

## 1) - 2 散水設備から火炎を通過して可燃物表面に到達する散水量の工学的評価モデルの開発【安全・安心】

### Development of an Evaluation Model for Amount of Water Droplets Discharged from Water Applications onto Combustible Material Surface through Flame

(研究期間 平成 30～令和元年度)

防火研究グループ  
Dept. of Fire Engineering

野秋 政希  
MASAKI Noaki

An estimation model of motion of water droplet discharged from a water application in fire plume was developed; is based on force and heat balance including evaporation. And a series of experiment aimed at verification of validity of the model was carried out. From the results of the heating experiment of water whose parameter of external heat flux, it is confirmed that water evaporation rate can be estimated as net heat flux onto water surface divided by latent heat of water evaporation. And the present model can reproduce the tendency that smaller water droplet causes lower penetration ratio of water amount with and without fire.

#### [研究開発の目的及び経過]

スプリンクラー等の散水設備は有効な火災拡大抑制手法として広く認知されているが、性能的火災安全設計において散水設備による火災抑制効果が反映された事例は少ない。その一因として、散水設備による火災拡大抑制効果の工学的評価手法が確立されていないことが挙げられる。散水による火災拡大の抑制効果の評価手法が確立されれば、建物の火災安全性を保つために必要な防火対策の選択肢が増え、設計の自由度の向上が期待できる。

本研究では、火災の拡大に大きな影響を及ぼす可燃物の発熱速度（燃焼によって単位時間あたりに発生する熱量）の低減に着目している。燃焼物への直接散水による発熱速度低減効果は可燃物に供給される散水密度（単位面積当たりの散水量）に大きく影響されることが確認されている。多くの散水設備では水平面に供給される散水密度分布のデータが得られているが、火災時には、①火炎等からの熱による水滴群の蒸発や②火炎等の上昇気流による水滴群の飛散により、可燃物表面に到達する散水密度が低減する可能性が指摘されており、この低減効果の工学的評価手法は未だに確立されていない。

そこで本研究では熱気流中における水滴の飛散および蒸発の挙動をモデル化すると共に当該モデルの妥当性検証を目的とした実験を実施した。

#### [研究開発の概要]

##### (1) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデル

本研究では、散水設備から任意の角度で放出された水滴の力学的釣り合いおよび熱的釣り合いから、水滴の蒸発および飛散性状をモデル化した。

##### a) 水滴の力学的釣り合い

水滴には重力と周辺気体の抵抗力  $F$  がかかることを考慮し、以下の運動方程式を解く。なお、鉛直方向を  $z$  軸、水滴の飛散孔からの水平方向を  $r$  軸とする。

$$m_w \alpha_r = -F_r \quad (\text{水平方向}) \quad (1)$$

$$m_w \alpha_z = m_w g - F_z \quad (\text{鉛直方向}) \quad (2)$$

また、水滴を球体と仮定し、水滴に加わる周辺気体の抵抗力  $F$  を次式で求めた。このとき、水滴の半径  $R_w$  は後述の計算より水滴の蒸発の影響を考慮している。

$$F = \frac{1}{2} \pi R_w^2 C_D \rho_g v_{rel}^2 \quad (3)$$

このうち、抗力係数  $C_D$  は既往研究により球に関する種々の式が提案されているが、本研究では  $Re$  の範囲毎に算定式を切り替える必要のない式として、 $0.1 < Re < 10^5$  の範囲で当てはまりの良い次式を構築し、これを用いた。

$$C_D = \frac{24}{Re^{4/5}} + 0.4 \quad (4)$$

また、鉛直方向の熱気流の流速は McCaffrey により提案された算定式を用いた。ただし、水平方向の流速や空気の巻き込みの影響は考慮していない。

##### b) 水滴の熱的釣り合い

水滴は火炎や熱気流からの放射および対流による入熱により昇温・蒸発が生じているが、下式の通り 373K を境に熱収支式を分けることにより、水滴の温度上昇および蒸発に伴う粒子径を工学的に容易に取り扱った。

$$4\pi R_w^2 \left\{ h(T_f - T_w) + q_{rad} \right\} = \begin{cases} c_w m_w \frac{dT_w}{dt} [T_w < 373K] \\ -L_w \frac{dm_w}{dt} [T_w \geq 373K] \end{cases} \quad (5)$$

##### (2) モデルの検証

a) 水滴の熱的釣り合いモデルの検証

細孔から水滴を自由落下させ、700mm 下方に設けた容器に溜まった水量を火源の燃焼の有無別に計測し、両者の差から、水滴が火炎を通過する間に蒸発する水量の計測を試みた。しかし、今回実施した実験条件（火源の発熱速度：4.4kW 程度、水滴の直径：1.94mm、2.96mm）では、水の滴下時の蒸発量と水を滴下させない条件で燃焼パンに予め溜めておいた水の蒸発量に大きな差異が無く、明確な火炎通過中の水滴の蒸発が確認できなかった。モデル検証には水滴径をさらに小さくする必要があるが本研究の範囲では適当な装置を構築できなかったことから、水面に供給される加熱の強さと蒸発速度の関係の把握を目的とし、水平に設置したステンレス製の容器（100mm 角）内に溜めた水を電熱ヒーターで放射加熱し、水の蒸発速度を計測した。

加熱強度 4~60kW/m<sup>2</sup>における平均蒸発速度の計測値を図1に示す。なお、図中の×プロットは加熱強度から水面での放射および対流による失熱を減じた熱流束を水の単位重量当たりの潜熱で除した蒸発速度の推定値であり、いずれの加熱強度においても蒸発速度の推定値と実験値がほぼ一致することを確認した。

