

効率的なノズル開発に向けた散水挙動の理論的考察 ～延焼火災から歴史的な木造密集市街地を守る 街路壁面散水設備(WSS)の開発～

Theoretical considerations of water sprinkling morphology for efficiently preparing the nozzle of WSS which sprinkles limited water to facade of wooden narrow street for controlling radiant heat and protecting historic districts

栗原拓大¹・大窪健之²・金度源³・林倫子⁴

Takuhiro Kuwahara, Takeyuki Okubo, Dowon Kim and Michiko Hayashi

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

Graduate student, Ritsumeikan University, Graduate school of science and engineering

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, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

³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

⁴立命館大学助教 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)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

A piece of Japanese traditional cityscape, there is wooden cultural city. However in high densely areas of wooden cultural city, it is difficult to control spread as large-scale fire after earthquake etc. Water Shield System is a kind of firefighting equipment that sprays water to the surface of wooden walls facing toward spread, reduce the temperature from radiant heat and decrease the speed of fire spreading across narrow streets in traditional high density areas. This study aims to reveal the actions of water droplet which be drained off from a uniforate water spray nozzle based on an actual water spray nozzle which can sprinkle for a wide range of area for more efficiently preparing the WSS nozzle.

Keywords : WSS(Water Shield System), uniforate water spray nozzle, actions of water droplet, using model of wall

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年、大規模な地震の発生が予測されている日本では、地震による揺れのみならず、それに伴い発生する大規模火災や地盤の液状化等の複合災害への対策が急務とされている。特に1995年に発生した阪神淡路大震災では、地震により倒壊した家屋が道路を閉塞し、孤立した地区への消防活動が困難になった結果、大規模な同時多発火災となり、多くの人命と建物が失われた。日本には、文化的価値を有する木造建造物が多く現存しており、京都のような歴史的な木造建造物が密集している地域においては、街路が狭く、緊急車両の進入が困難であるといった特性から、地震時の延焼火災によりそれらを失う可能性がある。しかしながら、そのような歴史的な町並みを有する都市は、火災に対し脆弱であるにもかかわらず、その特徴から建物の不燃

化や道路拡幅等の景観に係る火災対策が困難であり、文化的景観を損なうことなく実施できる延焼対策の考案が必要とされてきた。

そこで歴史的な景観を有する木造密集市街地での延焼抑止対策として、一定量の水を壁面に対し事前に散水を行うことにより、木材表面の素材を改変する事なく、一時的に耐火壁に相当する性能を付与し、火災発生街区からの延焼を抑止しようとする Water Shield System(以下WSSと略す)が考案されている。

既往研究では、土橋ら¹⁾によって加熱を受ける木材供試体において、事前散水を行う事により、壁面部材に着火限界温度を超えない一時的な耐火性能を持たせる作用があることが明らかとなった。また大窪ら^{2) 3)}の研究では、伝統的な木造外壁面を持つ実大模型を用い、WSSによる散水を行った場合の延焼抑止効果や必要散水量、放水圧による建物への水損被害ならびにノズルの離れ距離や散水幅等のノズルの仕様検討等が行われ、実際の木造密集市街地におけるWSSの効果の検討や、より効率的なノズルの開発等が行われた。

また、井元ら⁴⁾によって、京都市清水周辺地域を対象とした実際の市街地におけるWSSの延焼抑止効果のシミュレーション評価が行われ、荒川ら⁵⁾や金ら⁶⁾によって、WSS使用時における京都市清水周辺地域の配水システムの評価や、本願寺水道の送水管再生によるWSSの防災水利としての活用など、実際の配置を想定した研究が行われてきた。

しかしながら、WSS散水ノズルは、対象物となる壁面までの距離や大きさ、壁面高さ等状況に応じ、水滴噴出孔の位置や角度、口径などに変化させなければならず、ノズル作成者の経験や技術に依存している部分が多く、試作と試験を繰り返してノズル仕様を検討している点から、作成において非常に多くの時間と費用がかかるといった課題が挙げられる。

