

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～

A study on the site planning of "the Water Shield System" for protecting wooden cultural city
～Evaluation of its effectiveness by using fire spread model-case study in Kiyomizu area, Kyoto～

井元駿介¹・大窪健之²・樋本圭佑³・田中哮義⁴

Shunsuke IMOTO, Takeyuki OKUBO, Keisuke HIMOTO, Takeyosi TANAKA

¹立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Graduate student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University,

²立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

³京都大学助教 次世代開拓研究ユニット (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Assistant Professor, Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto University

⁴京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Hanshin-Awaji Earthquake brought much damage, due to the frequent and simultaneous occurrence fire that occurs immediately after the earthquake. When the fire occurs in the wooden densities urban area like the Kiyomizu, Kyoto, many historical cultural heritages might be lost by the fire spread. Installation of "Water Shield System" is one of the major government-aided development project of water supply for disaster mitigation. It can protect the cultural heritage and the surroundings, which was firstly planned by the Kyoto City Fire Department. This study aims at evaluating the effectiveness of site for us planning by the simulation of the fire spread and proposing more effective site planning.

Keywords: *Water Shield System, fire spread simulation, historical wooden cultural heritages, Kiyomizu Kyoto, earthquake fire measures, for disaster mitigation*

1. はじめに

1995年の阪神淡路大震災においては、地震直後に発生する同時多発火災によって多くの被害を受けた。被害拡大の背景には、建物が密集した市街地において地震により建物が倒壊し、道路が塞がってしまったことが挙げられる。このことから、緊急車両が被災現場に辿り着けず、同時多発火災となり、全ての消火活動が不可能になったことや上水道が被災したことで、これに依存した消火システムが機能しなかったことが挙げられる。伝統的木造文化を有する日本には世界に誇れる歴史的木造文化遺産がある。歴史都市京都にはその



図1 延焼抑止放水システムのイメージ図1

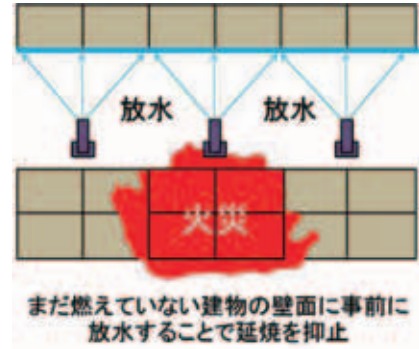


図2 延焼抑止放水システムのイメージ図2

多くが存在し、木造建造物が密集する市街地と接して存在している。このような木造密集市街地では、火災に対して極めて脆弱であるため、大地震直後におこる同時多発火災時に近隣の市街地火災からの延焼によって文化遺産や木造建造物が焼ける可能性があり、延焼を防ぐ必要がある。しかしながら、ただ近隣の木造建造物を不燃の耐火建築に建て替えただけでは歴史的な景観を損ねてしまうことになり、文化遺産を含めた歴史的景観の保存にはならない。したがって、歴史的景観を損なわないような地震火災対策が検討されている。このことは「万一燃えても消すことができる豊富な水資源のある美しく安全な都市環境を整備」することで、地震火災から我々人間と歴史的な街並みを守ることに繋がると考えられる。

延焼抑止放水システム（WSS：Water Shield System）は文化財とその周辺を守る防災水利整備事業¹⁾²⁾において、まだ延焼していない建物の壁面に事前に放水して延焼を抑止する街路壁面放水設備である。WSS²⁾は木造外壁に一時的な耐火性を持たせる作用があるため、両側に木造外壁面が接する街路に設置することで、特にその効果を発揮する。本研究では以上の考え方にに基づき、最悪の延焼火災を抑止するために提案された延焼抑止放水システムの配置計画の有効性について、著者らが開発した物理的延焼性状予測モデル³⁾（以後既往モデルと呼ぶ）を延焼シミュレーションによって評価し、より有効な配置計画の提案を策定することを目的とする。WSSのイメージ図を図1と図2に示す。

2. 既往モデルとWSSによる延焼抑止モデルについて

本研究では火災対策のひとつであるWSSの配置計画の有効性を評価し、火災安全対策を立てる上でのひとつの指標を得ることを目標とする。評価方法として、既往モデルに本研究で構築したWSSによる延焼抑止モデル（以後本モデルと呼ぶ）を組み込んで延焼シミュレーションを行う。次に既往モデルと本モデルの概要を示す。

