

京都市内にある文化財建造物の地震火災による焼失リスク

樋本圭佑・田中哮義

要 旨

本研究では、京都市東山区内の7つの文化財建造物を対象として、地震火災による焼失リスクの評価を行った。評価にあたっては、筆者らがこれまでに開発した市街地火災延焼モデルを利用し、出火、消火活動、地震動による建物構造被害、気象の各条件の不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。分析の結果、六波羅蜜寺、法観寺、建仁寺の焼失リスクは、それらを取り囲む一般家屋の焼失リスクと同等であることが分かった。このことは、これらの文化財建造物が周辺の家屋と一体的に市街地を形成しており、周辺からの延焼火災の被害を受け易くなっていることを示している。

キーワード：京都、文化財建造物、地震火災、延焼モデル

1. はじめに

歴史都市・京都には多数の文化財建造物が集積している。平成22年4月現在、国によって重要文化財に指定される建造物は201件、このうち国宝に指定されるものは40件となっている。この他にも、府・市によって指定されるものや、未指定ながらも文化的価値が高い建造物は多く、その集積状況は際立っている。これらは、京都のまちを特徴付ける重要な要素となっており、歴史都市としての特異な位置づけを今後も維持していくためには、文化財建造物を適切に保全し、後世に継承していくことが欠かせない。

一方、京都には低層の木造家屋が密集する市街地が広範囲に残されている。こうした木造密集市街地の中で火災が発生すれば、家屋間の間隔が狭いため燃え広がりが起こり易い。特に地震時には、複数の火災が同時に発生し、上水道や貯水槽といった設備が破損する事態も想定される。こうした中で円滑に消火活動を行うことは困難であり、消し止めることができないいくつかの火災は大規模な延焼火災へと発展する可能性もある。

京都市内の文化財建造物には、こうした木造密集市街地の中に立地しているものが少なくない（photo 1）。仮に、周辺市街地で延焼火災が発生すれば、文化財建造物が巻き込まれて焼失する可能性もある。このため、文化財建造物を火災被害から守るには、通常想定されることの多い平常時の「敷地内で発生

する火災」に加え、地震時の「周辺市街地で発生する火災」への備えを同時に講じておく必要がある。

「周辺市街地で発生する火災」への対策を講じるにあたっては、対象となる文化財建造物だけではなく、周辺市街地の実態を反映した延焼危険性を把握しておく必要がある。

そこで本研究では、「周辺市街地で発生する火災」に着目した文化財建造物の焼失リスク評価手法を整備することを目的とする。また、整備した手法を用いることで京都市東山区内のいくつかの文化財建造物を対象としたケーススタディを行い、地震延焼火災の危険性の実態を分析する。



Photo 1. Designated architectural monument located in the middle of densely-built urban area.

2. 文化財建造物の焼失リスク評価

2.1 関連する既往研究

地震延焼火災による文化財建造物の焼失の危険性は以前から指摘されてきたが（地震火災から文化財を守る協議会，1999），これまでに定量的な分析が加えられた例はほとんどない。ただし，わが国では古くから常習的に市街地火災が発生してきたこともあり，市街地そのものの延焼危険性を評価する試みは数多くなされてきた。こうした研究は，「(1) 市街地空間特性の分析に基づくもの」（建設省，1982；糸井川ら，1991；加藤ら，1999；齋藤ら，2006；加藤ら，2006）と，「(2) 延焼モデルを利用するもの」（樋本ら，2004；樋本ら，2008；川越ら，2008）に大別することができる。

このうち，(1) には，対象地域の建物面積率や空地率などをもとに市街地指標を導出するもの（建設省，1982；糸井川ら，1991）や，建物の燃焼特性や隣棟間の延焼確率をもとに延焼危険性をモデル化するもの（加藤ら，1999；齋藤ら，2006；加藤ら，2006）がある。こうした方法は大きな被害の発生が想定される地域を比較的簡便な手続きによって抽出できるといった特長があり，例えば町丁目単位の評価といったように，ある一定の広がりをもつ市街地の延焼危険性の評価に利用される場合が多い。

一方，延焼モデルを利用する(2)では，ある地点で発生した火災の燃え広がりを時系列に予測することで市街地の延焼危険性を評価する。延焼モデルには様々なものがあるが，このうち，現象の物理的知見に基づき構築された延焼モデル（Himoto et al., 2002；国土交通省，2003；樋本ら，2006；樋本ら，2010）では火災拡大のメカニズムが明示的に定式化されており，各種対策の効果を延焼予測計算に反映させ易いといった特長がある。過去には，物理的延焼モデルを利用することで建物の開口部や壁に防火補強を施した場合の延焼危険性の低減効果が検証されるなどしている（樋本ら，2004；樋本ら，2008；川越ら，2008）。

2.2 被害発生の不確実性を考慮した評価

文化財建造物を対象とする焼失リスク評価では，市街地を面的に捉えるのではなく，その中の特定の建造物に対する評価が必要となる。また，リスク評価の結果を防災計画の検討等に活用するには各種防火対策の効果を定量的に検証できなければならない。そこで本研究では，上記の要件を満たす物理的延焼モデル（樋本ら，2010）を利用することで文化財建造物の焼失リスクを評価するための手法を整備する。

本延焼モデルでは，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。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延焼が発生する点にある。ここでは，地震動による建物の損傷レベルを，(0) 被害なし・軽微，(1) 小破，(2) 中破，(3) 大破，(4) 倒壊の5段階に分類し，これを，(a) 柱や梁など軸組の損傷，(b) 壁・扉・窓ガラスなど面材の欠損，(c) モルタルやALCパネルなど外装材の剥落，といった被害内容に読み替えることで個々の建物の構造的損傷状況を考慮した火災性状計算を行う。

なお，市街地火災の延焼性状は，例えば出火条件や気象条件などのように，その時，その場所で確率的に変動する要因によって大きく左右される。従来の評価（樋本ら，2004；樋本ら，2008；川越ら，2008）では，こうした点に関する検討が十分ではなかった。本研究では，文化財建造物の被害発生に影響を及ぼす不確実要因の關係に着目することとし，それらの発生確率を考慮した分析を行えるようにする。

2.3 焼失リスクの定義

地震に伴って火災が発生し，これが延焼して文化財建造物に到達するまでの流れを Fig.1 に示す。また，これをイベントツリーにしたものが Fig.2 である。ここでは，「(I) 地震の発生の有無」，「(II) 出火の発生の有無」，「(III) 初期消火活動の成否」，「(IV) 延焼の発生の有無」の4つの排反事象を考え，それらの発生確率の組み合わせから被害の発生確率を求める。すなわち，「(I) 地震」が発生し（ p_E ），周辺市街地で「(II) 出火」が発生し（ p_I ），「(III) 初期消火活動」が失敗し（ $\bar{p}_{FF}$ ），対象となる建造物まで「(IV) 延焼」が発生（ p_S ）した場合に，文化財建造物が焼失するものとする。

本研究では地震延焼火災によって特定の建物が焼失する確率を焼失リスク R_k と定義することとし，これを文化財建造物が曝されている危険性の尺度とみなす。上述した各確率事象の発生確率を考慮すると，焼失リスク R_k は次式より評価することができる。

$$R_k = p_{E,k} \cdot \sum_{i=1}^N [p_{I,i} \cdot \bar{p}_{FF,i} \cdot p_{S,i}] \quad (1)$$