(2) 研究の目的

上記の背景から、今後より精度の高いWSSの効果検討や低コストで効率的なノズル開発を行うためには、WSSによる散水形状の理論的把握が不可欠である。

これまで、散水に関する研究は岡村ら^{7) 8) 9)}によって農業用スプリンクラーによる地表面での水滴挙動の理論化が行われており、本研究ではそれらに用いられてきた「飛翔水滴の運動方程式」を使用し、既往研究において検討された仕様のWSS単孔ノズルを作成し用いることで、地表面と垂直方向に存在する壁面への最大被散水量が計測される位置の予測を行う。また、散水に影響を及ぼすと考えられるノズル要素を変化させた場合の壁面被散水量の結果から、ノズルの要素と壁面被散水量の関係式を算出し、その検討を行う。

2. WSSによる散水形状の理論化に向けた実験ノズルの仕様設定

(1) 現行のノズル仕様

現在までのWSSのノズル仕様としては、将来的に京都市清水地域等の伝統的な木造密集市街地への配置計画の検討を目指している事から、景観等に配慮した省スペースでの設置を目的とし、一つのノズルに複数の噴出孔を設けた多孔形状のノズルが作成されている。また、上記に示したような木造密集市街地を想定した場合、これらの地域に多く見られる特徴としては、現存する二階建ての木造町屋が連続する町並み有しており、WSSによる延焼抑止はそれらを対象とする為、標準的な木造壁面の高さを考慮し、WSSの散水ノズルによる散水高さを6mとしている。同様に既往研究ではノズル位置と散水対象物である外壁面までの水平距離(以下、ノズルの離れ距離)を5m、散水角度(広角)を90°とし、離れ距離が5mの場合散水幅10mをノズルの基本仕様としていた。¹⁾

(2) 実験におけるノズル仕様の検討

本研究では水滴の挙動を明らかにするために、表1のノズルの仕様を簡略化した物を用いる事により、ノズル仕様が飛散形状に及ぼす基本的な影響に関する情報を抽出する。

ノズルの仕様として、現状の多孔形状ノズルにおける基礎的な情報を抽出するために、単一孔形状のノズルを使用し、既往研究³⁾により用いられてきたノズル径より代表的な3種類(φ3mm、φ5mm、φ7mm)を用い、口径の変化に対する水滴の広がり具合を確認する。

ノズルの設計に関して、既存のノズルはノズル内において圧力を等しく分布させるため、ノズル上部ほど内部の断面積が小さくなる設計になっている事から、ノズル内部の高さによって、水滴発射までの距離(以下助走距離とする)に差異が生じ、水流の挙動が変化する恐れがあった。そこで、本研究における実験では、図1から

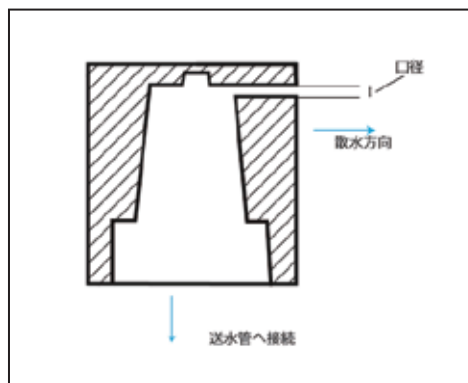


図1 現行ノズル設計

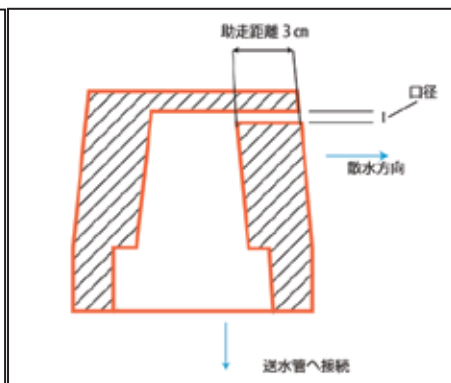


図2 本研究におけるノズル設計

図2橙線に示すように、ノズル外面を削り、ノズル内部からの水滴の助走距離が水平面において一定とした(助走距離3cm)。また、エア(気泡)の混入による圧力損失を最小限にするため、ノズル最上部に水滴噴出孔を設置する事となった。