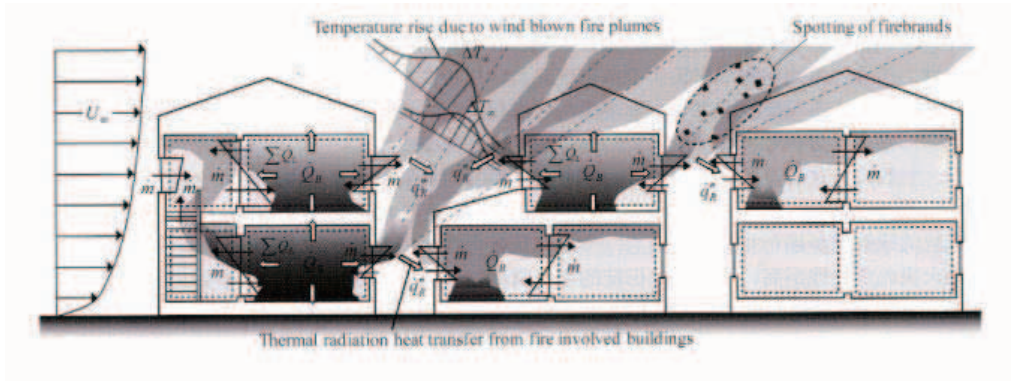


図3 物理的延焼性状予測モデルの概念図

(1) 既往モデル

まず図3のように、既往モデルは市街地における火災拡大を現象の物理的な知見に基づいて定式化されている。このモデルは「建物内部の火災性状予測モデル」と「建物間の火災拡大性状予測モデル」の二つのモデルを統合したもの³⁾である。都市火災を多くの建物火災の集合と捉えて、他の建物火災の影響下において個々の建物火災の延焼性状を予測し、市街地全体の延焼性状予測へとつなげるものとなっている。

(2) 本モデル

延焼抑止モデルはWSSの起動判定と貯水残量の算出のプログラムから構成される。図4に概要を示す。

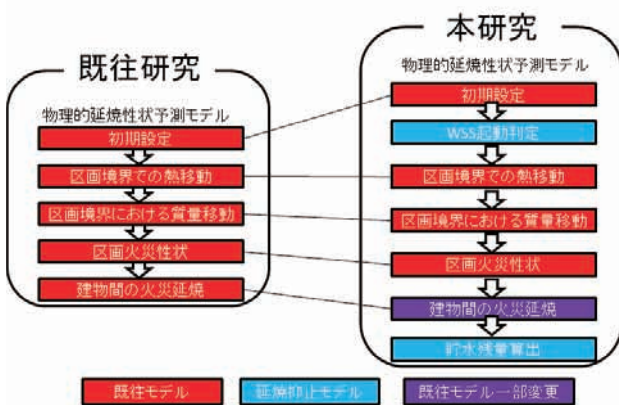


図4 延焼抑止モデルの概要

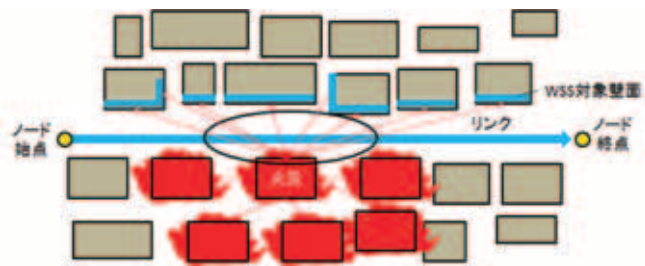


図5 WSSの起動判定

(a) WSSの起動判定条件

本研究の範囲ではWSSは延焼を与える要素の中で輻射熱流束³⁾⁴⁾のみ抑止するものとし、飛び火と熱気流による温度上昇の影響下では抑止できずに延焼するものとする。WSSを設置する道路に関して、ノード(道路の屈曲点)を端点とするリンク(道路の直線部分)を設定し、WSSはリンク単位で起動するものとする。

既往モデル内では、形態係数³⁾⁴⁾と呼ばれる輻射源と隣接する建物との幾何学的な関係を示す係数が計算されている。本研究ではWSSの起動判定のために、この形態係数算出過程の受熱面の走査線ベクトル³⁾の設定、走査線ベクトル上の遮蔽壁面の有無の確認の部分を利用することとした。図5のように燃焼建物から受熱建物へ輻射熱流束のベクトルがリンク(WSSが同時に起動する路線)と交差する場合WSSが起動するという判定を行っている。

