

対向流拡散火炎に対する水噴霧の消火メカニズムの解明

Study of fire extinguishing mechanism of water spray on counterflow diffusion flame

田渡 貴史,
(Takafumi TADO)
山口大学
(Yamaguchi Univ.)

瀬尾 健彦,
(Takehiko SEO)
山口大学
(Yamaguchi Univ.)

三上 真人
(Masato MIKAMI)
山口大学
(Yamaguchi Univ.)

This study experimentally investigated the fire extinguishing mechanisms of water spray using a counterflow burner. The water spray was injected in the stream consisting of oxygen and nitrogen from the lower duct while the methane was introduced from the upper duct. We observed behavior of the flame during extinction for different mean water droplet diameters using a high speed video camera. The extinction behavior of flame without water spray showed that the flame size became smaller gradually until it extinguished. On the other hand, in the case of extinction of flame by water spray, a hole was formed at the surface of flame near the center part and it expanded, resulting in extinction. Therefore, the formation of a hole in flame has a great influence in flame extinction with water spray. The flame hole formation mainly depended on the mean droplet diameter and number of droplet of water spray.

Keywords: Fire extinguishing mechanism, Water spray, Droplet diameter, Diffusion flame

1. 緒言

火災は人々の生活の中でとても恐ろしいものであり、このような災害に備えて消火剤や消火特性の研究開発が進められている。現在消火能力の最も優れている消火剤として、ハロン 1301 が知られている。ハロン 1301 は消火能力が高いだけでなく、浸透性および絶縁性が高く、また人体に対しても無害なため広く使われてきた。しかし、フロン的一种であるハロン 1301 はオゾン層の破壊の原因となることがわかり、1987 年の「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」締約国会議においてハロン 1301 の生産・使用が全面的に禁止になることが決まった。現在では承認を受けた施設でのみハロン 1301 使用が許されており、ほとんどの施設において消火能力の劣る消火剤が用いられている。このためハロン 1301 に替わる代替消火剤の研究開発が進められている。

代替消火剤として研究開発されているものに水噴霧があり、条件によってはハロン 1301 と同等の消火能力を持つことが報告されている⁽¹⁾。水噴霧の利点として、安価であること、確保しやすいこと、また環境汚染の心配が無いことなどがあげられる。さらに水は蒸発潜熱および熱容量が非常に大きいため、火炎から熱を奪うことで消火を行う冷却消火と、蒸発した水蒸気が燃焼場の酸素濃度を下げることで消火を行う窒息消火の 2 つの原理によって消火する。このため、水滴径を数 μm から数百 μm までの無数の小さな液滴に微粒化することで、単位体積当たりの表面積を大きくし、蒸発効率を上げ冷却消火および窒息消火を向上させることで、水噴霧の消火能力を向上させることができると考えられる。

過去の研究において、代替消火剤として水噴霧を用いた研究は数多く行われており、その中で消火能力を最大とする水噴霧の液滴径が存在することが報告されている。Lentati ら⁽¹⁾⁽²⁾は、燃料にメタンを用いた対向流拡散火炎に対する水噴霧の影響を数値計算を用いて調査しており、その中で水滴径が $20\mu\text{m}$ の時に最も消火能力が高く、この時ハロン 1301 よりも

消火能力が高くなることを明らかにした。Dvorjetski・Greenberg ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、拡散火炎に対する消火特性について理論的に調査しており、最適液滴径について明らかにした。また、Sasongko ら⁽⁵⁾は対向流拡散火炎に対する多分散水噴霧の影響を実験的に調査しこの中で最も消火能力の高い平均液滴径は $60\mu\text{m}\sim 70\mu\text{m}$ に存在したと報告している。さらに、Ndubizu ら⁽⁶⁾は水噴霧の消火メカニズムについて実験的および数値計算を用いた調査を行っており、その中で水噴霧の持つ冷却効果・窒息効果の影響について調査している。

このように、代替消火剤として水噴霧を用いた研究は数多くされており、その中で、最適径の存在や消火メカニズムに関する研究が行われている。しかし、消火時の火炎の観察による消火メカニズムの解明については報告された例が無い。そこで本研究では、高速度カメラを用いることで火炎の消滅挙動を調査した。さらに、水噴霧を伴う場で火炎の温度計測を行うことで、水噴霧の冷却能力の調査も行った。これらの調査から火炎を貫通する液滴の存在が消火に及ぼす影響を考慮した新たな水噴霧の消火メカニズムを提案し考察を行う。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

