

延焼火災から歴史街区を守る街路壁面散水設備の開発 ～低負荷で効率的なWater Shield Systemの仕様検討～

Research on Specification of Water Shield System for Fire Spread
Control to Protect Traditional Wooden Cities from Fire Disaster

大窪健之¹・荒川昭治²・菊間陽介³・田中喙義⁴・井元駿介⁵

Takeyuki Okubo, Shoji Arakawa, Yosuke Kikuma, Takeyoshi Tanaka, and Shunsuke Imoto

¹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

²株式会社建設技術研究所 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1丁目6-7)

CTI Engineering Co., Ltd.

³株式会社ニトリ (〒115-0043 東京都北区神谷 3丁目 6-20)

Nitori Co., Ltd

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

⁵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

In case of Japan and Asian Countries, fire spread control must be urgent task for protection of traditional and high densited wooden buildings. The aim of this paper is development of specification for water spray system as "Water Shield System" to keep the surfaces of wooden street buildings wet and to protect them from spread of fire without harming their authenticity. Examination for understanding the needed amount of water for the system, the adequate method for spraying water to street buildings, the order of impact for traditional buildings by the water spray system and specification of water nozzle with low impact and high performance. The basic policies were shown by the series of four experiments.

Key Words : *Disaster mitigation, Traditional wooden buildings, Fire spread control, Development of water nozzle, Water Shield System*

1. はじめに

(1) 研究の背景

日本列島は環太平洋造山帯に位置しており、その成立から地震は不可避な災害となっている。現在、我が国は地震の活動期に入ったともいわれており、近年では阪神大震災や東日本大震災に見るように、地震直後に発生する地震火災によりさらに多くの被害を受けている。地震火災が、木造建造物の密集する伝統的地域において発生すれば、その被害は甚大なものとなり、多数の人命と共に、無二の遺産である文化的価値の高い建造物をも滅失してしまう可能性が高い。

本研究では、木造密集市街地の延焼火災を抑止する防火設備の一つとして、街路壁面散水設備(Water Shield System : 以下 WSS と略称)を提案する。この原理は、伝統的な木造外壁面に対して街路対岸から散水することにより、木材表面の素材を改変することなく、即時的に耐火壁に相当する性能を付与しようとする

ものである。

伝統的木造地域に多い狭小道路や、消防隊が活動できない熱環境下であっても稼働できるため、限られた水で伝統的な町並みでの街区をまたぐ延焼を抑止する効果を期待できる。

図1は、延焼の起きている街区から道路を挟んで反対側の木造街路壁面に対して、WSSシステムで効率的に散水し続けることで、街区間での延焼を抑止しているイメージである。



図1 延焼抑止放水システムのイメージ図

(2) 研究の目的

本研究では、当該システムの開発に資するため、①木材表面に散水することによる延焼抑止効果と散水量の関係を実験により確かめ、②効率的に散水するための自動旋回方式を含めた散水方式の検討を行い、③低負荷で高効率の散水ノズルの仕様検討を行う。

これによりノズル開発に向けた仕様設定の基本的指針の導出を目指す。

具体的には以下4点の課題に取り組む。

- ① 必要散水量の検討
木材表面への散水による延焼抑止効果を実験によって確認し、延焼が進展しない必要散水量を把握する。
- ② 散水方式の検討
街路対岸の木造の町並みに対し効率的に散水できるよう、旋回方式を含めた散水方式を検討する。
- ③ 水損の検討
散水による木造建物群への水損（散水荷重による破壊）防止するため、散水条件を把握する。
- ④ 散水ノズルの仕様検討
既製ノズルのタイプ別に空間的な散水分布特性を把握し、低負荷で高効率のノズル試作へ向けた、組み合わせによる仕様の検討を試みる。

