

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22310104

研究課題名（和文） ウォーターミストによる火災とガス爆発の防止に関する研究

研究課題名（英文） SUPPRESSION OF FIRE AND GAS EXPLOSION BY WATER MIST

研究代表者

吉田 亮 (YOSHIDA AKIRA)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：40105680

研究成果の概要(和文):ウォーターミストはハロン系消火剤に比較して、環境負荷がないため、代替消火剤として注目されている。本研究では火災時に発生する拡散火炎およびガス爆発を引き起こす予混合火炎の消火機構におよぼすウォーターミストの影響を実験的および解析的手法を用いて燃焼学的に明らかにした。拡散火炎の消炎に対しては、ミストの質量分率とミスト粒径の比(面積パラメータ)および蒸発ダムケラー数が支配的なパラメータであり、これらを大きくすることにより、拡散火炎を消炎することができる。一方、予混合火炎では、ウォーターミストを添加することにより燃焼速度が低下するが、これはミストの蒸発熱および水蒸気の熱容量による冷却効果が大きく影響している。しかし、水蒸気による反応抑制効果も無視できない。また、燃焼速度抑制効果は添加されるウォーターミストのモル分率で決定される。これらの知見はウォーターミスト消火設備の設計に極めて有用である。

研究成果の概要(英文): Water mist is environmentally acceptable as compared with Halon, and is attractive as an alternative fire suppressant. In the present study, we investigated experimentally and analytically the effect of water mist on the diffusion flame which appears in fires and the premixed flame which induces the gas explosion, on the basis of combustion science. The extinguishment of the diffusion flame is mainly affected by the ratio of mist mass fraction and mist diameter, which is defined as surface area parameter, and the evaporation Damköhler number. On the other hand, the burning velocity of premixed flame decreases with the water mist addition mainly due to the thermal effect which includes the latent heat of evaporation and heat capacity of water vapor. However, the chemical effect on the burning velocity cannot be neglected. Reduction of the burning velocity is mainly affected by the increase of mole fraction of added water mist. These results could be applied to the design of the water mist fire extinguishment system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学

## キーワード：火災・事故

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ここ数年住宅火災および爆発事故による死者数は1,000名を超え、そのうちの約5割が65歳以上の高齢者であり、今後高齢化の進展に伴いさらに増加するおそれがある。また火災の件数は50,000件を超えており、火災による消失損害額は1,000億円以上にのぼっている。安心して安全に生活できる社会の構築のために住宅防火対策を早急に推進する必要がある。

(2) 火災の被害を最小化するためには初期消火が必須であるが、消火器、スプリンクラーの設置が義務付けられているのは特定防火対象物だけであり、一般戸建て住宅の防火対策は極めて遅れている。ようやく平成18年になって初めて火災警報器の設置が義務付けられたが、消火設備に関しては現在でも設置義務はない。これは設備費用の問題、消火能力の信頼性の問題、さらには消火剤による二次被害の問題があり、未だに法的に規制することができないためである。こうした背景のもとに、住宅用として、簡便で信頼性が高くかつ二次被害の少ない消火設備の開発が必要とされている。

### 2. 研究の目的

(1) ウォーターミストは、従来のハロン系消火剤に比較して環境負荷がなく、人体に無害なため、古くから注目されてきた。しかし、ウォーターミストによる火災の消火機構が燃焼学的に解明されていない上に、ウォーターミストの拡散過程が気体消火剤とは異なるために、火災の消火に効果的なミストの供給方法は明らかにされていない。

(2) 火災の消火は燃焼学的にはダムケラー数(空気力学的特性時間と化学反応の特性時間の比)で記述できる。しかしウォーターミストが含まれる場合、ダムケラー数を定めるそれぞれの特性時間が火炎伸長率、レイノルズ数、ストークス数、ミスト粒子特性長さ、蒸発の特性時間などのパラメータの影響を受ける。本研究では、拡散火炎の消炎現象および予混合火炎の燃焼速度低減効果におよぼすそれぞれのパラメータの影響を定量的に明らかにし、消火に有効なウォーターミストの特性と供給方法を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) これまでの研究は実際的なものが多く、実スケールの模擬火災に、あるノズルから発生したミストを適用して火災を消火する消火能力に注目したものが多く、これは消防法によって規定された標準的な火災の消火能