WSSによる散水は風の影響を大きく受ける為、その挙動を詳細に把握するために本研究では屋内において放水実験を行った。散水の対象とする壁面の高さ(散水高さ)は、実験場の屋根の高さを考慮し4mとした。実際の配置では設置間隔は散水幅・散水角度(広角)により決定され、複数のノズルを使用する際に必要な項目であることから本研究においては考慮せず、散水幅・散水角度(広角)および放水流量に関しては単孔ノズルにより水滴噴出孔一つ当たりの性能を実験により検討するため実測値を求めるのみとする。ノズルからの離れ距離と壁面被散水量の変化を明らかにするため3m、5m、7mの3地点において壁面被散水量を検討する。また、散水角度(仰角)に関しては、本研究では図2に示す水平方向への単孔ノズルを使用する事から、実験においてWSSを設置する為の支柱を可動式にした架台を用い仰角の変更をできるようにした。仰角の代表値は、数値の変化が大きく、かつ実験場の放水高さ限界を考慮した3種類(20°・30°・35°)を採択した。なお、放水圧力に関しては、既往研究と同様に重力加圧式の散水を行う際、高低差の小さい地点でも稼働できる必要がある事から、通常の防火設備の半分程度を目安に0.25MPaとする。³⁾ 上記内容をまとめ、表1に記載する。

表1. 本研究におけるノズルの仕様設定

ノズルの仕様条件	項目	内容
デザイン	形状	単孔形状
	口径	φ 3mm、φ 5mm、φ 7mm の 3 種類
設置条件	ノズルの離れ距離	3m・5m・7m
	散水角度(広角)	実測値に従う
	散水角度(仰角)	20°・30°・35°
	散水幅	実測値に従う。
	散水高さ	4m
	設置間隔	考慮せず
散水性能条件	設置レベル	0m
	必要壁面散水量	実測値に従う
	放水流量	実測値に従う
	放水圧力	0.25MPa

3. WSSの飛散特性評価のための壁面模型放水実験

(1) 実験概要

表1における仕様ノズルと受水升(高さ20cm×幅20cm)20個を垂直に重ねた集水パネル壁面(高さ4m×幅20cm)(3.(2).b)集水パネルにて後述)を用い、WSSノズルを移動させることによりノズル離れ距離および単孔ノズルによる散水幅の計測実験を行う。

(2) 設備設定

a) ノズル

表1において示した仕様のノズルを使用する。

b) 集水パネル

壁面散水の計測には、図3に示すような、幅20cm、正面から見たときの高さ20cm(樋の縁部分1.98cm)、奥行31.24cmの受水升(集水パネルブロック)を図4のように20個積んだ物を壁面として使用する。受水升は、受水面に付着した水滴を下の受水升へ流下させ、あらかじめ各ブロックの裏側から接続させた取水ホースを通じて計測升へと誘導する(図5参照)。各取水ホースにはバルブを取り付け、放水を行っている間はバルブを閉止する。また壁面は、計測開始前に消火栓等を用い、事前に濡らしておく事により、一定量の水滴が恒常的に壁面もしくはブロック内部およびホース内部に付着させる事とする。