ここで， k は想定する地震の種別， i は地震種別 k の下での出火件数（最大 N ）を表している。ただし，複数の出火がある場合の「(III) 初期消火活動」の失敗確率 $\bar{p}_{FF}$ は，そのうちの少なくとも1件の消火に

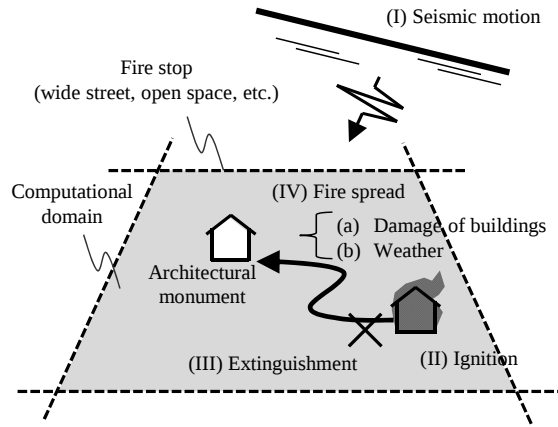


Fig.1 Flow of event before the architectural monument gets ignited in case of post-earthquake fire spread.

失敗し、そこからの火災延焼を許す確率のことを指している。なお、一般的なリスクの定義として、損失 L の期待値が採用されることもある。この場合、損失 L の定義が別途必要であるが、文化財建造物のように再生・代替が困難なもの場合には様々な観点からの定義が可能であり、一般的な合意が得られた定義は存在しない。そこで本研究では、損失 L にはよらない、焼失確率を焼失リスク R_k とした。

上式(1)で定義される焼失リスク R_k は各事象の発生確率を考慮したモンテカルロシミュレーションにより評価する。なお、「(I) 地震の発生の有無」は延焼火災の発生そのものを左右する重要な要因であることから、その発生確率 p_E を含めた焼失リスク R_k の定式化を行った。わが国において発生が想定されているいくつかの地震については、 p_E の推定結果（地震調査研究推進本部，2011）が公表されている場合もあり、焼失リスク R_k の評価にこうした成果を活用することは可能である。しかし、地震の活動間隔などによってその推定精度が異なると考えられることや、本研究のケーススタディで対象となる全ての想定地震の p_E が得られているわけではない。そこで、式(1)の p_E 項を含めたリスク評価の実施は今後の検討課題とし、本研究では地震そのものの発生は所与とすることとした。

物理的延焼モデル（樋本ら，2010）は、「(II) 出火」が起こり、「(III) 初期消火活動」が失敗した後に発生する延焼火災の拡大予測と、その結果もたらされる文化財建造物への「(IV) 延焼」の発生予測に利用する。ただし、市街地火災の延焼性状は出火件数や出火場所といった「(II) 出火」に関する条件が定まったからといって一意に決まるものではない。ここでは、建物の火災性状や建物間の火災拡大性状に影響を及ぼす「(IV-a) 地震動による建物損壊条件」

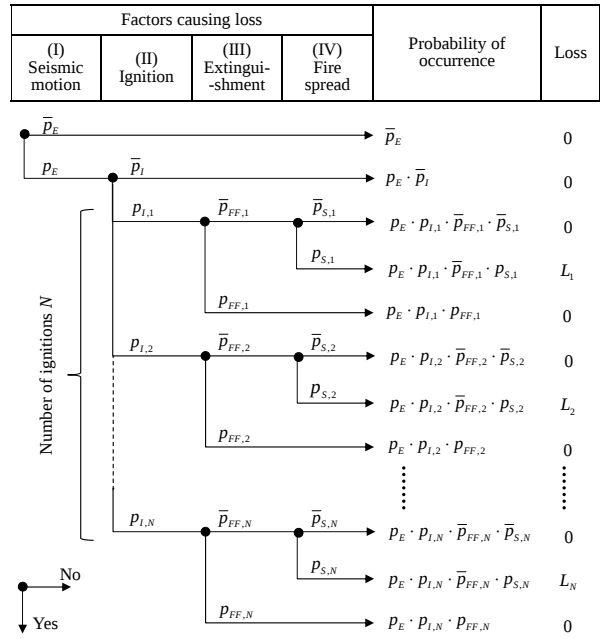


Fig.2 Event tree for the occurrence of damage due to post-earthquake fire spread.

と「(IV-b) 気象条件」の各不確実要因を延焼予測計算に反映させることで文化財建造物への「(IV) 延焼」の発生確率 p_s を評価する。

また、被害が広範囲の市街地に及ぶ地震延焼火災の性質上、「(II) 出火」や「(IV) 延焼」といった確率事象の評価においては、対象となる文化財建造物だけではなく、その周辺の市街地を含めた検討が必要となる。ただし、市街地の全領域を計算対象とすることは合理的ではないことから、対象となる文化財建造物を含み、計算領域外で発生した火災によってその文化財建造物が焼失する可能性がないような、外縁を延焼遮断帯によって区切られた市街地を計算領域として設定する。この場合、計算領域内で発生した火災のみに着目することで焼失リスク R_k の評価が可能となる。

3. 京都市内の文化財建造物の焼失リスク

京都市東山区内の市街地状況を Fig.3 に示す。この中には、「八坂神社」、「高台寺」、「法観寺」、「地主神社」、「清水寺」、「六波羅蜜寺」、「建仁寺」といった重要文化財に指定される建造物を所有する 7 社寺が立地している。その指定状況は Table 1 に示す通りである。この他にも、重要伝統的建造物群保存地区に指定される産寧坂地区や、独自の町並み保全の取り組みを進める祇園町南側地区などが含まれ、比較的良好に歴史的景観が保全されている。

一方で、これらを取り囲むようにして建ち並ぶ家

Table 1 Designated important cultural properties in the computational domain

Name of site	Name of structure
Yasaka Jinja	Ishi-Dorii, Honden ^{*1} , Massha-Ebisusha-Shaden, Rohmon
Kodaiji	Kaizandoh ^{*1} , Kangetsudai, Karakasatei and Shiguretei, Tamaya, Omotemon
Hokanji	Goju-no-toh ^{*1}
Jishu Jinja	Haiden, Honden ^{*1} , Sohmon
Kiyomizudera	Hondoh ^{*1} , Niohmon, Umatodome, Nishimon, Sanju-no-toh, Shoroh, Kyodoh, Tamuradoh, Asakuradoh, Chinjudoh, Honboh-Kitasohmon, Todorokimon, Shakadoh, Amidadoh, Okuin, Koyasutoh
Rokuharamitsuji	Hondoh ^{*1}
Ken-ninji	Hohjoh ^{*1} , Chokushimon

*1 structure of which burn-down risk was analyzed

Table 2 Burning and thermal properties of building

		General building / Warehouse	Sturdy building / High-rise building
Live fire load		30kg/m ²	30kg/m ²
Dead fire load		100kg/m ²	30kg/m ²
Wall	Width	90mm	120mm
	Thermal conductivity	1.30×10^{-3} kW/mK	1.30×10^{-3} kW/mK
	Density	2,000kg/m ³	2,400kg/m ³
	Specific heat	0.80kJ/kgK	0.80kJ/kgK
	Equivalent burn-through time	Exterior wall : 30min Roof and floor : 20min	No burn-through considered
Door	Width	3mm	
	Thermal conductivity	0.78×10^{-3} kW/mK	
	Density	2,540kg/m ³	
	Specific heat	0.77kJ/kgK	
	Equivalent burn-through time	5min	20min

