スプリンクラー消火設備による吸熱特性

Endothermic Characteristics of Sprinkler extinction equipment

○ 多田 直人 (福井大院) 正 川端 信義 (福井大)

Naohito TADA, Graduate School of Fukui, Bunkyo3-9-1, Fukui-shi, fukui
Nobuyoshi KAWABATA, University of Fukui

Key Words: Water mist, Sprinkler

1. 緒言

スプリンクラーは消火設備として極めて一般的な設備であり、室内から自動車トンネルまで大小様々な空間に適用されている。自動車トンネルでは長大トンネルを中心に交通量の多いトンネルに設置されており、火勢を弱め、延焼を抑え、熱気流の遡上を抑える効果がある。しかし、放出水滴の径及び流量についても様々であり、それぞれの空間・用途に応じて最適な水滴径、流量があると考えられる。本研究ではスプリンクラーの火災高温空間からの吸熱効果について、水滴径、流量をパラメータとし、実験によって明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概観図を Fig.1 に示す。装置の寸法は幅 5m、奥行き 3m、高さ 3m であり、鋼材で枠を組み、外壁にはトタン、区画内部に厚さ 5mm の珪酸カルシウムボードを設置し断熱性を高めた。水噴霧の効果を定量的に評価するためには水滴径や流量のパラメータによる整理が重要である。そこで、水滴径や流量などの詳細データのある、スプレーイングシステム社のフルコーンスプレーノズル(TG)を使用した。流量は流量計を設置し直接計測した。水滴径は計測した流量の値を用い、同社の性能特性図を用い決定した。また、K 型熱電対(Φ 0.1mm)を用い温度計測を行った。計測点は Fig.2 に示すように 19 点であり、噴霧した水滴の影響を避けるため、ノズルから離して設置した。

2.2 実験方法

はじめに、ガソリンの主成分である n-ヘプタン 215g を燃焼させ煙と熱を発生させる。そして、火源鎮火 30 秒後から水噴霧を行うこととした。これは、火源燃焼中に水噴霧を行うと、火源燃焼性状等が変化し、条件を揃えることが困難になるためである。また、装置の制約上、水噴霧開始直後は圧力、流量が安定しないため、吸熱効果を検討する際の評価範囲は水噴霧開始後 30 秒から、装置内の温度が周囲温度と比較して十分高いことが確認できた水噴霧開始後 150 秒までの 120 秒間とした。

Fig1. Outline of experimental equipment

Fig.2 Thermocouple arrangement

3. 区画内温度変化のモデル式

水噴霧による吸熱効果を定量的に評価するため、燃焼終了後の温度低下を模擬するモデル式を導出し、モデル式中の吸熱効果を表す定数によって結果を整理した。

時刻 $t(T, \rho)$ 時の区画内に含まれる熱量と実験時の周囲温度 (T_a, ρ) の熱量の差 q は

$$q = C_p V \rho (T - T_a) \quad (1)$$

とおける。ただし、 C_p :定圧比熱、 ρ :密度、 V :装置内容積。微小時間 dt の吸熱効果は区画外部へ放熱する熱量と、水滴による吸熱効果の和であり、区画内温度と周囲温度の差、区画内空気密度に比例すると仮定する。ただし、水滴による吸熱効果は他にも水滴が区画内を漂う平均時間や放出速度、放出パターンにも影響を受けると考えられるがそれらの影響をまとめて α とおく。また、実験時の周囲温度とタンク内の水温の差は平均 2°C 程度であるため $T_w = T_a$ とした。以上より

$$-dq = (h_m + \alpha) \rho' (T - T_a) dt \quad (2)$$

とおける。ただし、 h_m :水噴霧なし時の吸熱効果を表す定数。また、 $t+dt$ の熱量は

$$q + dq = C_p V \rho' (T + dT - T_a) \quad (3)$$

とおける。モデルを等圧変化として取り扱うため

$$\rho' = \rho (1 - dT/T) \quad (4)$$

とおいた。(1),(2),(3),(4)を整理し、積分すると、

$$(T - T_a)/T = C \exp(-(h_m + \alpha) t / C_p V) \quad (5)$$

が得られる。Fig.3 の(a)に式(5)と実験値の比較を示す。Fig.3 から燃焼終了直後の高温領域から低温領域まで、温度の減少傾向を概ね表現できている。従って、式(5)を水噴霧時の吸熱モデルとする。また、式(5)の定数 C 、 $(h_m + \alpha)$ を最小二乗を用い実験値に近似するような値を求めた。

