flux received by the building members. The falling of exterior claddings increases the probability of ignition due to external heating, and the burn-through of partitioning walls allows transfer of heat and mass between neighboring rooms. For the verification of the new model, simulation of fire spread which followed 1995 Kobe Earthquake was conducted. Behavior of fire spread obtained by the numerical simulation was compared with the survey data at which reasonable agreement was obtained.

Keywords: Post Earthquake Fire, Urban Fire, Urban Fire Spread Model, Seismic Motion, Heating of Fire

地震火災, 都市火災, 延焼モデル, 地震動, 火災加熱

1. 研究の目的と背景

わが国の都市は、焼損建物数が1,000棟を超えるような大規模な市街地火災を数多く経験してきた。こうした危険性は、多くの木造建物が密集する市街地において特に顕著であり、ひとたび火災が発生すれば容易に延焼火災へと発展する可能性が高い。延焼火災の潜在的危険性を有する木造密集市街地は、大都市をはじめとして全国に幅広く分布しており、その対策の重要性が指摘されている¹⁾。

対策を講じるにあたっては、市街地火災による被害を予測し、対策の有効性を定量的に評価する手法の整備が必要となる。このうち、市街地火災の燃え広がりを時系列に予測する計算モデルは延焼

モデルと呼ばれ、これまでにも数多く開発されてきた²⁻¹⁰⁾。これらは、過去に発生した市街地火災の情報をもとに経験的に火災前線の移動速度を定式化したもの²⁻⁵⁾、建物間の延焼を介在する建物種別に応じて確率的に定式化したもの⁶⁾、市街地を構成する個々の建物の火災性状を現象の物理的知見に基づいて定式化したもの⁷⁻¹⁰⁾など、特徴の異なるいくつかの系統に分類でき、それぞれの特性に応じて自治体の被害想定や防災まちづくり計画などに活用されてきた。

ここで、市街地火災の発生の契機に着目すると、延焼モデルの予測対象は、強風時の市街地火災と地震時の市街地火災(地震火災)、もしくはその混合型の市街地火災に分類することができる。強風時

*1 京都大学次世代開拓研究ユニット 博士(工学)

*2 立命館大学大学院理工学研究科 博士(工学)

*3 三菱UFJリサーチ&コンサルティング 修士(工学)

*4 一条工務店 修士(工学)

*5 神戸大学都市安全研究センター 学博

*6 京都大学防災研究所 工博

Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto University, Dr. Eng.

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Dr. Eng.

Mitsubishi UFJ Research & Consulting, M. Eng.

Ichijo Corporation, M. Eng.

Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Ph. D.

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

には、風に吹き曝されることによって個々の火災建物が激しく燃焼すると同時に、飛び火によって既に燃焼している領域から離れた場所に非連続的な延焼が引き起こされる。一方、地震時には、同時に複数の場所での出火が発生し、そのうちのいくつかは、地震動により損傷した建物が多数混在する市街地の中を燃え広がる。強風時と地震時の市街地火災を比較すると、同じ市街地火災とは言え、それぞれに特徴的な様相が存在する。しかし、これまでに開発されてきた延焼モデルの多くでは、例えば市街地風による火炎や火災気流の傾斜などの、強風時に顕著となる現象の定式化が重視されてきた。一方、地震動による建物構造被害については、市街地火災の延焼性状に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、従来の延焼モデルでは十分に考慮されてこなかった。

そこで本研究では、地震動による建物構造被害とその後に発生する火災性状との関係に着目した、地震火災の延焼性状予測モデルの開発を行うことを目的とする³⁾。また、1995年に発生した兵庫県南部地震後の神戸市内での延焼火災の記録と、本延焼モデルによる計算結果の比較を行うことで、モデルの妥当性の検証を行う。

2. 地震火災延焼モデルの概要

地震火災延焼モデルの概念図を図1に示す。ここでは、地震火災を複数の建物火災の集合と捉え、他の建物火災の熱的な影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、市街地全体の火災延焼性状の予測を行う。こうした考え方は、筆者らがこれまでに開発してきた延焼モデル^{9),10)}のそれを踏襲するものである。本研究では、この既存延焼モデルに改良を加えることで、地震火災の延焼性状を予測可能なモデルへと発展させる。

2.1 建物火災性状

地震火災の特徴は、地震動によって構造的被害を受けた建物が多数混在する市街地で火災が発生し、個々の建物の火災性状がそれぞれの構造的損傷状況の影響を受ける点にある。なかでも、内部空間が押し潰された建物の火災性状は、熱源が区画化されていないために、内部空間が保持された建物のそれとは大きく異なる。ここでは、こうした火災性状に対する影響の大きさを踏まえ、建物損傷状況と、それに対応する燃焼モードを以下に示す2種類に分類し、それぞれに個別の計算手続きを用意するものとする。

(I) 内部空間の保持された非倒壊建物：区画火災の集合

(II) 内部空間の保持されていない倒壊建物：クリブ火災

ただし、(II)は、層崩壊の発生により内部空間の消失した建物を指しており、ここでは倒壊建物と呼ぶこととする。また、(I)に該当するこれ以外の全ての建物を非倒壊建物と呼ぶこととする。

まず、内部空間が保持された非倒壊建物については、一層ゾーンモデルの考え方に基づいて火災性状を計算する。一層ゾーンモデルでは、建物を構成する各部屋(区画)の占有空間を検査体積とみなし、検査体積ごとに定式化される支配方程式を時系列に解くことで火災性状を予測する。ただし、火災の規模を左右する発熱速度の大きさについては、可燃性ガスの生成速度と開口部からの空気の流入速度との関係から評価する。本モデルでは、既報^{9),10)}で示した方法に基づいてこの計算を行う。

一方、内部空間が保持されていない倒壊建物については、検査体積となりうる空間が残されていないので、一層ゾーンモデルを利用した火災性状の計算は行えない。倒壊建物の場合には、内部に収納されていた可燃物や構造材が屋外に露出していることが多く、むしろ建物全体を多孔質状の木質系可燃物とみなして、これが外気に曝される中で燃焼すると仮定する方が実態を表しているものと考えられる。ここでは、既往の木材クリブを利用した燃焼実験の結果を踏まえ、自由空間における火災モデルをもとに個々の建物の火災性状を定式化する。この詳細は3章で整理する。

2.2 建物間の延焼性状

ある燃焼中の建物(加熱側建物)から周辺の建物(受熱側建物)への火災拡大は、以下の3要因によってもたらされるものとする。

- (A) 火災建物からの熱伝達
- (B) 火災気流からの熱伝達
- (C) 火の粉の飛散

要因(A)では、非倒壊建物の火災室に充満する高温ガスや開口噴出火炎、もしくは倒壊建物の上方に形成される火炎を熱源と考え、ここからの放射熱伝達により周辺の建物が加熱される。