本研究は図 1 に示すような対向流バーナを用いた。バーナは基本的に Sasongko ら⁽⁵⁾の研究で用いられたバーナと同様である。本対向流バーナは同軸の上下に対向するように配置された 2 組の二重円筒管から構成されており、上下の円筒管出口間隔を 10mm としている。上下の内側円筒管の内径および長さはそれぞれ $\phi 23\text{mm}$, 700mm とし、上下の外側円筒管の内径および長さはそれぞれ $\phi 39.7\text{mm}$, 300mm である。上側の内側円筒管からはメタンを供給し、下側の内側円筒管からは、窒素・酸素・水噴霧を燃焼場へ供給している。上下円筒管の外周部の流路には主流と同軸方向・同速度の窒素を流すことで、主流と周囲空気とのせん断を防ぐ構造とし、さらに内側円筒管の温度上昇を抑えバーナリムへ火炎が接触しな

いような構造となっている。燃焼によって上側円筒管周囲に形成される自然対流の発生を抑制するために燃焼場上方に金網を取り付けた。また、下側円筒管から供給する窒素・酸素の総流量 Q_{total} を微粒化ガス Q_{atom} として用いる窒素・酸素の変化に関係なく一定とするために、窒素・酸素を補助ガス Q_{supp} として同時に供給している。

次に、水の噴霧方法について説明する。水は対向流バーナの下側に取り付けられた密閉容器内の外部混合式二流体噴射弁 (1/8JJ 型, Spraying Systems Co.Ltd.) によって噴霧される。密閉容器は周囲空気の誘引を防ぎ、さらに、下側円筒管から噴霧した水噴霧のうち燃焼場に到達できないものを溜め、排出できる構造となっている。

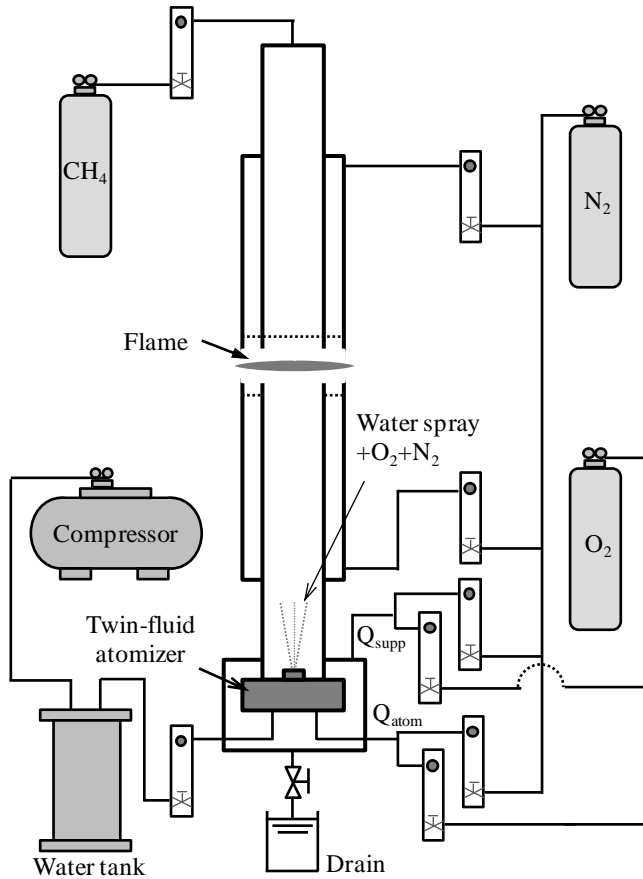


Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 実験条件および方法

本実験では燃焼場に供給されるメタンの流量 $Q_F=13$ L/min, 水噴霧の流量を $Q_W=0.4$ mL/min でそれぞれ一定とした。また下側円筒管から供給される総空気流量は $Q_{total}=10$ L/min とし、微粒化ガス流量を $Q_{atom}=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ L/min とした。これらの流量は、面積式流量計 (RK1250, KOFLOC) を用いて調節した。水噴霧を供給しない場合の流れ場のひずみ速度は 160 s⁻¹ である。

水噴霧の液滴径の計測には、PDDPA (Phase Doppler Particle Analyzer, TSI) を用いた。なお、水噴霧の液滴径の計測は下側円筒管出口の断面中央部で上方に 1mm の点において計測を行い、計測液滴数が 1 万個に達した段階で計測を終了した。なお、本研究では水噴霧の液滴径に大きな分布を有する多分散水噴霧を用いているためザウタ平均液滴径 d_{32} を代表平均液滴径として用いた。

