

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420166

研究課題名(和文) 高濃度の水ミストが予混合火炎の燃焼特性に及ぼす影響に関する研究

研究課題名(英文) A study of effects of water-mist addition to premixed flames on flame characteristics

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：水ミストが添加されたメタン/空気予混合火炎に対し燃焼速度の測定を行い、水ミストが予混合火炎の火炎抑制に及ぼす影響について調査を行った。燃焼速度は、バーナー上に定在化されたブンゼン火炎に対し角度法を用いることで導出した。測定は、種々の水ミスト濃度および当量比に対して行われた。得られた測定結果を数値計算結果と比較したところ、数値計算結果は水ミストによる影響を過小評価することが分かった。また、希薄側より過濃側の方が火炎は抑制されやすいということが分かった。さらに、数値計算を用いた反応速度解析を行った結果、過濃側において水ミストはfall-off反応に大きな影響を及ぼすことがわかった。

研究成果の概要(英文)：The flame inhibition effect by high-concentration water mist was investigated experimentally. Measurements of burning velocities for water-mist-loaded CH₄/air premixed flames were conducted by the angle method for various equivalence ratios and the water-mist mass fractions. The experimental results of burning velocities were compared to the numerical results and other experimental data. It was found that the higher water mist mass fractions were attained than those in the previous studies, and the experimental data of burning velocities became much smaller than those obtained by the numerical simulation. The sensitivity analysis was also conducted, and the results show that the fall-off reaction; $H + O_2 (+M) = HO_2 (+M)$ has a large impact on the flame inhibition in the case if the equivalence ratio is high.

研究分野：燃焼工学

キーワード：予混合火炎 燃焼速度 水ミスト 化学反応機構

1. 研究開始当初の背景

水ミストは、ハロンガスに代わる消火剤として近年、盛んに研究が行われている。水ミストを添加した場合、蒸発時の潜熱、発生した水蒸気の顕熱、高温蒸気からのふく射により熱損失が生じ、火炎は抑制される。また、発生した蒸気による希釈の影響に加え、蒸気が化学反応に影響を及ぼすことも予想される。さらには、実際の火災では火炎伸長も影響しており、水ミストによる消火、および火炎抑制は極めて複雑な現象であると言える。

代表的な水ミストによる予混合火炎の消炎に関する研究としては、Blouquin and Joulin [1]による漸近解析を用いた研究が挙げられる。この研究により、水ミストが添加された次元平面火炎において、ミスト粒径が燃焼速度や消炎に及ぼす影響について明らかにされた。また、Keeらのグループ[2,3]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 Joulin による解析[1]と同様の結果を得ている。

一方、実験的研究として、Fuss ら[4]は水ミストを含む量論混合比におけるメタン/空気予混合火炎の燃焼速度の測定を行い、測定結果と数値計算結果[3]との比較を行った。しかしながら、水ミストを含む予混合火炎に対する実験データは限られたものとなっている。特に、消炎限界付近の高い水ミスト濃度における実験結果や当量比を変化させた場合の実験結果はほとんど存在しない。実際、Fuss ら[4]の測定結果も当量比 1.0 のみで、水ミストの質量分率が最大 2~3%程度に留まっている。

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、高濃度の水ミストが添加された当量比 $\phi = 0.8 \sim 1.3$ の CH_4/air 予混合火炎に対し燃焼速度の測定を行った。また、水ミストによる熱損失の定量化を試みた。さらには、詳細反応機構と水ミスト蒸発モデルを考慮した次元平面火炎の数値計算を行い、水ミストが化学反応機構に及ぼす影響について調査した。

