

ウォーターミストによる消煙に関する 基礎的研究

大黒正敏*・寺井孝男**

Study on Smoke Control by Water Mist

Masatoshi DAIKOKU* and Takao TERAI

Abstract

The effect of water mist characteristics on smoke control were investigated. Swirl atomizer was adopted and newly designed as a water mist generator. The spray characteristics of the atomizer was initially discussed, and the effects of the mist diameter and the flow rate on smoke control were clarified. Consequently, an optimum diameter for smoke control was obtained in a model room with no heat source. Evaporation characteristics of the injected water mist in the model room with a heat source were also investigated numerically, the optimum diameter with no water damage in room fire was found.

Keywords : water mist, smoke control, room fire, atomization

1. はじめに

建物で火災が発生した場合、人体にとって最も恐ろしいのは、炎よりも煙である。実際、火災では、煙が原因で死亡する例が多数報告されており、火災発生時における煙の抑制は、避難および救助双方立場から重要課題である。一方、消火活動は放水、スプリンクラー、消火剤等により行われてきたが、近年のOA化の進展に伴い、消火後の水損の問題も無視しえなくなってきた。また、水に代わるハロンやCO₂を用いての消火も、地球環境や人体への影響の問題があり、ハロンは廃止される方向¹⁾にある。そこで、水損が少なく、かつハロン等の代替消火剤として、近年ウォーターミスト（水噴霧）が注目され、消火特性²⁾、モデリング³⁾に関する研究等がなされているが、消煙に関する研究は比較的少ないようである。

本研究は、ウォーターミストを用いた消火・消煙システム構築に関する基礎的研究として、ミスト発生用ノズルの設計・試作を液体微粒化技術の一応用分野としてとらえ、そのミスト特性が消煙におよぼす影響を調べることを目的としている。

本報では、ウォーターミストノズルから噴霧されるミストの粒子径、流量を変化させ、モデル室内での消煙効果を実験的に検討する。さらに、熱源の存在するモデル室内でのミストの運動や蒸発に関する数値解析も併せて行い、消煙に効果のあるミストについても検討する。

2. スプリンクラーとウォーターミストシステム

2.1 スプリンクラー^{1),4)}

スプリンクラーは、一般に火災の初期状態での消火設備として設置され、スプリンクラーヘッドと呼ばれる放出口から水を大量に散布することで消火する設備である。その放水量は、ス

平成10年10月16日受理

* 機械工学科・助教授

** 機械工学科・技師

プリンクラー1個あたり毎分80 L (リットル)以上、散水径は半径3 m以上と規定されている。ただし、ひとつのスプリンクラーヘッドの散水範囲(有効散水半径)は、一般的事務室で半径2.3 m以下である。従来のスプリンクラーでは、ヘッド部分水圧が0.1~1 MPaと幅があり、その結果、放水量が規定値80 Lの3倍以上となってしまう可能性があった。改良型ヘッドでは1個あたりの放水量を毎分50 L以上(事務室等の場合)とし、ヘッドでの水圧も0.1~0.4 MPaとしているため、過剰放水の可能性も最大で50 Lの2倍以下と小さくなっている。また、有効散水半径は事務室の場合、従来型の2.3 m (10.58 m²)から3.25 m (21.0 m²)と向上し、面積では約2倍を消火可能であるが、いずれにしても大量の水を散布することには変わりがない。

スプリンクラーは、室内の温度上昇を捉えて放水開始するため、火災時の信頼性が高いという長所はあるものの、いったん放水を開始すると、制御弁等を操作しない限り、停止することができないという短所もある。そのことが建築物および収容物に対する水損被害の拡大となり、消火後、速やかに放水を停止できるスプリンクラーが望まれている理由である。

2.2 ウォーターミストシステム⁵⁾

ウォーターミストによる消火は、環境にやさしく、人体にも無害で、しかも前述のスプリンクラーに比べ小流量であるため、水損も最小限にすることが可能であるが、水損の程度にも関心が向けられ、火災規模に対して適正な水量の検討、すなわち発熱速度と必要散水密度; (Required Delivered Density: 燃焼物表面に散水させれば初期消火が達成できる最低散水量)の調査・研究等も行われている。