なお、WSSは土橋¹⁾らの研究において、加熱を受ける木材壁面に対して散水を行い、木材表面に水膜を形成することで、輻射熱を水膜の蒸発により消費させ、着火限界温度に到達させないという知見を基に検討されている事から、今回の実験では壁面に衝突し、受水面に付着しなかった水滴に関しては無駄水として扱う事とした。

c) ノズル固定用可動式

架台の操作における仰角の設定は、ノズル固定部を動かしおおよその仰角の設定を行った後、架台本体の高さ等を微調節し行う。

また、放水毎に架台を壁面に対し20cmずつ並行移動させる事で、ノズル中心から水滴が到達する限界の距離を散水幅を捕捉する事ができ、その合計を鏡像反転させる事でノズル一つ当たりから噴出される水滴の散水幅を推定できる。

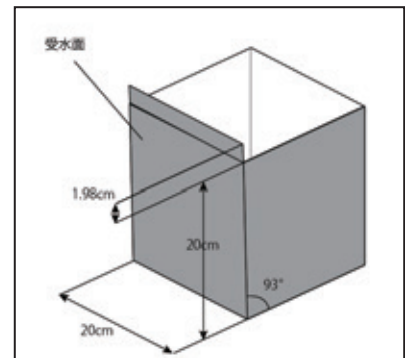


図3 受水升



図4 集水パネル壁面

(3) 実験方法

試験条件は表1に示すようなノズルの仕様条件を満たすように、設置レベルは0m、集水パネルとノズルとの離れ距離は3m、5m、7m、ノズル仰角は20°、30°、35°のいずれかとし放水圧力は0.25MPaとし計測時間は1分間とする。³⁾

実験手順

- ① 気温を計測し、WSS ノズルの位置・仰角・高さ(以下 設定とする)の調節を行う。
- ② 各バルブが開放されている事を確認する。
- ③ 壁面に消火栓で放水し、各受水升を均等に濡らす。また各受水升から取水ホースを伝って各バルブから排水されている事を確認する。
- ④ 放水を中止する。
- ⑤ 各バルブから排水がされていない事を確認し、バルブを閉止する。
- ⑥ WSS ノズルに障害物を設置し、放水が受水升に入らないようにし圧力設定を行う。
- ⑦ 規定圧力(0.25MPa)を確認し、計測スタートの合図に合わせて障害物を取り除く。
- ⑧ 計測終了時間(1分間)の合図と同時にノズル前面に障害物を入れポンプを停止する。
- ⑨ 排水バルブの下に計測升を設置し、排水バルブを開放して各受水升の水を抜き取る。