2. 必要散水量の検討

始めに、木材表面への散水による延焼抑止効果を検証し、有効な必要散水量を把握するための実証実験を行った。

(1) 実験概要

関連する既往研究として、樹木と散水を組み合わせた放射熱遮断による延焼防止効果の屋外実規模実験¹⁾がある。樹木は約20～40%程度の放射熱遮断効果があるとされ、更に効果を高めるために、水幕と組み合わせた実験が実施された。実験の結果では散水ノズル5.5L/分を1mピッチに配置して、平均粒子径100 μ の水を毎分1m当たり約3L散水することで、更に放射熱を約50%低減出来る事が確認された。

木材表面への散水により延焼を防ぐ実験としては、木質系柱部材の耐火性能実験²⁾がある。一般に木材は5～11kW/m²程度の放射受熱量があれば10分程度で発炎し、その際の木材の炭化速度は0.6mm/分程度といわれている。これに対し300mm角の柱材を用いた実験では10～20L/m・分での散水により90%程度の抑制効果があることが確認されている。

これらの既往研究の結果から、木造密集地域には植樹を行う余地のある街路が少ないことを踏まえ、特に

後者の研究を発展させることで、木造外壁面への散水による延焼抑止効果の確認を行う実験を実施することとした。

すなわち伝統的な木造外壁材を試験体とし、発熱性試験装置を用いた小規模の実験を行い、試験体に加わる熱流速と注水量との関係から、試験体の着火限界を把握することを目的とした。さらに広範囲への効率的な散水が期待できる自動巡回式散水設備の利用を想定して、水のかからないタイミングを定期的に設定した間欠散水による影響についても計測を行い、着火に至らない限界の散水条件を探った。

(2) 実験方法

一般的な伝統木造建築の外装材である、杉および桧材について、素地、アルキッド系塗装、クリアラッカー塗装の別に 10cm 四方の試験体を用意し、発熱性試験装置を用いて加熱強度および表面への散水量を変化させて、試験体表面温度を計測³⁾した結果、散水量 $1.35\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{分}$ 以上であれば、どの材料についても加熱強度 $40\text{kW}/\text{m}^2$ という延焼相当の熱環境下において延焼抑止効果があることが明らかとなった。

さらに自動巡回式の散水設備の活用を想定し、散水時間と無散水時間とがサイクリックに繰り返される状況を再現した散水インターバル実験⁴⁾を行った結果、どの材料についても無散水時間を 5 秒とし散水時間を 3 秒とした場合には表面の温度上昇が頭打ちとなり、着火には至らないことが明らかとなった。

(3) 成果と課題

以上の結果を踏まえ、必要散水量としては安全率を見込んで $2\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{分}$ 、無散水時間 5 秒に対して散水時間を 3 秒確保することを散水設備の目標とした。これを実現できるような設備開発が課題となる。

3. 散水方式の検討

次に、この効果を応用した防火システムの実用化を目指し、より広範囲への効率的な散水が期待できる自動巡回式の散水設備について、既製設備の活用可能性の検討を行った。

(1) 実験概要

まず実設備サイズの自動巡回散水設備による垂直壁面への散水量を測定した。散水ノズルには文化財等の防火設備で一般に使用されている $550\text{L}/\text{分}$ (0.5MPa 時) の可変噴霧ノズル (放射角 20°) を採用し、自動巡回による散水特性を把握し、既往実験から得られた散水量・散水条件に対する比較検討を行った。

(2) 実験方法

伝統的な木造地域では狭小道路が多いが、実際にはおよそ $4\text{m} \sim 10\text{m}$ 程度と幅がある。開発に当たり散水条件を厳しく設定する必要から、散水距離を 10m と広めに設定した。

散水高さについては、建築基準法上の上限である 3 階建て木造建築高さ相当まで散水するため 10m と設定した。旋回の角度は、大きくすればするほど散水設備の設置ピッチを広げることができるが、無散水時間が長くなり延焼防止が困難になることが予想されるため、予備実験を踏まえて 90° に設定した。