これは消火・消煙に有効な水滴粒子径の研究の必要性を意味している。実際に水滴が火炎を貫通し、火源に到達するに必要な粒子径は、スプリンクラーが作動する規模の火災では、直径

0.8 mm以上、そして0.5 mm以下の水滴は、雰囲気冷却に有効といわれている。また、液体火災(水溶性液体を除く)では、水滴が火炎を貫通して液体中に沈降すると消火効果を失い、一方では、小さな水滴は炎のアップドラフトにより火炎中に進入できない等の現象がある。

ゆえに、ウォーターミストシステムの消火・消煙能力が比較検討され、さらに性能が改善され、従来の消火・消煙設備よりも大幅に少ない水量で、同等あるいはそれ以上の効果を得ることができれば、火災安全工学上きわめて有益である。

3. 実験方法

3.1 ウォーターミストノズル

消火・消煙用ウォーターミストシステムを構築する場合、確実に作動し、保守・点検が容易、低コスト等の条件を満たす必要がある。したがってノズルに要求される重要な条件のひとつに微粒化エネルギーを安価に得ることがある。そこで、スプリンクラーと同様に、基本的には建築物の「高さ」を利用してエネルギーを得ることとし、圧力噴射弁を使用することにした。そこで、本研究では設計法が確立されている渦巻き噴射弁^{6),7)}を用いることとした。

ミスト特性の消煙効果への影響を詳しく調べるためには、広範囲の粒径、流量で実験することが好ましいが、単一の渦巻き噴射弁では、それが困難である。そこで、噴口径の異なる複数のノズルを設計・製作し、噴射圧力を変化させて、流量一定でミスト径の消煙への影響、あるいはミスト径一定で流量の影響を調べることにした。なお、噴霧角(設計値)はいずれのノズルも80°で一定とした。

3.2 消煙実験装置

図1にウォーターミストノズルを用いた消煙の実験装置系統図を示す。直方体のモデル室寸法は、高さ1.76 m、床面は一辺が1.17 mの正方

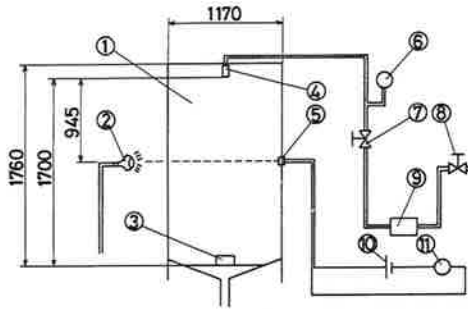


図1 実験装置系統図

形である。隣接する2側面は透明アクリル、残り2面と天井は合板を使用し、底部は金網を付置した排水装置となっている。煙発生源には線香を用いた。モデル室内が一定の濃度になるまで煙を発生させた後に、天井部に取り付けたノズルから噴霧を開始して、次節で述べる減光係数の時間的変化を測定して、消煙の性能を評価する。

3.3 減光係数測定法

一般に火災時に発生する煙の濃度を表すパラメータとして、減光係数 C_s ⁹⁾ がある。減光係数の値が大きければ視界が妨げられることを意味している。本研究では、光源にフラッドランプ、センサーにCdSセルを使用して、光源の光強度 F_0 、距離 L における光強度 F の間に成り立つ Lambert-Beer の法則：

$$F = F_0 \exp(-C_s L)$$

を利用して減光係数を決定し、ミストによる消煙の効果を評価することにした。

4. 実験結果および考察

4.1 ウォーターミストノズル特性

表1に本研究で用いた3種類のノズルのザウタ平均粒径(SMD)を液浸法により測定した結果を示す。流量一定(10 mL/s)の場合、ミスト径の範囲が約90~170 μm で、消煙への影響を調べることが可能である。

表1 粒子径測定結果

流量 (mL/s)	ザウタ平均粒径: SMD (μm)		
	ノズル A	ノズル B	ノズル C
5	102	227	346
10	91	109	170
15		103	117
20		86	95