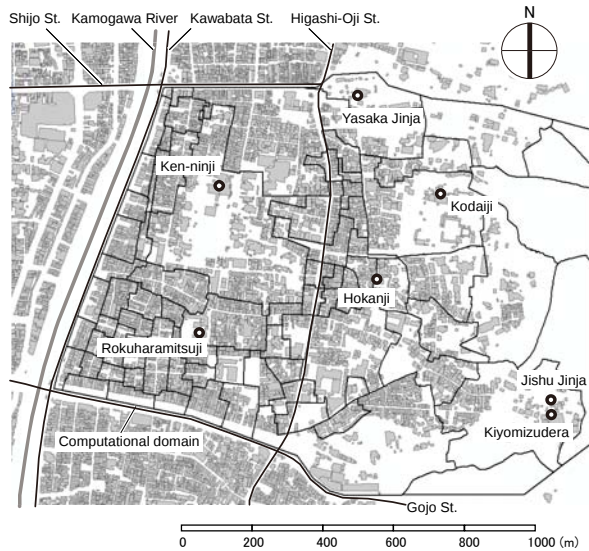


Fig.3 Location of designated architectural monuments in Kyoto Higashiyama area.

屋には防火性能が必ずしも高くない低層木造が多い。このため、この中のいずれかの家屋で火災が発生すれば、隣接する家屋への延焼が起こり、大規模火災に発展しやすい市街地構造となっている。京都市第3次地震被害想定（京都市，2003）では、こうした

大規模火災のきっかけとなる地震が、「(A)花折断層」，「(B) 桃山-鹿ヶ谷断層」，「(C) 宇治川断層」，「(D) 檜原-水尾断層」，「(E) 光明寺-金ヶ原断層」，「(F) 有馬-高槻断層系」，「(G) 琵琶湖西岸断層系」といった複数の内陸型活断層によって引き起こされる可能性があることを指摘している。また、海溝型地震の中では「(H) 南海・東南海地震」が最も大きな被害をもたらす可能性があることを指摘している。

本研究では、Table 1 に記す文化財建造物のうち各社寺から主要な建造物を 1 棟選び、上記地震に伴って発生する延焼火災によって、これらの文化財建造物が焼失するリスク R_k の評価を行う。

3.1 計算条件

焼失リスク R_k を評価するためのモンテカルロシミュレーションでは、不確実要因を考慮した延焼予測計算の試行回数を各地震につき 2,000 回とした。また、各試行の計算時間は出火から 48 時間とした。その他の計算条件は以下の通りである。

(1) 市街地状況に関する条件

延焼遮断帯を境界とする計算領域は Fig.3 に示すように設定した。延焼遮断が可能となる条件は火災の規模や気象条件などにより変わるが、ここでは道

路や空地などによって建物間隔が 20m 以上となるオープンスペースの繋がりを延焼遮断帯とみなした。

建物平面形状、建物高さ、構造、および市街地の地形に関する情報は、都市計画図ならびに航空測量の結果をもとに作成した。計算領域内に含まれる建物棟数は 4,597 棟であり、このうち 3,987 棟が普通建物、52 棟が無壁舎、残る 558 棟が堅牢建物もしくは高層建物に分類された。ここでは、このうち普通建物と無壁舎の防火性能が防火木造のそれに、それ以外の防火性能が RC 造のそれに、それぞれ相当するものと仮定し、Table 2 に示すように燃焼・熱伝達特性を設定した。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 つの検査体積とした。

開口形状については、既往の実態調査（杉本ら、2006）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。

$$r_D = \begin{cases} 0 & (L < L_1) \\ 0.3(L - L_1)/(L_2 - L_1) & (L_1 \leq L < L_2) \\ 0.3 & (L_2 \leq L) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 L は当該壁面と最も近接する壁面との距離、 L_1 と L_2 は基準距離であり、それぞれ 1m、5m とした。

(2) 不確実要因に関する条件

本リスク評価では、火災延焼による被害発生を左右する不確実要因として以下の条件を考慮することとしている（Table 3）。

- (II) 出火条件（日時、件数、場所）
- (III) 初期消火活動条件（初期消火の成否）
- (IV-a) 建物損壊条件（5 段階の建物損壊レベル）
- (IV-b) 気象条件（市街地風の風速、風向）

要因(II)については、出火の発生日時を無作為に与えることとし、仮に複数の出火がある場合であっても全ての出火は同時に起こるものと仮定した。これは、通常の地震において、出火の多くが地震発生から短い時間で発生しているためである（日本建築学会、1998）。このときの出火件数と出火建物は計算領域内の全ての建物の出火判定を個別に行うことで求める。ただし、建物一棟あたりの出火確率 p_{ign} は規模や用途などにはよらないものとし、全ての建物に対して一律に与えられるものとする。この場合、計算領域内での出火件数が i となる確率 $p_{I,i}$ は次の二項分布で求めることができる。

$$p_{I,i} = {}_M C_i (p_{ign})^i (\bar{p}_{ign})^{M-i} \quad (3)$$

ここで、 M は計算領域内の建物棟数である。ただし、

Table 3 Scenario earthquakes with uncertain parameters

Active fault / Earthquake ¹⁵⁾				Uncertain parameters		
ID	Name	Magnitude	Expected Seismic Intensity (Japanese) in Higashiyama area	(I) Probability of occurrence p_E	(II) Probability of ignition (reference) $p_{ign,0}^{15)}$	(III) Probability of extinguishment at initial stage of fire $P_{ext}^{17)}$
A	Hanaore	7.5	6-upper ~ 7		0.000169	0.2
B	Momoyama-Shishigatani	6.6	6-lower ~ 7		0.000085	
C	Ujigawa	6.5	5-lower ~ 6-upper		0.000042	
D	Kashihara-Mizuo	6.6	4 ~ 6-lower		0.000042	
E	Komyoji-Kanegahara	6.3	4 ~ 5-upper		0.000042	
F	Arima-Takatsuki	7.2	5-lower ~ 6-lower		0.000042	
G	Biwako-Seigan	7.7	5-lower ~ 6-lower		0.000085	
H	Nankai-Tohnankai	8.5	5-lower ~ 6-lower		0.000042	

Uncertain parameters (continued)					
(IV-a) Damage ratio of buildings ¹⁵⁾					(IV-b) Weather condition ¹⁸⁾
(0) No damage	(1) Minor damage	(2) Moderate damage	(3) Major damage	(4) Collapse	Time-series data obtained from AMeDAS weather data
0.348	0.127	0.114	0.292	0.119	
0.517	0.093	0.131	0.207	0.051	
0.979	0.008	0.004	0.008	0	
0.996	0.004	0	0	0	
1	0	0	0	0	
0.970	0.021	0.004	0.004	0	
0.920	0.064	0.008	0.008	0	
0.996	0.004	0	0	0	

