

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06202

研究課題名(和文) 高濃度の水ミストにより予混合火炎が消炎に至る機構に関する体系的理論の構築

研究課題名(英文) Clarification of extinction mechanisms of premixed flames by high-concentration water mist

研究代表者

大上 泰寛 (Ogami, Yasuhiro)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：00375122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高濃度の水ミスト添加により予混合火炎が抑制されるメカニズムについて解明を目指したものである。とりわけ、解析的には明らかとなっているものの実験データが不足している水ミストの粒径分布が異なる場合の燃焼速度の変化に着目した。本研究では、水ミスト平均粒径が制御できるような試験装置を開発し、種々の水ミスト濃度、当量比の条件下においてバーナー上にメタン/空気/水ミスト予混合火炎を形成させ、面積法を用いることで燃焼速度の測定を行った。得られた結果より、燃焼速度は平均粒径によって影響を受けることを確認した。また、燃焼速度に対する平均粒径の影響は、単一粒径の場合と同様の傾向となることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水ミストの粒径の違いが予混合火炎の抑制、消炎に及ぼす影響については、単一粒径水ミストに関して解析的および数値計算的な研究がいくつかおこなわれてきた。しかしながら、解析結果を裏付ける実験結果については、十分であるとは言えない状況である。本研究では、限定的ではあるが粒径を変化させた実験を行うことができた。これは解析解や数値計算結果を検証する上で極めて有意義なデータである。

研究成果の概要(英文)：Effects of the mean droplet diameter of water mist on the burning velocities were investigated experimentally.

The burning velocities of water-mist-added CH<sub>4</sub>/air premixed flames were obtained by the angle method for various conditions of the water mist mass fraction. The mean droplet diameters were controlled by changing the mixture-gas flow rate. The experimental results of burning velocities were compared between each condition of the mean droplet diameter. It was found that the burning velocities with the large mean droplet diameter of water mist became faster than those for the small mean droplet diameter, and the experimental data of burning velocities had the similar trends to previous analytical results for the mono-disperse water mist.

研究分野：燃焼工学

キーワード：水ミスト 予混合火炎 平均粒径

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、水を微粒化した液滴である水ミストがハロンガスに代わる消火剤として期待されている。水ミストに関する研究は、これまで様々な研究が行われてきた。例えば、水ミストを添加した予混合火炎を対象とした研究としては、Blouquin and Jouline の漸近解析[1]や Kee らのグループによる数値計算 ([2],[3]) などが挙げられる。Blouquin and Jouline は単一粒径の水ミストを用いて解析を行い、粒径が十分に小さい水ミストは水ミスト添加量の増加に伴い逆 C 状のカーブを描きながら燃焼速度が低下するが、粒径が大きくなるにつれて逆 S 字状のカーブを描きながら燃焼速度が低下することを漸近解析により明らかにしている。また、Kee らのグループは水ミストが添加されたメタン/空気およびプロパン/空気予混合火炎に対し詳細反応機構を考慮した数値計算を行い、Blouquin and Jouline の漸近解析結果と同様の結果を得ている。しかしながら、水ミストの粒径の違いが燃焼速度に及ぼす影響に関して実験的に調査した研究は限られたものとなっている。

水ミストを消火に用いるためには、水ミストの消火性能を定量的に把握することが極めて重要となる。数値計算は実験に比べ水ミストの粒径や流量の設定がはるかに容易であり、水ミストの消火性能の評価において望ましい手法であると言える。ただし、数値計算においては実験結果を用いた計算モデルの検証が必須となるが、測定データの不足により十分に議論できていないのが現状である。すなわち、広範な条件下における水ミストを含んだ予混合火炎に関して、さらなるデータの取得が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、メタン/空気予混合火炎に濃度および平均粒径を変化させた水ミストを添加した条件下において燃焼速度の測定を行い、水ミストの平均粒径の違いがメタン/空気予混合火炎に及ぼす影響について調査した。