(b) 輻射熱流束と放水量の関係について

延焼を抑止するためにはどれだけの放水量が必要であるのかを確認するため、土橋らによる加熱を受ける壁面への事前散水による延焼防止効果に関する実験⁵⁾の結果から、輻射熱流束と放水量の関係を着火した場合と着火しなかった場合に分けてプロットした。図6のグラフのように着火と未着火を弁別できるような直線を着火限界として設定した。この理由として散水を受けると散水の一部が蒸発することで熱が奪われ、散水を受けている場合の壁に入射する輻射熱流束は式(1)で表される。

$$q = q_0 - \alpha \cdot W \cdot \Delta H \quad (1)$$

Wについて解くと式(2)のようになる。

$$W = \frac{1}{\alpha \cdot \Delta H} q_0 - \frac{1}{\alpha \cdot \Delta H} q \quad (2)$$

式(2)は q_0 とWの1次式とみなせることから式(3)で表せる。

$$W = \beta_1 q_0 + \beta_2 \quad (3)$$

このことから放水量 0 で着火する熱流束を 15 kW/m^2 ⁶⁾ とする原点を設定し、未着火点における限界点(3点)の線形近似を着火限界熱流束とした。(図 6) 線形近似による着火限界熱流束は式(4)で表わされる。

$$Q = \frac{(W + 0.621)}{0.0414} \quad (4)$$

q : 散水を受けている場合の壁に入射する輻射熱流束、 q_0 : 熱源からの輻射熱流束、 β_1 β_2 : 定数
 Q : 着火限界熱流束(kW/m^2)、 W : 水量($\text{L/m}^2 \cdot \text{分}$)、 α : 水の吸収率、 ΔH : 水から奪われる熱量

本研究では水量を $1.5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{分}$ で設定しており、式(4)から着火限界熱流束約 51 kW/m^2 まで延焼を抑止できることがわかった。

(c) 建物間の火災延焼について

本研究では本モデルを既往モデルに組み込むために、建物間の火災延焼のプログラムを既往モデルから一部変更した。入射熱流束の和を計算する際に、WSS の起動対象の壁面と WSS の起動対象ではない壁面とで場合分けを行った。まず WSS の起動対象ではない壁面については既往モデルと同様の延焼が起こるものとした。一方 WSS の起動対象となる壁面において、輻射熱流束が放水量の関係から求めた着火限界熱流束を下回る場合は、入射熱流束の和は 0 となり延焼は起こらないものとした。逆に着火限界熱流束を超える輻射熱を受けた時は、WSS 起動対象ではない壁面と同様に延焼が進行するものとした。

(d) 貯水残量について

WSS は水がなければ機能できないため、延焼が発生した場合に十分な貯水残量があるか評価することが必要となることから貯水残量についても算出した。WSS 起動中は設定した毎分単位面積あたりの放水量 ($\text{L/m}^2 \cdot \text{min}$) が放水面積にかかるものとして、リンクごとに放水量(L)を算出する。

研究対象地域の建物のうち 3 階建てまでの木造建物の棟数分布高さ (図 7) から、建物の 90%以上が含まれる高さ 10m を放水高さに設定した。放水面積は各リンクの長さで放水高さ 10m の積で求めている。最後に貯水量 3000t から各リンクの放水量の総和の差をとって貯水残量を算出した。