建物一棟あたりの出火確率 p_{ign} は次のように求めることとした。

$$p_{ign} = C_I \cdot p_{ign,0} \quad (4)$$

ここで、 $p_{ign,0}$ は冬季 18 時における基準出火確率、 C_I は建物内部の火気使用率に基づく季節別・時刻別の変動係数である。基準出火確率 $p_{ign,0}$ の値は Table 3 に、変動係数 C_I の分布は Fig.4 に、それぞれ示してある。いずれも京都市第 3 次地震被害想定（京都市，2003）の東山区内での結果をもとに設定した。ただし、変動係数 C_I については、11 月から 4 月を冬季、5 月から 10 月を夏季としている。式(3)，(4)を用いると基準時である冬季 18 時における、計算領域内の出火件数の確率分布 $p_{i,i}$ が Fig.5 に示すように得られる。

要因(III)の初期消火活動の失敗確率 $\bar{p}_{FF}$ は、出火のあった全ての建物に対する消火活動の成否を個別に判定することで求める。出火一件あたりの初期消火活動の成功確率を p_{ext} とおくと、出火件数が i の場合の初期消火活動の失敗確率 $\bar{p}_{FF}$ は次のように求まる。

$$\bar{p}_{FF,i} = 1 - (p_{ext})^i \quad (5)$$

ただし、出火一件あたりの初期消火活動の成功確率 p_{ext} は兵庫県南部地震の際の実績を参考に 0.2 とした（日本建築学会，1998）。なお、本来であれば、ここで考慮している初期消火活動に加え、火災が拡大した後に行われる消火活動の効果もリスク評価に反映させる必要がある。ただし本研究では、長時間の消火活動を行うために必要となる上水道や貯水槽といった設備は地震動によって破損し、火災が拡大してからの消火活動は行えなくなるものと仮定した。

要因(IV-a)の建物損壊条件については、京都市第 3 次地震被害想定（京都市，2003）の東山区内での推定結果をもとに、表3に示すように建物被害率を設定した。ただし、建物の損壊レベルは5段階に分類されており、各損壊レベルの構成比率に基づいて確率的に計算領域内の個々の建物の損壊レベルを決定した。

要因(IV-b)の気象条件については、出火日時に対応する市街地風の風向と風速を AMeDAS 標準年気象データ（1981 年～1995 年）（AIJ，2003）から抽出し、火災が継続している間の時間変動を与えた。京都市における風速の確率分布は Fig.6 に、風向の確率分布は Fig.7 に示す通りとなっている。

3.2 計算結果の概要

(1) 延焼予測計算の結果の一例

花折断層を震源とする地震が発生した場合の延焼

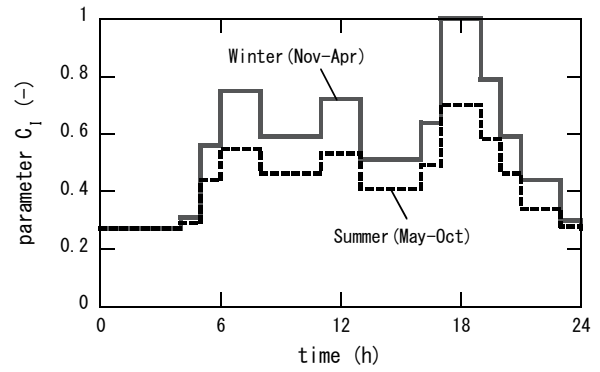


Fig.4 Season- and time-dependent variability for the probability of ignition.

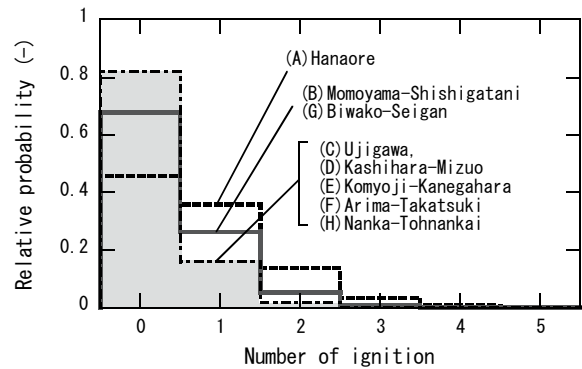


Fig.5 Probability distribution of ignition at reference season and time.

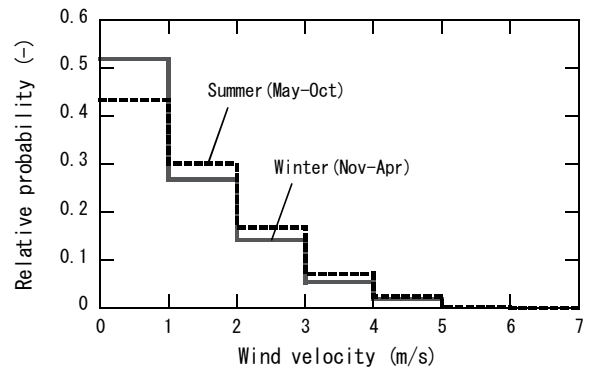


Fig.6 Frequency of wind velocity in Kyoto city.

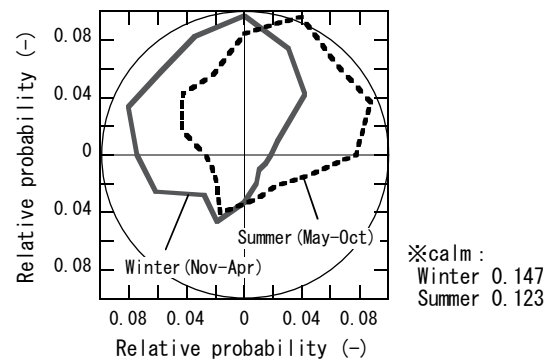
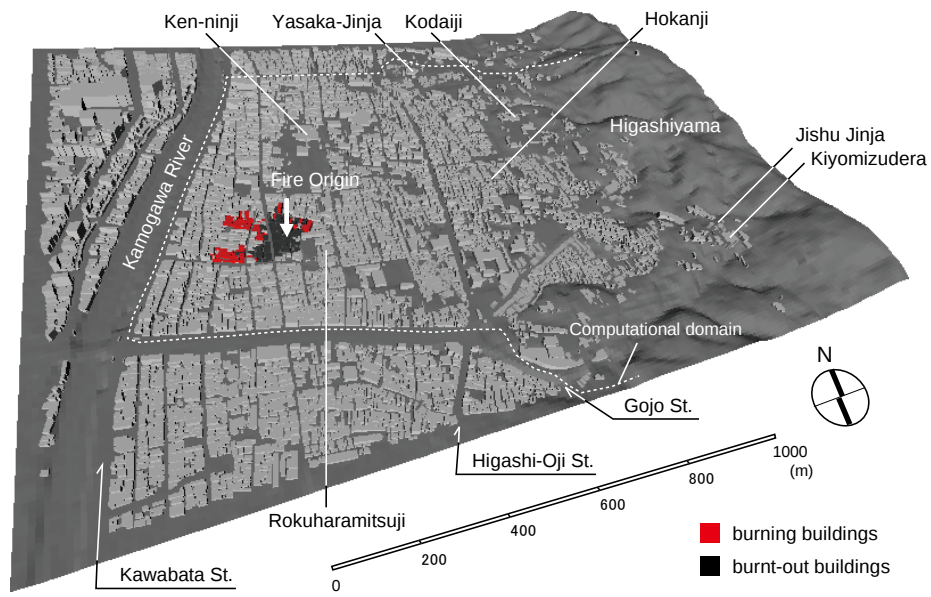
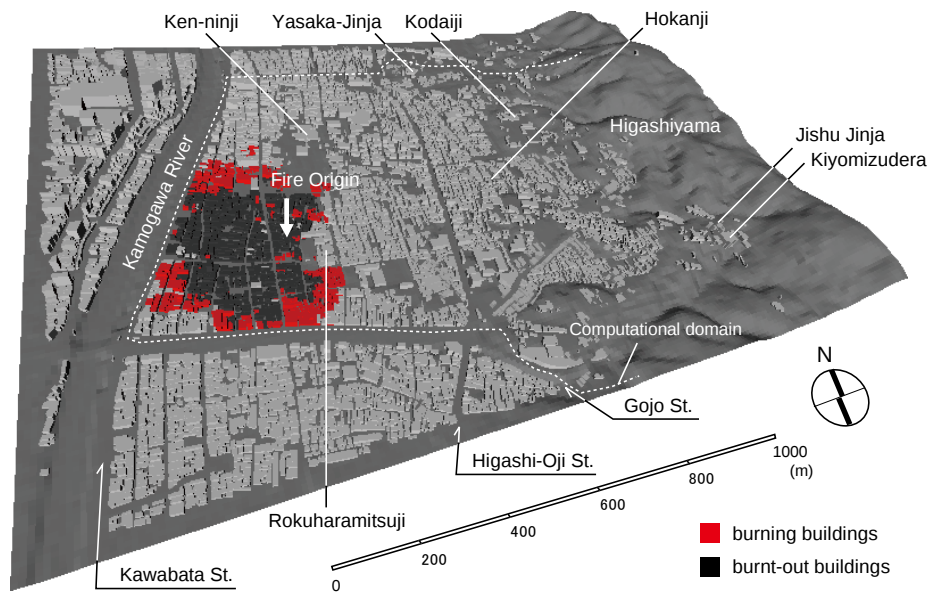