以上から図 2 のモデルを想定し、自動巡回式散水設備による壁面への散水量について、図 3 の測定装置を作成して実測⁵⁾した。

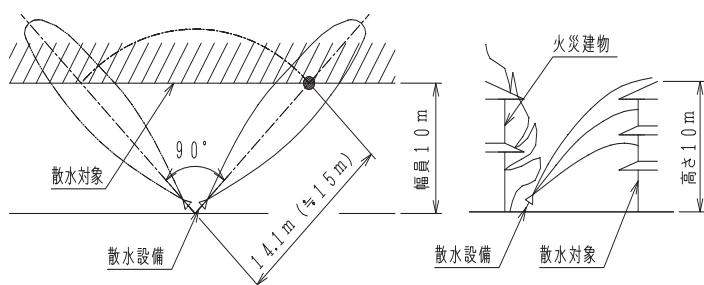


図 2 自動巡回式散水設備のモデル

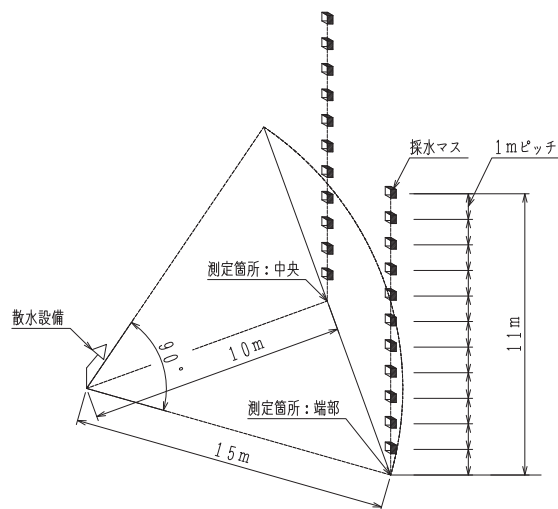


図 3 測定装置の概要

その結果、

- ・目標設定値を目指して無散水時間を短くするべく回転速度を速くすると、散水パターンが全体的に縮小し、散水が到達する高さの低下や垂直壁面における総散水量の減少が生じるため、結果として有効散水量を得るためには消費水量的に非効率となること。
- ・散水設備から散水対象までの距離が短くなる場合（振幅中央部）には主流が拡散せず、壁面への散水範囲が狭くなること。

等の特性が明らかとなった。

(3) 成果と課題

以上の結果、開発する散水設備の仕様については、自動回転式とはせずに固定式とし、複数のノズルを組み合わせる等により広範囲への効率的な散水を目指すこととした。なお、散水ノズルの主流部では距離 5m で最大 $9.0\text{kgf}/\text{m}^2$ の散水荷重を記録したことから、散水荷重による伝統木造建築物への影響を把握しておく必要性が明らかとなった。

4. 散水荷重による建築物への影響検討

(1) 実験概要

先の実験で伝統的木造建築物に対する散水荷重が課題となったことから、前面道路側を構成する外壁面のうち、最も強度の弱い部位の一つと考えられる木製の建具まわりに注目し、同じ可変噴霧ノズルを使用して建具の破壊時の散水圧と、その散水荷重の測定を行った。

(2) 建具の選定

一般的な京町家を想定し、実際に使用されていた古建具を確保して建具枠を制作した。現存する京町家の多くが明治後期から昭和初期にかけて建築されていることに鑑み、①主に商店などの玄関に用いられる板厚約 4mm のガラス一枚戸、②商店以外の外観を構成している板厚約 2mm のガラス格子戸、③雨戸を閉めきった場合の外観を構成している板戸の 3 種類に加え、④それらの外側に配置される例の多い木製格子（開口率約 50%）、との組み合わせについても再現した。

(3) 実験方法

散水設備を水平に固定して 10m の距離に建具枠に入れた建具を配置し、徐々に散水圧を高めて破壊された際の散水圧を測定し、併せてその際の散水荷重を測定した。実験ケースとしては、強度が弱いと考えられる順に、①ガラス一枚戸、②ガラス格子戸、③ガラス格子戸＋木製格子、④板戸の順に検証した。