水滴の吸熱効果を検討するため、水噴霧なし時の吸熱効果を表す定数を見積もり、吸熱効果全体から引くことで水滴の吸熱効果を得ることとした。式(5)中の水噴霧時の吸熱効果を表す定数 α を 0 とおいた、式(6)を水噴霧なし時の吸熱モデルと仮定した。

$$(T - T_a)/T = C \exp(-h_m t / C_p V) \quad (6)$$

Fig.3(b)に式(6)と実験値の比較を示す。評価範囲内において実験値とモデル値がよく一致しており、式(6)を水噴霧なし時のモデル式とする。さらに、式(6)を用い同様に最小二乗を行い h_m を求めた。同様の実験を 5 ケース行い、各ケースについて h_m を求め、その平均を水噴霧なし時の吸熱効果を表す定数とし、 $h_m=124.34 [J/Ks \cdot m^3/kg]$ と決めた。Table1 に各実験時の周囲温度と求めた h_m 示す。また、Fig.3 の(a)に水噴霧時、水噴霧なし時の結果を示すが、比較すると水噴霧による吸熱効果が確認できる。

Table1 Approximation result

	$h_m [J/Ks \cdot m^3/kg]$	Outside Temperature [K]
no-water-1	129.7	304.22
no-water-2	128	301.73
no-water-3	117.4	294.26
no-water-4	127	284.27
no-water-5	119.6	282.95
average	124.34	

4. 水噴霧の吸熱効果

ここからは、各実験ケースについて最小二乗により求めた α について検討する。実験データの内、明らかに異常なデータ (10 ケース程度) を除き、全 102 ケースを対象とした。まず、Fig.4 は水滴径をそれぞれ 0.2mm, 0.3mm に固定し、流量を変化させることによる α の変化を示したもので、縦軸を α を h_m で割り無次元化した値、横軸を流量とした。Fig.5 は流量をそれぞれ 0.6L/min, 0.8L/min に固定し、水滴径を変化させることによる α の変化を示したもので、縦軸を α/h_m 、横軸を水滴径とした。それぞれの関係について最小二乗により算出した近似式を示す。Fig.4 から α は概ね流量 Q に比例することが確認できた。また、Fig.5 から α は概ね水滴径の 1/2 乗に反比例することが確認できた。そこで α は $Q/\sqrt{d}$ によって決定でき

るとし、縦軸 α/h_m 、横軸 $Q/\sqrt{d}$ をとり、すべての実験ケース示したものを Fig.6 に示す。Fig.6 から $Q/\sqrt{d}$ が小さな領域、つまり流量が小さく水滴径が大きな領域では α/h_m は $Q/\sqrt{d}$ に比例することがわかる。しかし、 $Q/\sqrt{d}$ が大きな領域、つまり流量が大きく水滴径が小さい領域では増加の割合が減少する傾向にあることがわかる。そこで、 $y = \alpha/h_m$ 、 $x = Q/\sqrt{d}$ とおき、 x が小さい時は線形、 x が大きい時に一定値となる関係として $y = x/(ax+b)$ とおいた。さらに、 $Y = 1/y$ とし、 $Y = a/x + b$ について最小二乗を行い、 a 、 b を決定した。その結果を Fig.7 に示す。Fig.7 から実験結果は概ね描かれた曲線と一致することが確認できる。この結果より $Y = 1.278/x + 0.3536$ で表すことができた。つまり、 $y = x/(0.3536x + 1.278)$ であり、水噴霧時の吸熱効果を表す係数 α と流量、水滴径との関係は

$$\alpha/h_m = (Q/\sqrt{d}) / (0.3536 * (Q/\sqrt{d}) + 1.278) \quad (7)$$

で表せることが分かった。

5. 結言

閉鎖、高温区画内へ水噴霧を行い、吸熱効果に関して噴霧流量および水滴径をパラメータとして検討した結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 水噴霧時の吸熱モデルを(5)で表すことができた。ただし、水噴霧を行わない場合は $\alpha=0$ とする。
- ・ 水噴霧時の吸熱効果を表す係数と流量、水滴径の関係は式(7)で表すことができる。

参考文献

- (1) 川端ほか、日本火災学会研究発表会概要集、(2004)、pp.334-337

(a). water spray

(b). no-water

Fig3. Relationship between rising temperature and time

Fig.4 Relationship between Q and α/h_m

Fig.5 Relationship between d and α/h_m

Fig.6 Relationship between $Q\sqrt{d}$ and α/h_m

Fig.7 Relationship between $Q\sqrt{d}$ and h_m/α