

# 地震火災時の文化財建造物に対する防火対策検討プロセスの開発 —東福寺及び周辺地区を事例として—

Development of general planning process for fire risk management of urban cultural heritages from spreading after earthquake : Casestudy for Tofuku-ji temple and surrounding areas

荒川昭治<sup>1</sup>・加村大輔<sup>1</sup>・中畑摩耶<sup>1</sup>・大窪健之<sup>2</sup>・金度源<sup>3</sup>

Shoji Arakawa, Daisuke Kamura, Maya Nakahata, Takeyuki Okubo and Dowon Kim

<sup>1</sup>株式会社建設技術研究所 大阪本社 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

CTI Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup>立命館大学教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil & Environmental Engineering

<sup>3</sup>立命館大学准教授 衣笠総合研究機構 歴史都市防災研究所 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization, Institute of Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage

For protection of frameable cultural heritage buildings in Japan, the fire risk management is indispensable. Sometime fire starts spreading from surrounding high densited urban area to the wooden cultural heritage sites. But it is difficult to use governmental subsidy for fire protection measures at the site out of designated cultural heritage, without logical and clear reason. This paper aims to develop the general planning process for fire risk management of urban cultural heritages from spreading after earthquake through the casestudy in Tofuku-ji temple and surrounding areas using mathematical fire spreading simulation system.

**Keywords:** Earthquake Fire, Risk Assessment, Urban Fire Spread Model, Urban Cultural Heritage, Tofuku-ji Temple

## 1. 研究の背景と目的

1950（昭和25）年の文化財保護法制定以降、日本の重要文化財建造物の防災対策は、対象となる建造物の防災性能の向上に重点が置かれ、敷地内の重要文化財建造物及びこれに近接する建物に限定して講じられてきた。その後1995（平成7）年の阪神淡路大震災を契機として、同時多発的に発生する可能性のある市街地大火に対し、周辺地域からの延焼も含めた総合的対策の必要性が指摘されてきた。これを受け、2008（平成20）年には、防災、文化財、建築、都市計画等の分野の有識者を委員とする「重要文化財建造物の総合防災対策検討会」が発足し、文化財建造物及びその周辺地域の総合防災対策のあり方が検討<sup>1)</sup>されはじめている。

一方で、火災対策関連の既往研究には、延焼被害を予測する東京消防庁<sup>2)</sup>や樋本・田中<sup>3)</sup>等による延焼シミュレーション開発が挙げられる。これらの研究成果により、延焼の物理的特性や時間進行を考慮したシミュレーション技術が確立され、広域の延焼被害性状や消失棟数等を把握することが可能になった。廣川・大佛による研究<sup>4)</sup>では、延焼シミュレーションに基づく消失棟数を用いて、発災直後の消防活動や避難行動の支援、市街地の効率的な整備方法等を検討するための、建物単位の延焼危険性指標等が提案されている。

以上を踏まえ、本稿では、京都市東山区の東福寺及び周辺地区を事例として、延焼シミュレーションに基づく重要文化財建造物の延焼に直結する危険箇所の特定、対策案の立案及び効果の定量的評価など、汎用的な防火対策検討プロセスの開発を目的とする。延焼火災に対する消防設備整備に関する既往の研究としては、金・大窪<sup>5)</sup>による祇園南地区を対象とした防災水利計画、井元・大窪<sup>6)</sup>による延焼抑止放水システムの配置計画等があるが、汎用的な防火対策検討プロセスの開発までは至っていない。

## 2. 東福寺の重要文化財建造物と周辺地区状況について

### (1) 東福寺の概要

東福寺は、京都市東山区に位置する臨済宗東福寺派大本山の寺院で、大本山東福寺と25カ寺の塔頭、特別由緒寺院（最勝金剛院）からなる。塔頭は大本山東福寺に隣接しているものや一般家屋を挟んで立地しているものがあり、東福寺全体の敷地としては南北最大1,200m、東西最大700mにも及ぶ（図1）。

敷地内の文化財建造物は、国宝2件（東福寺三門、竜吟庵方丈）、国重要文化財19件、京都府指定文化財18件に及び、文化財の宝庫となっている。また、紅葉シーズンには日最大35,000人もの観光客が訪れるなど、地域の歴史・文化・経済の中心的役割を担っている。

### (2) 周辺地域の状況

東福寺の東側は東山の山地となっており、西側は鴨川の沖積平野となっている。西側に行くにつれて標高が低くなり、その斜面に東福寺等の社寺、住宅が立地している。

また、北東側、西側は古い木造家屋が密集した地区となっており、大部分の道路が幅員4m未満で袋街路も多数存在する。南東側は比較的新しい家屋が立ち並び、幅員4m以上の道路も多い。

### (3) 地震火災時の課題

以上のことから、東福寺及びその周辺地区は、地震火災時に以下の課題が考えられる。

- ①木造家屋密集箇所があることから、重要文化財建造物を含めた地域全体の延焼の危険性が高い
- ②道路幅員が小さく消防車が進入しにくいことから、消防活動が困難となる可能性が高い