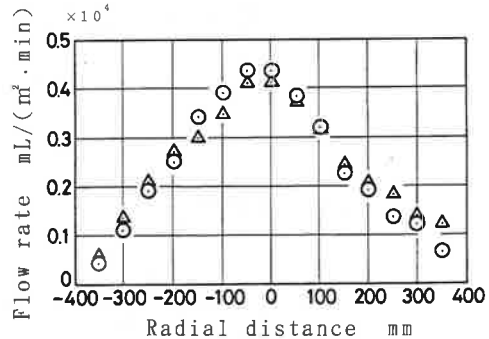


図2 分散量分布測定結果
(ノズル B: 噴射圧力 2 MPa)

図2はノズル B (噴射圧力 2 MPa) について、ノズル中心から鉛直下方約 1.5 m の水平平面上で互いに直行する2方向(図中○および△)についてミストの分散量分布を測定した結果である。一般に渦巻き噴射弁からのミストは中空円錐状であることが知られており、実際にノズル噴口近傍を観察すると、そのようになっている。しかし、本分散量分布測定のように、ノズルからじゅうぶん下方では、エントレイメント等の影響でモデル室内にミストが拡散しており、中心軸上で最大値をとる⁹⁾ことがわかる。なお、この傾向はいずれの実験条件でも同様であった。

4.2 消煙実験

図3は流量を一定(10 mL/s)に保ち、ミストの平均粒径を 91, 109, 170 μm と変化させて、モデル室内の減光係数の時間的変化を、それぞれ求めた結果(図中○, △, □)である。ここでの減光係数は、ミストを噴霧する直前の値 (C_s)₀

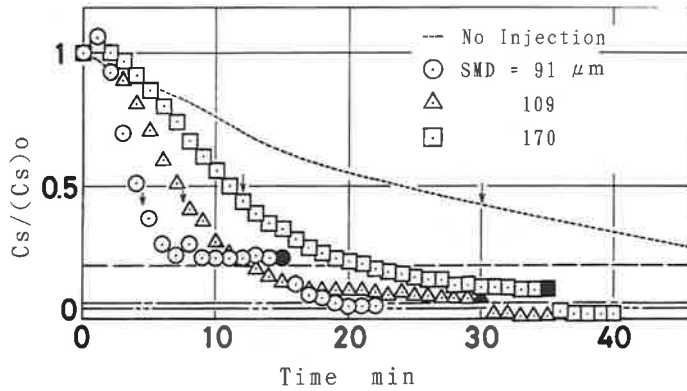


図3 減光係数の時間的变化 (Q=10 mL/s)

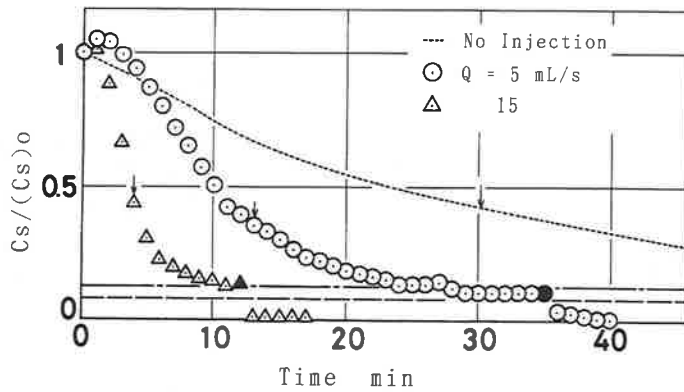


図4 減光係数の時間的变化 (SMD=100 μm)

で無次元化したものである。なお、図中の破線 (Time=0 min にて $C_s/(C_s)_0=1$) は、ミストを噴霧しない場合、すなわち煙を充満させ放置した場合の減光係数変化を求めたものである。

