

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

白井 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¹⁾が十分とは言えない。

- ① 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²⁾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に関する実験を行う。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) 散水分布測定

図1及び2に示す火源と放射計の間に採水マス(0.1m²)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(0.25m²)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。

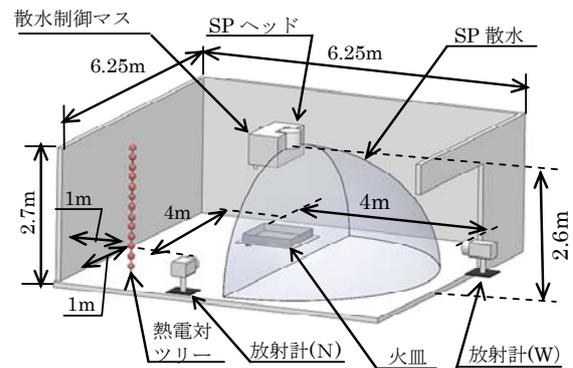


図1 放射熱減衰の測定(区画内燃焼)

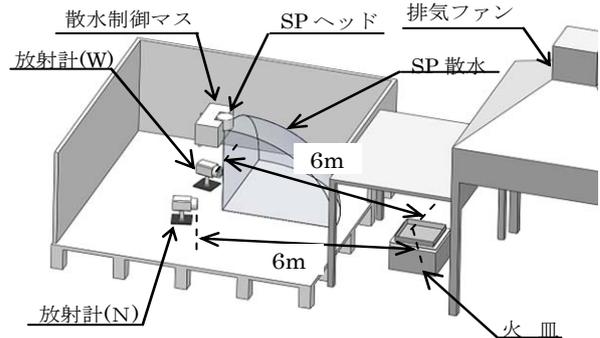


図2 放射熱減衰の測定(区画外燃焼)

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。

表1 実験及び測定項目

	呼称	K30	K50	K80A	K80B	K80C
SP	流量[L/min]	30	50	80		
	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				
	火源	ヘプタン、エタノール(0.25m ²)				
火源	測定項目	分光放射スペクトル、放射熱の減衰				

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

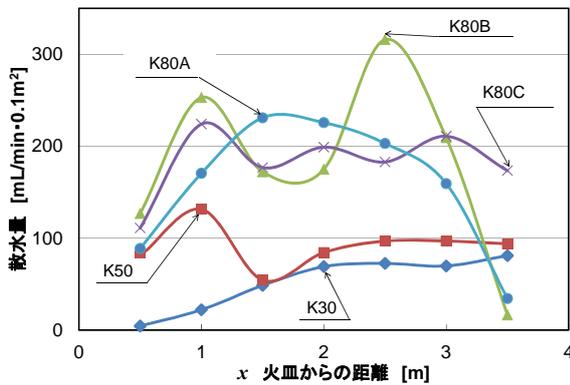


図3 各SPの散水分布

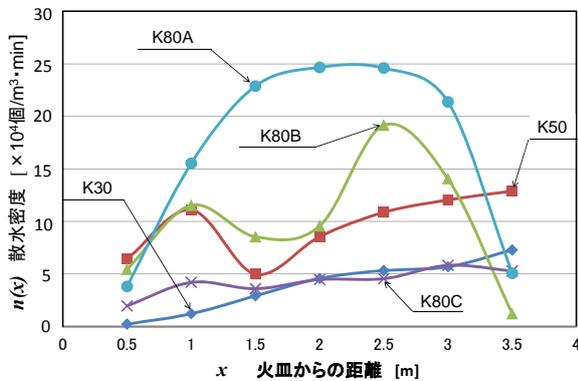


図4 各SPの粒子密度

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て図13に示す。火炎特有の CO_2 放射体である $4.3\mu\text{m}$ に鋭いピークが表れ、 H_2O 特有の $2.7\mu\text{m}$ にも特徴が表れている。さすが多量に発生するヘプタンでは、 $2.0\mu\text{m}$ 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、放射計(W)は低減されていることが分かる。

図6に区画内燃焼における燃料及び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。

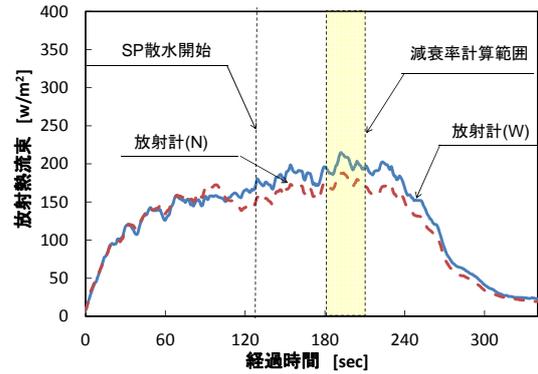


図5 放射熱流束(エタノール、K80B)

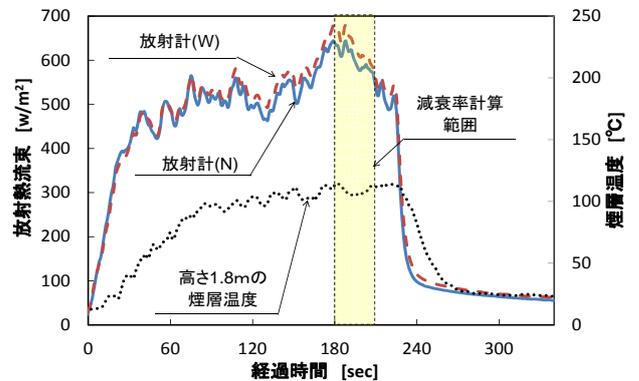


図6 放射熱流束(ヘプタン、SPなし)