図1 東福寺及びその周辺の状況

### 3. 防火対策の検討プロセスの体系化

本稿では、延焼の危険性の高い東福寺及び周辺地区を事例として、以下の考え方、手法により地震火災時の危険性、防火対策の必要性、評価方法について検討プロセスを提案し、体系的な整理を試みる。

#### (1) 検討プロセスの概要

防火対策の検討では、現地状況に基づく延焼の危険性の有無や地域特性を把握したうえで、対策案を立案するとともにその効果を定量的に評価することが必要となる。図2に、汎用性を考慮した防火対策の基本的な考え方と検討の流れを示す。

まず、重要文化財建造物と周辺の建物情報（建物形状及び種別、階層、標高等）、消火設備、道路情報、気象情報等を収集し、データ化する。

次に、延焼の危険性を定量的に評価可能な延焼シミュレーションモデルを構築するとともに、重要文化財建造物に対する延焼影響範囲を把握し、計算負荷に配慮した検討範囲を設定する。

さらに、地震火災の発生条件の任意性を考慮し、出火点及び気象条件をランダムに設定した延焼シミュレーションを複数回実行する。ここでは、延焼回数の比率を指標として、重要文化財建造物への延焼抑止ラインの配置を検討する。

その後、設定した延焼抑止ラインにおける地形や建物の階層・近接度等を踏まえ、防火対策を立案し、延焼抑止効果や対策の優先度を評価する。

#### ○基礎情報の収集・データ化

- ・建物情報（建物・構造種別、階層、標高等）
- ・重要文化財、指定文化財
- ・消火設備（消火栓、防火水槽、水源等）
- ・道路情報（道路幅）
- ・気象情報（気温、風速、風向）

#### ○延焼シミュレーションモデルの構築

- ・基礎情報のモデル化
- ・シミュレーション条件の設定
- ・文化財建造物に対する延焼影響範囲の把握

#### ○延焼危険性の検討

- ・出火点や気象情報の任意性を考慮した危険度評価
- ・延焼抑止ラインの検討

#### ○対策案の評価

- ・地形や建物特性に応じた防火対策案の立案
- ・対策箇所ごとの延焼抑止効果の評価と優先度の検討

図2 防火対策の検討フロー

#### (2) 延焼シミュレーションモデルの概要

本稿では、樋本・田中<sup>3)</sup>等によって開発された延焼シミュレーションモデルを援用する。このモデルは「建物内部の火災性状予測モデル」と「建物間の延焼拡大性状予測モデル」を統合したものであり、従来の確率論に加えて詳細な物理演算に立脚している。

建物間の延焼拡大予測モデルでは、建物間の火災拡大の要因として、①火災建物からの輻射熱、②火災建物の風下に形成される熱気流、③火の粉の飛散（飛び火）を考慮する（図3）。ただし、③については、図4のように火の粉の飛散範囲を分布確率で設定しており、同条件（出火点、気象条件）でも同一の結果にならない。延焼危険性の傾向把握や対策案の延焼抑止効果の評価の際には、火の粉の飛散による延焼拡大の偶発性に留意し、十分なシミュレーション回数の確保が必要となる。

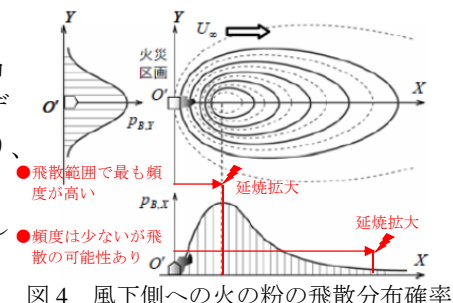


図4 風下側への火の粉の飛散分布確率

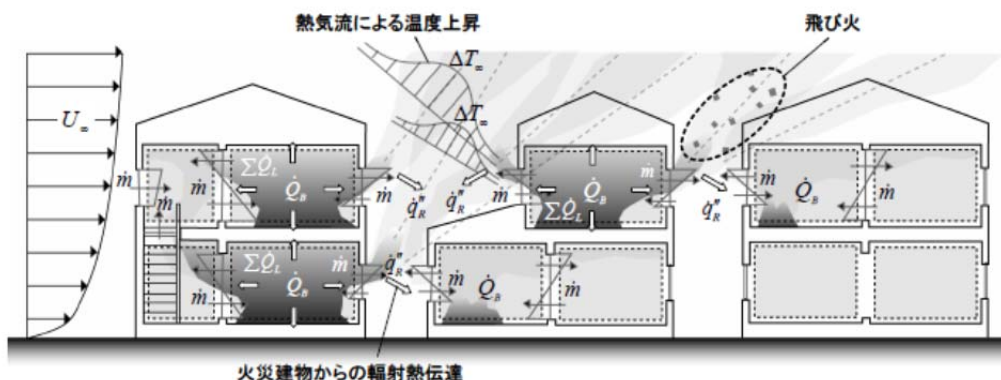


図3 延焼性状予測モデル（都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発から引用）

#### 4. 基礎情報の収集・データ化

東福寺および周辺地区を事例とした検討を進めるにあたり、基礎情報として地区全体の建物情報、重要文化財、指定文化財の情報、消火設備、道路情報、気象情報を収集した。延焼シミュレーションの実施にあたっては、建物情報と気象情報から条件を設定した。設定したシミュレーション条件を表1に示す。