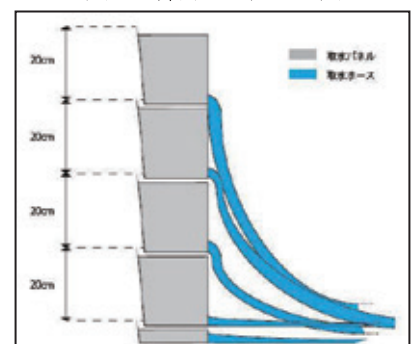


図5 受水方法

- ⑩ 各バルブから排水されていない事を確認し、計測升の水量を計測する。
- ⑪ 手順⑨・⑩の間にノズルの設定を行う。

(4) 結果

散水位置における壁面到達水量を図6に整理する。

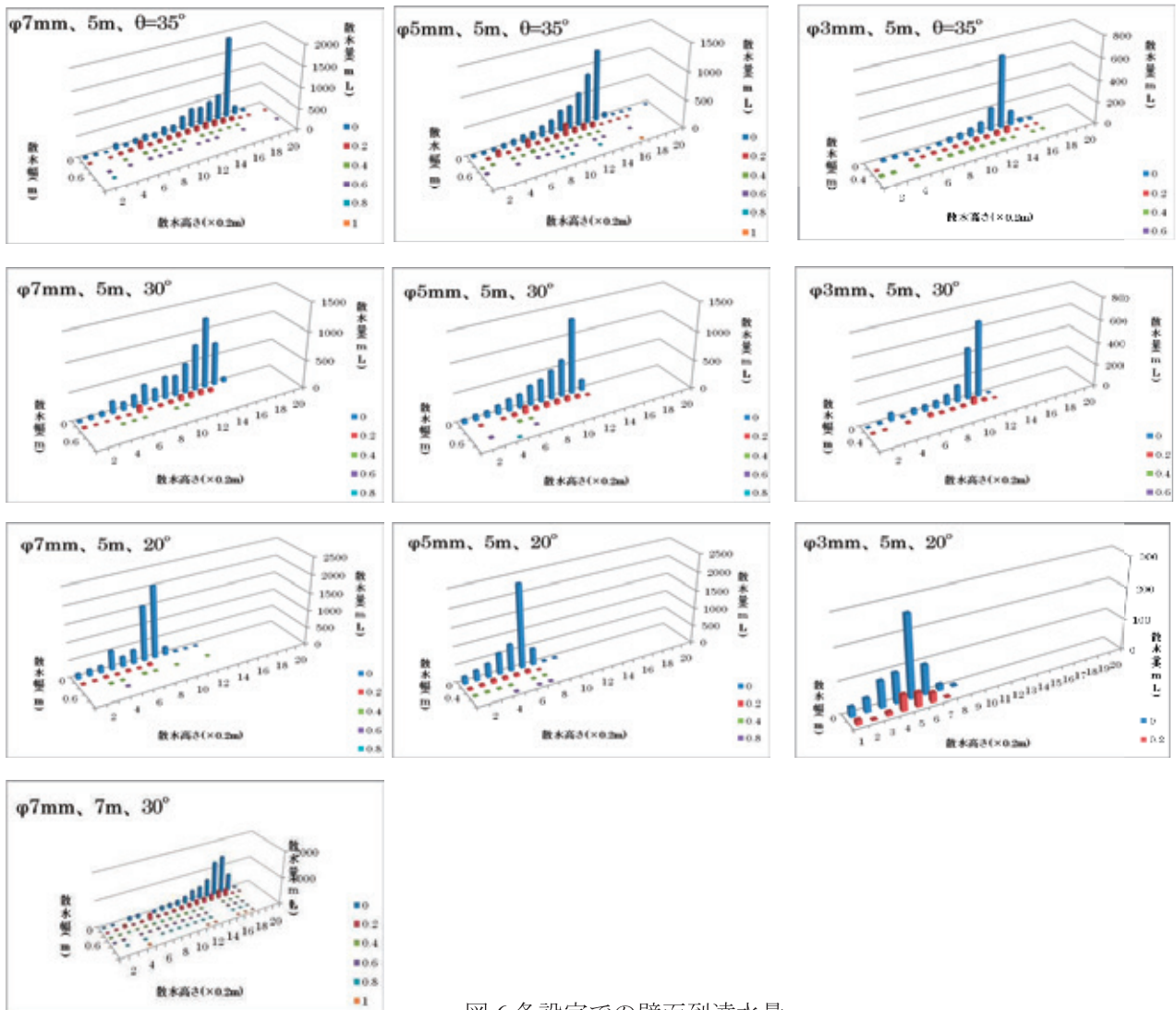


図 6.各設定での壁面到達水量

図6は、各設定のノズルによる放水において、壁面がの各受水升が受水した水量を示したグラフである。凡例の色は散水位置(架台の壁面に対する平行移動)による散水を表し、全受水升の被散水量が0になった地点をその仕様のノズルにおける散水限界幅とした。また散水高さは受水升のNo.を下から1~20としNo.×0.2[m]を被散水位置とした。

4. 水滴挙動の理論化に向けた基本式

(1) 飛翔水滴の運動方程式を用いた発射角度の予測

本研究では水滴の飛散時にノズルから噴出される水滴がある離れ距離において存在する壁面に到達する場合に、仮想的にノズルから噴出されたと考えられる角度(以下 水滴の発射角度とする)を算出する。なお実際の水滴はノズルの仰角に従い噴出された水流が、放水開始直後から分裂を繰り返し広がりながら噴出するが、今回実験では壁面に到達する水滴はすべて同じノズル孔から異なる発射角度で噴出すると想定する。