力によって噴霧ノズルあるいはミスト消火器の許認可が決定されるため、こうした研究では消炎機構は解明できない。

(2) ダムケラー数で消炎現象を議論するためには、これら物理的要因のほかに化学的要因として、化学反応速度を考慮する必要がある。これには温度、安定化学種および中間生成物、特にOH基の濃度の影響を解明する必要がある。これらの要因の影響を分離して明らかにするためには、流れ場を単純化しなければならない。これまでに燃焼の基礎研究では、火炎の構造解析などの目的で対向流、よどみ流および同軸噴流が用いられている。そこで本研究では、実験および数値シミュレーションで広く用いられてきた対向流、よどみ流および同軸噴流を採用する。ミストの特性は、消炎現象に決定的な影響を与えると考えられるが、これまでの研究では、使用された装置固有のミストに対する消炎現象が議論されており、汎用性のある定量的な結果は得られていない。本研究ではミストの特性を広範囲に変化させ、それぞれの粒径、数密度および粒径分布形状パラメータが消炎におよぼす影響を、流体力学、熱力学および反応化学に基づいて実験と数値シミュレーションにより詳細に検討する。

(3) 研究を進めるにあたり、研究組織は実験グループと数値シミュレーショングループより構成する。実験グループでは主に以下の項目に関して研究する。まずウォーターミストの特性を明確化する。このように特性が明確となったミストを用い、よどみ流平面予混合火炎、対向流拡散火炎および同軸流拡散火炎の消炎限界を測定する。レーザ粒度測定装置を用いて火炎近傍でのミストの挙動を調べるとともに、消炎に至るまでの火炎構造の変化を温度測定および速度測定により明らかにする。これらの研究により、消炎現象におよぼすウォーターミストの物理的影響および化学的影響が明らかとなる。

(4) 数値シミュレーショングループでは、不活性ガスとして水蒸気(蒸発という相変化を伴わない場合)を考慮することにより、水蒸気がよどみ流平面予混合火炎、対向流拡散火炎および同軸流拡散火炎の消炎におよぼす影響について数値シミュレーションを行う。また蒸発過程を一種の化学反応と仮定した簡易的なモデルを用いて、ウォーターミストの蒸発が消炎機構におよぼす影響を検討する。さらに、液体としてのミストの影響を厳密に考慮するためには従来のオイラー系基礎方程式に、ラグランジュ系でミストの運動

を組み込む必要がある。ここでミストが流れと相対的な運動をするために基礎方程式の解に特異性が現れ、ミストの運動および蒸発過程に数値モデルを構築する必要がある。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究では、対向流拡散火炎および同軸流拡散火炎の消炎機構におよぼすウォーターミストの影響ならびに予混合火炎の燃焼速度におよぼすウォーターミストの影響を実験的に明らかにするとともに、モデルを用いた数値シミュレーションによりその影響を評価した。

(2) 実験的な研究では、従来まで考えられてきたウォーターミストの三つの物理的効果、すなわち①冷却効果、②窒息効果および③化学反応抑制効果だけで消炎現象を議論できず、流れ場との相互作用を考慮する必要性が示された。一方、数値シミュレーションでは、ミストを添加することにより、蒸発潜熱および水蒸気の熱容量による冷却効果が極めて大きく、窒息効果はほとんど認められないことが分かった。また化学反応におよぼす影響については、連鎖分枝反応に寄与する活性化学種の濃度が著しく低下することが明らかにされたが、感度解析および反応経路解析から燃焼速度におよぼす影響はそれほど大きくないことが分かった。