表1 シミュレーション条件

項目		条件
建物	諸元	位置情報及び平面構造（図5）、階層、標高、種別（木造、防火木造、準耐火造、耐火造）（図6、図7）
	開口部	壁の面積に対して一定の割合を開口部として設定
最大延焼時間		24時間
初期消火		なし（大規模地震後の火災では24時間は消火活動が行われないことを想定）
気象条件		近10年の風速、風向、気温（図8、図9）からランダムに設定
出火点		1棟（計算毎にエリア内の建物からランダムに設定）

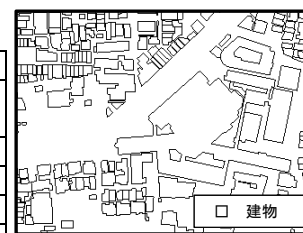


図5 建物の位置及び平面構造の設定イメージ

建物情報については、東福寺および周辺地区の建物を対象に位置や平面形状、建物種別、階層、標高、建物の高さの情報を収集し、GISデータを作成した。一般的には、市町村が管理している固定資産台帳等の最新情報を活用することができれば、精度の高いデータを作成することが可能だが、膨大なデータ化作業が必要となる。本稿では、立命館大学所有の2000年代のGISデータを活用することができたが、精度確保（家屋の建替えや区画整理による土地利用状況の変化への対応）に課題があったため、現地調査等を実施することで精度向上を図った。具体的には、図6に示す建物種別の判定フローに従い、建物の外観上の特徴から、各建物を木造、防火木造、準耐火造、耐火造の4種類に分類し、GISデータに反映した。図7に示す事例では、外壁等に木造の露出がある場合は「木造（＝裸木造）」、外壁がサイディング貼りで3階建て以下の場合は「準耐火造」と判断した。

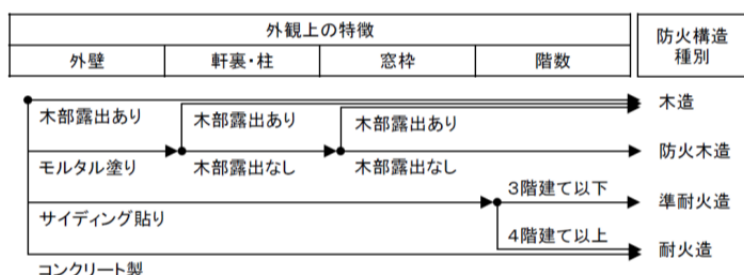


図6 建物種別の判定フロー

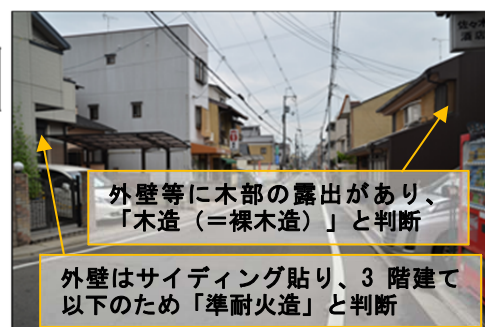


図7 外観上の特徴から建物種別を判断した事例

気象情報については、京都気象台の2005年～2014年までの風速、風向、気温を整理し、延焼シミュレーションモデルに反映するとともに、東福寺周辺地域の気象特性を分析した。年間を通してみると、平均風速は2m/s程度、最大風速の平均は5m/s程度（図8）で、風向は北北西、東北東、南南西の3方向が卓越する（図9）。後述する延焼シミュレーションでは、これらの特性を踏まえた気象条件を設定する。