まず流量係数を加味した流量計算式を式(1)に示す。式(1)より実験時におけるノズル口径から、流量および水滴の初速度を算出する。

$$Q = 0.653 D_n^2 \sqrt{10.2P} \quad (1)$$

(但し Q : 流量[m³/min]、 A : ノズル孔面積 $\pi(\frac{D_n}{2})^2$ [m²]、 D_n : ノズル口径[m]、 P :放水圧力[MPa]とする)

本研究では、ノズル噴出孔より発射された水滴はすべて式(1)により求められる初速度で発射されると仮定し $v=Q/A=q_{cr}$ として以下に示す式(2)水滴の分裂式により水滴の半径を求める。

$$\text{臨界速度 } q_{cr} = \sqrt{\frac{4\alpha \cdot g}{\gamma \cdot C_D \cdot \rho_a}} \quad (2)$$

ただし α : 水滴の表面張力[N/m]、 γ : 水滴の半径[m]とする。

初速度と同様に、臨界速度を越えない限りすべての水滴は式(2)より求められる半径とし、これを用いて「飛翔水滴の運動方程式」^{7) 8) 9)}より、水滴ひとつあたりにおけるx,y,z方向への運動を考察する。飛翔水滴の運動方程式は式(3)～式(5)のように示され、x,y,z方向におけるそれぞれの初速度を水滴の発射仰角を θ_w 、発射仰角を Φ_w として以下のようにあらわされる。式(6)～式(8)

・ x 方向(ノズル孔から壁面へ垂直方向)

$$\ddot{x} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q \dot{x} \quad (3)$$

・ y 方向(ノズル孔及び壁面と平行方向)

$$\ddot{y} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q \dot{y} \quad (4)$$

・ z 方向(鉛直方向)

$$\ddot{z} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q \dot{z} - g \quad (5)$$

ただし D : 飛翔水滴の粒径(m)、 ρ_w : 水滴の密度 (kg/m³)、 q : 水滴の相対飛行速度= $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ (m/s)、 C_D : 抵抗係数、 ρ_a : 空気の密度(kg/m³)、 g : 重力加速度(m/s²)

$$\dot{x}_0 = q_{cr} \cdot \cos\theta_w \cdot \cos\Phi_w \quad (6)$$

$$\dot{y}_0 = q_{cr} \cdot \cos\theta_w \cdot \sin\Phi_w \quad (7)$$

$$\dot{z}_0 = q_{cr} \cdot \sin\theta_w \quad (8)$$

式(1)～式(8)を用い、20cm 四方の各受水升へ飛散する水滴の飛散角度を加法近似により算出することにより水滴の飛散角度分布を求める。

本稿では初期条件を実験時に計測した以下の数値を代入する。

初期条件 : P :放水圧力=0.25MPa、実験時の平均気温8.3℃より ρ_a : 空気の密度=1.2548 kg/m³、 ρ_w : 水の密度=999.83 kg/m³、水滴の表面張力 $\alpha=7.461 \times 10^{-3}$ N/m、抵抗係数 $C_D=0.45$ 、重力加速度 $g=9.806$ m/s²

算出した飛散角度分布による最大被散水量計測位置と、図 6 に示す実験により得られた最大壁面被散水量の計測位置を比較すると、口径 $\Phi 7$ mm、壁面離れ距離 5m、ノズル仰角 30 度の場合では発射角度予測は $30.34^\circ < \theta \leq 32.20^\circ$ でノズルから噴出された主流(水流の本流)の到達位置は散水高さ 2.6m であると計算される。これは図 6. 中の $\Phi 7$ mm、壁面離れ距離 5m、ノズル仰角 30° の場合の最大被散水量を計測する位置(No.13)と一致する。また実験にて計測した仰角 20° 、 35° の場合でも飛散角度予測による最大被散水量を計測する位置と実験において計測された最大被散水量計測位置に関しても同様の結果が得られたことから、 $\phi 7$ mm においては飛散角度予測による最大被散水量を計測する位置を予測できると考えられる。