Fig.7 Frequency of wind direction in Kyoto city.



(a) 5 hours after the outbreak of fire



(b) 10 hours after the outbreak of fire

Fig.8 One of the results of the fire spread simulation for the Hanaore-fault earthquake.

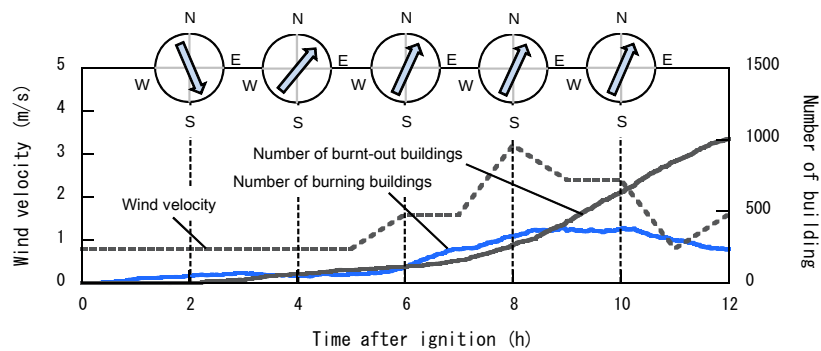


Fig.9 Transition of wind condition and the number of damaged buildings in the same simulation shown in Fig.8.

予測計算の結果の一例をFig.8に示す。この場合、出火点はFig.8中に矢印で示す1ヶ所である。まず、出火から5時間後の様子 (Fig.8 (a)) を見ると、この時点での火災の勢いは比較的低調である。燃焼中建物数は少なく、出火点の東側および南側には部分的に燃え止まりが発生している。しかし、出火から10時間後の様子 (Fig.8 (b)) を見ると、焼失領域が大きく広がっており、火災前線の南側は五条通に、東側は鴨川に達している。

さて Fig.9 は、Fig.8 に示した延焼予測計算の結果における、市街地風の風速と火災の規模の時間変化を示している。市街地風の風速は、出火当初1m/s未満であったが、出火から5時間を経過したあたりから次第に大きくなり、出火から8時間後には最大の3.2m/sとなった。焼失領域の大幅な拡大は風速が増したこの時間帯に発生しており、市街地風によって吹き倒された火災気流や飛び火の影響が増し、延焼火災の勢いが激しくなっていたことが推測できる。

(2) モンテカルロシミュレーションの結果

以上のような延焼予測計算を利用したモンテカルロシミュレーションを行った結果、計算領域内で出火があった場合の、想定地震ごとの焼失棟数の相対確率分布が Fig.10 に示すように得られた。ただし Fig.10 には、想定する8通りの地震のうち、「(IV-a) 建物被害率」の傾向が異なる「(A) 花折断層」、「(B) 桃山-鹿ヶ谷断層」、「(E) 光明寺-金ヶ原断層」を震源とする地震が発生した場合の結果を示している。これによると、本計算で仮定する放任火災であっても、500 棟未満の焼失で収まる火災がある一方で、対象市街地のほぼ全域を焼失する火災も高い頻度で発生していることが分かる。これは、対象市街地内にオープンスペースや防火性能の高い建物が少ないため、一度火災が発生すれば燃え止まりが生じ難いことを示している。

Fig.10 の結果を比較すると、地震動による「(IV-a) 建物被害率」が小さいほど大規模な火災が起こり易い傾向があることが分かる。地震動により家屋が倒壊した場合には、外装材で覆われていた可燃性部材が外部に露出することで防火性能が低下し、火災延焼が起こり易くなる場合がある。

この一方で、倒壊によって家屋形状が変われば、隣接する火災家屋からの加熱を受け難くなり、火災延焼が起こり難くなる場合もある。地震動による建物被害は、これらの異なる効果をもたらすが、本計算ではこのうちの後者の効果がより顕著に表れ、火災延焼をもたらす家屋間の繋がりが分断されたものと考えられる。

なお本計算では、上水道や貯水槽といった長時間

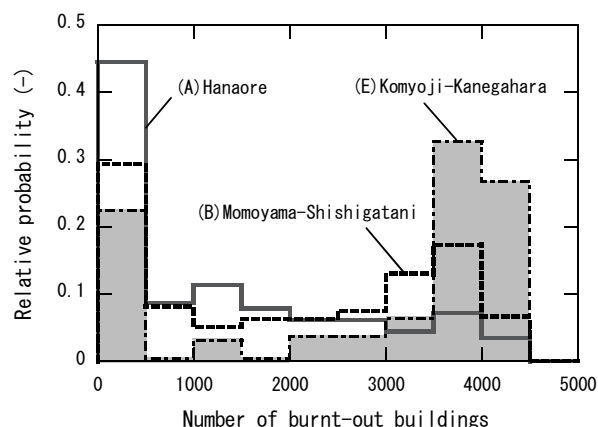


Fig.10 Distribution of relative probability for the number of burnt buildings.