いずれの粒径のミストでも噴霧直後は、モデル室に充満した煙に加えて、ミスト自身が光を遮断するため、減光係数がいったんわずかに上昇し、その後は時間とともに減少することがわかる。ミスト粒径が小さくなるにつれて、減光係数がより早く減少することがわかる。これは、同じ流量の場合、粒径が小さいほど粒子表面積の総和が増すことに加えて、粒子のモデル室内での沈降速度が小さくなり、煙の吸着が良好に行われるためと考えられる。じゅうぶん時間が経過すると、減光係数の値は変化しなくなるが、

これは各平均粒径のミストのみが存在する場合の減光係数 (図下部の3本の破線、鎖線) にほぼ一致しており、この時点で、消煙の完了を意味している。なお、各条件における噴霧終了 (●, ▲, ■) 以降の減光係数は、いずれも0に漸近することも確認された。

避難設備の計画上、視認限界距離¹⁰⁾は重要な要素であるが、これは周囲の照明の状況や煙の性状等で異なる。本研究における一連の実験では、煙が充満して視界が妨げられている初期状態から、黒色の壁面に記した白色のマークが確認される時間を求めた (図中↓)。いずれの場合も $C_s/(C_s)_0=0.4$ 程度の値であり、また粒径が小さいほど早く確認されることがわかる。

図4は粒径をほぼ一定値(100 μm)に保ち、減

光係数の時間的変化を求めた結果である。流量の増加にともない、減光係数が急激に減少することがわかる。これは、流量の増加によって、モデル室内のミスト粒子数が増え、表面積の総和が増加し、煙の吸着が促進されるためと考えられる。

消煙と消火とは目的は異なるが、本ウォーターミストノズルの噴射流量は、最大の場合でも単位面積・単位時間あたりでスプリンクラーの約1/10程度以下であり、小流量でも効果があることがわかる。

5. モデル室内におけるミストの挙動解析

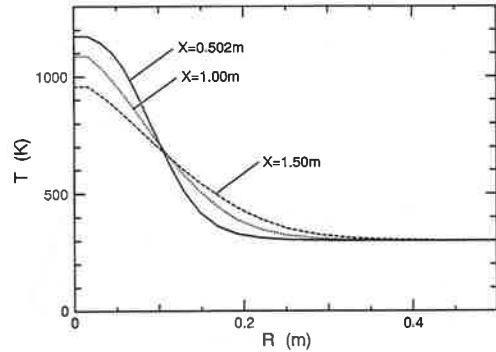
前節の消煙実験は、熱源のないモデル室で行ったが、ミスト粒子の運動や蒸発特性は火災時に存在する上昇流（プルーム）等によって大きく変化する。そこで、熱源の存在するモデル室内での粒子の挙動を数値解析し、消煙に効果のあるミスト径⁵⁾を検討することにした。

流れ場は計算の簡便性から、旋回のない軸対称2次元（直径1 m×長さ2 mの円筒）定常流とし、燃料噴霧の蒸発解析¹¹⁾と同様の手法を用いた。乱流モデルは $k-\epsilon$ 2方程式モデル、液滴との相互干渉による気流の生成項にはPSI-Cellモデルを用い、粒子の運動はラグランジュ的に解析した。計算領域にはスタッガード格子を適用して、SIMPLER法により計算した。

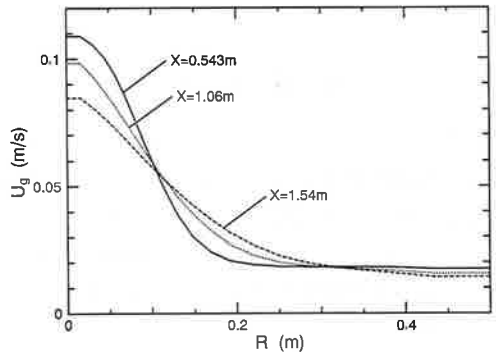
図5は床面からの高さが約0.5, 1, 1.5 mにおける半径方向の(1)温度、および(2)速度分布の計算例である。これは常温(300 K)の室内空气中に熱源(直径170 mm)から高温気流が一樣(温度1,200 K, 流速0.1 m/s)に流入する場合であるが、上方に向かうにつれて高温気流が拡散していく様子が見られる。