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。

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

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。

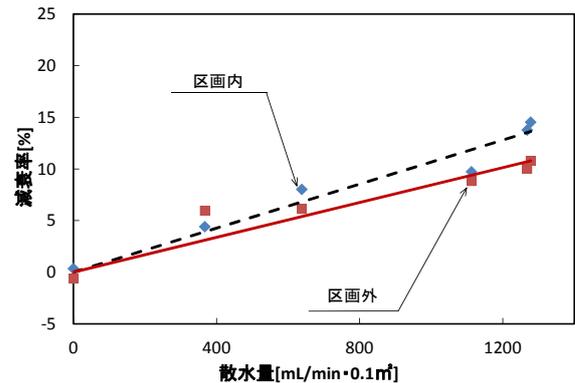


図7 エタノール放射熱の減衰

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を見て取れる。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。

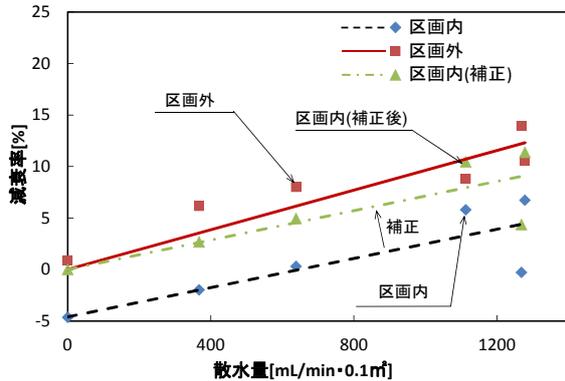


図 8 ヘプタン放射熱の減衰

3. Mie 理論による放射熱減衰予測

3.1 Mie 理論について³⁾

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(Q_{abs})と散乱係数(Q_{sca})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 $P(\theta)$ 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。

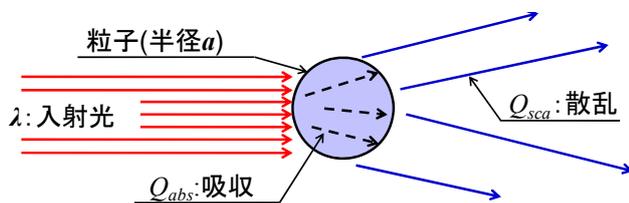


図 9 Mie 理論の概念

3.2 実験値と計算値の比較

図 10 に $4.3 \mu\text{m}$ 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²⁾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。

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

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

ただし、 $n(x)$ は図 4 に示す結果を用いた。 Q_{abs} は Mie 理論より算出され、計算結果の一部を図 11 に示す。 $2.7 \mu\text{m}$ 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。

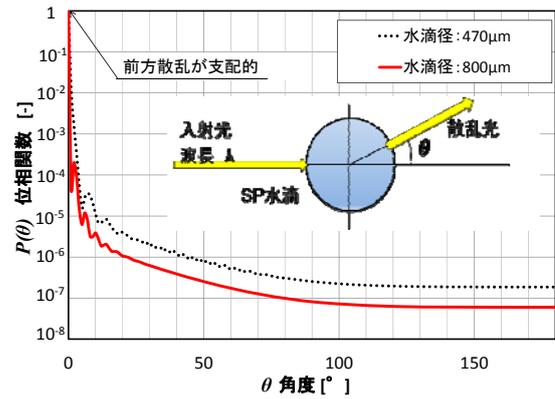


図 10 SP 粒子の位相関数

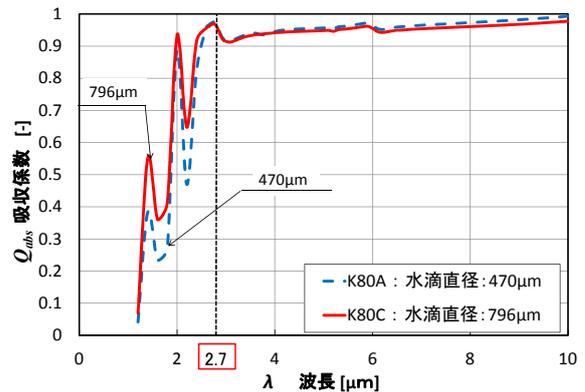


図 11 SP 粒子の吸収係数

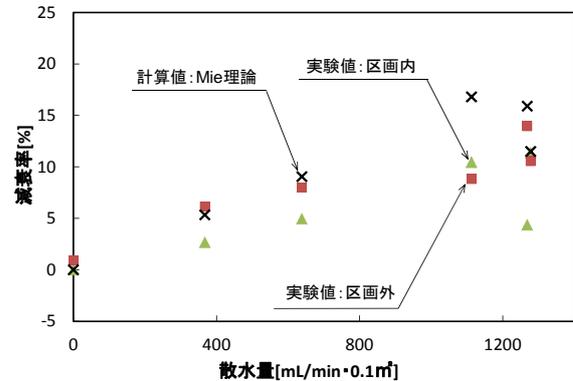


図 12 実験値と計算値の比較(ヘプタン)

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)⁴⁾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。このモデルを試みた、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。