### 3. 研究の方法

実験装置は、飽和湿り空気発生装置、水ミスト発生装置、空気・燃料供給系、燃焼器・保炎器・ガラスカバーから構成される。Fig.1 に、実験装置の概略図を示す。

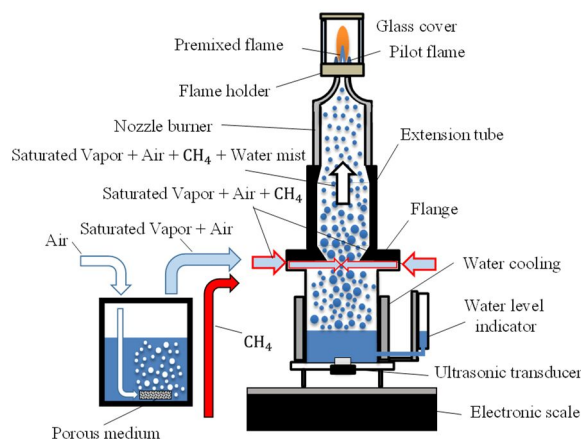


Fig.1 Experimental apparatus.

混合気用の空気の流量は、マスフローコントローラにより制御される。その後、空気は、飽和湿り空気発生装置に供給される。飽和湿り空気発生装置は内部を水で満たされており、水中から多孔体を介して空気を供給し多量の気泡を発生させることで、湿度の高い空気を発生させることが可能となる。

水は、水ミスト発生装置内において超音波振動子によって微粒化され水ミストとなる。容器内部の水面高さは、実験開始時に水位計を基に調整する。水面高さが変わると水ミスト発生量に変化する。本研究では2つの水面高さを設定し、水ミスト発生量が多い条件と少ない条件の2つに対して実験を行った。なお、水ミスト発生量が多い条件を Case-1、少ない条件を Case-2 とする。

燃料と空気の混合気は、燃料・空気供給フランジから水ミスト発生装置内へと流入し、延長筒を通過して燃焼器へと供給される。なお、延長筒は、流路中で最大の断面積を持つ。

燃料流量は、空気と同様、マスフローコントローラにより制御される。空気、燃料のいずれのマスフローコントローラも、予め湿式ガスメーターによって校正されており、実流量が設定値に対して $\pm 1\%$ の精度であることを確認している。燃料としては、高純度メタン(99.9%)を用いた。な

お、燃料濃度は全条件において当量比  $\phi=1.0$  とした。

燃焼器には、円形ノズルバーナーを用いた。バーナーの先端には保炎器を設置し、バーナー出口周囲からメタン/空気予混合パイロット火炎を形成させることで火炎基部を強化し吹き飛びを防いでいる。パイロット火炎が主流火炎に影響を及ぼさないよう、パイロット火炎の燃料流量を主流燃料の10%以下とした。また、火炎からの熱で加熱されたバーナー壁によって未燃予混合気が加熱されることを防ぐために、保炎器内部には冷却水を循環させた。加えて、火炎が周囲空気から受ける擾乱の影響を防ぐため、火炎の周囲を石英ガラスのカバーで覆った。

水ミスト発生装置は、電子天秤の上に乗っている。実験時には、電子天秤によって水ミスト発生装置の重量変化を計測することで水ミスト質量流量を得ることができる。燃焼速度を評価する際の水ミスト質量分率  $Y_{mist}$  は、水ミスト質量流量をもとに決定した。

燃焼速度  $S_u$  [m/s] は、デジタル一眼レフカメラ (Nikon D800E) によって撮影された火炎写真を基に角度法により導出した。角度法には、各条件 15 枚の火炎写真を用いた。

#### 4. 研究成果

Fig.2 に、バーナー出口流速  $U_{exit}$  と水ミスト質量流量との関係を示す。なお、Fig.2 における縦軸の  $\dot{M}_{mist} / \dot{M}_{mist, U_{exit} 1.2}$  は各  $U_{exit}$  の水ミスト質量流量を  $U_{exit} = 1.2$  m/s の時の水ミスト流量で正規化している。 $U_{exit}$  の増加に伴って水ミスト質量流量も増加している。超音波振動子により発生した水ミストはある粒径分布を有している。ここに混合気を供給した場合、水ミストの一部はバーナー出口に向かって上昇する。バーナー出口に向かって上昇できる水ミストの最大粒径  $D_{max}$  [m] は、次のストークスの式より説明できる。

$$D_{max} = \sqrt{\frac{18\mu_g U_g}{(\rho_{H_2O} - \rho_g)g}} \quad (1)$$

ここで、 $\rho_{H_2O}$  [kg/m<sup>3</sup>] は水の密度、 $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] は気体密度、 $g$  [m/s<sup>2</sup>] は重力加速度、 $\mu_g$  [Pa·s] は気体粘度、 $U_g$  [m/s] は延長筒内の平均気体流速であり、 $U_{exit}$  の概ね 1/10 の値である。ある流速で混合気を供給した場合、水ミスト質量流量は、式(1)より求まる  $D_{max}$  よりも小さい径の水ミストの質量の総和であらわされる。すなわち、 $D_{max}$  に対するふるい下積分となる。