さらに、本実験では水噴霧の各平均液滴径に対して、酸素濃度を窒素希釈によって減少させ消炎酸素濃度を調査した。消炎酸素濃度 Y_{O2ext} は、火炎が消炎した時の酸素質量分率と定義した。火炎温度は素線径 200 μ m の R 型熱電対を用いて計測を行った。なお、白金による触媒反応を防ぐため、本実験では熱電対表面に対してシリコーティングを施した。火炎および水噴霧の高速度撮影にはハイスピードカメラ (Phantom Miro M310, Vision Research) を用いた。また、半導体レーザー (SDL-532-050F, Shanghai Dream Lasers Technology) を光源とし、円筒平面凸レンズを用いてシート光を形成し、このシート光を噴霧断面に照射することにより噴霧の可視化を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水噴霧特性

本実験で用いた水噴霧の代表的な平均液滴径 d_{32} に対する液滴径分布を図 2 に示す。この図より、平均液滴径が大きくなるにつれ 25 μ m 以上の液滴の個数が増加し、反対に 25 μ m 以下の液滴の個数は減少していることが読み取れる。しかし、どの平均液滴径においても、大多数を占める液滴は 25 μ m 以下の液滴であり、最も大きな $d_{32}=127\mu$ m においても液滴数の 80% 以上が 25 μ m 以下である。

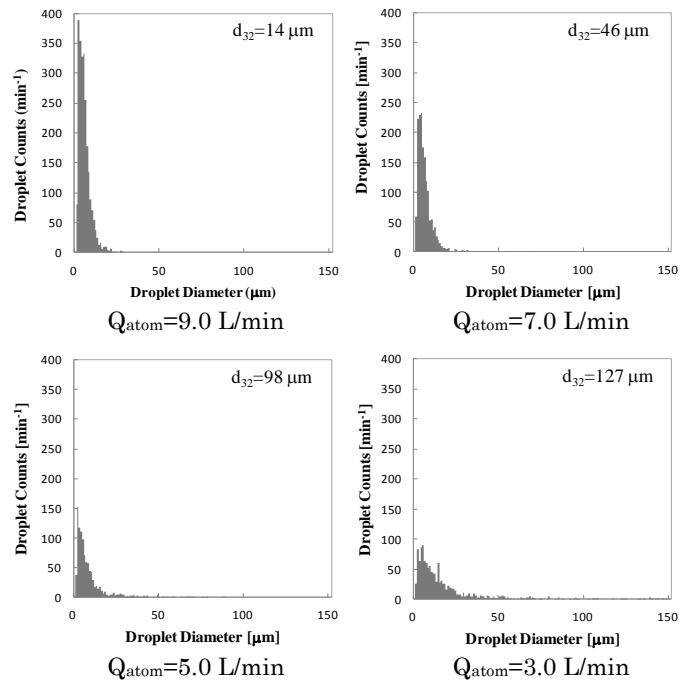


Fig. 2 Water droplet size distributions for different atomizing gas flow rates Q_{atom}

図 3 に各平均液滴径に対する火炎および噴霧画像を示す。なお酸素濃度は $Y_{O2}=0.24$ 一定としており、酸素濃度は質量分率で示す。図より水噴霧の平均液滴径が大きくなるにつれ液滴個数が減少している様子が確認できる。また、液滴の蒸発挙動に着目すると液滴径の大きな条件ほど液滴が火炎を貫通している様子が確認できる。しかし、液滴径が小さくなるにつれ貫通する液滴の個数が減少し、反対に火炎近傍において蒸発する割合が高くなることが確認できる。

この現象はストークス数および蒸発ダムケラー数を用いて説明することが可能である。ここで、ストークス数は流れ場の変動に対する粒子の応答特性時間と流れ場の特性時間との

比で表される無次元数であり、蒸発ダムケラー数は流れ場の特性時間と蒸発特性時間との比で表される無次元数である⁶⁾。平均液滴径が大きいほどストークス数が大きな値となり、水噴霧は伸長流れに追従しにくい条件となる。さらに、水噴霧の平均液滴径が大きいほど蒸発ダムケラー数は小さな値となり、1よりも小さい場合には、火炎に到達するまでに蒸発が完了しなくなる。後に図5に示されるように、100 μm を超えるほど大きな水滴は火炎に到達するまでに蒸発を完了せず、また、大きな貫通力を持つ。逆に20 μm より小さい水滴は火炎手前において蒸発が完了し、また、流れへの追従性も高いと考えられる。