表2は本シミュレーションに用いたミストの条件を示している。ここで、噴出速度¹²⁾はノズル寸法、実験条件から算出して、この場合は約60 m/sである。

図6は、図5で示した流れ場におけるこのミ



(1) 温度分布



(2) 速度分布

図5 モデル室内温度分布・速度分布

表2 シミュレーションに用いたミスト

粒度分布	抜山・棚沢式(分割数20)
平均粒径	90 μm (最大粒径225 μm)
流量	10 mL/s
噴霧角	半頂角40° (標準偏差5°)
噴射速度	60 m/s (標準偏差10 m/s)

ストの挙動を示している。大粒子(197 μm)は高温域を貫通して壁面に衝突し、小粒子(例えば84 μm)は噴出後に円筒中心付近の高温域で瞬時に蒸発が完了することを示している。この計算条件の場合には、比較的大きな163 μm の粒子が、蒸発完了して消失する時に床面に到達することがわかる。

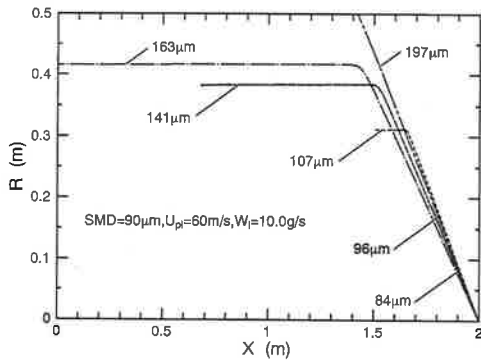


図6 ミスト粒子の挙動

6. ま と め

本研究では、ウォーターミストによる消煙・消火の基礎的研究として、ミスト粒子径、流量を変化させ、消煙効果の検討を行った。

- (1) ウォーターミストによる消煙・消火用の渦巻き噴射弁を設計して、その特性を調べた。
- (2) 消煙効果の実験的検討では、粒径が小さく、流量が多いほど高い消煙効果が得られた。
- (3) 熱源の存在するモデル室内でのミスト粒子の挙動のシミュレーションを行い、消煙に効果のあるミスト径を検討した。

今後はミストによる消火・消煙のメカニズム解明のためのモデリング、基礎実験を継続する方針である。

謝 辞

本研究の数値シミュレーションには弘前大学

理工学部稲村隆夫教授の御指導・御協力を賜りましたことに深甚なる謝意を表します。また実験遂行にあたり、平成8年度卒研究生上田学、神山智則、松本敦志各君の多大なる協力を得たことに深く感謝します。

引用文献

- 1) 次郎丸誠男,「はじめてのビル防災」, p. 80, オーム社, (1995).
- 2) Mawhinney, J.R., Dlugogorski, B.Z., and Kim, A., Proc. 4th International Symposium on Fire Safety Science, (1994), pp. 47-60.
- 3) Hadjisophocleous, G., Kim, A., and Knill, K., Proc. International Conference on Fire Research and Engineering, (1995), pp. 389-394.
- 4) 高木任之, 新版「イラスト建築防火」, p. 39, 全国加除法令出版, (1991).
- 5) 稲村勝正, 日本火災学会誌, Vol. 44, No. 3, (1994), pp. 31-34.
- 6) 辻正一, 「燃焼機器工学」, p. 126, 日刊工業, (1981).
- 7) 小林清志ほか2名, 「燃焼工学」, p. 83, 理工学社, (1988).
- 8) 植竹徹ほか3名, 平成8年度日本火災学会研究発表会概要集, (1996), pp. 178-181.
- 9) Bayvel, L., and Orzechowski, Z., "Liquid Atomization", p. 141, Taylor & Francis, (1993).
- 10) 堀内三郎(監修), 「建築防火」, p. 149, 朝倉書店, (1994).
- 11) 稲村隆夫, 第5回微粒化シンポジウム講演論文集, (1996), pp. 264-269.
- 12) Lefebvre, A.H., "Atomization and Sprays", p. 165, Hemisphere, (1989).