3. 研究の方法

図 1 に、実験装置の概略図を示す。実験装

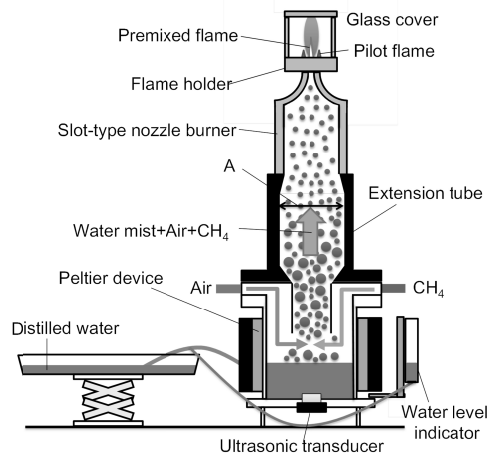


図 1 実験装置概略図

置は、コンプレッサー・高圧空気タンクからなる空気供給系、水ミスト発生装置、水供給系、燃焼器・燃料ガス供給系から構成されている。

水ミスト発生装置内には、水面高さが常に一定となるよう精製水が供給される。水ミスト発生装置の下部には超音波振動子(本多電子株式会社製, HM1630)が設置されており、水の霧化が行われる。水ミスト発生装置上部からは酸化剤と燃料が供給されており、水ミストとの気液二相流となり延長筒を経て燃焼器へと供給される。水ミスト発生装置から燃焼器に至るまでの流路中、延長筒内において最大の流路断面積となる。本研究では、断面積 "A" の異なる case-1, case-2 の 2 種類の延長筒を用いた。延長筒の断面積を変更することにより、後述するよう、粒度分布等の水ミスト特性を変えて実験を行った。なお、case-1 の断面積 "A" は、case-2 のおおよそ 2 倍となっている。

水ミストを含まない湿り空気を用いた実験においては、混合気を容器底部より多孔体を通して供給することで水中に多量の気泡を発生させた。これにより、相対湿度 90% 以上の湿り空気を得られることを湿球温度計により確認している。

燃料としては CH_4 を、酸化剤としては空気をを用いた。 CH_4 (純度 99.99%)および高圧空気は、それぞれ高圧ガスボンベ、およびドライヤー付コンプレッサーから圧力調整弁を介して 2 台の超高精度型マスフローコントローラー(Brooks Instrument 製, Model 5850S)に供給される。マスフローコントローラーはあらかじめ湿式ガスメーター(株式会社シナガワ製, W-NK-1A または W-NK-2.5A)にて校正されており、 CH_4 、空気の体積流量は設定値の $\pm 1\%$ の精度で制御される。

本研究では、火炎の曲率の影響を排除し二次元的な形状の火炎を形成させるため、燃焼器として出口寸法 8 mm x 30 mm の矩形ノズルバーナーを用いた。バーナー内には、整流を目的としてステンレス製のメッシュ(#20)が 2 枚挿入されている。また、バーナー内を

流れる流体の温度を測定するため、バーナー出口から 100 mm の位置に K 型熱電対が設置されている。バーナー火炎を用いて実験を行う場合、火炎基部は火炎伸長を受けると同時に、バーナーリップへの熱損失の影響を受ける。よって、消炎はバーナーリップ付近から生じることから、消炎限界に達する前に吹き飛びが生じてしまう恐れがある。そこで、バーナー先端部に保炎器を装着してバーナー出口の長手方向の側面に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、吹き飛びを防止した。着火の際は、パイロット火炎用の混合気流量は大きな値に設定される。主予混合火炎の形成後、パイロット火炎用混合気流量を吹き飛び直前の状態まで減少させる。パイロット火炎用の混合気流量を減少させるのに伴い主予混合火炎の高さに変化が見られるが、パイロット火炎用混合気流量を主予混合気流量の 10% 程度まで減少させると火炎高さが変化しなくなることが確認された。火炎高さが変化しないということは燃焼速度が変化していないことを表しており、パイロット火炎が主流火炎に影響を及ぼしていないとすることができる。以上を踏まえ、パイロット火炎に供給する燃料の体積流量は、主流燃料流量の 10% 以下とした。さらに、バーナー短辺側端部から窒素を流すことで端部に火炎が形成されない二次元性の高い火炎が形成される。バーナー出口は石英ガラス製のカバーで覆われており、周囲空気の乱れによる影響を防止するとともに、燃料過濃条件においてはスミセル火炎の形態となり余剰燃料による拡散火炎が予混合火炎に及ぼす影響を排除することが可能となる。

以上の装置は 2 つの電子天秤（新光電子株式会社製 SJ-8200JS、アズワン株式会社製 IB-3KH）上に設置されており、装置全体の重量変化を計測することで、水の質量流量を把握することが可能である。

火炎直接写真の撮影は、デジタル一眼レフカメラ（Nikon D300）により行った。なお、燃焼速度は、直接写真から得られる火炎頂角と、主流混合気体積流量より求めたバーナー出口平均流速を用いて角度法を行うことで導出した。