の消火活動を行うために必要となる設備は地震動によって破損し、一度発生した火災に対しては消火活動が行えなくなるものと仮定した。しかし、想定地震の中には「(IV-a) 建物被害率」が小さい地震も含まれており、こうした地震については上記の仮定が適切ではなくなる場合もあるものと考えられる。このため、Fig.10 に示した結果のうち、「(E) 光明寺-金ヶ原断層」のように「(IV-a) 建物被害率」が小さい地震の確率分布については、規模の大きな火災の発生確率が実際より高く推定されているものと考えられる。

(3) 文化財建造物の焼失リスク

モンテカルロシミュレーションの結果得られた文化財建造物の焼失リスク R_k は Table 4 に示す通りとなった。

このうち花折断層を震源とする地震が発生した場合の焼失リスク R_k を比較したものが Fig.11 である。 R_k の値には大きなばらつきが見られ、最大は六波羅蜜寺の 0.096、最小は八坂神社の 0.003 であった。文化財建造物は、 R_k の低いグループ (八坂神社、高台寺、地主神社、清水寺) と、 R_k の高いグループ (法観寺、六波羅蜜寺、建仁寺) に分けられるが、後者の焼失リスク R_k は計算領域内の全家屋の平均 0.067 に比較的近い。このことは、後者に属する文化財建造物が周辺の家屋と一体的に市街地を形成しており、火災による焼失の危険性を周辺の家屋と共有していることを示しているものと考えられる。

分析対象とした文化財建造物のうち法観寺に着目し、想定地震が異なる場合の焼失リスク R_k の違いを示したものが Fig.12 である。これによると、「(G) 琵琶湖西岸断層系」の R_k が最も高く、「(A) 花折断層」、「(B) 桃山-鹿ヶ谷断層」の R_k がそれに続いている。これらの想定地震は、いずれも基準出火確率

Table 4 Burn-down risk of architectural monuments due to post-earthquake fire spread

Active fault / Earthquake		Burn-down risk due to post-earthquake fire spread R_k							
ID	Name	Average (entire area)	Yasaka Jinja	Kohdaiji	Hokkanji	Jishu Jinja	Kiyomizu dera	Rokuhara mitsuji	Ken-ninji
A	Hanaore	0.067	0.003	0.016	0.083	0.009	0.009	0.096	0.056
B	Momoyama-Shishigatani	0.057	0.005	0.015	0.066	0.007	0.006	0.075	0.055
C	Ujigawa	0.050	0.004	0.012	0.060	0.011	0.011	0.059	0.055
D	Kashihara-Mizuo	0.039	0.006	0.010	0.048	0.007	0.007	0.045	0.041
E	Komyoji-Kanegahara	0.041	0.002	0.016	0.049	0.009	0.009	0.048	0.043
F	Arima-Takatsuki	0.053	0.006	0.016	0.062	0.008	0.008	0.065	0.054
G	Biwako-Seigan	0.078	0.007	0.024	0.089	0.018	0.018	0.093	0.083
H	Nankai-Tohnankai	0.041	0.004	0.010	0.051	0.009	0.009	0.048	0.045

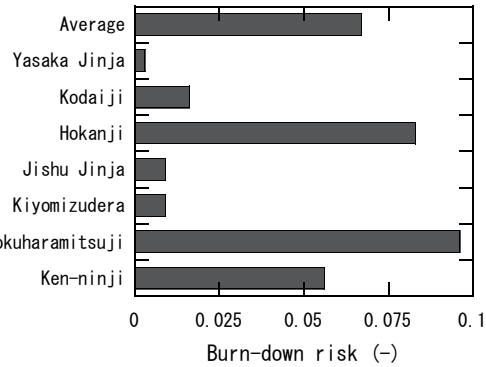


Fig.11 Burn-down risk of architectural monuments for the Hanaore-fault earthquake.

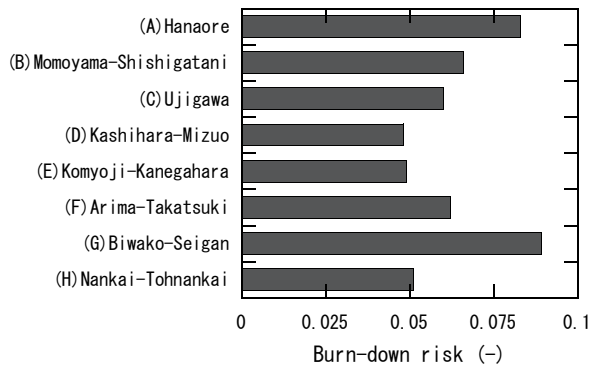


Fig.12 Burn-down risk of Hokanji with different scenario earthquakes.

$p_{ign,0}$ が高い部類に属している。しかし、「(G) 琵琶湖西岸断層系」の基準出火確率 $p_{ign,0}$ は「(A) 花折断層」のそれより低いにもかかわらず、 R_k は最も高い。これは、先に述べた「(IV-a) 建物被害率」の影響によるもので、「(IV-a) 建物被害率」が大きい「(A) 花折断層」の場合には家屋形状が変わり、火災延焼が起こり難くなっているためと考えられる。また本計算では、「(III) 初期消火活動」における出火一件あたりの初期消火活動の成功確率 p_{ext} がいずれの想定地震についても一律の値 0.2 をとるもの

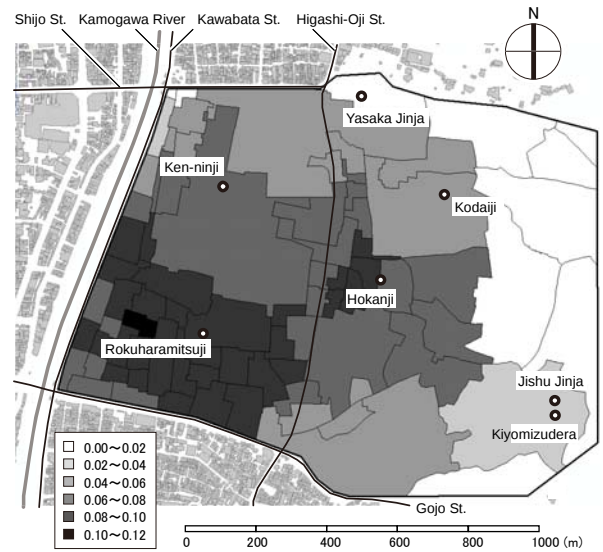


Fig.13 Average burn-down risk of buildings of each administrative unit for the Hanaore-fault earthquake.

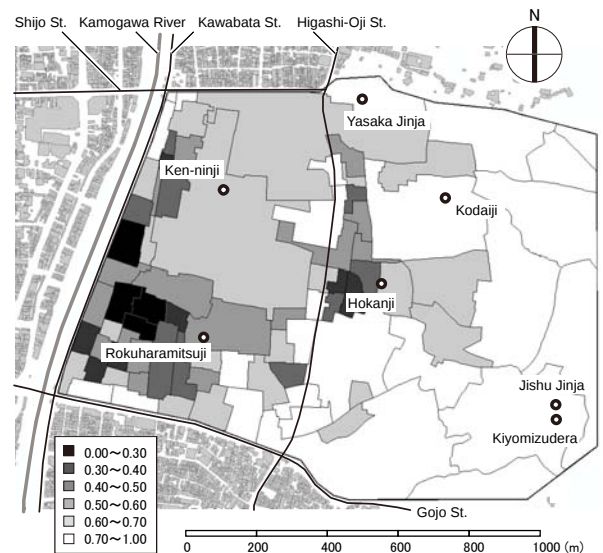


Fig.14 Fire-proof area ratio of administrative units in the computational domain.