要因(B)では、火災建物を熱源とする熱気流が市街地風によって吹き倒され、風下側の広い領域に外気温上昇がもたらされる。

要因(C)では、火災建物から屋外に放出された火の粉が、市街地風によって同じく風下側の広い領域に飛散し、そのうちのいくつ

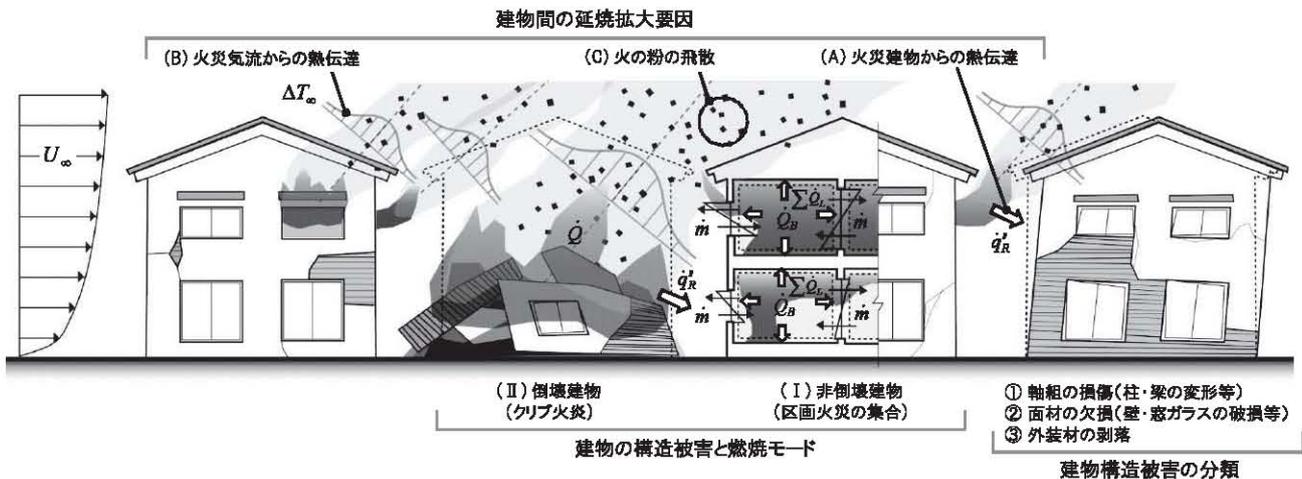


図1 地震火災の延焼性状予測モデル

かが延焼先となる可能性のある建物の上に落下する。

これらの要因が作用した結果、次のいずれかの条件が、受熱側建物において満たされた場合、建物間の延焼が起こるものとみなす。

(a+b) 入射熱流束が着火限界値を超えた場合

(c) 十分な熱エネルギーを有する火の粉が落下した場合

このうち、条件 (a+b) は、上に記した着火要因 (A), (B) が複合的に作用することによってもたらされる。また、条件 (c) には、着火要因 (C) が対応している。

こうした建物間の延焼計算の枠組みそのものは、建物の構造的被害の有無によって異なることはない。ただし、加熱側建物から受熱側建物への熱伝達性状は、加熱側建物の燃焼モードや、受熱側建物の損傷程度などの違いによって異なるため、具体的な計算の手続きについては個別の状況に応じて整備しておく必要がある。このうち、建物が構造的被害を受けていない場合の着火要因、および着火判定の計算については、既報^{9,10)}で示した方法をそのまま利用する。建物が構造的被害を受けている場合の火災拡大の計算手続きについては4章で整理する。

2.3 建物の構造被害と火災性状

地震火災のもう一つの特徴は、火災が継続することで建物の構造的損傷も進行し、それに伴って火災性状そのものが変化する点にある。すなわち、建物構成部材の損傷をもたらす外力には、地震動と火災加熱の双方が考えられ、前者は1回だけ作用する(余震を除く)のに対し、後者は状態を変えながら継続的に作用することになる。こうした関係を整理したものを図2に示す。

本モデルでは、地震発生後の火災延焼性状を予測することを目的としているので、地震動による個々の建物の構造的損傷の度合い(建物損傷レベルと呼ぶ)が計算の与条件として必要となる。ここでは、慣用的な分類の一つ^{11,12)}に従い、(0)被害なし・軽微、(1)小破、(2)中破、(3)大破、(4)倒壊、の5段階に建物損傷レベルを分類する¹³⁾。ただし、こうした分類は、軸組の残留変形や基礎の不同沈下の状態などに基づく、建物の構造的健全性を表すものであるため、ここから直接的に火災性状に対する影響を評価することはできない。そこで、上記の5段階の分類に基づく被害内容を、火災性状への影響に着目した被害内容に変換する必要がある。

まず、先に定義した建物火災の燃焼モードを左右する内部空間の保持状態の定義と、建物損傷レベルのそれに対応付けることは厳密には困難であるものの、「(0)被害なし・軽微～(3)大破」となった建物が、「(I)非倒壊建物」に相当するものとする。また、「(4)倒壊」となった建物は、燃焼モードの観点から定義される「(II)倒壊建物」に相当するものとする。この関係を図3に示す。

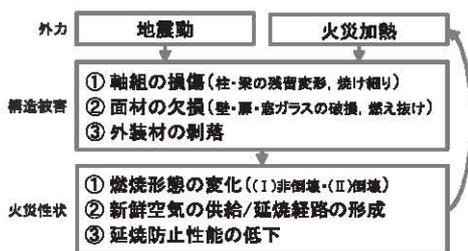


図2 地震動と火災加熱による損傷

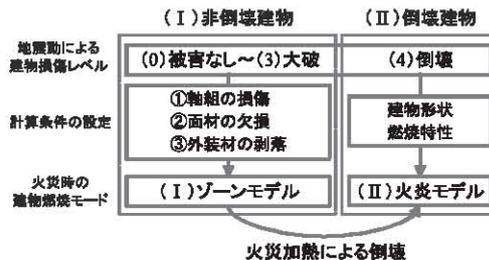


図3 建物の構造的被害と火災時の燃焼モード

このうち、「(I)非倒壊建物」は、対応する建物損傷レベルが「(0)被害なし・軽微～(3)大破」と幅広いため、一層ゾーンモデルによる一律的な計算を行えば、構造的損傷が火災性状に及ぼす影響を適切に評価することが出来ない可能性がある。そこで、「(I)非倒壊建物」については、さらに次の項目に着目することで、構造的損傷と火災性状が相互に及ぼし合う影響を関連付ける。

- ① 軸組の損傷
- ② 面材の欠損
- ③ 外装材の剥落

まず項目①は、柱や梁といった軸組の、地震動による残留変形や、火災加熱による焼け細りのことを指している。ここでは、地震動による影響を「柱の残留傾斜角」、火災加熱による影響を「柱の炭化深さ」で表わすこととし、ここから算出される軸組の保有耐力と荷重の大きさの関係から建物の倒壊判定を行う。また、地震動だけでなく、火災加熱によって建物が倒壊すると判定された場合においても、燃焼モードは (I) から (II) へと移行する。

次に、項目②は、壁・扉・窓ガラスといった面材の、地震動による破損や、火災加熱による燃え抜けのことを指している。ここでは「欠損率」としてこの大きさを表す。面材の欠損が大きくなれば、火災室に供給される新鮮空気の量が増加すると同時に、まだ着火していない可燃物に伝達されるエネルギー量が増加して、火災拡大につながる可能性がある。

最後に、項目③は、モルタルやALCパネルなどの外装材が、地震動や火災加熱によって剥落することを指している。ここでは「剥落率」としてこの大きさを表す。外装材の剥落により、もともと覆われていた可燃性の軸組や面材が屋外に露出すると、隣接する火災からの加熱による着火が起こり易くなる。

また、「(II)倒壊建物」については、建物火災をクリブ火災とみなした計算を行うが、この場合の燃焼性状は、倒壊後の建物形状や、多孔質系可燃物の燃焼特性といった条件によって決定される。またこうした条件は、隣接する建物への伝熱量の大きさにも関係し、建物間の延焼性状を左右する要因ともなる。

ここに示した建物損傷の各指標は、まず、地震動に基づく建物損傷レベルによりその大きさが決められることになる。その後の火災加熱による損傷の進行状況は、これらの指標に反映され、連動する火災性状の変化へとさらにつながっていく。こうしたモデル化の詳細については5章で、また一部を3章で整理する。

3. 建物火災性状

ここでは、地震動や火災加熱により建物が倒壊し、燃焼モードが

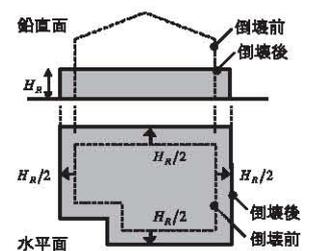


図4 倒壊前後の建物形状

(I) から (II) へ移行した場合の火災性状の定式化を行う。

3.1 燃焼速度

倒壊した建物が周辺の火災から延焼を受けるなどして燃焼を始めると、乱雑に積み上がった様々な形状の破損部材の上に火炎が形成される。本来、破損部材の種類は様々であるが、火災時の主要な可燃物は、一般の戸建て住宅などで構造材として使用されることの多い木材になるものと考えられる。ここではこのことを踏まえ、倒壊建物の燃焼性状が、棒状の木材を井桁状に組み上げた木材クリブの燃焼性状で近似できるものとする。