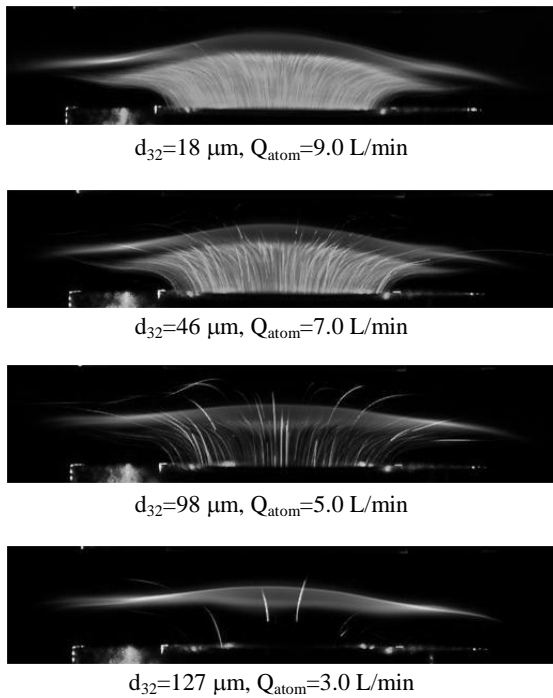


Fig. 3 Laser light sheet photographs of counterflow diffusion flame with water spray for different Sauter mean diameters of water droplet d_{32} ($Y_{O_2}=0.24$)

3.2 冷却能力を最大とする水噴霧の液滴径

水噴霧を伴う場合の火炎温度を計測することで水噴霧の冷却能力の調査を行った。水噴霧を伴う場合のメタン拡散火炎の燃焼挙動は不安定であり、かつ酸素濃度の違いまたは水噴霧の有無によって火炎位置が異なる。そのため、バーナ中心軸上で火炎に対して熱電対の温接点を上下に移動し火炎温度

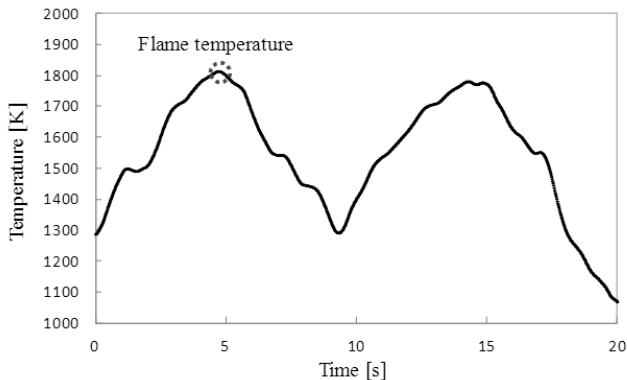


Fig.4 Temperature history with moving the thermocouple up and down near the flame and determination of flame temperature

の計測を行った。この計測によって得られた温度履歴は図4に示すようなグラフとなる。本実験ではこのグラフから最高温度を抽出しこれを火炎温度と定義した。

図5に水噴霧の平均液滴径に対する火炎温度を表したグラフを示す。なお実験条件を一定とするため酸素濃度は $Y_{O_2}=0.24$ 一定とした。

図より、水噴霧の平均液滴径が小さくなるにつれて火炎温度は一旦減少し最小値をとった後増加している様子が確認できた。火炎温度を最小とする水噴霧の平均液滴径において冷却能力が最も高くなると考えられる。図5から火炎温度を最小とする水噴霧の平均液滴径は $d_{32}=50\sim 70\mu\text{m}$ の範囲内に存在していると言える。

次に図5の上部に示した無次元数を用いて冷却能力を最大とする水噴霧の液滴径について考察する。図より冷却能力を最大とする水噴霧の平均液滴径はストークス数 St が1付近および蒸発ダムケラー数 Da が1よりも大きな条件において確認することができる。反対にストークス数が1よりも小さな条件および1よりも大きな条件では平均液滴径が小さいほど火炎温度は上昇しており水噴霧の冷却能力は低下したと考えられる。ストークス数が1よりも小さな条件では、液滴径が小さく蒸発ダムケラー数の値が高いことから、火炎の十分手前で水滴が蒸発を完了しているものと考えられる。さらにストークス数の値が小さなことから、水噴霧は伸長流れ場に追従して分散するため、火炎に到達しにくくなることも冷却能力を低下させる要因だと考えられる。逆に、ストークス数が1より大きな条件では、液滴径が大きくなるにつれ蒸発ダムケラー数も減少することから、完全に蒸発が完了する液滴の個数が減少し冷却能力が低下したと考えられる。