4. 研究成果

(1) 水ミストを添加した CH_4/air 火炎の燃焼速度

図 2, 3, 4 に、水ミストが添加された火炎の燃焼速度 S_u と水ミスト質量分率 Y_{mist} との関係を示す。図中の燃焼速度は、水ミストを含まない状態の湿り空気の燃焼速度 S_u^0 により無次元化されたものとなっている。各条件において右端に書かれた斜線は、火炎形態が予混合火炎から大きく変化する限界（予混合燃焼限界と定義する）を示す。いずれの図中に

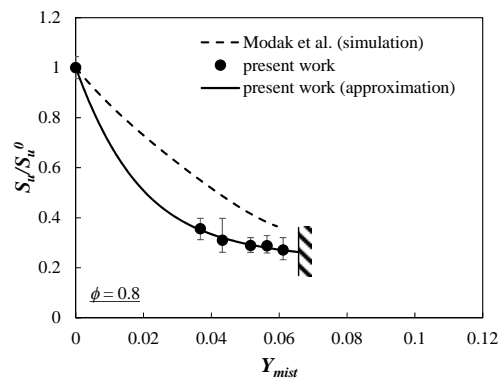


図 2 燃焼速度と水ミスト濃度との関係 ($\phi = 0.8$).

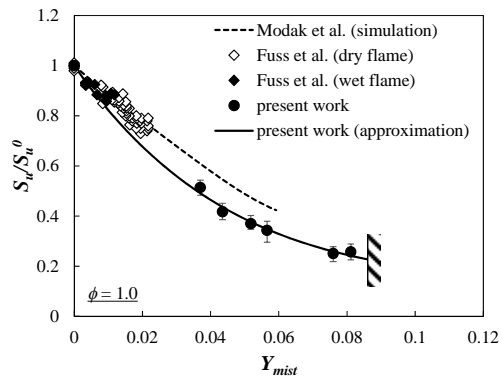


図 3 燃焼速度と水ミスト濃度との関係 ($\phi = 1.0$).

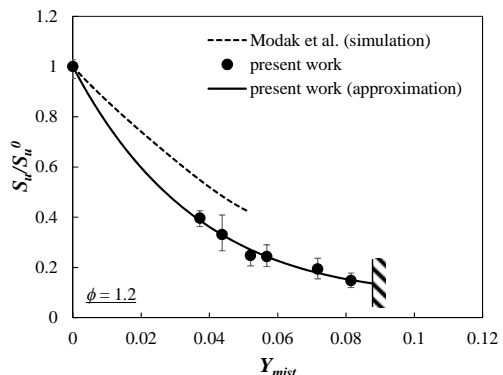


図 4 燃焼速度と水ミスト濃度との関係 ($\phi = 1.2$).

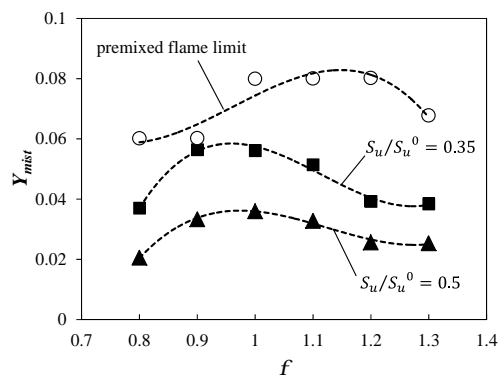


図 5 $S_u/S_u^0 = 0.5, 0.35$ となる際の水ミスト濃度

も、Kee らのグループによって行われた数値計算結果[3]も示されており、当量比 1.0 については Fuss らによる実験結果[4]が示されている。全ての条件において、本研究の S_u/S_u^0 の測定結果は Y_{mist} に対して単調減少し、その近似曲線は下に凸の二次曲線的な形状となる。

また、測定結果は数値計算結果[3]を大幅に下回る結果となった。

当量比 0.8 (図 2) の条件では、測定結果と計算結果との差異が著しいが、定量的な差異に加え、定性的な差異も見られる。数値計算結果[3]では、 S_u/S_u^0 は Y_{mist} に対して直線的に減少している。一方、実験結果に対する S_u/S_u^0 の近似曲線においては、 Y_{mist} が 0.02 以下では S_u/S_u^0 は急激に減少するが、 Y_{mist} が 0.03 以上では S_u/S_u^0 の減少傾向は緩やかとなる。