(3) 対向流拡散火炎の消炎の研究ではメタンを燃料とし、ミスト濃度と消炎限界火炎伸長率の関係を明らかにした。その結果、拡散火炎の消炎には火炎伸長率が大きな影響を与えていることが分かった。図1は対向流拡散火炎の消炎限界におよぼす面積パラメータの影響を示す。縦軸は無次元消炎限界速度勾配で横軸はミスト粒子特性パラメータである面積パラメータを表す。消炎限界速度勾配

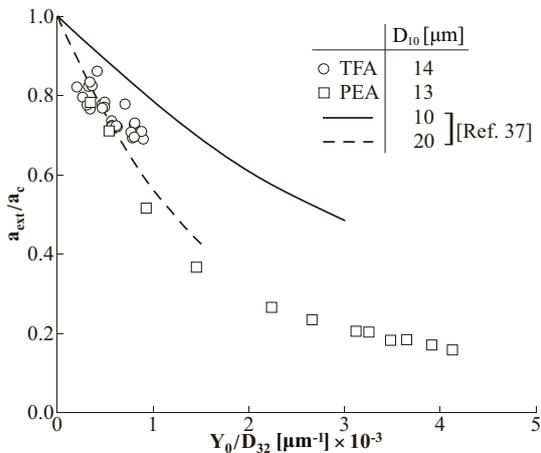


図1 対向流拡散火炎の消炎限界におよぼす面積パラメータの影響

は面積パラメータの増加とともに減少することが明らかである。ウォーターミストによる消炎に関するこれまでの研究では、火炎伸長率はほとんど考慮されてこなかったが、本研究により極めて限定された範囲ではあるが、ミスト濃度と消炎限界火炎伸長率の関係が明らかとなった。

(4) 同軸流拡散火炎の消炎の研究では、プロパンを燃料とし、燃料流速、周囲空気流速および添加ミスト量を変化させて、火炎の安定機構を明らかにした。図2に示すように、ミスト流量により安定限界は著しく異なることが明らかになり、火炎の安定性は火炎基部に形成される予混合領域の構造によって決定されることが分かった。また、ウォーターミストの火炎基部における滞留時間と蒸発時間の比すなわち蒸発ダムケラー数により消炎限界が決定されることが明らかとなった。

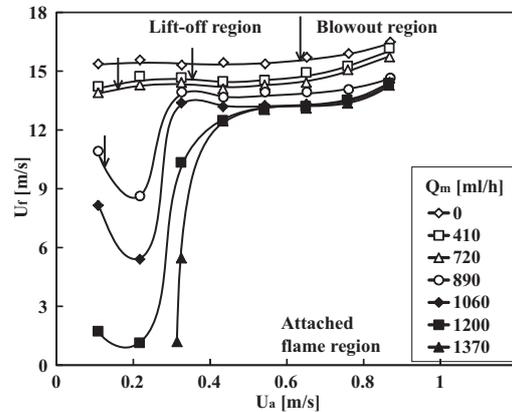


図2 同軸流拡散火炎の安定限界におよぼすミスト流量の影響

(5) 一方、予混合火炎の燃焼速度におよぼすウォーターミストの影響の研究においては、よどみ流中にプロパン-空気予混合火炎を形成し、火炎伸長率が燃焼速度におよぼす影響を明らかにした。ウォーターミストを添加すると燃焼速度は明らかに減少する。しかし、ミストを添加しない場合、プロパン-空気予混

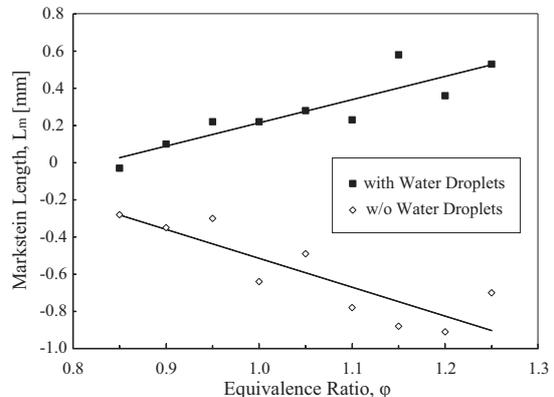


図3 マークシュタイン数

合火炎の燃焼速度は火炎伸長率の増加とともに増加するが、ウォーターミストを添加することによりその依存性は逆になることが分かった。図3に示すように、マークシュタイン数はウォーターミストの添加により負から正に逆転する。これは混合気流れとウォーターミスト粒子の相対運動が、層流燃焼速度の低下に大きな影響を与えているためである。