木材クリブは、建物内部の火災性状を再現するための代表的な火源の一つと見なされてきたこともあり、燃焼性状を調べるための実験が比較的多くなされてきた。ここでは、そのうちの一つの結果を利用することとし、可燃物の露出表面積に依存した場合の燃焼速度 $\dot{m}_{F,S}$ と、可燃物の空隙を通じて供給される空気量に依存した場合の燃焼速度 $\dot{m}_{F,P}$ のうち、いずれか小さい方の値が実際の燃焼速度 \dot{m}_F になるものとして次のように計算する¹³⁾。

$$\dot{m}_F = \min\{\dot{m}_{F,S}, \dot{m}_{F,P}\} \quad (1)$$

ただし、 $\dot{m}_{F,S}$ 、 $\dot{m}_{F,P}$ はそれぞれ次のように求められる。

$$\dot{m}_{F,S} = \frac{4M_0 v_p}{D_C} \left(\frac{M}{M_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{F,P} = 4.4 \times 10^{-4} \left(\frac{S_C}{H_C} \right) \left(\frac{M_0}{D_C} \right) \quad (3)$$

ここで、 M_0 はクリブの初期重量、 M は当該時刻におけるクリブの重量、 D_C は木材の代表厚み、 S_C は木材の隙間間隔、 H_C はクリブ全体の高さ、 v_p は木材表面の炭化速度である。

3.2 倒壊後の建物形状

上式(1)~(3)による燃焼速度 \dot{m}_F の計算には、倒壊建物の形状に関する情報が必要となるが、建物倒壊時の破壊パターンは構造種別や規模によっても様々であり^{例えは14)}、これを全て反映させた火災性状の計算を行うことは難しい。ただし、延焼火災の危険性が高い密集市街地では、1階もしくは2階建てといった低層の木造建物が多い。こうした建物が倒壊した場合の破壊パターンについて、筆者らが近年の被害地震において撮影した写真を併せて見てみると、押し潰された1・2階部分の瓦礫の上に屋根が残ったものや、1階部分が崩壊して2階部分だけが残ったものが多い。この高さには大きなばらつきがあるが、ここでは中間的な値をとることとし、もとの建物階高 H_R が倒壊建物の高さに相当するものと仮定する。

また、こうした低層の木造建物の倒壊は、軸組の接合部が外れることによって起こることが多いことを考慮し、部材の散開幅は、柱の倒れ込み幅(階高 H_R)に相当するものと仮定する。建物が倒れ込む方向については、軸組みや構面の配置状況といった建物の個別の条件にも左右される。ただし、こうした情報を、計算対象となる市街地の全ての建物について把握することは難しい。そこで本モデルでは、柱の倒れ込み方向を考慮せず、倒壊による建物全体の重心位置の移動は小さいものと仮定する。すなわち、倒壊前の各外壁が、屋外方向に階高 H_R の半分だけ移動した位置が、倒壊後の建物の外周に相当するものとする。この場合、結果的に得られる散開幅が、

建物全体として見た場合に階高 H_R に一致することになる。以上の仮定に基づく、建物形状の倒壊前後の関係を図4に示す¹⁵⁾。

倒壊建物を木材クリブとみなした場合の木材の隙間間隔 S_C については、倒壊建物の空隙率 ϕ ¹⁶⁾ が $S_C/(D_C+S_C)$ 、と表わされることを踏まえ、次のように計算することができる。

$$S_C = \frac{\phi}{1-\phi} D_C \quad (4)$$

なお、木材の代表厚み D_C には任意性があるが、ここでは倒壊建物が燃焼する場合の主要な燃料が、柱や梁といった軸組材料になるものと考え、こうした軸組の一般的な断面寸法を与えるものとする。

4. 建物間の延焼性状

燃焼中の倒壊建物から隣接する建物への火災拡大は、2.2節に示したように、(A) 火炎からの熱伝達、(B) 火災気流からの熱伝達、(C) 火の粉の飛散、によってもたらされる。このうち、(B)、(C)については、既報^{9,10)}で示した方法を利用して計算を行うこととし、ここでは、建物が倒壊している場合について個別の扱いが必要な(A)の定式化を行う。

4.1 火災形状

倒壊した建物の上方に形成される火炎の形状は、燃料の供給源となる倒壊建物の立体形状、中でも建物の地表面投影形状に依存する。市街地には不整形な建物が多数存在するが、こうした個々の建物形状に応じた計算方法の一般化は困難であるため、ここではこれを簡略化することで、放射熱伝達計算を系統的に取り扱うことを考える。すなわち本モデルでは、倒壊建物火炎を、代表寸法 D を底面直径とする円柱状火炎とみなし、ここから周辺の建物に対する放射熱伝達が起こるものとする。

円柱状火炎の高さ、および傾斜角については、無風時と有風時のそれぞれの場合について計算式を用意しておく必要がある。まず、無風時の火炎高さ H_F には、ガス燃料、アルコール燃料、木材といった燃焼特性の異なる各種燃料を利用した実験の結果から導かれた次の関係式を用いる^{15),16)}。

$$\frac{H_F}{D} = \begin{cases} 3.3Q_D^{2/3} & (Q_D^* < 1.0) \\ 3.3Q_D^{2/3} & (Q_D^* \geq 1.0) \end{cases} \quad \text{ただし、} Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} D^{3/2}} \quad (5)$$

ただし、 \dot{Q} は火炎の発熱速度、 ρ_∞ は外気の比重、 c_p は定圧比熱、 T_∞ は外気温、 g は重力加速度である。

一方、有風時については、火炎高さ H_F に加え、火炎の中心軸長さ L_F を求めることで、傾斜角を含めた火炎形状を把握することができる。ここでは、木材の燃焼実験の結果から導かれた次の関係式を利用する¹⁷⁾。

$$\frac{L_F}{D} = 70 \left(\frac{\dot{m}_F^*}{\rho_\infty^* g D} \right)^{0.43} \left(\frac{U_\infty^2}{g D} \right)^{-0.11} \quad (6)$$

$$\frac{H_F}{D} = 56 \left(\frac{\dot{m}_F^*}{\rho_\infty^* U_\infty} \right) \left(\frac{U_\infty^2}{g D} \right)^{0.13} \quad (7)$$

ここで、 \dot{m}_F^* は燃料の単位面積あたりの重量減少速度、 U_∞ は市街地風の風速である。

4.2 火災からの放射熱伝達

円柱状火災から受熱面に対して伝達される熱流束は、円柱状火災の形態係数と放射エネルギーの積として計算できる。ただし、形状が時々刻々変動する火災の形態係数を、膨大な数の建物から構成される市街地全体で計算することの負担は大きい。そこで本モデルでは、火災の放射特性をある一つの点に代表させ、ここから受熱面の重心に設定される受熱代表点に伝達される熱量を計算する。ここで、放射代表点から等距離にある球面を通過する放射エネルギーが、火災からの全放射エネルギーに等しいとみなすと、受熱代表点に入射する熱流束 \dot{q}_R^* は次のように計算できる。

$$\dot{q}_R^* = \frac{\chi_R \dot{Q}}{4\pi s^2} \cos \alpha \quad (8)$$

ただし、 χ_R は発熱速度 \dot{Q} の放射成分の比率、 s は放射代表点と受熱代表点の直線距離、 α は放射代表点から受熱代表点に伸ばした直線が受熱面の法線となす角である。

このとき、放射代表点は、円柱状火災の重心に設定することも可能である。しかし、この場合の距離 s には火災の奥行き長さも含まれることになるため、倒壊建物の規模が大きくなるほど実質的な放射代表点との隔たりが大きくなり、伝達エネルギー量が過小に評価される可能性がある。そこで本モデルでは、図5に示すような仮想火災面を考え、その重心に放射代表点を設定する。この仮想火災面は、受熱点から円柱の外周に伸ばした直線の接点を頂点とする、高さ H_F の長方形であり、受熱点に対する円柱状火災の投影面を近似している。なお図5は、無風時における円柱状火災と受熱面の関係を示したものであるが、有風時に火災が傾斜した場合についても、火災とみなす円柱を傾けることにより、同様の手続きが適用できる。