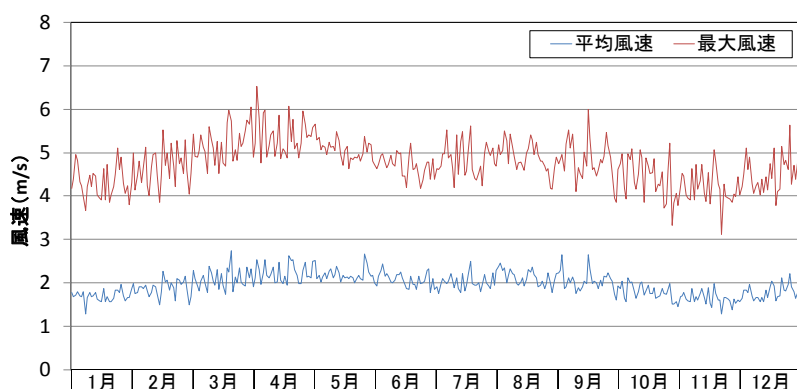


図8 平均風速、最大風速（京都気象台 2005年～2014年）

（10カ年の日単位データを平均して表示）

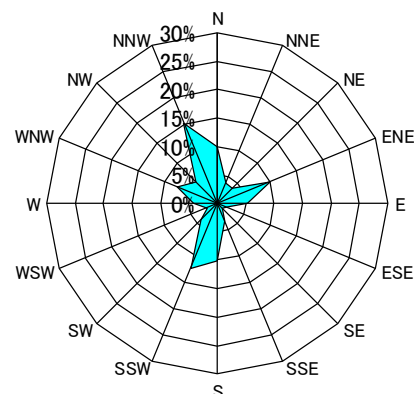


図9 風向分布（年間）

（京都気象台 2005年～2014年）

## 5. 延焼シミュレーションモデルの構築

延焼シミュレーションの構築にあたり、データ管理・計算負荷の観点から、広域なモデル範囲を設定すると防火対策の検討が非効率となる可能性がある。ここでは、東福寺及び周辺地区を事例として、地形及び延焼特性に応じたモデルの構築と適正なモデル範囲の設定方法についてとりまとめる。

### (1) モデルの予備検討範囲の設定

重要文化財建造物を有する対象領域（東福寺敷地）へ延焼が及ぶ範囲を把握するため、以下の点に留意して延焼シミュレーションの予備検討範囲を設定した。

- ・大規模地震の発生後は消火活動が困難となり、最大24時間程度延焼が続くと想定し、1km程度の検討範囲を確保する（阪神淡路大震災時の延焼速度50m/h以下）。
- ・幅員が12m以上の道路や、鉄道、河川及び山地は、延焼の抑止機能が高いと想定されていることから、検討範囲の境界線候補として取り扱う。

以上から、西は琵琶湖疎水、北は国道1号、東は東山の山地と市街地の境界、南は名神高速道路によって囲まれる範囲（図10）を抽出した。

### (2) 必要な計算ケースの検討

モデル範囲内の12,660棟の建物から、1ケースごと1棟の建物を出火点としてランダムに抽出し、表1に示す条件で延焼シミュレーションを実施した。

地震火災時の延焼範囲は、ランダムに抽出した出火点と気象条件（風速、風向、気温）に左右されるため、偶然性を排除するためにはケース数を増やす必要がある。一方で計算負荷の観点から、可能な限りケース数は減らすことが望ましい。そこで500、1,000、1,500、2,000、2,500、3,000ケースの計算結果から、延焼した家屋総数を比較した。その結果（図11）、計算（＝出火点）を2,000ケース（建物総数の16%）実施すると、概ね延焼家屋数が収束し、対象エリア全体の延焼特性を評価できると判断した。

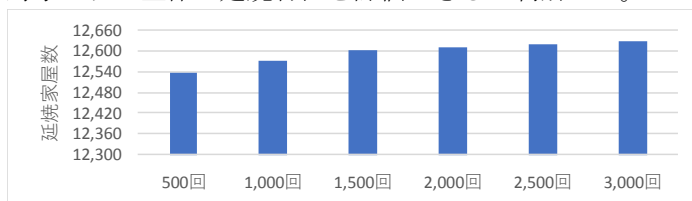


図11 計算ケース（回数）と延焼家屋数の関係

### (3) モデル範囲の設定

24時間後に東福寺敷地内の建物が延焼したケース（図10中の■）と延焼しなかったケース（図10中の■）を集計し、地形で分割した3エリア（点線内）の延焼確率を算出した。

東海道新幹線・東海道本線より北側のエリア①と府道119号より南側のエリア③は、東福寺敷地への延焼確率が10%未満で、ほぼ影響がないと判断される。一方、東福寺敷地を含むエリア②は、65%の確率で東福寺敷地へ延焼が及ぶことから、エリア②を延焼危険性の評価モデル範囲として設定することとした。