図4 建具まわりに対する散水実験

(4) 成果

上記ケースの内、④については実験設備の上限となる 1.0MPa （測定散水荷重= $40.4\text{kgf}/\text{m}^2$ ）でも破壊されなかったが、①についても予想に反して破壊に至らなかった。これはガラス一枚戸が、町家を商店等として改修利用するようになった比較的近年に導入されはじめた建具であり、ガラス自体には現代のフロートガラスが用いられていたため破壊されにくかったものと考えられる。一方②については、フロートガラスが開発される以前のガラスが利用されており、 0.4MPa （測定散水荷重= $15.0\text{kgf}/\text{m}^2$ ）で破壊に至った。次いで

これの前に開口率約 50%の木製格子を配置して③の計測を行った結果、0.7Mpa（測定散水荷重=28.3kgf/m²）で破壊に至った。

検証の結果、最も弱いケースとなったガラス格子戸であっても、3章で計測した最大値 9.0kgf/m²を超える 15.0kgf/m²まで耐えられることが明らかとなった。これにより、延焼抑止効果が期待できるレベルの散水環境下でも、建築物側が破壊される可能性は十分に低く、低負荷のシステムと言えることが示された。

また木製格子は伝統的景観に寄与するだけでなく、その開口率に応じて、建具まわりの強度向上にも貢献することが明らかとなった。

5. 散水量測定実験に基づく効率的な散水ノズル仕様の設定

(1) 実験概要

次に効率的な散水ノズルの仕様を検討するため、代表的な 3 種類(可変噴霧、扇形、組み合わせ型)の既製ノズルを用いて、壁面散水量測定実験を実施し、それぞれの空間的な散水分布特性を把握した。得られたデータを元に 10m 幅の道路対岸に想定した、横幅 20m（散水ノズルからの水平放射角を 90° と設定）、高さ 10m（木造 3 階建て相当）の木造の町並みの全面に対して、必要な 2L/m²・分以上の散水を行うことが可能な、効率的なノズルの組み合わせ方針を導出した。

(2) 実験方法

測定対象としたノズルは以下の 3 種である。

①可変噴霧ノズル：これまでの実験で利用した型

550L/分（0.5MPa 時）放射角約～20°

②扇形ノズル：文化財で主に用いられる型

155L/分（0.5MPa 時）放射角約 25°

なお①については、3章：散水方式の検討の際に、散水設備を固定したまま 15m の離れ距離において、主流の到達する高さ 10m から下向きに 1m ピッチで散水量を計測しておいたデータが利用できるため、これを援用することとした。この際の散水幅は中心から左右約 1.5m の範囲であったが、10m の離れ距離での計測値に近似するため、高さ、幅方向ともに 2/3 を乗じた値を参考値として採用することとした。

②の測定については計測データが無かったため、以下の条件で測定した。ノズルの高さを地上 1.3m に固定し、仰角は散水の主流部が高さ 5m に来るように調整して、公道としての最小幅である 4m と、条件の厳しい 10m の 2 つの離れ距離において、高さ 5m までの散水量を 1m ピッチで測定できる測定ラインを垂直に設置した。散水量は開口面積 0.1 m² の取水マス を 1m おき縦方向に配置し、そこに溜まる各水量をホースで導水して計測した。なお高さ 5m までの測定とした理由は、予備実験において②のノズルの能力では、離れ距離 10m の位置で高さ 10m まで水を到達させることが不可能であったためである。

この測定ラインを、最も散水量が多いと考えられる散水方向正面の中央部と、そこから左右に 1m ずつ離れた位置に設置し、高さ 1m ピッチの散水量を測定した（図 5）。加えて中央から左右に離れることにより散水が到達しなくなる場所（散水量ゼロ）までの距離を測定した。



図 5 散水量測定実験



図 6 組み合わせノズル

③組み合わせノズル：広範囲への散水に用いられる型

155L/分 (0.5MPa時) 放射角約 25°

併せて応用の可能性を検証するため、小型単口ノズル 5 ヶを下段に、小型扇形ノズル 2 ヶを上段に、それぞれ水平に配置した形式の既製の③「組み合わせノズル」(485L/分 (0.5MPa 時)) (図 6) についても測定を行った。このノズルの散水能力も②と同様に高さ 10m に及ばなかったため、②と同条件にて測定した。