5. 建物の構造的被害と火災性状

建物構造被害については、2.3節に示したように、①軸組の損傷、②面材の欠損、③外装材の剥落、の3種類に内容を分類し、それぞれが火災性状との間で及ぼしあう影響を定式化する。

5.1 軸組の損傷

軸組の損傷程度は、建物倒壊の判定基準となるのと同時に、この結果をもとに、建物燃焼モード (I) から (II) への移行が決定される。建物の倒壊については、建物の内部空間が、柱や梁など複数の構造材料から構成される架構によって保持されていることを踏まえ、本来であれば、架構における力の伝わりを考慮した上で判定

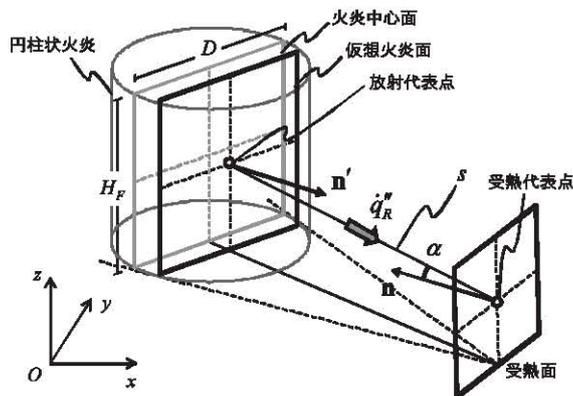


図5 無風時の円柱状火災からの放射熱伝達

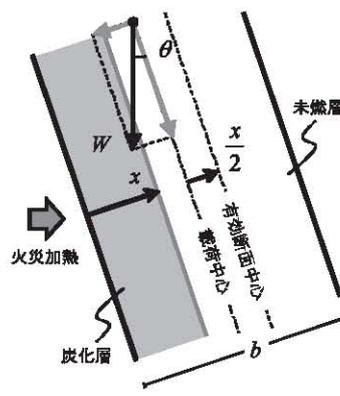


図6 偏心荷重による柱の曲げ破壊

を行うべきである。しかしここでは、計算手続きの簡略化を図るため、架構全体の損傷の大きさを、ある1本の柱の損傷の大きさで代表させる。すなわち、地震動もしくは火災加熱によって柱の耐力が低下して荷重を支えきれなくなった場合、その柱の破壊が起こると同時に建物全体が倒壊に至るものとする。

まず、地震動による軸組の損傷程度は、「柱の残留傾斜角 θ 」で表されるものとする。表1は、2.3節に示した (0) 被害なし～ (4) 倒壊の5段階の建物損傷レベルを、経験的な柱の残留傾斜角 θ に対応付けたものである。火災延焼計算を行うにあたっては、建物損傷レベルに応じた個々の建物の残留傾斜角 θ が、この関係に基づいて与えられる。一方、火災加熱による軸組の損傷程度は、「柱の炭化深さ x 」で表されるものとする。地震発生後の火災によって建物内部の柱の炭化が進むと、炭化した部分が荷重を負担することはないため、柱の支持力は徐々に低下する。最終的に荷重を支えきれなくなれば、柱は破壊し、建物倒壊へと発展する。ここでは、偏心荷重による曲げと、柱材の軸直交方向に加わる力による曲げが、柱に作用するものと考え、以下の判定式によりその破壊を予測できるものとする。

$$\frac{\sigma_B + \sigma_H}{f_B} \geq 1 \quad (9)$$

ここで、 σ_B は偏心荷重による曲げ応力、 σ_H は軸直交方向の力による曲げ応力、 f_B は柱の曲げ強度である。なお、柱の炭化の仕方は、外周部の露出状況などによって異なるが、ここでは柱の断面形状を正方形と考え、外周4面のうち1面が加熱を受けるものと仮定する。ただし、炭化速度 v_p については、本モデルでは加熱強度などの影響を考慮せず、0.8mm/分という値を一義的に与える¹⁹⁾。

火災の発生からある時間の後に炭化層深さが x となっているとすると、荷重は有効断面の中心から $x/2$ だけずれた位置に作用する (図6)。この偏心荷重によって生じるたわみは、柱の中央部で最大となり、その大きさ v は次のように表わされる。

$$v = \frac{x}{2} \cdot \left(\frac{1}{\cos(kH/2)} - 1 \right), \quad \text{ただし、} k = \sqrt{\frac{W \cos \theta}{EI}} \quad (10)$$

ここで、 W は鉛直荷重、 EI は柱の曲げ剛性、 H は柱の長さである。このとき、柱に加わる曲げモーメント M_B は、軸方向に働く力の大きさが $W \cos \theta$ となるので次のように表わされる。

$$M_B = W \cos \theta \cdot \left(v + \frac{x}{2} \right) = W \cos \theta \cdot \frac{x}{2 \cos(kH/2)} \quad (11)$$

柱材の軸直交方向の力による曲げについては、材端を固定端として柱頭に水平変異のみ自由度が与えられた

表1 建物損傷レベルと燃焼モード^(注5)

建物損傷レベル	柱の残留傾斜角 θ [rad]	燃焼モード
(0) なし	0	I
(1) 小破	1/200	
(2) 中破	1/100	
(3) 大破	1/30	
(4) 倒壊	-	II

態を考える。このとき、柱端部に作用するモーメント M_H は、材端に作用するせん断力 $W \sin \theta$ を用いて次のように表わされる。

$$M_H = W \sin \theta \cdot \left(\frac{H}{2} \right) \quad (12)$$

以上より、 M_B および M_H による線応力 σ_B と σ_H は、 Z を柱の断面係数として、それぞれ次のように計算することができる。

$$\sigma_B = \frac{M_B}{Z}, \quad \sigma_H = \frac{M_H}{Z}, \quad \text{ただし、} Z = \frac{b(b-x)^2}{6} \quad (13)$$

ここで、 b は柱断面の一辺の長さである。

5.2 面材の欠損

本研究では、壁、扉、窓ガラスなどの面材が隔てる2つの空間の間に一切の遮蔽物がなくなる部位のことを欠損部分と呼ぶ。また、欠損部分の面材全体に対する面積の比率を「欠損率」と定義し、被害程度を表す指標とする。隣接する2空間の間の換気や放射による熱伝達は、欠損部分のみを通じて起こるため、欠損率の大きさが、建物火災性状ならびに建物間の延焼性状に及ぼす影響は大きい。面材の欠損は、地震動と火災加熱の双方によって発生・拡大する。このうち、地震動による欠損の発生は、過去に発生した大規模地震の建物被害の撮影記録などにも散見される。ただし、複数の板材料が積層した壁に生じた欠損は、一見して部分的な材料の剥落とは見分けがつかないことが多く、これを定量化するために必要な資料は少ない。そこで本モデルでは、当面、地震動の影響は考慮せず、主に火災加熱によって面材の欠損が発生・拡大するものとする。

火災加熱による面材の欠損は、燃え抜けとも呼ばれるが、その発生機構は、材料の劣化・溶融や、材料間の膨張率の差に起因する歪みなど様々である。ただし、こうした状態の変化は、面材へ入射する累積受熱量の大きさにより一般化が可能であるものと考え、累積受熱量が面材の種類に応じて設定される限界値 Q_{cr}^* を超えた段階で燃え抜けが始まるものとする。すなわち、ある面材の燃え抜けによる欠損の発生時刻 t_{cr}^* は、加熱が始まった時間を0、面材への入射熱流束を \dot{q}^* とし、次式を満足する値となる。

$$\int_0^{t_{cr}^*} \dot{q}^* dt = Q_{cr}^* \quad (14)$$

この関係に基づけば、面材の燃え抜け難さを Q_{cr}^* の大小で表すことができる。ただし、 Q_{cr}^* そのものは物理量であり、このままでは、例えば建築基準法に規定される耐火構造や準耐火構造などの、既に普及している火災安全性能指標(例えば¹⁹⁾)との比較は難しい。そこで、限界受熱量 Q_{cr}^* を、次のような等価燃え抜け時間 t_{cr}^* に換算する。

$$Q_{cr}^* = \int_0^{t_{cr}^*} \dot{q}_{standard}^* dt$$

ここで、 $\dot{q}_{standard}^*$ は ISO834 標準加熱曲線による加熱を加えた際の面材への入射熱流束とする。すなわち、等価燃え抜け時間が t_{cr}^* の面材とは、標準加熱を受けた場合に時間 t_{cr}^* だけ燃え抜けを起こすことのない面材と、同等の性能を有していると見なすことになる。