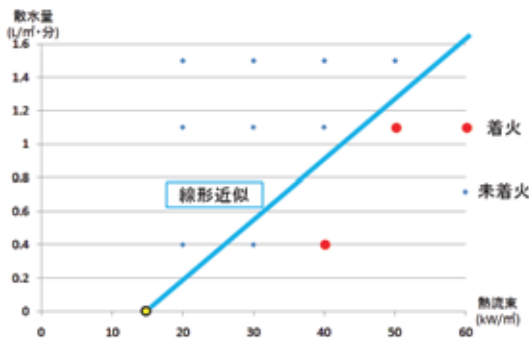


図 6 輻射熱流束と放水量の関係

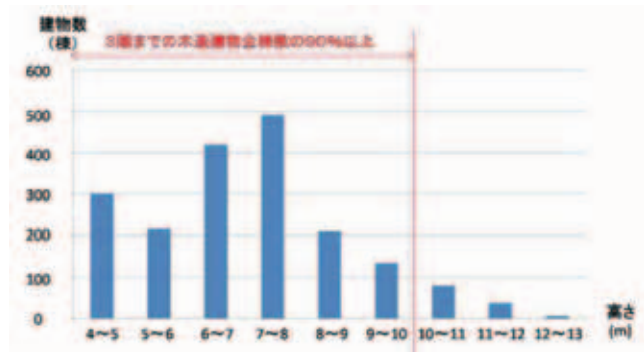


図 7 3 階建てまでの木造建物の高さ毎の棟数分布

3. 京都市清水周辺地域における延焼シミュレーション

WSS の延焼抑止効果を検証するため、WSS を設置する場合と設置しない場合で出火から 12 時間の延焼シミュレーションを行った。

(1) 延焼シミュレーションの条件

本研究では次の 3 項目の条件を設定し、延焼シミュレーションを行った。

(a) 設置条件

- ① WSS の設置箇所については 両側に木造外壁面が接する道路かつ幅員 4m以上ある道路²⁾ (有効な散水面積の確保と接延を考慮) に設置するものとした。
- ② 設置箇所の道路においてノードを設定し、ノードを結ぶリンクを設定する。ノードの設定については各リンクが直線となるように数値地図 2500 の道路接点 (屈曲点) のデータを使用した。
- ③ 他に接続されている市民消火栓等の消防設備による消火活動については考慮せず、消防設備は WSS のみが存在するものとした。

(b) 延焼条件

- ① WSS は輻射熱流束による熱伝達の影響のみを抑止するものとし、飛び火と熱気流による温度上昇の影響下では延焼が起こるものとした。
- ② 設定した水量に応じて着火限界熱流束が変化し、着火限界熱流束を超える輻射熱流束を受けた場合は延焼するものとした。

(c) その他の条件

- ① 各設置箇所において WSS が有効に機能するかを詳細に検証するため、出火点をエリア単位で設定し、図 8 のように①~⑫まで街路区画のエリア分割を行った。分割の条件は WSS 設置道路と、建物幅が 10m 以上あるところかつ他の区画に延焼の影響を及ぼすところで分割した。各エリアでランダムに出火建物を 1 棟設定して計算を行った。WSS がある場合とない場合とで出火建物は同一の建物で行っている。
- ② 現時点では複数の建物を同時に計算させることはできないため、同時多発火災での貯水残量については街路区画ごとの放水量の結果を足し合わせて計算するものとした。

表 1 シミュレーション条件

ノード・リンク	ノード数 100 点 リンク数 97 本
風速	0m/s (飛び火と熱気流による温度上昇の影響を考慮しないため)
放水量	1.5L/m ² ・min (参考文献 5)の実験結果に基づく)
着火限界熱流束	51 kW/m ² (放水量 1.5L/m ² ・min の場合)
貯水量	3000 t (高台寺公園地下貯水槽：1500t 清水寺貯水槽：1500t)
総建物数と種別	2082 棟 (普通建物：1860 棟 堅牢建物：114 棟 高層建物：105 棟)
出火点	1 棟 (各エリアでランダムに出火建物を設定。WSS がある時とない時とで出火建物は同一の建物)
エリア数	12 エリア (WSS 設置道路・建物幅が 10m 以上かつ他の区画に延焼の影響を及ぼすところ)



図 8 研究対象エリアにおける WSS 設置路線及び出火点のエリア

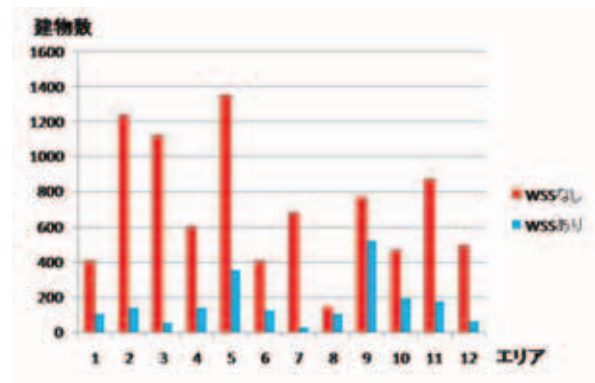


図 9 WSS なしに対する WSS ありの場合の効果

(2) 延焼シミュレーション結果

(1)で設定した条件に基づき、①～⑫のエリアにおいて延焼シミュレーションを行った。図8に研究対象エリアにおけるWSS設置路線及び出火点のエリア、図9に12時間後における焼失建物数からみたWSSなしに対するWSSありの場合の効果を示す。またエリア⑨における出火から12時間後の状態を図10と図11に示す。赤が燃焼建物、黒が消失建物、青がWSS対象建物を表す。



