# 散水設備作動時の水滴による火炎の放射熱減衰効果

Absorption and Transmittance of Radiant Heat Flux from Flame through Water Droplets

臼井 清人 (K110605) Kiyoto Usui (K110605)

## 1. はじめに

スプリンクラー設備(以下, SP)は様々な用途の 建築物に対して設置基準が消防法等で定められて おり、その消火性能は広く認識されている。一方 で、①~③に示す副次的な性能も期待できること は知られているが、報告事例<sup>1)</sup>が十分とは言い難 い。

- 区画内における雰囲気温度の減衰効果
- ② 周囲構造体の温度減衰効果
- ③ 火源からの放射熱減衰効果

特に、③に関しては、ドレンチャー設備等の水 幕状散水の設備が主たる対象で、SPを対象とした 事例は非常に少なく、最近では Mie 理論を用いた 水滴による放射熱の吸収を考慮した研究<sup>12)</sup>もある が、限定的な条件であり系統的な研究はなされて いないのが現状である。

本研究では以上を鑑み、先ずSPの基礎的データ の収集、火炎の基礎的データの収集を行う。さら に実大規模の火災実験においてはSP散水と燃焼特 性の異なる燃料を用いて実験を行う。併せて Mie 理論を適用し放射熱に関する理論的考慮、SP基礎 的データと火炎分光放射スペクトルモデルを利用 した散水設備水滴による放射熱減衰効果に関する モデルの構築を目的とする。これらを明らかにす ることで火源特性と水滴の放射熱減衰特性の両者 に対して予測することが可能となる。

#### 2. 実験による放射熱減衰の確認

#### 2.1 実験概要

放射熱減衰予測を行うために、SPの基礎データと 分光放射スペクトルが重要な要素となる。先ずは SP 及び火炎の基本特性の収集を行う。併せて、実大散 水区画を用いて SPの水滴による放射熱減衰の関す る実験を行う。後者の実験は区画内・外で行うこと で、煙層(すす)の影響による比較を目的とする。

#### 2.1.1 SPの基礎的データ収集

## a) 散水分布测定

図1及び2に示す火源と放射計の間に採水マス (0.1m<sup>2</sup>)を火皿から0.5~3.5mまで0.5mピッチで配 置し測定した。

#### b) 粒子径測定

光源としてレーザー(Nd:YAG/120mJ/532nm)を 一定間隔照射し、同期させたカメラ (PCO.1600.)で 撮影し、VisiSizer(Oxford)による画像処理を行い粒 子径の解析を行った。なお計測した粒子数は約 1000 ~2000 個である。

#### c) 粒子速度測定

PIV システムを用い、SP 水滴自身をトレーサとし 測定して、Koncerto(西華産業)で解析した。

#### 2.1.2 火炎分光放射スペクトル測定

SR5000(CI SYSTEM)を使用し火皿(0.25m<sup>2</sup>)から 6m、火皿上端部から約 0.2m の位置の分光放射スペ クトルを測定した。

2.1.3 **実大区画を用いた放射熱減衰効果の測定** 実験は実大散水区画((W)6.25×(D)6.25×(H) 2.7m) にて行った。 図1に区画内での燃焼実験に関する概要を示す。 区画天井中央にSPが設置され、散水範囲は制御マ スを用いて半円状(1/2)とした。同性能の放射計(東京 精工製・RE-III)を2台使用し、散水の影響を受けな い放射計(N)、影響を受ける放射計(W)により減衰効 果を確認する。いずれも火源中央から同距離(4.0m), 同高さ(火皿上端 0.4m)に配置した。また、区画内温 度分布を計測するために区画内隅角部から1mの位 置に熱電対(K型・φ0.32mm)を床面から 0.2~2.6m まで 0.2m ピッチで計 13 点を配置した。

図2に区画外での燃焼実験に関する概要を示す。 燃焼中は常時排気することで煙層(すす)の影響を排 除した。散水範囲は制御マスを用いて1/4とした。 区画後方に放射計を2台配置し放射熱の減衰効果を 測定した。いずれも火源中央から同じ距離(6m),か つ同高さ(火皿上端0.4m)に配置した。



図2 放射熱減衰の測定(区画外燃焼)

#### 2.2 実験条件及び測定項目

表1に実験条件と測定項目を示す。SPは5種類 用い、火源はすす(煙層)の影響も比較するため、ヘ プタンおよびエタノールの2種類を使用した。 素1 実験及び測定項目

X I										
	呼称	K30	K50	K80A	K80B	K80C				
	流量[L/min]	30	50	80						
SP	タイプ	フラッシュ				マルチ				
	測定項目	散水分布、粒子径、粒子速度								
火	種類	ヘプタン、エタノール(0.25m <sup>2</sup> )								
源	測定項目	分光放射スペクトル、放射熱の液								