燃え抜けが発生して以降の欠損拡大の具体的な計算手続きについては、既報^{9,10)}に示した方法を利用す

ることができる。本来、欠損の発生しやすい部位や欠損の拡大速度も面材の性質によってまちまちではあるが、ここでは、面材の重心を起点として辺縁と直角方向に欠損が生じるものとし、その拡大速度は面材に対する入射熱流束の大きさに比例するものとする。

5.3 外装材の剥落

ここでは、面材の欠損部分に対し、外装材の一部が脱落するなどして下地が露出した部位のことを剥落部分と呼ぶ。欠損部分とは異なり、剥落部分を通じて換気や放射熱伝達が起こることはない。ただし、不燃外装材が剥落することによって面材の防火性能が低下すると同時に、可燃性材料が下地に使われていれば、ここが屋外からの加熱に曝されることによって着火に至る可能性は増大する。そこで、面材に対する剥落部分の面積の比率を「剥落率 ϕ 」と定義し、外装材剥落後の面材が燃え抜けを起こす限界の受熱量 $Q_{cr,\phi}^*$ を、 ϕ の関数として次のように与えることとする。

$$Q_{cr,\phi}^* = \phi \cdot Q_{cr,A}^* + (1-\phi) \cdot Q_{cr,B}^* \quad (16)$$

ここで、 $Q_{cr,A}^*$ は外装材が全て剥落した場合の限界受熱量、 $Q_{cr,B}^*$ は外装材が剥落していない場合の限界受熱量である。

地震動による外装材剥落率 ϕ の評価には、兵庫県南部地震における建物損傷レベルと非構造材である外壁の被害程度(外壁損傷レベルと呼ぶ)が対応付けられた結果を利用する^{20, 21)}。図7は、剥落率 ϕ の評価の流れを示したものである。剥落率 ϕ の評価対象は、先に定義した5段階の建物損傷レベルのうち、(0)被害なし・軽微と(4)倒壊を除く、(1)小破、(2)中破、(3)大破、のいずれかに該当する建物となる。同じ建物損傷レベルであったとしても、外壁損傷レベルにはばらつきがあることを踏まえ、ここでは、外壁損傷レベルの内訳を示す累積確率分布を、建物損傷レベルごとに用意している。従って計算上は、まず建物損傷レベルを設定し、該当する累積確率分布をもとに確率的に外壁損傷レベルを評価する。外壁損傷レベルは (R0) から (R5) までの6段階に分類されており、各損傷レベルに対応する剥落率 ϕ が、文献²⁰⁾の記述をもとに与えられる。

なお、外装材の剥落は、火災加熱によっても進行する。これに伴い、面材の防火性能は徐々に低下していくが、ここではこうした効果が、式(16)によって調整される限界受熱量 $Q_{cr,\phi}^*$ や、そこから導かれる等価燃え抜け時間 t_{cr}^* の中に既に組み込まれているものと考え、この過程を陽にモデル化することはない。

6. 兵庫県南部地震における市街地延焼火災

1995年の兵庫県南部地震では、神戸市を中心に広い範囲で火災延焼による被害が発生した^{21)~25)}。地震発生から10日の間に、神戸市

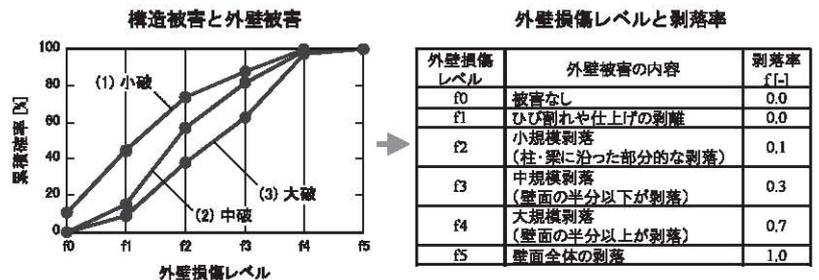


図7 地震動による建物の構造被害と外壁の剥落率

で発生した建物火災の件数は 157 件、そのうち焼損延床面積が 10,000m²を超える大規模な延焼火災は 11 件となっている²³⁾。本稿ではこのうち、長田区の高橋病院周辺と御蔵通 5・6 丁目で発生した 2 件の火災の延焼シミュレーションを行い、調査記録をもとに作成された延焼動態図²⁵⁾と計算結果を比較することで予測モデルの妥当性を検証する。表 2 は、これら 2 件の火災による被害の概要を整理したものである。いずれも地震発生直後に火災が発生しており、鎮圧に至るまでの時間は、高橋病院周辺火災で約 18 時間、御蔵通 5・6 丁目火災で約 13 時間となっている。

6.1 計算条件

計算に必要な建物形状に関する情報は、1990 年に発行された都市計画図から読み取った。同都市計画図では、普通建物、堅牢建物、無壁舎の 3 種類に建物分類されている。このうち、堅牢建物については、3 階建て以上の場合に階数の記載があったのでそれを採用することとし、それ以外は全て 2 階建てとした。ただし、いずれの種別についても建物内部の間仕切りの配置を把握することは困難であるため、各階の占有空間を 1 つの検査体積とみなした。建物高さに関する情報も入手が困難であるため、ここでは普通建物と無壁舎の階高を 3m、堅牢建物の階高を 4m と一律に設定した。

開口形状については、既往の実態調査²⁷⁾の結果を参考に、次のように壁面積に対する開口部の面積比率 r_D を与えることとした。

$$r_D = \begin{cases} 0.3(L/L_0) & (L \leq L_0) \\ 0.3 & (L > L_0) \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 L は当該壁面と最も近接する壁面との距離、 L_0 は基準距離であり、ここでは 5m とした。すなわち、他の壁面との距離 L が小さいほど開口面積比率 r_D は小さく推定されることとなる。

各建物の燃焼・熱伝達特性については、建物種別ごとに、表 3 に示すように設定した。ここでは、普通建物と無壁舎が防火木造建物、堅牢建物が耐火造建物とそれぞれ同程度の火災安全性能を有しているものと仮定した。ただし、固定可燃物の初期露出表面積比 Ψ_0 とは、固定可燃物の全表面積のうち、燃え抜けによってではなく、火災発生当初から露出している表面積の比率を指している^{9), 10)}。表面積比 Ψ_0 は、建物内部での可燃性ガスの供給速度を支配する指標であるが、これまでに実態調査などによる評価がほとんどなされていない。そこで本研究では、計算結果と火災調査記録が最も良く一致するよう、 Ψ_0 の値を試行錯誤的に調整した。

気象条件については、神戸海洋気象台の観測記録を利用することとした。図 8 は、市街地風の風速と風向の観測記録を示している。17 日 1 時から 18 日 0 時にかけての 1 日間の風速の平均は 2.6m/s であり、変動はあるものの北東方向からの風が主であった。なお、市街地風による影響が大きい飛び火による延焼については、確率論的モデルによる計算が可能ではあるが^{9), 10)}、計算結果に対する不確実な要因を排除するために本検討での予測は行わず、聞き取り調査等によって確認された飛び火発生地点と発生時間を計算条件として与えることとした。

火災発生当時、地震動による建物損傷レベルがどの程度のものであったのかについては、報道機関による中継映像、日本火災学会によって整理された映像ライブラリー、住民へのヒアリング・アンケート結果^{21), 23)-25)}をもとに、建物単位の確認を行った。図 9 は高橋