式(1)より、混合気流速が遅いとき、上昇する水ミストの粒径は小さいものに限定される。しかし、混合気流速が速くなるとともに、粒径が大きい水ミストも上昇できるようになる。そのため、混合気流速の増加に伴い水ミスト流量も増加する。

Case-1 と Case-2 では、水ミスト質量流量の増加傾向が同様となっている。このことから、Case-1 と Case-2 で超音波振動子によって発生する水ミストの粒径分布は、同様であると推定できる。つまり、Case-1 と Case-2 で同じ流速で実験を行った場合、バーナー出口へと供給される水ミストの平均粒径は、同じになると考えられる。よって、本研究において流速を変化させて実験を行った場合、平均粒径を変化させたことに等しい。具体的には、Case-1 と Case-2 において  $U_{exit}$  が等しい条件では平均粒径も等しく、 $U_{exit}$  が速い条件では平均粒径は大きい条件となり、 $U_{exit}$  が遅い条件では平均粒径は小さい条件となるということである。なお、 $U_{exit} = 0.6$  m/s のとき  $D_{max} \cong 14.2$   $\mu\text{m}$ 、 $U_{exit} = 0.8$  m/s のとき、 $D_{max} \cong 16.4$   $\mu\text{m}$ 、 $U_{exit} = 1.0$  m/s のとき  $D_{max} \cong 18.3$   $\mu\text{m}$ 、 $U_{exit} = 1.2$  m/s のとき  $D_{max} \cong 20.1$   $\mu\text{m}$  となる。

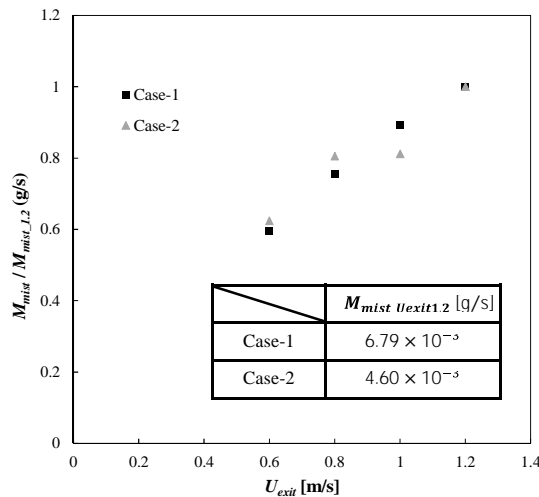


Fig.2 Relationship between  $\dot{M}_{mist} / \dot{M}_{mist, U_{exit} 1.2}$  and  $U_{exit}$ .

Fig.3(a) (b)に  $U_{exit} = 0.6$  m/s においてそれぞれ  $Y_{mist} = 0.0354$ ,  $0.0491$  の時の火炎写真を示す。水ミスト質量分率の高い条件と低い条件の火炎写真を比較すると、水ミスト質量分率が高い条件における火炎は伸長し、先端の角度が鋭角であることが確認できる。したがって、燃焼速度が低いこ

とも分かる。

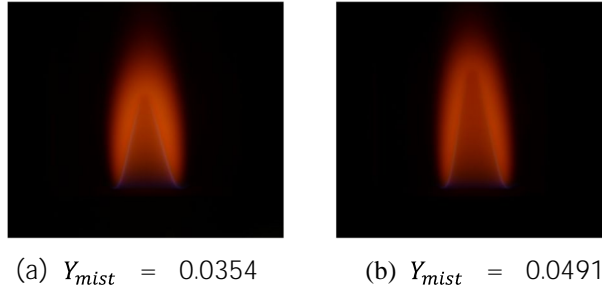


Fig.3 Flame direct image ( $\phi = 1.0$ ,  $U_{exit} = 0.6$  m/s).