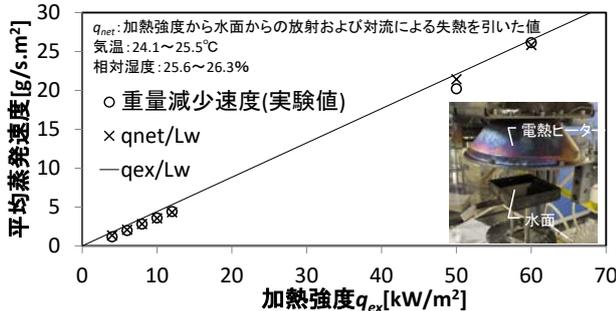


図1 加熱強度と平均蒸発速度

b) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデルの検証

(1) で概説したモデルの妥当性を確認するため、図2のように配置した取水マスのうち、散水ヘッド直下のマスに燃料（n-ヘプタン）を入れ、燃焼させることで火炎が存在する状況における散水密度分布を実測した。

使用した散水ヘッドは、噴霧角および水滴径が既知であるいけうち社の JJXP010、JJXP060、JJXP10 の3種類とした。実験パラメータはヘッドの種類のほか、火源と散水ヘッドの高さ H<sub>sp</sub>、火源径 D とした。

燃料を入れた枡における火炎無しの散水密度に対する散水有りの散水密度の割合（到達率と呼ぶ）を実験値から求めた結果が図3の黒線である。図より、JJXP010は他のヘッドに比べ到達率が低い。また、火源径が大きく、散水高さが高いほど到達率が低くなる傾向にある。

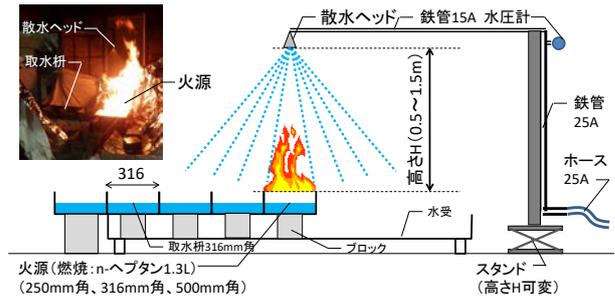


図2 実験概要図

一方、図3の緑線が(1)のモデルを用い、火源直下(水滴の放出角度 0°)における火炎の有無ごとの散水密度の比である。同図より緑線は水滴径の小さな JJXP010が他のヘッドに比べて到達率が低い傾向を概ね再現している。他方、散水密度分布の実験値と計算値の比較(図4)を鑑みると、実験値の場合、火源直下以外の散水密度が火炎有りの方が火炎無しに比べて低い値を示しているが、計算値では逆の傾向にある。このズレの原因については現時点で不明であるが、本モデルでは水滴の径を全て同一と見なしたのに対し、実際には極小径の水滴は気流で煽られ、燃焼生成ガスと共に排煙系統に捕集された可能性があることや火源に隣接する枡内の水が火源からの放射熱により蒸発した可能性などが考えられ、今後改善の余地がある。

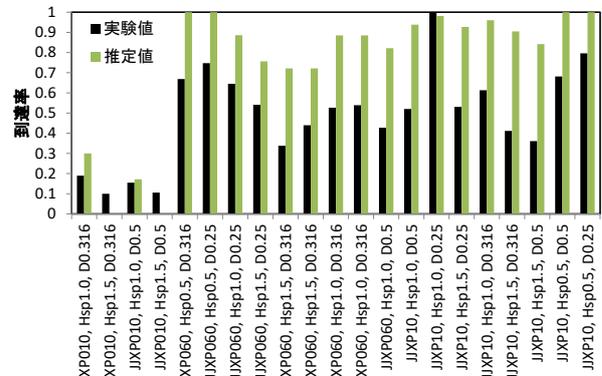


図3 到達率の実験値と計算値の比較

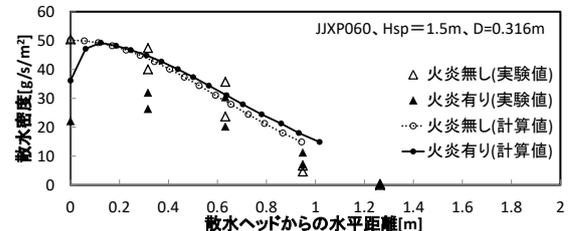


図4 散水密度分布の計算値と実験値の比較の例

<記号> m<sub>w</sub>: 水滴の重量[g], α: 水滴の加速度[m/s<sup>2</sup>], g: 重力加速度[m/s<sup>2</sup>], 添え字 r, z: それぞれ、散水ヘッドの中心から水平方向、地盤面から鉛直方向, R<sub>w</sub>: 水滴の半径[m], ρ<sub>g</sub>: 水滴近傍の気体の密度[kg/m<sup>3</sup>], v<sub>rel</sub>: 水滴と気体の相対速度[m/s], h: 対流熱伝達率[kW/m<sup>2</sup>·K], T<sub>f</sub>: 水滴近傍の気体の温度[K], T<sub>w</sub>: 水滴表面の温度[K], q<sub>rad</sub>: 火炎から水滴への放射熱流束[kW/m<sup>2</sup>], c<sub>w</sub>: 水の比熱[kJ/kg·K], L<sub>w</sub>: 水の蒸発潜熱[kJ/kg]