病院周辺での確認結果である。本計算では、「全層が崩壊した建物」と「最下層が崩壊した建物」を「(4) 倒壊」とした。ただし、被災地域が焼失してしまっていることもあり、全ての建物の損傷レベルをこの方法により確認できたわけではない。そこで、「崩壊していない建物」は「(0) 被害なし・軽微～(3) 大破」のいずれか、「未確認の建物」は「(0) 被害なし・軽微～(4) 倒壊」のいずれかに該当するものとし、表 2 に示す周辺地区の建物損傷レベルの割合をもとに、無作為に個々の建物の損傷レベルを割り振った。

6.2 計算結果と考察(高橋病院周辺火災)

高橋病院周辺地区は、南北に 300m ほどの間隔で並走する国道 2 号線と JR 山陽本線に挟まれている。ここでは、当時焼失した建物 997 棟とその周辺の建物を含めた計 1,126 棟を対象とした火災延焼シミュレーションを行った。ただし、焼失した地域の南、東、北の各方面については、広幅員道路などによって隔てられていることから延焼の危険性は小さいものと判断し、計算対象から除外した。

図 10 は、その結果を可視化したものである。設定された出火点は 2 か所であり、いずれも地震発生直後に出火したものと考えられ

表 2 兵庫県南部地震における市街地延焼火災の被害^{21), 23)}

	高橋病院周辺火災	御蔵通 5・6 丁目火災
出火日時	1月17日 5時47分頃	1月17日 5時47分頃
鎮圧日時	1月18日 0時0分頃	1月17日 19時0分頃
出火場所	①長田区若松町10丁目 ②長田区日吉町5丁目	①長田区御蔵通5丁目
出火原因	不明	不明
焼失区域面積	61,700m ²	20,300m ²
焼失延床面積	89,099m ²	25,509m ²
焼失棟数	997棟(うち全焼991棟、 半焼2棟、部分焼4棟)	225棟(うち全焼216棟、 半焼1棟、部分焼8棟)
対象地域周辺の構造被害レベルの内訳(推定)	(0) 被害なし:11.8% (1) 小破:15.2% (2) 中破:29.1% (3) 大破:23.7% (4) 倒壊:20.2%	(0) 被害なし:13.7% (1) 小破:31.8% (2) 中破:16.6% (3) 大破:18.1% (4) 倒壊:19.8%

表 3 建物構造と燃焼・熱伝達特性

	普通建物・無壁舎	堅牢建物	
収納可燃物密度	30kg/m ²	30kg/m ²	
固定可燃物密度	100kg/m ²	30kg/m ²	
固定可燃物の初期露出表面積比	0.2	0.2	
壁	厚み	90mm	120mm
	熱伝導率	1.30×10 ⁻³ kW/mK	1.30×10 ⁻³ kW/mK
	比重	2,000kg/m ³	2,400kg/m ³
	比熱	0.80kJ/kgK	0.80kJ/kgK
	等価燃え抜け時間	20分	燃え抜けなし
開口	厚み	3mm	
	熱伝導率	0.78×10 ⁻³ kW/mK	
	比重	2,540kg/m ³	
	比熱	0.77kJ/kgK	
等価燃え抜け時間	5分		

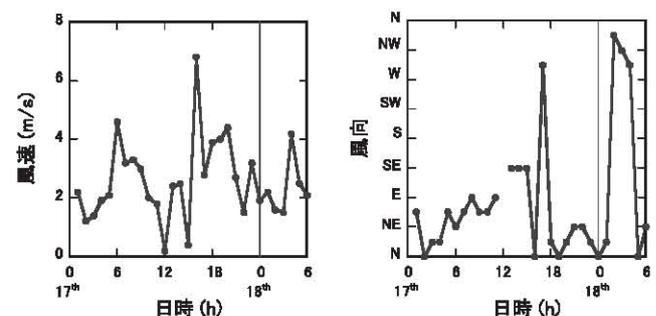


図 8 火災発生時前後の市街地風の観測記録

ている。100mほど離れた場所で同時に発生した2件の火災は周辺の市街地に延焼し、出火から2時間30分を経過した8:20までに合流して1つの燃焼領域を形成している。その後、南、東、北の各方面で燃え止まった火災は、建物が密集し、オープンスペースなどの延焼阻止要因の少ない西側に燃え進んだ。この結果、出火から6時間を経過した11:50の時点での火災前線は、最も近い出火点から200mほど離れた大国公園に達しようかとしている。なおこの時点で、火災前線には燃焼領域の帯が形成されていることが確認でき、その幅は50m程度となっていることが分かる。

聞き取り調査などをもとに作成された当時の延焼動態図²⁵⁾に一部加筆したものを図11に、計算結果をもとに作成した延焼動態図を図12にそれぞれ示す。両者を比較すると、計算による焼失範囲が、当時の焼失範囲よりも大きく算出されており、火災による被害が過大に評価される結果となった。中でも最も大きな違いは、大国公園の西側の街区に延焼が及ぶと計算された点にある。こうした違いは、計算で使用する市街地データの精度の不足のほか、本モデルにおいて消火活動による延焼抑止効果を考慮できていないこと



図9 高橋病院周辺での建物の損壊状況

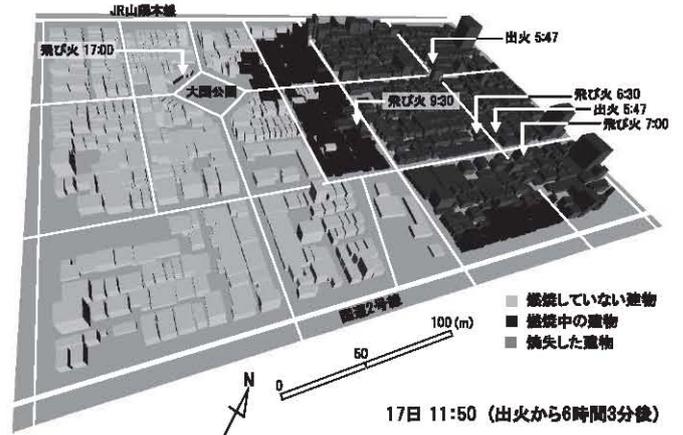
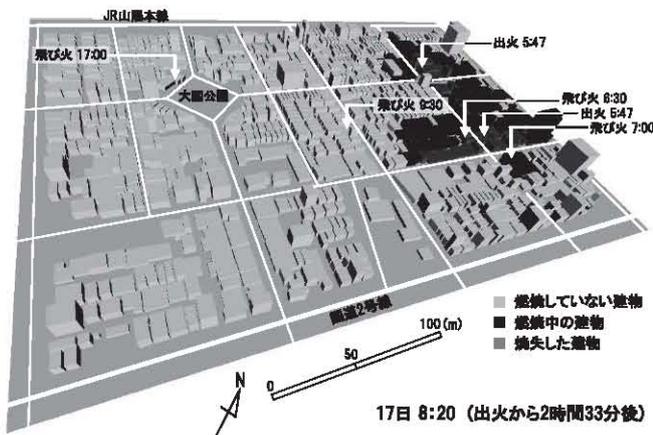


図10 高橋病院周辺火災の延焼シミュレーション結果

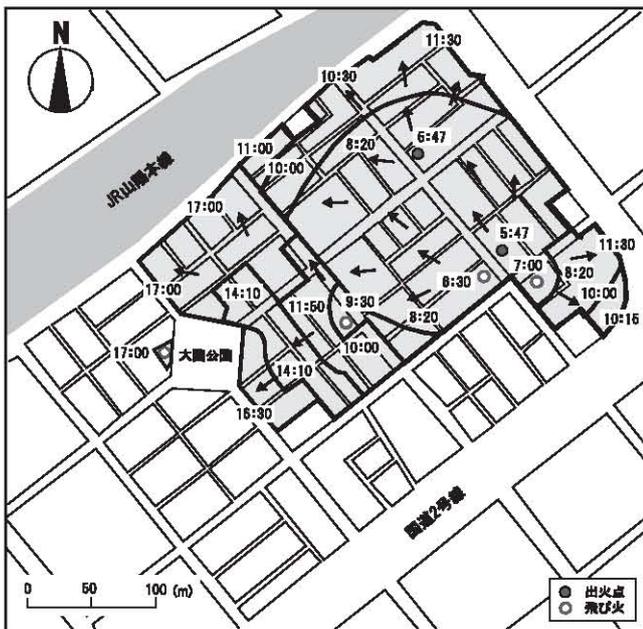


図11 高橋病院周辺火災の延焼動態図(調査)