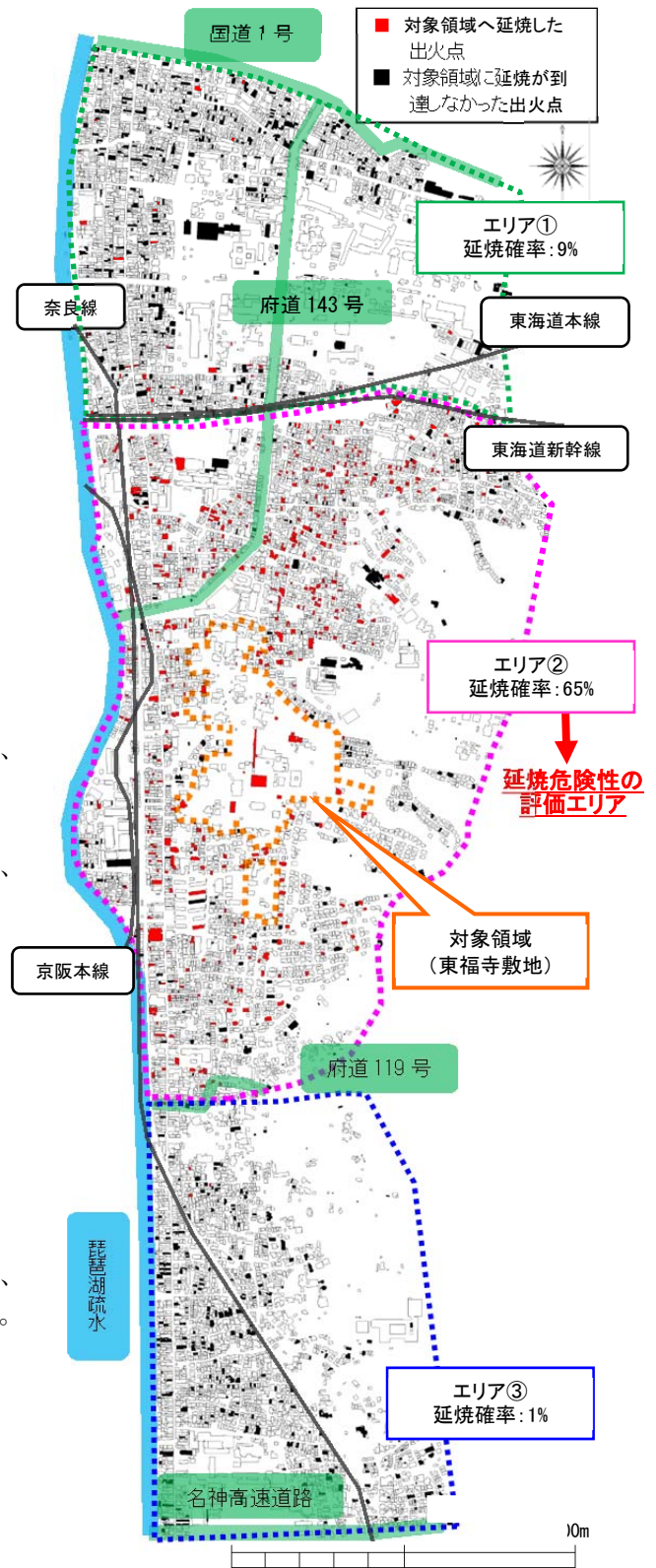
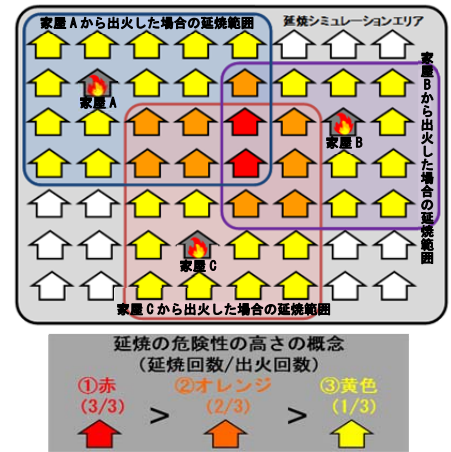


図10 各出火点からの対象領域への延焼判定

## 6. 延焼危険性の検討

### (1) 危険度評価の考え方

5章で示した結果より、東福寺は周辺地域からの延焼の可能性が高いことが言える。延焼に対する対策案を検討するためには、周辺地域を含めた一体で延焼の危険性を評価する必要がある。そこで、延焼の可能性のある範囲に着目して延焼シミュレーションを実施し、延焼回数の相対比較により延焼の危険性を評価する。具体的な考え方を図11に示す。モデル範囲内の家屋からランダムに出火点を抽出（図12中のA～C）し、24時間の延焼シミュレーションを実施する。24時間以内に延焼した家屋は延焼1回として取扱い、複数ケース（出火点）の結果を重ね合せて、家屋ごとに全ケースに対する延焼回数の比を集計する。任意の出火点に対する延焼の危険性は、延焼した回数に応じて高く評価するものとする。図12に示した例では、赤色家屋の危険性が相対的に最も高い（3/3）こととなる。



### (2) 東福寺及び周辺地区を対象とした危険度評価と延焼抑止ライン

東福寺及び周辺地区を対象に、出火点をランダムに選定し、延焼シミュレーションを実施した。5章で得た結果から、東福寺及び周辺地区では、地形・建物特性から建物総数の16%の計算ケースで対象エリア全体の延焼特性を評価できると考え、計算ケースは建物総数6,376棟（図10のエリア②）の約16%にあたる1,000ケースとした。シミュレーション結果から全ケースに対する各家屋の延焼回数比を算出し、図13に示す。