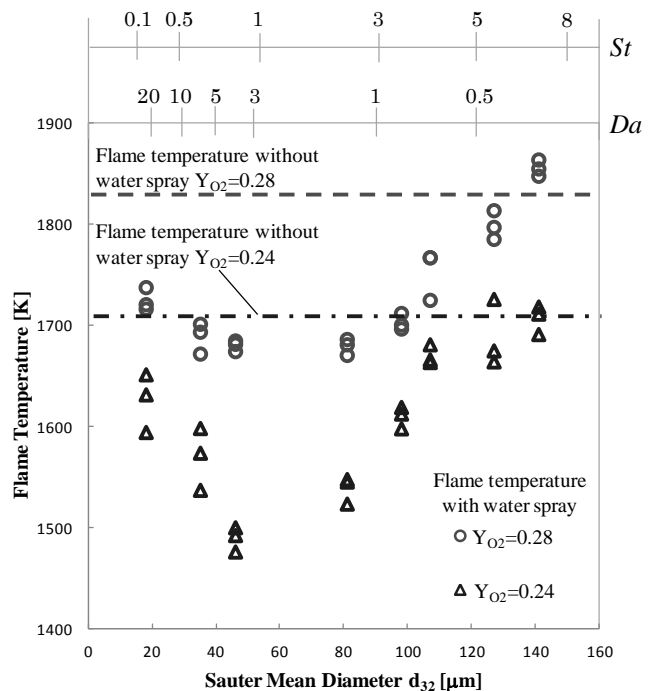


Fig.5 Flame temperature at constant oxygen concentration Y_{O_2} on Sauter mean diameter of water droplet d_{32}

3.3 消火能力を最大とする水噴霧の液滴径

既存の研究⁶⁾により、消火能力を最大とする水噴霧の液滴径の存在が報告されており、本実験においても同様の傾向が見られた。図6に本実験によって得られた消炎曲線を示す。プロットの上側は燃焼可能領域を表し、下側は燃焼不可能領域

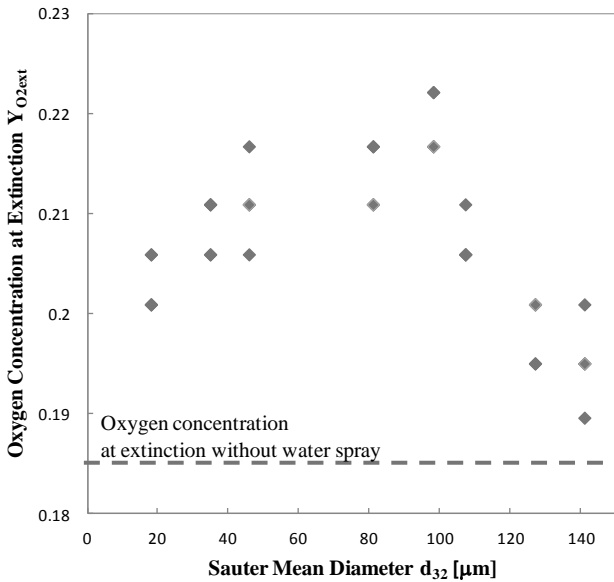


Fig. 6 Dependence of oxygen concentration at extinction $Y_{O_2, \text{ext}}$ on Sauter mean diameter of water droplet d_{32}

を表している。消炎酸素濃度の値が高いほど水噴霧の消火能力が高いと評価できる。したがって、図 6 より平均液滴径が $100\mu\text{m}$ 付近で最も消火能力が高いと評価でき、本実験においても消火能力を最大とする水噴霧の液滴径が確認できた。なお、水噴霧無しの場合の消炎酸素濃度は 0.187 であり、すべての平均液滴径において水噴霧の消火効果が確認できた。

次に、水噴霧の冷却能力を表す図 5 と消火能力を表す図 6 とを比較する。背景でも述べたように、既存の研究によって水噴霧の消火メカニズムは冷却とそれに付随する窒息からなることが知られている。よって、消火能力の最も高い液滴径と、冷却能力の最も高い液滴径は等しいものと期待される。しかし、図 5 より冷却能力の最も高い平均液滴径は $d_{32}=50\sim 70\mu\text{m}$ の範囲内に存在しており、消火能力の最も高い平均液滴径は図 6 より $d_{32}=100\mu\text{m}$ 付近に存在しており、最適値がそれぞれ異なることがわかった。

このように水噴霧の消火能力は、既存の研究によって報告されていた冷却効果および窒息効果のみでは完全には説明できない。そこで本研究ではハイスピードカメラを用いることで火炎の消炎の様子を詳細に観察し、新たな水噴霧の消火メカニズムの提案を行う。