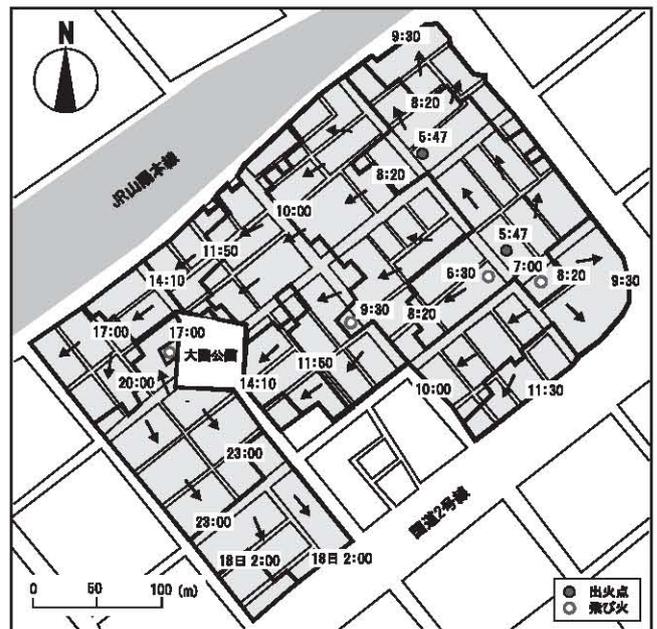


図12 高橋病院周辺火災の延焼動態図(計算)

が大きな原因になっているものと考えられる。当時の消火活動状況の報告²³⁾によると、消防隊による消火活動が開始されたのは、14時から16時にかけてと見られ、それ以降の延焼性状には消火活動の影響が反映されている可能性がある。すなわち、大公園の北側を經由した延焼の発生は、消火活動が開始されて以降の17時となっていることから、ここから西側の街区への延焼が起こらなかった理由は、消火活動によって火災そのものが消し止められたか、もしくは勢いが弱められていた可能性が考えられる。

消火活動が開始される前の延焼状況については、時刻ごとの火災前線の位置から比較できる。ここで、延焼距離が長く、比較が容易な、出火点から西側の火災前線の位置に着目すると、8:20では計算結果の方が遅れているのに対し、10:00では計算結果と調査結果がほぼ一致、それ以降では計算結果の方が早まる結果となった。このように、時間帯によって延焼速度に差が生じたということは、各時間帯で燃え広がりが起こっている地域の燃焼特性が、実態とは異なっていた可能性が考えられる。本計算では、地震動による建物構造被害の実態を確認できなかった一部の地区について、建物損傷レベルを各建物に対して無作為に割り振らざるを得なかった。そこで、このことが計算結果に及ぼしていた影響を調べるため、個々の建物の被害レベルをその都度割り振らおした計算を10回繰り返した。図13は、各計算から得られた焼失建物棟数の時間変化の平均と、本検討で使用した計算結果を示している。これによると、両者は同様な時間経過をたどっており、本検討で使用した計算結果は、概ね平均的な被害拡大の経過をたどっていたと見ることができる。ただし、エラーバーは各時刻で得られた標準偏差の大きさを表している。標準偏差の値は、8:00から12:00までの間で比較的大きな値をとっており、特に出火から間もない段階において、燃え広がりにばらつきが生じていることが分かる。こうした違いをもたらす要因には、以上のような対象地域の燃焼特性の設定方法のほかにも、計算モデルの仮定に起因するものも含まれているものと考えられる。例えば建物が倒壊した場合には、本来であれば一定の方向に偏って部材が散開することが多いが、本モデルでは倒壊前後の建物重心に変化はないものと仮定した。これにより、延焼のしやすさの指向性が排除され、周辺の建物との位置関係によっては、延焼速度を大きくする作用があった可能性も考えられる。

6.3 計算結果と考察(御蔵通5・6丁目火災)

御蔵通5・6丁目については、当時焼失した建物225棟とその周辺の建物を含めた計531棟を対象とした火災延焼シミュレーションを行った。出火点は、対象

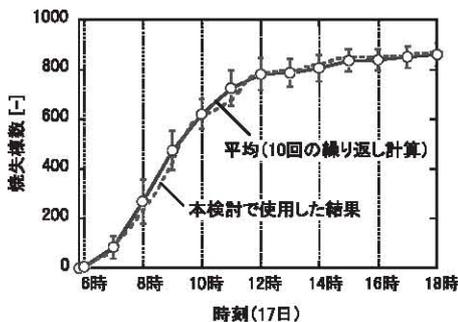


図13 被害レベルの無作為な割り振りと焼失棟数

地域の北東角に1か所設定してある。なお、その当時、同地域の東側に隣接する地域では、別の出火点から始まった延焼火災(菅原変電所周辺火災)により大きな被害を出した。これら2件の火災は一体的な火災と見なされることもあるが、ここでは、両地域が幅員20~30mの国道28号線で隔てられていることを考慮し、両火災が相互に及ぼし合う影響は軽微なものとして、御蔵通5・6丁目で発生した火災を独立して扱うこととした。

聞き取り調査などをもとに作成された当時の延焼動態図²⁵⁾の一部加筆したものを図14に、計算結果をもとに作成した延焼動態図を図15にそれぞれ示す。高橋病院周辺火災の場合と同様、焼失範囲は過大に算出されており、街区外周の広幅員道路にたどり着くまで燃え止まりが生じることはなかった。この理由には、やはり消火活動による延焼抑止効果を考慮した計算を行っていなかったことが挙げられる。御蔵通5・6丁目火災では、高橋病院周辺火災に比べ、比較的早期に消火活動が開始されていた。このことは、最終的な焼け止まり線の全長のうち消火活動によって延焼が阻止された長さの比率に見ることができ、高橋病院周辺火災が1.8%であったのに対し、御蔵通5・6丁目火災では12.8%となっている²¹⁾。こうしたことから、消火活動を考慮していなかったことの影響は、御蔵通5・6丁目火災においてより顕著であったものと考えられる。

一方、延焼動態図の火災前線の位置を比較すると、計算結果の方が幾分速いものの、比較的良好に延焼速度を再現できているものと考えられる。中でも、火災当時に燃え止まることのなかった出火点から南西方向と南東方向の一致は良い。本検討には、消火活動による延焼抑止効果が考慮されておらず、計算条件としての市街地情報についても確定的な設定が困難であったため、ここでの一致がモデルの妥当性をそのまま保証するものではない。ただし、その前提となる基本的な性能についての検証は行えたものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、地震動による建物の構造的損傷と、火災加熱による損傷の拡大を考慮した、市街地火災の延焼性状予測モデルを構築した。ここでは、建物の構造的被害を、①軸組の損傷、②面材の欠損、③外装材の剥落、の3種類に分類し、地震動・火災加熱による各被害の発生・拡大と、その結果もたらされる火災性状の変化をモデル化した。また、構築した延焼モデルの妥当性を検証するため、1995年の兵庫県南部地震において発生した市街地火災の延焼シミュレ

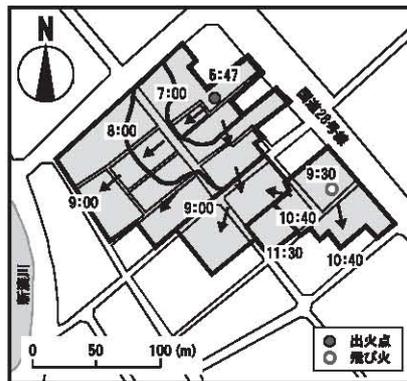


図14 御蔵通火災の延焼動態図(調査)