今回の測定では、散水対象となる垂直面に対して、高さ毎の散水量曲線を描くためのデータ計測を目標として、実験設備を構成した。(図 7)

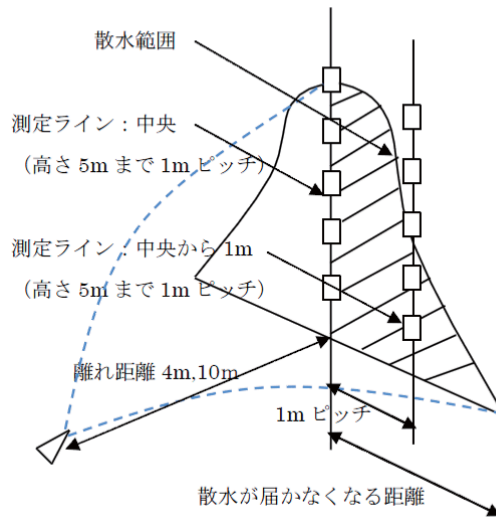


図 7 散水量測定実験の計測モデル

(3) 実験結果

得られた結果を以下に整理する。本論では、4m よりも条件の厳しい距離 10m での測定結果のみを示す。

①可変噴霧ノズルの散水量分布 (図 8)

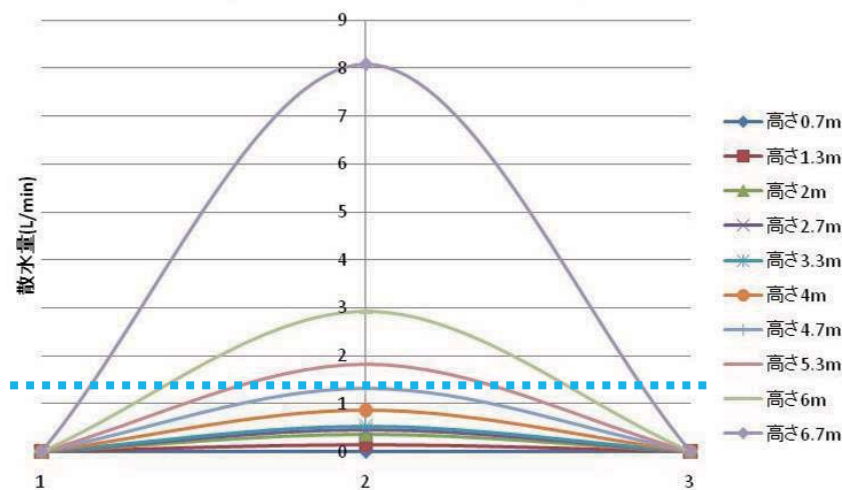


図 8 可変噴霧ノズルの高さ別散水量分布

可変噴霧ノズルについては、製品仕様通りの条件である 550L/分 (0.5MPa) にて散水を行い、離れ距離 15m、高さ 10m に主流を到達させた状態で計測しておいたデータをもとに、離れ距離 10m に換算するため高さ、幅方向ともに 2/3 を乗じた参考値としてグラフ化した。横軸は各地点番号で 2 は正面中央、1 および 3 はそれぞれ中央から 1m 左右方向に離れた地点を表す。

3 つの測定点を 3 次スプライン曲線 (3 次の多項式で小区間を近似する区分的多項式曲線) で補完したグラフから、必要水量となる 2L/m²・分以上の範囲をたどると、主流の到達する 6.7m の高さでは横幅約 1.8m の範囲をカバーできることが判る一方、高さ 6m では約 1m、高さ 5.3m ではほぼ中央付近のみが条件を満たすことが明らかとなった。

②扇形ノズルの散水量分布 (図 9)