当量比 1.0 (図 3) では、実験結果と計算結果[3]との差異は当量比 0.8 に比べ若干小さくなるものの、実験結果は計算結果に対して低い値となる。実験結果における S_u/S_u^0 の減少傾向は当量比 0.8 と同様に下に凸の二次曲線状となるが、当量比 0.8 と比べて Y_{mist} に対する S_u/S_u^0 の傾きの変化は小さい。Fuss らの実験結果[4]では Y_{mist} の最大値は 0.02 程度であり、本研究の測定範囲 ($Y_{mist} = 0.036 - 0.081$) と比べ大幅に小さい。Fuss らの実験結果[4]のうち、乾燥空気に水ミストを添加した結果 (dry flame) は数値計算結果とは良い一致を示すが、本研究での近似曲線とは差異が見られる。温度が 20 において乾燥空気に水ミストを添加した場合、空気中には質量分率にして 1.5%程度程度の蒸気が生じるため、dry flame の結果は Y_{mist} を過大評価しているものと考えられる。そのため、水ミストより発生する飽和蒸気を考慮した本研究の実験データとは一致しないと推測される。一方、Fuss ら[4]の飽和した湿り空気に対して水ミストを添加した場合の測定結果 (wet flame) は、本測定結果より得られた近似曲線と概ね良い一致を示す。

当量比 1.2 (図 4) においては、 S_u/S_u^0 の近似曲線は当量比 1.0 と近い形状となるが、1.0 に比べて計算結果との実験結果の差異は大きくなる。

図 5 は、 $S_u/S_u^0 = 0.5$ 、および 0.35 となるときの Y_{mist} の値と当量比との関係を示したものである。図中には、予混合燃焼限界についても示されている。 $S_u/S_u^0 = 0.5$ の場合、当量比 1.0 付近においてピークを持つ形状となるが、これは Kee らのグループによる計算結果[3]と概ね同様の傾向となっている。ただし、本研究における Y_{mist} の値は、計算結果[3]と比べて大幅に小さい。 $S_u/S_u^0 = 0.35$ の場合、 $S_u/S_u^0 = 0.5$ に比べてピークは若干希薄側に移動する。すなわち、希薄側より過濃側の方が火炎は抑制されやすいということが分かる。