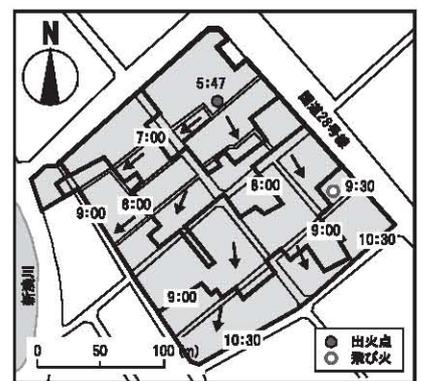


図15 御蔵通火災の延焼動態図(計算)

ーションを行った。ここでは、モデル変数である固定可燃物の初期露出表面積比 Ψ_0 の値を調整することにより、比較対象とした高橋病院周辺火災および御蔵通 5・6 丁目火災の延焼動態図を再現することを試みた。この結果、延焼動態の巨視的な傾向を捉えることは出来たが、最終的な焼失範囲や時間別の延焼速度については、消火活動等の影響に起因すると考えられる違いも見受けられた。延焼モデルの妥当性を実際に発生した市街地火災との比較だけで検証することは、火災当時の市街地状況を正確に把握することが困難であるため限界もある。そこで今後は、建物単体もしくは複数棟を対象として実施された実験など、検討条件が把握可能な対象との比較を行うことで、モデルの検証を継続していくことが重要と考えられる。

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費（若手研究者の自立的研究環境整備促進）を受けて実施した。

注

注1) 延焼性状の予測には、計算の前提条件となる建物構造被害や出火位置に関する情報が必要となるが、本モデルではこうした条件の予測は行わず、計算条件として陽に与えられているものとする。なお、地震動による建物構造被害、地震出火のいずれについても、既に多くの予測モデルが提案されていることから、こうした予測モデルを組み合わせることで、将来の発生が予想される地震火災についても延焼性状を予測することができる。

注2) 本研究での建物の建物損傷レベルの定義は、以下のようになる。

- (0) 被害なし・軽微：ア)外見上被害がまったくない。イ)一部の屋根瓦に損傷。ウ)一部の垂れ壁・腰壁・仕上げ材にひび割れ。
- (1) 小破：ア)大部分のレンガおよび一部の屋根瓦が破損。イ)一部の壁にひび割れ。ウ)一部の壁仕上げ材が脱落。エ)基礎の一部にひび割れ。
- (2) 中破：ア)大部分の壁・垂れ壁・腰壁にひび割れが生じ、一部が脱落。イ)大部分の屋根瓦が破損・ウ)基礎のひび割れが著しい。
- (3) 大破：ア)大部分の壁・垂れ壁が破損し、内外装材がほとんど脱落。イ)筋かいが折損し、柱・梁に割れが生じ、床が破損。
- (4) 倒壊：ア)屋根・壁・床・柱等の破損が全面にわたり、建物の変形が著しい。イ)周辺地盤の崩壊により、建物の変形が著しい。

注3) 本モデルでは、例えば2階建ての1階部分で層崩壊が起こった建物の場合に、2階部分の内部空間が保持されていたとしても、「(II)倒壊建物」と分類され、ク립火災を仮定した燃焼計算が行われる。また、構造的には「(4)倒壊」と判定され、軸組が大きく傾いているものの、内部空間が保持されている場合についても同様となる。こうした建物の火災性状については、ク립火災を仮定した計算が適当ではない場合もあるものと考えられ、今後の検討が必要と考えられる。

注4) 空隙率 ϕ は、倒壊建物の占有体積 V と、散開した部材が隙間なく積み上げられた場合の正味の体積 V_{net} を用いて次のように表わされる。

$$\phi = \frac{V - V_{net}}{V} \quad (a1)$$

本研究で使用した空隙率 ϕ は、過去に伝統木造住宅を対象として実施された重量測定結果²⁹⁾を参考にして求めた。測定対象となった建物の建築面積 A_{R} は 72m^2 、階高 H_R は 3m であり、3.2節に示した定義に基づいて占有体積 V を求めると概ね次のようになる。

$$V \approx H_R (\sqrt{A_{R}} + H_R)^2 \approx 396\text{m}^3 \quad (a2)$$

部材の構成比をもとに換算した正味の体積 V_{net} は 77m^3 となったので、これを式(a1)に代入することで空隙率 ϕ には 81% を得た。

注5) 建物損傷レベルと残留傾斜角 θ の対応関係は構法によっても異なるため、本来であれば一義的に定められるものではないが、ここでは過去の地震被

害調査に用いられた被災度判定基準¹²⁾、および、建築基準法における損傷限界変位 ($1/120$) や安全限界変位 ($1/30$)²⁹⁾ といった基準を参考にして設定した。

注6) 本研究では、資料の制約上、モルタル仕上げの鉄骨造建物を対象とした調査結果を利用する。ただし、層間変形角と構造被害の関係は構法によっても異なるため、ここで設定した建物損傷レベルと外壁損傷レベルの対応関係が、例えば木造建物に対しても適当である保証はない。今後、利用可能な資料が拡充されれば修正を加える必要がある。

参考文献

- 国土交通省：都市再生のための防災まちづくり、ぎょうせい、2003。
- 浜田稔：火災の延焼速度について、火災の研究 I、1951。
- 堀内三郎：建築防火、朝倉出版、1973。
- 建設省：都市防火対策手法の開発、総合技術開発プロジェクト、1982.12。
- 東京消防庁：直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策、火災予防審議会答申、1997。
- 糸井川栄一・塚越功：飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル、第23回日本都市計画学会学術研究論文集、pp.469-474、1988。
- Himoto K, Tanaka T. A Physically-based Model for Urban Fire Spread. Proc. 7th IAFSS Symposium, pp.129-140, 2002.6。
- 国土交通省：まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発、総合技術開発プロジェクト、2003.3。
- 樋本圭佑・田中喺義：都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発、日本建築学会環境系論文集、No.607、pp.15-22、2006.9。
- Himoto K, Tanaka T. Development and Validation of A Physics-based Urban Fire Spread Model. Fire Safety Journal, Vol.43, No.7, pp.477-494, 2008.10。
- 日本建築学会：1982年浦河沖地震・1983年日本海中部地震災害調査報告、1984.12。
- 菅原淳一・林康裕・福和伸夫：建物被害データに基づく各種の被災度指標の対応関係の分析、構造工学論文集、Vol.46B, pp.121-134, 2000.3。
- Babrauskas V. Heat Release Rates, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed., 2002。
- 岡田成幸・高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造系論文集、No.524, pp.65-72, 1999.10。
- Zukoski EE, Kubota T, Cetegen B. Entrainment in Fire Plumes, Fire Safety Journal, Vol.3, pp.107-121, 1980/1981。
- 田中喺義：建築火災安全工学入門 改訂版、日本建築センター、2002。
- Thomas PH. Some Aspects of the Growth and Spread of Fire in the Open, Forestry, Vol.40, No.2, pp.139-164, 1967。
- 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック、丸善、2004。
- 国土交通省住宅局建築指導課ほか編：耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説、井上書院、2001.3。
- 林康裕・吹田啓一郎・井上真木：1995年兵庫県南部地震に基づく鉄骨造建物の被害率曲線、日本建築学会構造系論文集、No.585, pp.193-198, 2004.11。
- 自治省消防庁消防研究所：兵庫県南部地震における神戸市内の市街地火災調査報告（速報）、1995.3。
- 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、1996.3。
- 神戸市消防局：阪神・淡路大震災における火災状況、1996.8。
- 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、1996.11。
- 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、1997.12。
- 日本建築学会編：阪神・淡路大震災調査報告-建築6、丸善、1998.10。
- 杉本綾亮・田中喺義・樋本圭佑・秋元康男・北後明彦：市街地延焼予測に関する建築物開口割合の実測手法に関する研究、日本火災学会研究発表会概要集、pp.322-325, 2006.5。
- 鈴木祥之・下西智也・清水秀丸・須田達・小笠原昌敏・杉山亮太：伝統木造住宅の重量算定、日本建築学会技術報告集、第24号、pp.131-136, 2006.12。
- 平成12年建設省告示第1457号（平成19年一部改正）、2007.6。

(2010年1月7日原稿受理、2010年4月6日採用決定)