この結果、延焼の危険性が最も高いのは、塔頭を含む東福寺敷地に隣接する北東エリアで、全ケースに対する延焼回数比が6%から最大15%程度（図13中の黄色～赤色）となった。北東エリアは木造家屋が密集し、幅3m以下の街路が支配的となっており、地震火災時には消防車の進入が困難で十分な消防活動ができない可能性が高い。なお、東福寺の北エリアには京都第一赤十字病院が立地しているが、耐火性を有する建物であるため、延焼の可能性が小さいとともに、東福寺敷地の北部において、東西方向の延焼を抑止する効果を果たしていると考えられる。

次に延焼の危険性が高いのは、東福寺の南エリアで、全ケースに対する延焼回数比が6%から最大10%程度（図13中の黄色～橙色）となった。北東エリアと同様に木造家屋が密集しているが、一部幅4～6mの街路も含まれており、北東エリアより延焼の危険性は低いと評価される。また、東福寺敷地と延焼の危険性の高いエリアの間には、鉄筋コンクリート造の鳥羽街道団地が立地し、南エリアでの出火が東福寺敷地に到達するまでの防火帯になっていると考えられる。

東福寺の西部地域では、北西エリアの延焼の危険性が相対的に高くなった。このエリアは木造家屋が密集しているが、幅員6m以上の道路・鉄道敷地や元月輪小学校の敷地等があり、上記二つのエリアと比較すると延焼の危険性は低いものと評価された。

東福寺敷地に隣接するその他のエリアは、延焼回数比が2%以下となっており、東福寺敷地への延焼の危険性は相対的に低いと判断される。

以上から、東福寺及び周辺地区での延焼抑止ラインを以下のように設定する。

- ①北東エリア：延長280m
- ②南エリア：延長460m
- ③北西エリア：延長1,060m

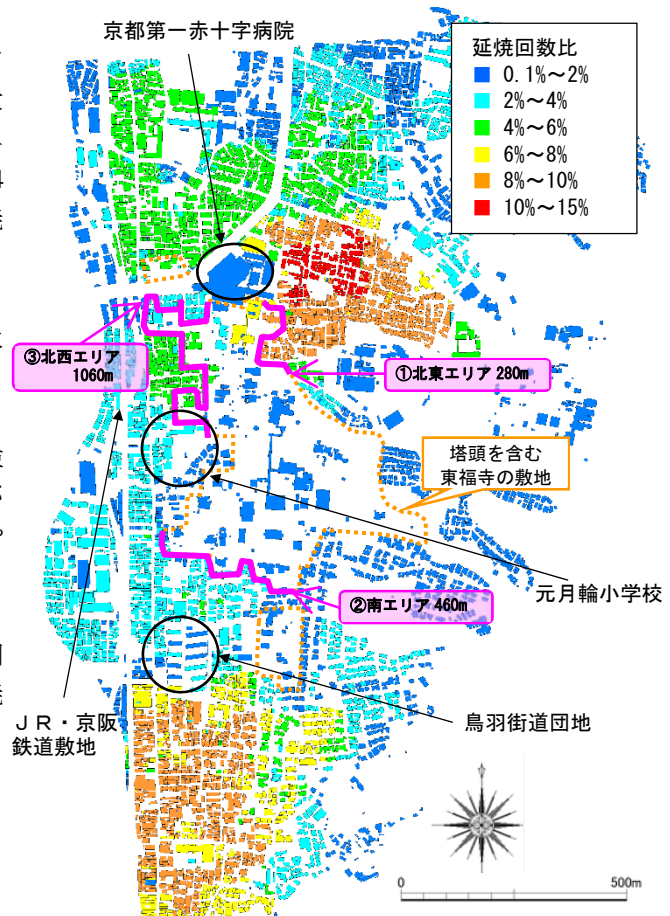


図13 東福寺及び周辺の延焼の危険度評価結果（計算1,000ケースに対する延焼回数を比率表示）

## 7. 対策案の有効性評価

### (1) 想定される対策案

延焼抑止ラインにおける具体的な対策案として、延焼抑止放水システム<sup>6)</sup>（WSS：Water Shield System）の設置を想定する。WSSは、木造の文化財建造物や歴史地区を延焼火災から守るため、まだ延焼していない建物の壁面に継続的に放水する設備である（図14、15）。木造外壁に一時的な耐火性を持たせる機能があるため、木造家屋が密集する街路等に設置することで、歴史的景観を損なうことなく延焼抑止効果が期待できる。

本稿では、図13で想定した3本の延焼抑止ラインについて現地を踏査し、WSSの設置スペースや放水対象となる壁面等を確認したうえで、以下の手順で各ラインにおける対策の効果、および整備優先度を評価した。

### (2) 各エリアの対策案

各延焼抑止ラインのWSSの有無のみを変更した延焼シミュレーションを実施し、対策による効果を評価した。なおWSSの有無は、既往の研究成果<sup>7)</sup>より延焼抑止ラインの家屋に耐火性壁面（開口部のないRC壁面と同等）を設定することで反映した。