# 2.3 実験結果

## 2.3.1 SPの基本的特性

測定結果を表2に示す。粒子径はザウター平均径 を用いた。フラッシュ型のヘッドはマルチ型よりも 粒径が小さく、また同じフラッシュ型でもK50、及 びK80AのSPは粒子径が小さい。粒子速度は各SP であまり差は見られなかった。次に散水分布の測定 結果を図3に示す。流量が同じK80は計測する場所 により散水分布にバラツキが見られるが、合計散水 量では大きな差は生じていないことがわかる。図4 に各SPの粒子密度n(x)を粒子径、粒子速度及び散水 分布から算出した結果を示す。

表2 各 SP の基本的特性

呼称	K30	K50	K80A	K80B	K80C
粒子径[μm]	555	483	470	592	796
粒子速度[m/s]	3.65	3.6	3.6	3.4	3.6
合計散水量[ml/min]	367	639	1113	1269	1278



## 2.3.2 分光放射スペクトル

分光放射スペクトルの測定結果をヘプタンについ 図 13 に示す。火炎特有の  $CO_2$ 放射体である  $4.3 \mu$  m に鋭いピークが表れ、 $H_2O$  特有の  $2.7 \mu$  m にも特徴 が表れている。すすが多量に発生するヘプタンでは、  $2.0 \mu$  m あたりにピークが表れ、黒体放射のような 形となっている。

#### 2.3.3放射熱減衰の実験結果

図5に区画内燃焼における燃料及びSPをそれぞ れエタノール、K80Bとした場合の放射熱流束の測 定結果を示す。SPの散水は燃料に着火後、火炎が 安定する点火120秒後に開始した。各熱流束は散水 開始以前は、ほぼ同様の値を示し散水開始以降水滴 の影響により、放流計(W)は低減されていることが 分かる。

図6に区画内燃焼おける燃料及びSPをそれぞれ ヘプタン、SPなしとした場合の結果を示す。点火後 しばらくすると放射計(W)の値が放射計(N)よりも上回っており、煙層の温度(底面から1.8m)を見比べると、煙層の温度が安定しだした時刻と一致することから、煙層の影響を受けていると推察される。



散水による放射熱の減衰率を散水後火炎が安定した後 30 秒間(180~210 秒)を平均値とし、(1)式より求めた。

減衰率[%]=
$$\frac{HFG(N) - HFG(W)}{HFG(N)} \times 100$$
 (1)

図7にエタノールにおける減衰率を示す。この場 合、区画内・外で大きな差は見受けられない。



ヘプタンの区画内燃焼では、煙層による影響が見 受けられたので、各放射計が煙層から受熱する放射 熱を形態係数を用いて計算を行った。その結果、自 由燃焼時における測定値の差と煙層からの放射熱差 はおおむね一致した。

図8にヘプタンにおける減衰率を示す。なお煙層 からの放射熱を補正した値も示す。原点は自由燃焼 で左から K30、K50、K80A、K80B、K80C である。 両燃料ともにバラツキはあるが、散水量の増加に伴 い放射減衰率が高くなることが見て取れる。これは 火源から発生される赤外線エネルギーが水滴によっ て吸収されていることに起因する。



図8 ヘプタン放射熱の減衰

3. Mie 理論による放射熱減衰予測

## 3.1 Mie 理論について<sup>3)</sup>

放射熱減衰効果に関して、Mie 理論を用い計算を 行う。Mie 理論の概念図を図9に示す。粒子に入射 した光(電磁波)は粒子に吸収されるか、入射した光 と角度が変わる散乱光に分けられる。その強度を示 す指標は吸収係数(Qabs)と散乱係数(Qcca)と呼ばれる。 この値は入射光のスペクトルや粒子径に依存する。 また、入射波長と散乱強度・角度の関係を示すもの を位相関数 P(θ)と定義され、波長に対して粒子径が 大きいと前方散乱が支配的になるといわれている。





#### 3.2 実験値と計算値の比較

図10に4.3µmの波長に対するSP水滴の位相関数 の計算結果を示す。散乱光は約1°の範囲に約99% の集中し、前方散乱が支配的となるため散乱は無視 した。したがって砂原ら<sup>2)</sup>が使用した、式(2)及び(3) に示す散乱を無視した二流束モデルによる計算方法 を踏襲した。これは単一粒子による吸収を無数の粒 子へ拡張したものである。

$$\frac{1}{2}\frac{dI_{\lambda d}}{dx} = n(x) \cdot \pi a^2 \cdot Q_{abs} \cdot I_{\lambda m}$$
(2)

$$I = e_{\lambda} \times \int I_{\lambda d}(x) dx \tag{3}$$

ただし、n(x)は図4に示す結果を用いた。QabsはMie 理論より算出され、計算結果の一部を図11に示す。 2.7µm以上はほぼ吸収され、それ以下は粒子径が大 きいほど吸収されやすい。これらを用い放射熱の減 衰率を求めた。ヘプタンの計算結果を図12に示す。 実験値と計算値は概ね一致し、特に煙層(すす)の影 響を排除した区画外の実験値と良好な一致を示した。 したがって放射熱の減衰は水滴による吸収が支配的 であり、Mie 理論を用いて放射熱の減衰を予測でき ると考えられる。