と仮定した。しかし、これは多数の建物倒壊が発生した兵庫県南部地震の際の実績を参考にしているため、「(IV-a) 建物被害率」が小さい「(G) 琵琶湖西岸断層系」などについては p_{FF} が過小に設定され、実際に比べると焼失リスクは高く評価されているものと考えられる。

(4) 対象市街地の火災安全上の特徴

焼失リスクの評価は文化財建造物に限定されるものではなく、計算領域内の任意の家屋を対象とすることができる。そこで、「(A) 花折断層」を震源とする地震を想定した場合の、計算領域内の個々の家屋の焼失リスク R_k を町ごとに平均した結果が Fig.13 である。これによると、六波羅蜜寺周辺の計算領域南西部と、法観寺周辺の計算領域中央部に、平均焼失リスク $\hat{R}_k$ の高い町が分布していることが分かる。両者の間には幅員 15m 程度の東大路通が通っているが、これに沿うようにして $\hat{R}_k$ の低下が見られることから、東大路通が延焼遮断の機能を一定程度果たしているものと考えられる。

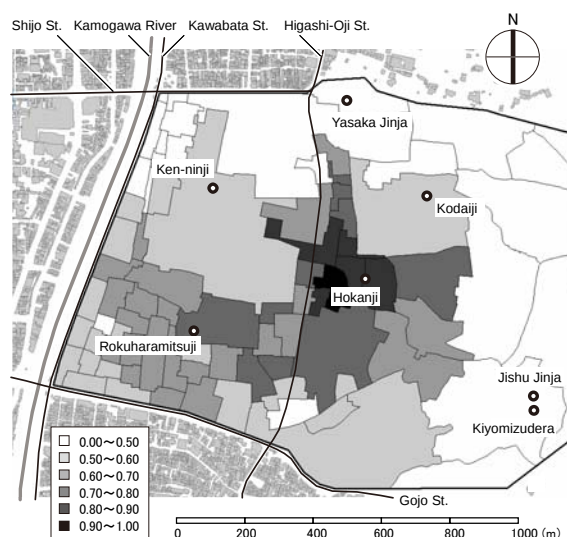
比較のために不燃領域率 r_{FP} を評価した結果を Fig.14 に示してある。ただし、不燃領域率 r_{FP} は都市防災計画の実務において延焼危険性の高い地域を抽出するために使用される指標であり、

$$r_{FP} = \frac{A_{OS} + A_{FR}}{A} \quad (6)$$

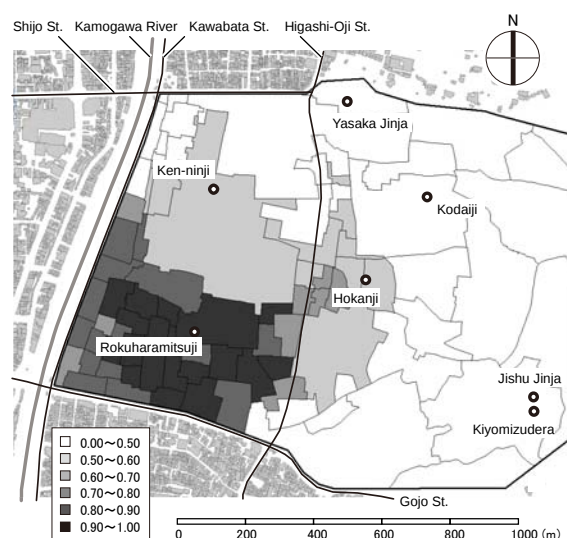
によって評価することができる（建設省，1997）。ここで、 A_{OS} は空地面積、 A_{FR} は耐火造建物によって占められる面積、 A は各町の面積である。ただし、Fig.14 では、都市計画図において堅牢建物もしくは高層建物に分類される建物を耐火建築物と見なして A_{FR} を算出した。また、延焼危険性の有無を判定する際の目安とされる、 r_{FP} が 0.7 以上（建設省，1997）の町は図中では白抜き領域として示してある。

平均焼失リスク $\hat{R}_k$ と不燃領域率 r_{FP} による評価の全体的な傾向は、計算領域の西部の延焼危険性が高くなる点などにおいて一致している。しかし、平均焼失リスク $\hat{R}_k$ によって一定の延焼危険性があると判定された町であっても、不燃領域率 r_{FP} では安全と判定された町もある。また、平均焼失リスク $\hat{R}_k$ による評価では延焼危険性が同程度の町が空間的に連続して分布しているのに対し、不燃領域率 r_{FP} では延焼危険性の高い町と低い町が混在しているなど、評価結果が一致しない点も見られた。

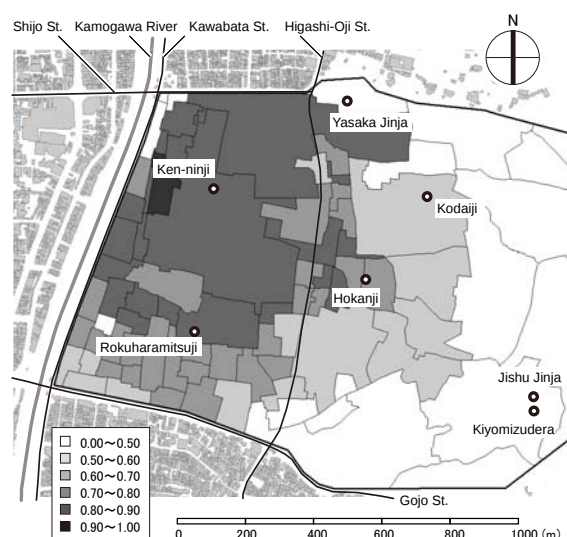
これは、例えば計算領域外周の延焼遮断帯を評価対象領域に含めるか否かなど、不燃領域率 r_{FP} の評価手続きに一定の任意性があることが原因と考えられる。また、不燃領域率 r_{FP} は各評価領域内の市街地構造のみをもとに評価されており、隣接する評価領域



(a) Hokanji



(b) Rokuharamitsuji



(c) Ken-ninji

Fig.15 Average probability of concurrent burn-down for the Hanaore-fault earthquake.

との関係が評価結果には反映されないことも原因と考えられる。

(5) 一体的に整備すべき周辺市街地

文化財建造物を地震延焼火災による焼失被害から守るには、平常時の「敷地内で発生する火災」に加え、地震時の「周辺市街地で発生する火災」への備えを同時に講じておく必要がある。こうした一体的な整備の対象となる市街地を抽出することは、文化財建造物の防災計画を検討する上で欠かせない。ここでは、ある文化財建造物が地震延焼火災によって焼失する場合に、周辺の家屋が同時に焼失している確率を同時焼失確率 p_c と定義する。同時焼失確率 p_c が高い家屋は、文化財建造物と延焼危険性を共有する度合いの強い家屋とみなせることから、一体的整備の対象を抽出する際の指標として p_c を利用できるものと考えられる。