3.4 水噴霧の消火メカニズム

水噴霧が無い場合とある場合の火炎の時系列変化をそれぞれ図 7, 8, 9 に示す。撮影速度は 100fps とし、露光時間は 3.3ms とした。

水噴霧が無い場合の図 7 では、火炎は徐々に小さくなり消炎に至っている。図 8 の平均液滴径 $98\mu\text{m}$ の水噴霧を伴う場合には、一つまたは複数の大きな液滴が貫通することで火炎の一部に穴があき、その穴の拡大によって消炎に至る様子が確認された。図 8 の静止画のみからは火炎に生じた穴の視認性の低い画像もあるが、 -50ms 以降の画像では火炎に開いた穴のエッジが拡大していくのがわかる。 -50ms から穴のエッジに注目して時間を遡って見ていくと、そのエッジは -80ms の画像において火炎を貫通する液滴近くの火炎のわずかな窪みに繋がっている。この火炎の窪みは液滴の火炎の貫通による局所消炎によるものと考えられる。同条件の他の火炎においても同様な消炎挙動が見られた。また、画像では比較的大

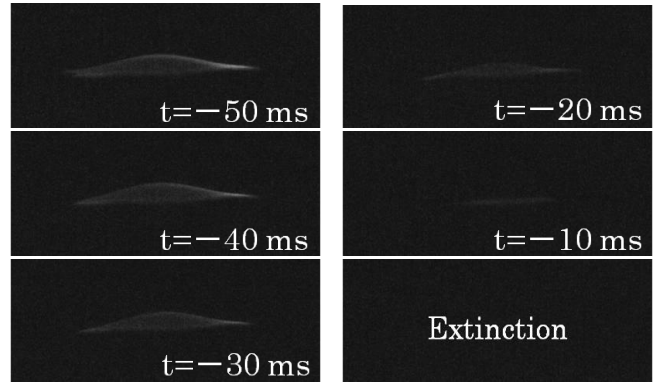


Fig. 7 Time-series of flame extinction without water spray ($Y_{O_2}=0.19$)

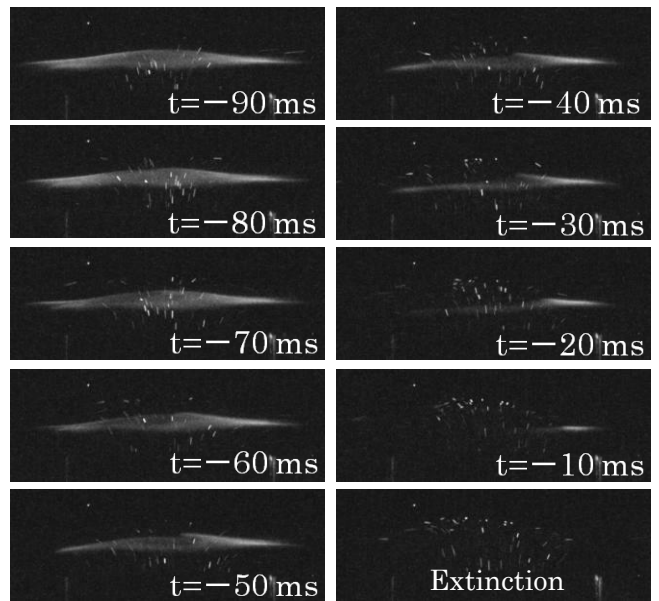


Fig. 8 Time-series of flame extinction with water spray ($d_{32}=98\mu\text{m}$, $Y_{O_2}=0.22$)

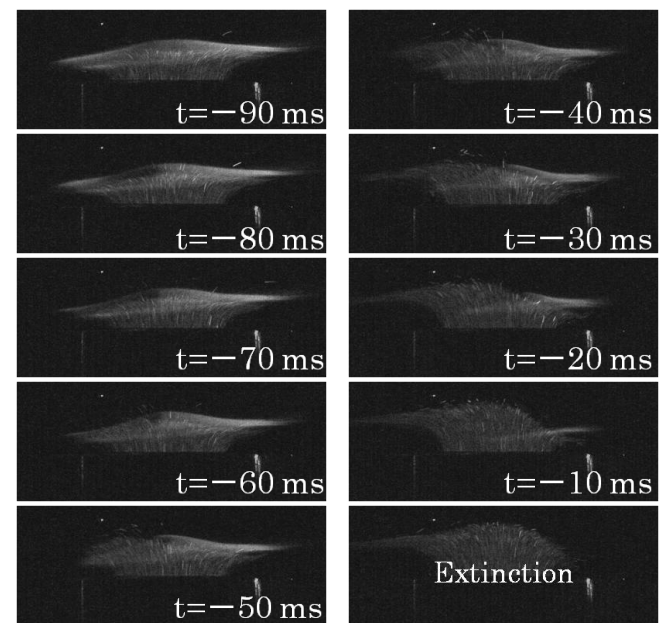


Fig. 9 Time-series of flame and water spray illuminated by Laser light during extinction ($d_{32}=18\mu\text{m}$, $Y_{O_2}=0.20$)