Fig.4 は、 $S_u$ と $Y_{mist}$ との関係を $U_{exit} = 0.6 \sim 1.2$  m/sごとにプロットしたものである。  $Y_{mist} = 0$  の条件は、飽和湿り空気を供給した際の燃焼速度を表す。なお、それぞれの流速における燃焼速度に対して便宜的に二次関数を用いて近似した曲線も合わせて示す。前述の通り、 $U_{exit}$ が速い条件では平均粒径が大きく、 $U_{exit}$ が遅い条件では平均粒径が小さくなる。 $Y_{mist} = 0.02 \sim 0.05$ の範囲において $S_u$ は $U_{exit} = 1.2$  m/sの条件が最も速く、 $U_{exit} = 0.6$  m/sの条件が最も遅くなることが分かった。前述の通り、 $U_{exit}$ が速い条件では平均粒径は大きく、 $U_{exit}$ が遅い条件では平均粒径は小さいと考えられる。Fig.4の結果から、平均粒径が大きい条件( $U_{exit}$ が大きい条件)では燃焼速度は高く、平均粒径が小さい条件( $U_{exit}$ が小さい条件)では燃焼速度が低くなることが分かった。

本研究では、粒径分布を有する水ミストに対し平均粒径の違いが燃焼速度に及ぼす影響について議論を行った。ただし、本研究で得られた結果は、単一粒径の水ミストを用いて燃焼速度に及ぼす影響を調査した Blouquin and Joulin [1]の漸近解析と同様の結果となった。なお、本研究では、実際には最大粒径のみを変化させることで平均粒径を変化させているが、それでも顕著な違いが確認できる。言い換えれば、小径の水ミスト中に大径の水ミストが存在することで消炎性能が著しく低下することがわかる。

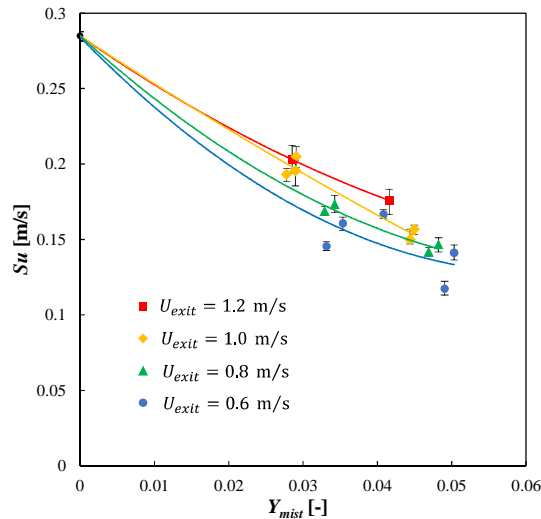


Fig.4 Relationship between  $S_u$  and  $Y_{mist}$  ( $\phi = 1.0$ ).

#### 参考文献

1. Blouquin, R., and Joulin, G., Proc. Combust. Inst. 27:2829-2837 (1998).
2. Yang, W., and Kee, R. J., Combust. Flame 130: 322-335 (2002)
3. Modak, A. U., Abbud-Madrid, A., Delplanque, J-P., and Kee, R. J., Combust. Flame 144: 103-111 (2006)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村 聖, 須知 成光, 大上 泰寛
2. 発表標題 粒径分布がメタン/空気/水ミスト予混合火炎に及ぼす影響
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiya Nakanishi, Yasuhiro Ogami, Masahiro Ito and Takashi Tsuruda
2. 発表標題 Impact of Water Mist on Chemical Reaction of Methane/air/water-mist Premixed Flames
3. 学会等名 26th International Colloquium of the Dynamics of Explosion and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西 聖也, 伊藤 雅太, 大上 泰寛, 鶴田 俊
2. 発表標題 高濃度の水ミスト添加がメタン/空気予混合火炎の化学反応機構に及ぼす影響
3. 学会等名 平成29年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西 聖也, 中村 聖, 大上 泰寛, 鶴田 俊
2. 発表標題 ふく射熱損失がメタン/空気/水ミスト予混合火炎に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	杉本 尚哉  (Sugimoto Masaya)  (20291784)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授   (21401)	
研究 分担者	鶴田 俊  (Tsuruda Takashi)  (90197773)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授   (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------