(6) ウォーターミストの化学的な影響を実験的に評価することは難しいために、数値シミュレーションにより明らかにした。図4に量論比のプロパン-空気予混合火炎の燃焼速度におよぼすウォーターミストの添加量の影響を示す。燃焼速度はミスト添加量の増加に伴い著しく減少し、熱的な冷却効果すなわち蒸発熱と水蒸気の熱容量の影響が極めて大きいことが分かる。また化学反応抑制効果は比較的小さいが、無視できない。これは連鎖分枝反応に寄与する活性化学種の濃度が著

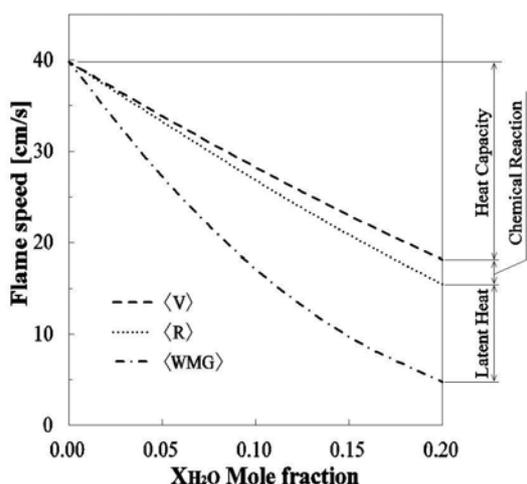


図4 燃焼速度におよぼすウォーターミスト添加量の影響

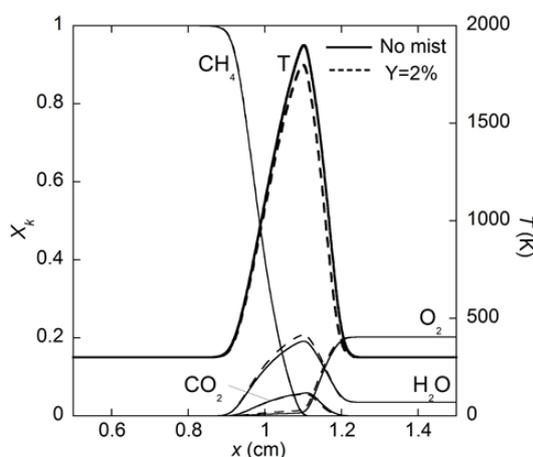


図5 対向流拡散火炎の構造におよぼすウォーターミストの影響

しく低下することが原因である。一方、感度解析および反応経路解析から層流燃焼速度におよぼす影響はそれほど大きくないことが分かった。

一方、詳細化学反応とウォーターミストを考慮したメタン-空気対向流拡散火炎の数値計算を行い、ウォーターミストが消炎におよぼす影響の解明を試みた。図5にミストの質量流束分率を  $Y=0, 2\%$  としたときの火炎構造の変化を示す。初期ミスト直径は  $15\mu\text{m}$  である。ミスト添加により  $\text{H}_2\text{O}$  の最高濃度が増加するとともに火炎温度が低下することが分かる。この温度低下はミスト蒸発過程で吸収された蒸発潜熱による冷却効果によるものであり、またその温度低下量は速度勾配が大きいほど増加する。一方、ミスト添加により反応帯中の酸素濃度はむしろ増加し、ミスト蒸発によって生じた水蒸気による酸素の希釈による窒息効果は生じていないことが明らかにされた。