図10 WSSなしの場合（出火から12時間後）

図11 WSSありの場合（出火から12時間後）

4. 延焼抑止放水システム(WSS)の有効性

延焼シミュレーション結果をもとにWSSの有効性について評価する。また同時多発火災への対応とより有効な配置計画の提案について考察する。

(1) エリア別の延焼抑止放水システム(WSS)の焼失建物数からみた有効性

図8より各エリアにおいてWSSを設置した場合、焼失建物数はWSSを設置しなかった場合と比較すると、全てのエリアで減少している。焼失建物数の減少割合に着目すると、エリア②ではWSSなしの場合の約10%、エリア③⑦ではWSSなしの場合の5%未満にまでに抑えられており、これらのエリアでは特にWSSは有効に機能したといえる。他のエリアと比べて木造建物が密集していることからより顕著にWSSの効果が表れたからだと考えられる。一方でエリア⑧⑨では焼失建物数は30%程度しか抑えられなかった。この要因としてはWSSの設置されていない路線から延焼が進み、結果として広範囲にわたって延焼が拡大したためだと考えられる。

(2) 延焼抑止放水システム(WSS)の同時多発火災への対応

3000tの放水量でWSSがどれだけの同時多発火災まで対応できるのかを検討した。京都市第3次地震被害想定⁷⁾によると、花折断層を震源とする地震による出火件数は東山区において4件であった。このことから最悪の事態を考慮して本研究エリアにおいて4件の同時多発火災が起ると想定することにした。ただし、現段階では出火建物を1棟しか設定しなかったため、4エリアにおけるシミュレーション結果を重ね合わせて放水量を計算することとした。例として、エリア③⑥⑧⑫の4件の同時多発火災における放水量と貯水残量を図12に示す。結果、4件の同時多発火災が発生した場合でも、貯水量3000tでは十分に対応可能であることが明らかになった。

(3) 延焼抑止放水システム(WSS)のより有効な配置計画の提案

延焼シミュレーション結果からエリア⑤⑨⑪ではWSSで延焼を抑止できずに燃え広がってしまった箇所が存在した。これを防ぐための延焼抑止放水システム(WSS)のより有効な配置計画を検討する必要がある。

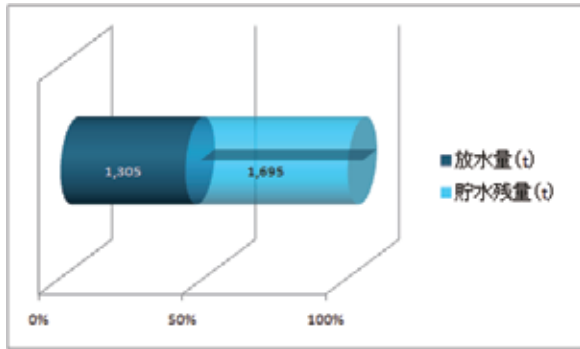


図 12 エリア③⑥⑧⑫における同時多発火災時の貯水残量



図 13 提案配置計画

ここではエリア⑤⑨⑪での広範囲に渡る延焼を防ぐため、延焼した箇所への WSS の追加設置を検討し、既往の計画との延焼抑止効果の比較を行う。またエリア⑧では木造建物が多く存在するにもかかわらず、二寧坂より北にはほとんど WSS が計画されていないことから、WSS の起動の有無が焼失建物数にほぼ変化がない。このような地域では WSS を追加設置することでより少ない被害に抑えられることが期待される。図 13 に示すように文化財とその周辺を守る防災水利整備事業の配置計画²⁾に WSS 設置路線を増やして計算した結果、焼失建物数を 50%以下に減らせることが明らかになった。(図 14・図 15)

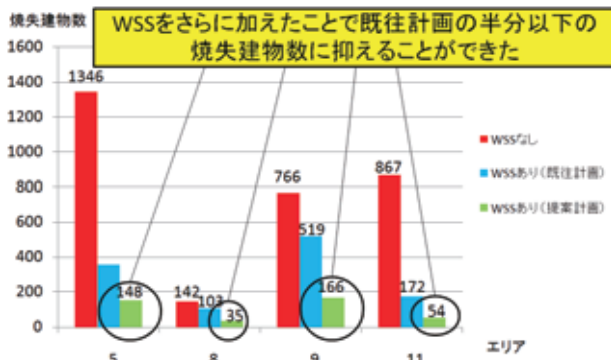


図 14 提案配置計画による効果



図 15 提案計画によるエリア⑨での効果 (出火から 12 時間後)