大きい液滴は散乱光強度が大きいため視認性が高いが、散乱光強度の小さい微小液滴も視認性は低いながらも存在しており、火炎に生じた穴を通過していると考えられる。また、この穴は火炎中心部に形成された場合は、外周部へ移動することで拡大している様子が確認できた。よって、形成される穴の位置によっても、消火能力に影響すると考えられる。図 9 には $d_{32}=18\mu\text{m}$ の消炎時の火炎と水噴霧の時系列画像を示す。図より火炎の一部に穴が形成され、その穴から直径の大きな液滴だけでなく、直径の小さな液滴も穴に進入している様子が確認できる。その後液滴は火炎の上面に到達し、穴のあいた火炎外周部は上下方向から水噴霧によって消火され火炎の一方は完全に消炎することが確認できる。さらに、火炎の一部分が消炎したことにより、火炎全体の消炎につながることを確認できた。ただし、図 8 の $d_{32}=98\mu\text{m}$ の水噴霧で消炎が生じた酸素濃度では $d_{32}=18\mu\text{m}$ の場合には消炎は生じず、より低い酸素濃度で図 9 の消炎が生じた。酸素濃度が低下すると、反応速度が低下するとともに火炎はより酸化剤側に移動する。そのため、液滴が火炎に到達するまでの時間が短くなり、より小さい平均液滴径の場合でも液滴が火炎を貫通しやすくなり、液滴の火炎貫通に伴う消炎が生じやすくなると考えられる。

図 10 に新たな消火メカニズムのモデル図を示す。図に示すように大きな液滴もしくは数個の液滴が火炎を貫通するような場合に火炎では局所消炎が起こると考えられる。次に、局所消炎によって生じた穴に水噴霧が侵入することにより穴の内側の局所冷却が進み、形成された穴の拡大が進行し火炎全体の消炎につながると思われる。

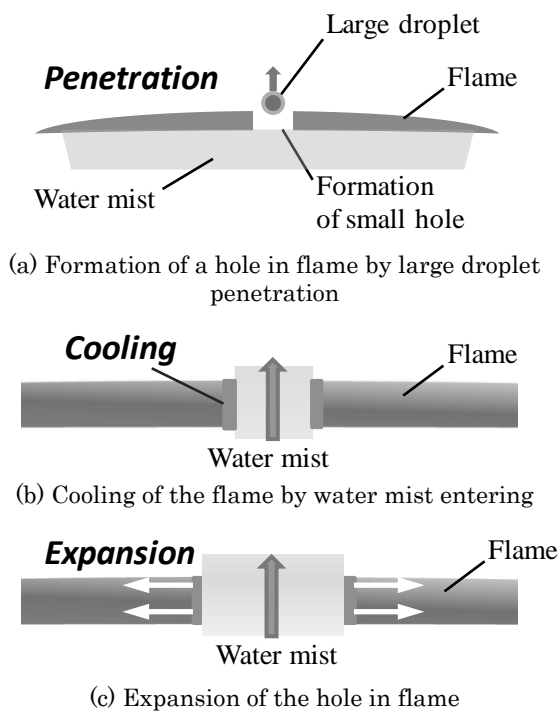


Fig. 10 Conceptual diagram of hole formation and enlargement in flame by water spray penetration

次に、3.3 章において消火能力を最大とする水噴霧の平均液滴径と冷却能力を最大とする水噴霧の平均液滴径が異なっていた理由について本節で提案したメカニズムを用いて説明する。

冷却能力の最も高い平均液滴径は $d_{32}=50\sim 70\mu\text{m}$ の範囲内に存在しており、消火能力の最も高い平均液滴径は $d_{32}=100\mu\text{m}$ 付近に存在していた。冷却能力を最大とする水噴

霧の平均液滴径の条件は火炎中心部付近において蒸発が完了する液滴が最も多い条件であり、ストークス数および蒸発ダムケラー数が 1 より大きい場合と考えられる。一方、水噴霧により消炎が生じる際には、火炎近傍で蒸発が完了せず火炎を貫通する水滴が存在し、その貫通により形成された火炎の穴に水噴霧が侵入または高頻度で水滴が貫通することにより穴の拡大が促進されることが必要となる。水滴の火炎貫通効果は、ストークス数の値が大きく、さらに蒸発ダムケラー数の値が 1 より小さい水滴において期待できる。よって、冷却能力を最大とする平均液滴径よりも蒸発ダムケラー数の小さい平均液滴径において消火能力は最大となると考えられる。また、消火能力を最大とする平均液滴径よりも大きい条件においては、火炎を貫通する水滴の頻度が低下し、火炎に穴が形成されてもその穴が閉じる前に別の水滴が通過する確率が低下し消火能力が低下すると考えられる。