焼失リスク R_k が高く評価された「法観寺」、「六波羅蜜寺」、「建仁寺」の各文化財建造物を対象として、計算領域内の個々の家屋の同時焼失確率 p_c を町ごとに平均したものを Fig.15 に示す。ただし、これらの平均同時焼失確率 $\hat{p}_c$ は、「(A) 花折断層」を震源とする地震を想定地震とした評価結果から算出したものである。これによると、いずれの文化財建造物についても、近隣の町ほど $\hat{p}_c$ が高くなっている。「法観寺」と「六波羅蜜寺」については、平均同時焼失確率 $\hat{p}_c$ の高い町の分布が、Fig.13 に示した平均焼失リスク $\hat{R}_k$ の高い町の分布と広い範囲で共通している。一方、「建仁寺」については、他の 2 寺に比べ、平均同時焼失確率 $\hat{p}_c$ が高い町の数が少なかった。これは、建仁寺の焼失リスク R_k が他の 2 寺に比べて幾分低いことと、建仁寺の周辺で発生した火災の延焼は広い境内によって遮断され、建仁寺をまたいだ燃え広がりが起こり難いためと考えられる。以上の結果をもとに、仮に平均同時焼失確率 $\hat{p}_c$ の閾値を 0.8 と設定すると、「法観寺」は 7 町、「六波羅蜜寺」は 17 町、「建仁寺」は 2 町が一体的整備の対象として抽出できる。

4. まとめ

本研究では、地震火災の延焼性状を物理的に定式化した計算モデルを用いることで、「(II) 出火条件」、「(III) 初期消火活動条件」、「(IV-a) 建物損壊条件」、「(IV-b) 気象条件」といった不確定要因の影響を考慮した、文化財建造物の焼失リスク評価手法を整備した。また、ケーススタディとして、市街地に被害をもたらすと考えられているいくつかの地震が発生した場合の、京都市東山区内の主要な文化財建

造物の焼失リスク R_k を評価した。主要な結論を整理すると以下になる。

- (1) 「法観寺」、「六波羅蜜寺」、「建仁寺」の焼失リスク R_k は、他の文化財建造物に比べて高く、計算領域内の全家屋の平均に比較的近いことが分かった。このことは、これらの文化財建造物が周辺の家屋と一体的に市街地を形成しており、周辺からの延焼火災の被害を受け易くなっていることを示している。
 - (2) 焼失リスク R_k は「(IV-a) 地震動による建物被害率」の影響を顕著に受け、消火活動が期待できない場合には、建物被害率が小さいほど文化財建造物の焼失リスク R_k が高くなる傾向が見られた。これは、倒壊により形状が変わった家屋が多数存在する市街地では、燃え広がりが起こり難くすると評価されたためと考えられる。ただし本研究では、出火一件あたりの初期消火活動の成功確率 p_{ext} を地震動の大きさによらず一律に与え、火災が拡大した後の消火活動を考慮していない。こうした仮定が焼失リスク R_k の評価結果に及ぼす影響については今後の検討が必要である。
 - (3) 平均同時焼失確率 $\hat{p}_c$ を用いることで、文化財建造物を火災による焼失被害から守るための、一体的整備の対象となり得る市街地領域の抽出を試みた。こうした市街地領域は文化財建造物ごとに抽出されるが、 $\hat{p}_c$ の閾値を 0.8 と設定すると、「法観寺」は 7 町、「六波羅蜜寺」は 17 町、「建仁寺」は 2 町が一体的整備の対象として抽出された。また、「法観寺」と「六波羅蜜寺」のそれは、全家屋の焼失リスク R_k から求めた平均焼失リスク $\hat{R}_k$ が高い市街地領域と広い範囲で重複した。
- 本研究では、木造家屋群に取り囲まれる文化財建造物の焼失リスクの実態分析を行ったが、今後は、ここで整備したリスク評価手法を活用することで、消火活動や建物防火補強といった各種防火対策の検証や、文化財建造物の個別の状況に適した防災計画の検討を進めていく。

参考文献

- 糸井川栄一・塚越功・青木義次 (1991) : 防火地域性と市街地の防火目標に関する一考察, 第26回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.211-216.
- 加藤孝明・小出治 (1999) : 市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察, 日本建築学会計画系論文集, No.516, pp.185-191.
- 加藤孝明・程洪・亜力坤玉素甫・山口亮・名取晶子 (2006) : 建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の

- 構築, 地域安全学会論文集, No.8, pp.279-288.
- 川越裕子・長谷見雄二・神谷秀美・小畑晴治・安井昇・坂田高洋・永盛洋樹・村上雅英(2008): 既存家屋の耐震・防火補強による密集市街地の地震後延焼火災の抑制効果の検討, 日本建築学会技術報告集, No.28, pp.483-486.
- 京都市消防局(2003), 京都市第3次地震被害想定.
- 建設省(1982): 都市防火対策手法の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト報告書.
- 建設省(1997): 都市防災実務ハンドブック.
- 国土交通省(2003): まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発, 国土交通省総合技術開発プロジェクト報告書.
- 齋藤正俊・熊谷良雄・糸井川栄一(2006): 簡易的火災延焼リスク算定のための基本モデルの構築と市街地集計データを用いたリスク概算の試み, 日本建築学会計画系論文集, No.604, pp.115-122.
- 地震火災から文化財を守る協議会(1999): 地震は近い.
- 地震調査研究推進本部(2011): 主要活断層及び海溝型地震の長期評価一覧.
- 杉本綾亮・田中哮義・樋本圭佑・秋元康男・北後明彦(2006): 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.
- 日本建築学会(1998): 阪神・淡路大震災調査報告(建築6).
- 樋本圭佑・田中哮義(2004): 延焼シミュレーションに基づく高山三町伝建地区の防火性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp.337-338.
- 樋本圭佑・田中哮義(2006): 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.
- 樋本圭佑・秋元康男・北後明彦・田中哮義(2008): 伝統的木造密集市街地の延焼火災リスク評価に関する基礎的検討, 歴史都市防災論文集, Vol.2, pp.7-14.
- 樋本圭佑・向坊恭介・秋元康男・黒田良・北後明彦・田中哮義(2010): 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, 日本建築学会環境系論文集, No.653, pp.543-552.
- Architectural Institute of Japan (2003): Expanded AMeDAS Weather Data.
- Himoto K., and Tanaka, T. (2002): A physically based model for urban fire spread, Proc. 7th IAFSS Symposium, pp.129-140.

Burn-down Risk of Architectural Monument Surrounded by a Group of Wooden Houses in Case of Post-earthquake Fire Spread

Keisuke HIMOTO and Takeyoshi TANAKA

Synopsis

Burn-down risk of seven architectural monuments in Kyoto-Higashiyama area in case of post-earthquake fire spread was analyzed. The analysis was conducted by the Monte Carlo simulation using a physics-based urban fire spread model formerly developed by the authors. Factors of uncertainty considered in the present analysis were the conditions on: (1) outbreak of fire; (2) firefighting activity at the initial stage of fire; (3) structural damage of individual buildings due to seismic motion; and (4) change of weather in time series. The result shows that burn-down risks of Rokuharamitsuji, Hokanji and Kenninji are rather close to the mean value of all the houses in the target urban area. This indicates that no fire-stops are maintained between these architectural monuments and densely-built wooden houses in their surroundings. Thus, integrated approach involving entire urban area is required on implementing fire safety measure, in order to effectively reduce the burn-down risk of such architectural monument.

Keywords: Kyoto, Architectural Monument, Post-earthquake Fire Spread, Urban Fire Spread Model