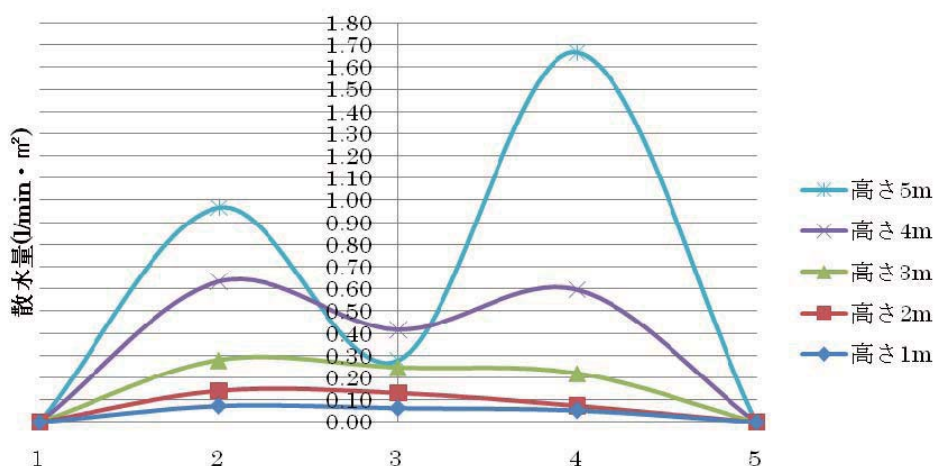


図 9 扇形ノズルの高さ別散水量分布

扇形ノズルについては、152L/分 (0.5MPa) のほぼ製品仕様通りの条件で散水し、離れ距離 10m、高さ 5m までの範囲で測定したデータとなる。横軸が各地点番号で、3 が正面中央、2 および 4 はそれぞれ中央から 1m ずつ左右方向に離れた地点であり、1 および 5 は散水が及ばなかった距離で中央から左右方向に 2m 離れた位置であった。

5つの測定点を 3 次スプライン曲線で補完したグラフからは、扇形ノズル単体では 2L/m²・分以上という必要散水量が得られない結果となった。中央付近の散水量が少なく、左右方向の散水量にも偏りが見られるが、偏りは製品による公差と考えられる。これを用いる場合には、複数の扇形ノズルで散水範囲を重ね合わせる等の散水量確保のための工夫が必要であることが明らかとなった。

③組み合わせノズルの散水量分布 (図 10)

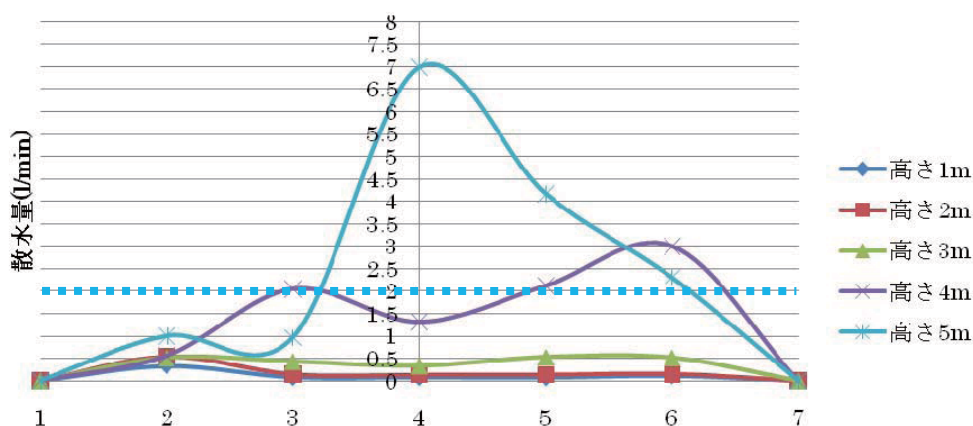


図 10 組み合わせノズルの高さ別散水量分布

組み合わせノズルについても、離れ距離 10m、高さ 5m までの範囲で測定したデータとなる。実験では散水圧を揃えるために 0.5MPa に設定した結果、散水量は 485 L/分となった。横軸が各地点番号で、4 が正面中央、3 および 5 はそれぞれ中央から 1m ずつ、2 および 6 は中央から 2m ずつ左右方向に離れた地点であり、1 および 7 は散水が及ばなかった距離で中央から左右方向に 3m 離れた位置であった。