しかしながら、口径がφ5mmやφ3mmの場合では、発射予測角度により予測された最大被散水量計測位置と実験で計測された最大被散水量計測位置に誤差が生じた。例として、口径φ5mm、壁面離れ距離5m、ノズル仰角30°の場合、発射予測角度 $26.45^\circ < \theta \leq 28.43^\circ$ の位置を示す壁面高さは2.0mであるが図6のグラフからは、実験での最大被散水位置は2.2mであり、実験値が予測値を下回る。これらは口径変化における飛翔時の水流の乱流等が影響していると考えられる。

(2) 実験結果によるノズル仕様と壁面到達水量の関係

ノズルを並行移動させ行った放水を、図6に示したグラフのように、散水幅と散水高さにおける1枚の仮想面とした場合、中心から片側における壁面被散水量を計測する事が出来た。ここで中心 $y=0$ の地点で仮想面を鏡像反転させること(ここでは仮想壁面とする)により単孔ノズル一つ当たりの散水幅と壁面到達水量を算出する。

表 2.各設定における壁面到達水量

		①放水量	②壁面到達水量	③壁面到達水量割合	④有効壁面到達水量
		L	L	(②/①)%	L
設定 (口径・離れ距離・仰角)	φ7mm、5m、35°	51.095	7.950	15.559	7.686
	φ5mm、5m、35°	26.069	6.669	25.582	6.404
	φ3mm、5m、35°	9.384	2.087	22.240	2.087
	φ7mm、5m、30°	51.095	6.636	12.988	6.588
	φ5mm、5m、30°	26.069	5.388	20.668	5.324
	φ3mm、5m、30°	9.384	1.987	21.174	1.987
	φ7mm、5m、20°	51.095	6.196	12.126	6.092
	φ5mm、5m、20°	26.069	5.940	22.786	5.818
	φ3mm、5m、20°	9.384	1.772	18.883	1.772
	φ7mm、7m、30°	51.095	10.412	20.378	10.105
	φ7mm、3m、30°	51.095	4.113	8.050	3.952

この結果から、式(1)よりノズルから放水される水の量を①放水量、壁面に到達する水の総量を②壁面到達水量、放水量における壁面到達水量の割合を③とし表2に示す。また壁面到達水量のうちおよそ9割以上が壁面中心から水平方向に50cmの幅(受水升中心を $y=0$ とし、2回平行移動させた距離)で消費されることから、片側有効散水幅を0.5mとしノズル孔1つから幅1.0mにおいて壁面に散水を行うと考え、有効壁面到達水量を④とする。

④の有効壁面到達水量を Q' とし、口径 ϕ およびノズル仰角 θ 、壁面離れ距離 x の3変数関数に関し重回帰分析を行った結果、式(9)が示された。

$$Q' = -10.068 + 1.175 \phi + 0.0465 \theta + 1.538x \quad (9)$$

ただし Q' :ノズル孔1つにおける壁面有効到達水量[L]、 ϕ :ノズル口径[mm]、 θ :ノズル仰角[°]、 x :壁面離れ距離[m]とする

式(9)はノズル要素(口径・仰角・離れ距離)の変更において、高さ4m×幅1mの範囲における有効壁面到達水量の推定を行うためのものであり、この回帰式の決定係数は0.917であることから、(式9)は実際の散水に即したおおよその Q' の値を示すものとする。