(7) 対向流拡散火炎および同軸流拡散火炎の消炎機構におよぼすウォーターミストの影響、予混合火炎の燃焼速度におよぼすウォーターミストの影響を実験的かつ定量的に明らかにするとともに、モデルを用いた数値シミュレーションによりその影響を確認した。これらの研究により、従来まで考えられてきた冷却効果、窒息効果および化学反応抑制効果だけで消炎現象を議論できないことが示された。いずれの場合も、流れ場の特性値が消炎に大きな影響を与えていることが示されたが、流れ場の特性値は従来の消炎機構の定性的説明には考慮されていなかった。今後、ウォーターミストを用いた消火設備の開発には本研究の成果が活用されるべきであろう。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Yoshida, A., Takasaki, R., Kashiwa, K., Naito, H. and Saso, Y., Extinguishment of Counterflow Methane/Air Diffusion Flame by Fine Water Droplets, *Combustion and Flame*, 査読有, Vol. 160, 2013, 1357-1363. DOI:10.1016/j.combustflame.2013.03.005.
- ② Yoshida, A., Udagawa, T., Momomoto, Y., Naito, H. and Saso, Y., Experimental Study of Suppressing Effect of Fine Water Droplets on Propane/Air Premixed Flames Stabilized in the Stagnation Flowfield, *Fire Safety*

Journal, 査読有, Vol. 58, 2013, 84-91.  
DOI:10.1016/j.firesaf.2013.01.025.

- ③ Sakurai, I., Suzuki, J., Kotani, Y., Naito, H. and Yoshida, A., Extinguishment of Propane/Air Co-Flowing Diffusion Flames by Fine Water Droplets, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 34, 2013, 2727-2734.  
DOI:10.1016/j.proci.2012.06.046.
- ④ Yoshida, A., Uendo, T., Takasaki, R., Naito, H. and Saso, Y., Water Droplets Behavior in Extinguishing the Methane-Air Counterflow Diffusion Flame, Fire Safety Science, 査読有, Vol. 10, 2011, pp. 569-582.  
DOI:10.3801/IAFSS.FSS.10-569.
- ⑤ 吉田 亮, 櫻井 格, 内藤浩由, 小谷良信, ウォーターミストによる噴流拡散火炎の消炎, 日本火災学会論文集, 査読有, Vol. 61, 2011, 11-19.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kasai/61/1/61\\_1\\_11/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kasai/61/1/61_1_11/_pdf).
- ⑥ Naito, H., Uendo, T., Saso, Y., Kotani, Y. and Yoshida, A., Effect of Fine Water Droplets on Extinguishment of Diffusion Flame Stabilized in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 33, 2011, 2563-2571.  
DOI:10.1016/j.proci.2010.06.005.

[学会発表] (計 16 件)

- ① Yoshida, A. and Yukawa, A., Numerical Simulation of Effects of Water Mist on Flame Structure and Flame Speed of Propane-Air Premixed Flames, The 9<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, 査読有, 2013/5/20, Gyeongju, Korea, CD-ROM.
- ② 曲胤 吉田亮, 西岡牧人, 詳細反応数値計算によるウォーターミストの消炎機構の研究, 第 50 回燃焼シンポジウム, 査読無, 2012/12/7, 名古屋, 490-491.
- ③ 百本洋介, 内藤浩由, 佐宗祐子, 吉田 亮, プロパン-空気予混合火炎の火炎温度に及ぼすウォーターミストの影響, 第 50 回燃焼シンポジウム, 査読無, 2012/12/7, 名古屋, pp. 486-487.

[その他]

ホームページ等

<http://yoshilab.web.fc2.com>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 亮 (YOSHIDA AKIRA)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：40105680

### (2) 研究分担者

西岡 牧人 (NISHIOKA MAKIHITO)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科  
・教授

研究者番号：70208148

小谷 良信 (KOTANI YOSHINOBU)

東京電機大学・工学部・講師

研究者番号：10266877

鈴木 仁治 (SUZUKI JINJI)

東京電機大学・工学部・講師

研究者番号：60426278

小林 佳弘 (KOBAYASHI YOSHIHIRO)

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：00550576

### (3) 連携研究者

佐宗 祐子 (SASO YUKO)

総務省消防庁消防大学校消防研究センター

・主幹研究官

研究者番号：80358788