7つの測定点を 3 次スプライン曲線で補完したグラフからは、中央付近の散水量が高さ 5m で突出しており、4m では 2L/m²・分以上を満たす範囲が幅 1.5m ほど存在するものの、3m 以下では 0.5L/m²・分以下となる。左右方向の散水量にも偏りが見られるが、これも製品の公差と考えられる。必要水量となる 2L/m²・分以上を満たす範囲は、公差を解消したノズルであれば高さ 5m 付近で幅 3m 程度確保できる可能性があるが、その際には棒状ノズルとほぼ同程度の散水量が必要となることが明らかとなった。

(4) 結果と考察

以上を総括して効率的なノズル開発に向けた仕様設定の検討を行う。

実験の結果からは、到達距離の長さでは可変噴霧ノズルが、 $2L/m^2 \cdot \text{分}$ 以上の散水量を満たす範囲の広さでは組み合わせノズルが、相対的により有利なノズル形式であると考えられる。このため効率的な散水を行うためには、道路対岸の正面中央部分については、組み合わせノズルによってできる限り広い範囲カバーするとともに、到達距離が長くなる道路対岸の高所部分や、正面から左右に散水角度の振れた両端部分に対しては、複数の可変噴霧ノズルで補完をするような組み合わせ方が必要となることが明らかとなった。

なお、実施した散水量分布測定では主流の中心が到達する高さから下方のデータしか得られなかったが、実際には主流の中心より上方へも散水は行われていることや、壁面を流下する余剰水の効果についても検討が必要であり、最終的に仕様決定をするためには、さらなる水の有効利用を考慮する必要がある。

6. 結論と今後の課題

本研究で得た成果は以下である。

① 必要散水量の検討

必要散水量としては安全率を見込んで $2L/m^2 \cdot \text{分}$ 、無散水時間 5 秒に対して散水時間を 3 秒は確保する必要が示された。

② 散水方式の検討

自動回転による散水方式は、無散水時間を短くする上で効率が悪化するため、固定式で検討する必要が示された。

③ 水損の影響検討

伝統木造建具に対する、散水荷重による破壊の可能性は少ないことが示された。

④ 散水ノズルの仕様検討

既製ノズルのタイプ別に空間的な散水分布特性を測定し、ノズルの組み合わせ方針について検討した。

なお今回検討したノズル仕様の基本指針には、実験結果で得たデータと推測値が混在しているため、散水角度を変えた壁面散水量測定を改めて行うなど、精査が必要である。今後、角度、流量などの要素を変更した場合の散水量分布を実験で測定し、より正確なノズルの仕様設定を行い開発を進めることと、実大に近い実験環境で、延焼抑止効果を立証することが課題となる。

謝辞

本研究はグローバル COE プログラム「歴史都市を守る「文化遺産防災学」推進拠点」の活動成果である。なお本研究を進めるにあたり、平成 20 年度および平成 22 年度の国土技術研究センター(JICE)研究助成金、平成 20 年度旭硝子財団研究助成金、平成 19 年度京都市調査研究委託、平成 18 年度消防防災科学技術研究推進制度による助成と補助を受けた。記して感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 山下邦博ほか「大震災時における地域防災活動拠点の安全性確保に関する研究報告書」、自治省消防庁消防研究所、平成 11 年 3 月
- 2) 石田博ほか「300 角柱部材の耐火性能及び炭化層深さ」平成 15 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.126-129、2003 年 5 月
- 3) 田中哮義（研究代表）、大窪健之ほか「地域消防力に着目した密集市街地の地震火災対策に関する研究」消防防災科学技術研究推進制度、平成 18 年度報告書
- 4) 京都市消防局、京都大学地球環境学堂（研究代表：大窪健之）「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」平成 19 年 3 月
- 5) 大窪健之（研究代表）ほか「文化遺産と伝統的町並みを地震火災から守る防火システムの研究開発」平成 20 年度(財)国土技術開発センター研究開発助成・成果報告書、平成 21 年 4 月
- 6) 井元駿介、大窪健之、樋本圭祐、田中哮義：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、歴史都市防災シンポジウム'10 論文集、pp.21-28、2010 年 7 月 3 日