4. 結言

本実験では、火炎温度計測および高速度カメラでの消炎時の火炎および水噴霧の挙動を観察することで、対向流拡散火炎に対する水噴霧の消火メカニズムの解明を行った。以下に本実験の結論を示す。

1. 水噴霧による火炎の冷却能力を最大とする平均水滴径が存在する。これは従来の水滴のストークス数と蒸発ダムケラー数を用いて説明できる。ただし、消火能力を最大とする平均水滴径は冷却能力を最大とする平均水滴径より大きかった。
2. 消火剤として水噴霧を用いた場合、比較的大きい水滴の貫通による局所消炎により火炎に穴が形成され、その穴の拡大が消炎につながることを確認できた。水噴霧の消火メカニズムの中で液滴の貫通と火炎の穴の拡大が消火に大きな影響を及ぼしていると考えられる。
3. 消火能力を高める水噴霧は、火炎の穴の形成が生じやすい水滴の貫通条件と、火炎の穴の拡大が促進される水滴の高頻度な火炎への進入に伴う局所冷却条件を満たす噴霧であると考えられる。

火炎の局所冷却による火炎穴の拡大は水噴霧濃度にも依存していると考えられる。水噴霧濃度も考慮した消火の十分条件を示す無次元数の提示が今後の課題である。

5. 謝辞

本研究は公益財団法人前田記念工学振興財団の補助を受けて行われた。また、本研究を行うにあたり山口大学工学部フアティマビンティニャン氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

6. 文献

- (1) Lentati, A. M., Chelliah, H. K., "Physical, Thermal and Chemical Effects of Fine-water Droplets in Extinguishing Counterflow Diffusion Flames", Proc. Combustion Inst. 27, pp. 2839-2846 (1998)
- (2) Lentati, A. M., Chelliah, H. K., "Dynamics of Water Droplets in a Counterflow Field and their Effect on Flame Extinction", Combustion and Flame .115, pp. 158-179 (1998).
- (3) Dvorjetski, A., Greenberg, J.B., "Analysis of Extinction of Counterflow Polydisperse Spray Diffusion Flame by a Polydisperse Water Spray", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29,

- pp. 385-392 (2002)
- (4) Dvorjetski, A., Greenberg, J.B., "Theoretical analysis of polydisperse water spray extinction of opposed flow diffusion flames", *Fire Safety Journal* vol.39, pp, 309-326 (2004).
 - (5) Sasongko, M. N., Mikami, M., Dvorjetski, A., "Extinction Condition of Counterflow Diffusion Flame with Polydisperse Water Spray", *Proc. Combustion Inst.* 33, pp. 2555-2562 (2010).
 - (6) Ndubizu, C. C., Tatem, P. A. and Motevalli, V., "On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame", *Fire Safety Journal* 31, pp. 253-276 (1995). vol.39, pp, 309-326 (2004).
 - (7) QU, Yin., 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火機構の研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2012), 490-491.
 - (8) 吉田亮, 櫻井格: ウォーターミストによる噴流拡散炎の消炎, *Fire Science and Engineering*, Vol. 61. No. 1 (2011), 11-19



田渡貴史
山口大学大学院理工学研究科
機械工学専攻
〒755-8611
山口県宇部市常盤台 2-16-1
Tel: 0836-85-9111
Fax: 0836-85-9101
E-mail:
r20ve@yamaguchi-u.ac.jp

略歴: 2011 年山口大学工学部卒業, 2011 年より山口大学大学院理工学研究科に在籍



瀬尾健彦
山口大学大学院理工学研究科
助教
〒755-8611
山口県宇部市常盤台 2-16-1
Tel: 0836-85-9111
Fax: 0836-85-9101
E-mail:
tseo@yamaguchi-u.ac.jp

略歴: 2006 年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了, 2009 年より現職. 主として液体燃料噴霧を対象としたレーザー着火メカニズムの解明に関する研究に従事.



三上真人
山口大学大学院理工学研究科
教授
〒755-8611
山口県宇部市常盤台 2-16-1
Tel: 0836-85-9112
Fax: 0836-85-9101
E-mail:
mmikami@yamaguchi-u.ac.jp

略歴: 1995 年東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了, 2009 年より現職. 微小重力場における液滴燃焼・液滴群燃焼, 予混合噴霧流燃焼, マイクロコンバスター, ディーゼルエンジン燃焼・騒音にする研究などに従事.