## 4. 火炎分光放射スペクトル予測モデル

Mie 理論を用いて水滴による放射熱の吸収を予測 するためには火炎の分光放射スペクトルが必要にな る。しかし、赤外線領域における周知の火炎分光放 射スペクトルデータは限られるため、火炎分光放射 スペクトルの予測を行うことができれば水滴による 放射熱の減衰計算が可能となる。ここでは既存のナ ローバンドモデル(RADCAL)40をベースとした改良 モデルにて分光放射スペクトル予測を試みた。この モデル試みた、火炎モデルは火炎温度、すす濃度、 化学反応時に発生するガスの分圧等を与えることで 放射スペクトルが算出される。

## 4.1 火炎モデルの検証(ヘプタン)

図 13 に火炎分光放射スペクトル予測モデルで予 測したヘプタンと実測データとの比較を示す。一部 に差異が見られるがこれは燃焼性状に起因する。特 徴的なピークは再現されていることから十分に適応 しうるモデルと判断される。



4.2 火炎モデルを用いた放射熱低減予測の検証 図 14 に図 13 で示した実測値とモデルを用いた Mie 理論による放射熱低減計算結果を示す。ただし、 SP データは表 2、図 4 に示す結果を用いた。両者に よる計算結果は良い一致が見られ、十分に適応し得 るモデルと判断される。



#### 5. 放射熱減衰の予測

前述までの実験及び理論的考察により、散水分布、 粒子径、水滴による吸収係数計算を始めとする放射 熱減衰、及び火炎分光放射スペクトルの予測が可能 となった。散水量、粒子径の違いよる放射熱減衰の ケーススタディを行う。火源は、図13に示すヘプタ ンを代表例とした。なお散水量の変化は散水密度の 増加を意味する。

#### 5.1 散水量に対する放射熱の減衰

図 15 に散水量に対する減衰率の変化を示す。散水 量が増えると、放射熱の減衰率は直線的に増加し、 粒子径が小さいほど傾向は顕著である。これは本研 究で行った実験結果の傾向と一致する。



#### 5.2 粒子径に対する放射熱の減衰

図16に粒子径に対する減衰率の変化を示す。粒子 径が小さいほど、減衰率は増加していくと予測でき る。これは、同じ散水量で粒子径が小さい場合は、 放射熱を吸収する表面積が増えるためであると考え られる。したがって、粒子径は小さい方がより効率 的に放射熱を遮断できる可能性がある。しかし実際 の設備においては、粒子径が小さすぎると、火炎か らの放射熱による蒸発や、火炎によって発生した流 れに巻き込まれて火源に到達できずに、散水設備と してうまく機能しないことも考慮する必要がある。



#### 6.まとめ

- 本研究で得られた成果は以下の通りである。
- 1) SPの散水基本特性の把握と併せ、系統的な実大実験を行うことで、散水(水滴)による放射熱減衰効果を明らかにした。
- 2) Mie理論による放射熱減衰計算は実験値とある程度の一致が見られた。これは、放射熱の減衰は水滴による赤外線エネルギーの吸収を意味する。
- 3) 火炎モデルは、実測値と良い一致を示し、さらに Mie理論による放射熱減衰予測に良い一致が見られたことから、燃料・散水特性を入力として放射熱減衰量を予測することが可能となった。
- 4) 粒子径、散水量をパラメーターにとり、放射熱の 減衰の予測をしたところ散水量の増加に対して 直線的に減衰率は増加する傾向がある。
- 5) 減衰予測を行った結果、粒子径が小さいほど減衰 率は増加する傾向が見られた。これは、同じ散水 量で粒子径が小さい場合は、散水密度大きくな り、放射熱を吸収する表面積が増えるためである と考えられる。

#### 記号説明

a:水滴の半径[m] *e*<sub>2</sub>:火炎の放射スペクトル[-] *HFG(N*):放射計(N)の値[W/m<sup>2</sup>] *I<sub>ad</sub>:*減衰された各波長の放射強度[W/m<sup>2</sup>・μm] *n(x)*:水滴密度[個/m<sup>3</sup>min] *Q<sub>abs</sub>*:水による吸収係数[-] *I<sub>sm</sub>:*測定された放射強度[W/m<sup>2</sup>] *I*:減衰された放射強度[W/m<sup>2</sup>]

#### 参考文献

- 1) 例えば、田中太、大宮喜文、高橋祥直、高橋文生、中尾智昭: 散水設備作動時における実大区の火災性状、日本建築学会環 境系論文集, No.614, pp.1-7, 2007 年4月
- 2) 砂原弘幸,石原慶大,松山 賢,菅原進一,森田昌宏:散水中の 木材クリブ燃焼の発熱速度と放射熱流速の関係に関する研究, 日本建築学会環境系論文集,No.658, pp.1009-1017, 2010年12月
- 3) 分体工学会編:粒子径計測技術,日刊工業新聞社,1994
- 4) W. L. Grosshandler, RADCAL: A Narrow-Band Model for Radiation. Calculations in a Combustion Environment, NIST Technical Note 1402, 1993