5. 研究の成果と今後の課題

(1) 研究の成果

本研究では延焼抑止放水システム(WSS)の配置計画の有効性を樋本らが開発した物理的延焼性状予測モデルを用いて検証した。WSS による延焼抑止モデルを作成し、物理的延焼性状予測モデルに組み込んで延焼シミュレーションを行った。研究対象エリアを 12 エリアに分割してそれぞれのエリアでランダムに出火建物を 1 棟選択して同じ条件のもとで計算を行った。抽出された結果について、WSS を設置しない場合と設置する場合とで延焼動向による比較、焼失建物数による比較を行い、WSS を設置する場合における放水量と貯水残量を計算した。結果、焼失建物数からみた有効性については、すべてのエリアにおいて WSS を設置した場合は設置しなかった場合と比べて焼失建物数が減少したことから WSS の配置計画は有効であると考えられる。また京都市第 3 次被害想定¹⁾の東山区の出火件数に合わせて 4 件での同時多発火を想定した結果、3000t の貯水量では十分に対応できることがわかった。より有効な配置計画の提案としてエリア⑤⑨⑪での広範囲に渡る延焼を防ぐため、延焼した箇所への WSS の追加設置を検討し、既往の計画との延焼抑止効果を比較した結

果、焼失建物数を既往計画の50%以下に抑えられることが確認できた。

(2) 今後の課題

本研究から抽出された課題を以下にまとめる。

①より現実に近いノード間隔の設定及び放水量の設定

本研究ではWSSの設置箇所におけるノードの設定について数値地図2500の道路接点(屈曲点)データを使用しているため、ノード間隔が均一ではない。このため実際のWSSの設置ピッチと異なることから、WSS起動のタイミングや放水面積が現実とは少し異なり、無駄な放水がなされている可能性がある。今後の課題としてより現実に近い適切なノード間隔で初期値を設定する必要がある。

②無駄な放水の考慮

WSSは道路を跨いで放水が行われるものであることからその際に放水された水は全て壁面にはかからずに一部は無駄な放水がなされ地面に落ちることになる。本研究ではこの無駄な放水については考慮しておらず、放水された水はすべて設定した放水面積にかかるものとして考えた。このことから今後はWSSによる放水時に放水角度や放水距離を変化させることで、どれだけの水が地面に落ちて無駄な放水がなされているのかといった実験を行う必要がある。さらに実験結果を基にして無駄水のモデル化ができるようになればシミュレーションの精度も増すと考えられる。

③今回考慮しなかった飛び火や熱気流による温度上昇の影響を含めた延焼抑止モデルの開発

本研究では延焼抑止モデルは輻射熱流束のみ抑止するものとした。このことから今後は飛び火や熱気流による温度上昇の影響下でも延焼を抑止する延焼抑止モデルの開発が課題となる。

④他に接続されている消火栓等による消火活動を考慮した延焼抑止モデルの開発

本研究では消火設備はWSSのみが存在し、他の消火設備の影響を考慮していないことから、今後は他の消火設備や消防隊の防災活動を含めた延焼モデルの開発ができればより現実に近いシミュレーションが可能となるだろう。

参考文献

- 1) 京都市消防局：文化財とその周辺を守る防災水利整備事業 <http://www.city.kyoto.lg.jp/shobo/page/0000066800.html>
(2010年6月現在)
- 2) 京都市消防局・京都大学地球環境学堂：清水地域の地域特性に応じた消火システムに関する調査研究委託業務報告書, P68-97,2007
- 3) 樋本圭佑・田中哮義：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 (607), P15-22, 2006-09-30
- 4) 田中哮義：建築火災安全工学入門, 日本建築センター, P65, P75,2002
- 5) 土橋常登・田坂茂樹・吉田正友・田中哮義：加熱を受ける壁面への事前散水による延焼防止効果に関する実験, 学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術, 社団法人日本建築学会, P29-30, 2007
- 6) 長谷川益夫・唐沢了：国産広葉樹のISO着火試験, 木材と技術, No56, P7-10, 1984
- 7) 京都市：京都市第3次地震被害想定報告書, P74, 2003