5. まとめと今後の課題

本研究では、ノズル作成工程の効率化を図る為、ノズル一つ当たりにおける散水挙動の理論考察を目的とし、散水特性の把握と考察を行った。

多孔形状の現行ノズルにおける、ノズル孔一つ当たりの散水性能を評価する為、水滴の挙動に影響を及ぼすと考えられるノズル仰角・口径及び壁面までの離れ距離を変化させた場合における散水情報の抽出を行う為の単孔ノズルを作成し、20cm×20cmの受水升によって作成した高さ4m、幅0.2mの壁面に対し散水実験を行うことによりその挙動の把握を行った。これにより、仰角3パターン(20°・30°・35°)、口径3パターン(φ3mm、φ5mm、φ7mm)と仰角・口径設定固定による距離変化3パターン(仰角30°・口径φ7mm一定とし、離れ距離7m・5m・3m)の計12パターンの散水分布を計測し、以下のことが明らかとなった。

- 式(1)、式(2)を用いることにより、ノズルから発射される水滴の初速度と粒径を算出することができ、そこから飛翔水滴の運動方程式を用いることによりφ7mmにおける水滴の最大被散水量計測位置を大まかに予測することができた。
- 壁面に到達する水量のうち、ノズル孔一つ当たりの散水幅は約1.0mとなり、壁面被散水量のうちの約9割がその範囲において消費される。
- ノズルの仕様(ノズル口径、壁面離れ距離、ノズル仰角)を変数として、実験値における有効壁面到達水量を基に重回帰分析を行うことにより、幅1m、高さ4mにおける範囲内におけるおおよその壁

面被散水量(有効壁面到達水量)を算出するための近似評価式(9)を明らかにした。

今後の課題として、本研究において示したノズル仕様と有効壁面到達水量の関係における近似評価式の性能を評価する為に、本研究での仕様と異なるノズルによる散水実験を実施し、評価式による推定値と実験値の比較検証を行うことにより、より精度の高い有効壁面到達水量の算定式を検討する必要がある。また、本研究では実験値と水滴の発射角度予測による最大壁面被散水位置の予測を行い、Φ7mmにおいては予測と実験での最大被散水位置が一致することが明らかになったが、Φ3mm・Φ5mmにおいて見られた予測値と実験値の差異が発生することに関する考察が不十分であったため、これらの検討を行い、それぞれのノズル口径変化における最大被散水位置変化を推定することにより、口径の変化における最大被散水位置の検討が可能となる。

謝辞：本研究は、株式会社横井製作所寄付金(技術指導)および私立大学等経常費補助金(研究施設運営支援)による研究成果の一部である。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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研究、社団法人日本建築学会、学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術 pp.35~41, 2007
- 2) 大窪健之、荒川昭治、菊間陽介、田中哮義、井元駿介：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～、立命館大学 歴史都市防災研究所、歴史都市防災論文集 Vol.5 pp.117~124、2011/07
- 3) 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止効果の評価～、立命館大学 歴史都市防災研究所、歴史都市防災論文集 Vol.9 pp.25~32、2015/07
- 4) 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～、立命館大学 歴史都市防災研究所、歴史都市防災論文集 Vol.4 pp.21~28、2010/07
- 5) 荒川昭治、片桐信、西野智研、大窪健之：木造住宅地域を地震時火災から守る Water Shield System に関する基礎的研究—京都市清水周辺地域の配水システムの研究—、地域安全学会、地域安全学会論文集 No.17 pp.1~9、2012/07
- 6) 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—、公益社団法人日本都市計画学会、都市計画論文集 Vol.48 No.3 pp.789~764。2013/10
- 7) 岡村俊一：スプリンクラー散水の理論的考察(I)—風の影響を受けない場合—、農業農村工学会、農業土木学会論文集、No.26 pp.49~55、1968
- 8) 岡村俊一：スプリンクラー散水の理論的考察(II)—風の影響を受ける場合—、農業農村工学会、農業土木学会論文集、No.28 pp.35~43、1968
- 9) 岡村俊一：スプリンクラー散水の理論的考察(III)—水滴の粒度分布—、農業農村工学会、農業土木学会論文集、No.28 pp.62~67、1968