検討方法は、計算負荷の軽減と延焼抑止ラインの地形・延焼特性から、以下の考え方で設定した。

- ・出火点は延焼抑止ライン近傍の5地点とする。
- ・風速は、対象地域の最大風速の平均（5m/s）を考慮して、0～5m/sの6ケースを選定する。
- ・風向は、対象地域で卓越する3方向を選定し、最も東福寺敷地への延焼が想定される（影響の大きな）ケースを組み合わせる。
  - ①北東エリア：東北東の風向
  - ②南エリア：南南西の風向
  - ③北西エリア：北北西の風向
- ・以上から、3エリア×5出火点×6風速・風向＝90ケースの延焼シミュレーションを実施する。
- ・シミュレーション結果を図16のように示す。着色はWSSなしケースとWSSありケースの延焼回数の差分を表示しており、図中の■はWSS設置によって延焼回数が減少したことを示している。

#### 1) 北東エリア

WSSの設置により、延焼抑止ラインを通過して西側に拡大する延焼範囲が縮小し、延焼回数も減少した（図16）。なお、一部で延焼回数が増加（図16中の■）しているのは、火の粉の飛散を分布確率により（図4）設定しているため、ケースによってランダムに離れた地点で延焼が発生するためである。

#### 2) 南エリア・北西エリア

WSSの設置により、東福寺敷地内での延焼回数の減少が見られるものの、地域全体の延焼範囲の縮小には効果がなかった（図17）。延焼は東福寺敷地の西面に沿うように南北に拡大する傾向があり、現状の延焼抑止ラインではこの方向への延焼には対応できないことが分かる。

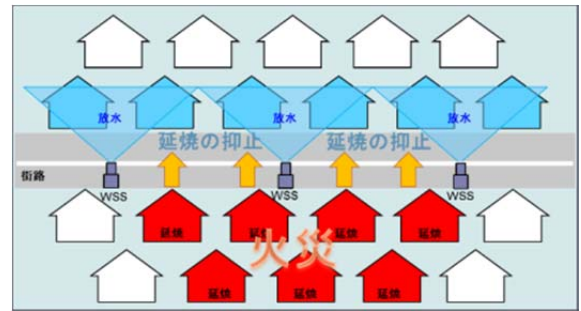
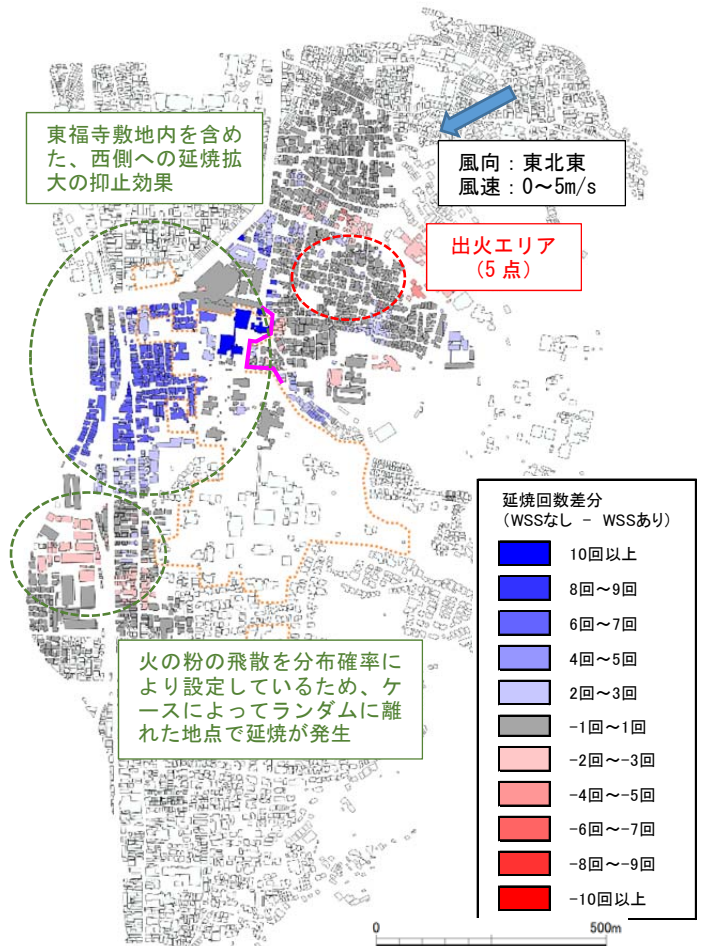


図14 延焼抑止放水システム（WSS）の概念



図15 WSSの放水部分



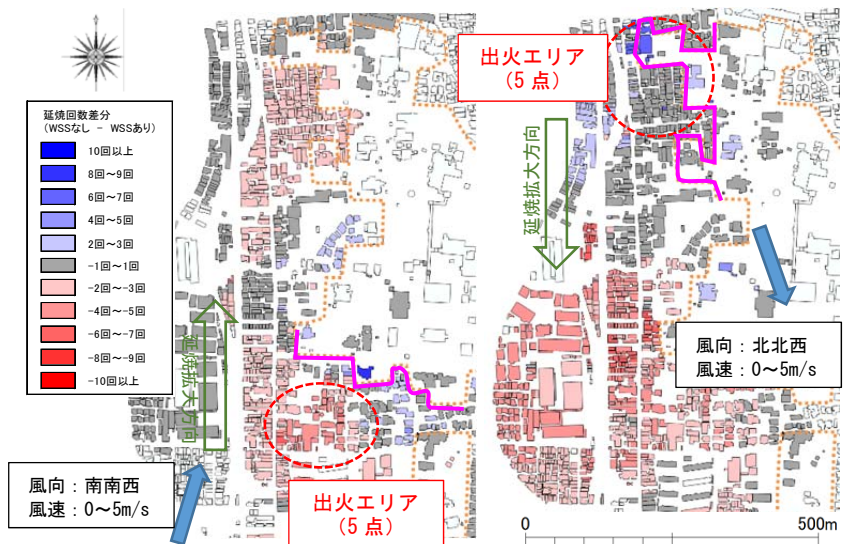
①北東エリアからの出火ケース  
図16 WSSによる延焼抑止効果の検討結果

### (3) 対策案の評価

以上から、本提案では北東エリアの対策を優先して実施することが望ましいこと、西部ではWSSによる地域内での延焼抑止効果は見込めないことなどが明らかとなった。

計算負荷の軽減（1,000ケースを1/10以下の90ケースに変更）や延焼シミュレーションの特性（火の粉の飛散分布確率による延焼の可能性）に留意した上で、効率的かつ定量的な評価が可能となった。

## 8. 研究の結論と課題



### (1) まとめと考察

文化財建造物及びその周辺地区に ②南エリアからの出火ケース ③北西エリアからの出火ケース  
図 17 WSS による延焼抑止効果の検討結果（東福寺敷地西側の抜粋）  
対する地震火災時等の汎用的な延焼火災対策へ向けて、以下のように計画検討プロセスを体系化するとともに、東福寺及び周辺地区を事例として、留意事項や具体的手法を明らかにした。

- ①基礎情報の収集・データ化 : 必要情報の明確化と簡易な建物種別の設定方法
- ②延焼シミュレーションの構築 : 計算負荷の軽減と適切な延焼影響範囲の把握方法
- ③延焼危険性の検討 : 地域全体の危険度評価と重要文化財建造物の対策箇所の検討方法
- ④対策案の評価 : シミュレーションの特性を踏まえた対策効果と優先度の評価方法

木造の文化財建造物や歴史的な街並みへの延焼リスクは日本各地で懸念されており、本稿でとりまとめた検討プロセスを活用することで、効率的かつ定量的な対策の立案及び評価が可能になると考える。

### (2) 今後の課題

本稿でとりまとめた延焼火災対策に関する一連の検討プロセスを深化させ、より実用的かつ効果的なプロセスへと改善するための課題を以下にとりまとめる。

- ①データ精度の確保や対策案の実現性等の観点から、行政、消防及び地域住民との連携、地区防災計画と連動した防火対策の推進等、地域全体の防火対策検討の枠組みを確立することが必要と考える。
- ②対策案の導入判断や定量的な比較評価の観点から、対策効果を経済的に評価する手法やツールが必要と考える。

**謝辞：**東福寺の平住寺務長ほかの皆様には、東福寺及び周辺の現地調査や文化財建造物等に関する情報提供など、多大なご協力を賜りました。また、「地震火災から文化財を守る会」の技術部会の皆様には、延焼抑止対策や効果に関する貴重なご意見を賜りました。さらに、国土交通省国土技術政策総合研究所の樋本圭佑主任研究官には、延焼シミュレーションに関する有益なご助言を賜りました。記して謝意を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 重要文化財建造物の総合防災対策検討会：重要文化財建造物及びその周辺地域の総合防災対策のあり方，2009.
- 2) 東京消防庁：地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策，火災予防審議会答申，2001.
- 3) 樋本圭佑・田中孝義：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，Vol. 71, No. 607, pp. 15-22, 2006.
- 4) 廣川典昭・大佛俊泰：同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用，日本建築学会計画系論文集，Vol. 82, No. 732, pp.301-310, 2017.
- 5) 金度源・大窪健之：歴史的な本願寺水道の送水管再生による市街地防火への有効性評価：大規模延焼火災を想定した祇園南地区での防災水利計画，都市計画論文集，No. 48, pp789-794, 2013.
- 6) 井元駿介・大窪健之：木造文化都市を守る「延焼抑止放水システム（WSS）」の配置計画に関する研究～京都市清水周辺地域での延焼シミュレーションによる評価を通して～，歴史都市防災論文集，Vol.4, pp21-28, 2010.
- 7) 大窪健之・中藪知孝：延焼火災から伝統的な木造密集市街地を守る街路壁面散水設備の開発～実大模型実験を通じた延焼抑制効果の評価～，歴史都市防災論文集，Vol.9, pp25-32, 2015.