(2) 水ミストが反応機構に及ぼす影響

次に、化学反応解析ソフト CHEMKIN-PRO を用い、詳細反応機構 (GRI-Mech 3.1) を考慮して行った一次元平面火炎の数値計算結果について示す。

図 6, 7 は、各水質量分率 Y_{H_2O} (= 水ミスト質量分率 + 飽和蒸気質量分率) に対し、火

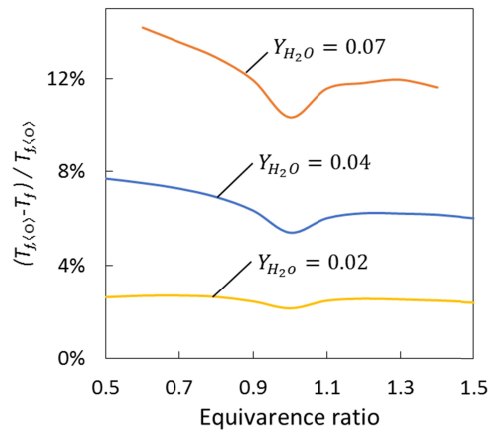


図 6 火炎温度減少率と当量比との関係。

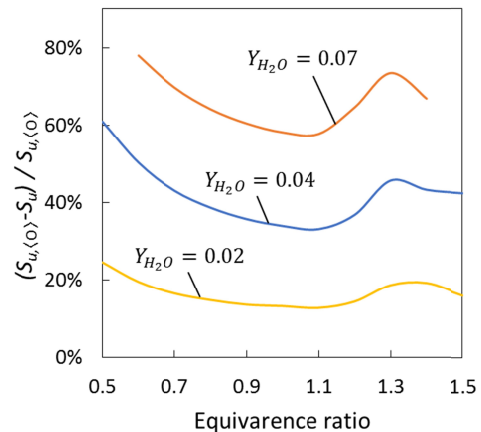


図 7 燃焼速度減少率と当量比との関係

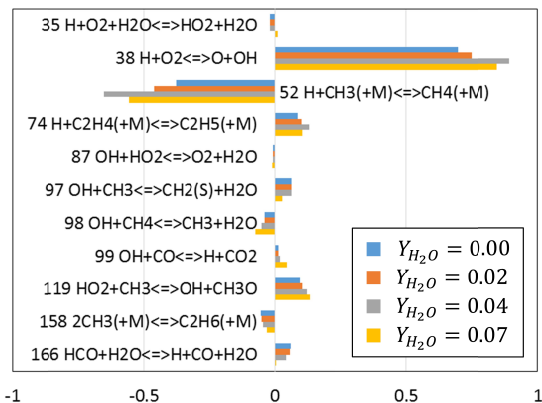
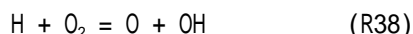


図 8 感度係数 ($\phi = 1.3$)

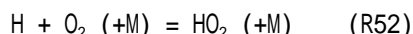
炎温度および燃焼速度の減少率をそれぞれ示したものである。いずれの Y_{H_2O} においても、火炎温度減少率は当量比の増加とともに減少する。すなわち、当量比の低い希薄条件の方が火炎温度の低下が著しい。一方、燃焼速度の減少率は当量比 1.0 付近で極小となり、当量比 1.3 付近で極大値を持つ。燃焼速度は全体の反応速度の 1/2 乗に比例するが、反応速度は温度の増大に伴い指数関数的に増大する。よって、図 6 の結果から考えると、当量比の高い条件下においては燃焼速度減少率は低くなるはずである。しかしながら、当量比が 1.0 より大きい領域で燃焼速度減少率は増大し、当量比 1.3 付近でピークとなって

いる。以上のことから、当量比の高い過濃側では水ミストが化学反応に大きな影響を及ぼしているものと推測される。

図8は、当量比1.3の条件に対して行った素反応の燃焼速度に対する感度解析結果を示している。当量比1.3の条件において大きな感度を有する反応としては、連鎖分枝反応である、



と、Fall-off 反応である、



の2つがあげられる。反応52は、第三体であるMの濃度が増大するに伴い反応速度定数が頭打ち(つまり、Fall-off)になる反応である。燃料であるメタン(CH₄)は高い衝突効率を有しているが、当量比が高い(すなわち、燃料濃度が高い)条件下において反応52の反応速度の頭打ちが早まると考えられる。さらに、水も同様に高い衝突効率を有していることから、水質量分率が高い条件下では、Fall-offが促進される。反応52の感度係数が $Y_{H_2O} = 0.04$ の条件でピークとなるのは、高い燃料および水濃度によりFall-offが生じ、反応52の反応速度の増大が頭打ちになったためであると考えられる。このような理由から、図8で見られるように、当量比1.3において燃焼速度の減少率が極大となったものと考えられる。

以上の結果から、水ミストの添加は、火炎温度の低下のみならず、特に当量比が高い燃料過濃条件下において化学反応にも大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

<引用文献>

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).
4. Fuss, S. P., Chen, E. F., Yang, W., Kee, R. J., Williams, B. A., and Fleming, J. W., *Proc. Combust. Inst.* 29: 361-368 (2002).

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1件)

大上 泰寛 伊藤 雅太 大徳 忠史 鶴田 俊,
高濃度の水ミストが CH₄/air 予混合火炎に及ぼす火炎抑制効果に関する研究,日本燃焼学会誌,査読有,58巻,2016,49-59.

[学会発表](計5件)

Y. Ogami, M. Ito, T. Daitoku, T. Tsuruda,
Burning velocities of CH₄/air/water-mist premixed flames near the extinction limit, The 25th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, USB-No158 (2015.8). (査読有)

伊藤雅太, 大上泰寛, 大徳忠史, 鶴田俊,
水ミストを添加した予混合火炎の消炎限界近傍における燃焼速度,第53回燃焼シンポジウム講演論文集,pp.548-549,つくば(2015.11).

大上泰寛, 大徳忠史, 鶴田俊,
水ミストを添加した CH₄/air 予混合火炎の消炎限界,第52回燃焼シンポジウム講演論文集,pp.108-109,岡山(2014.12).

大上泰寛, 森下晋至, 大徳忠史, 鶴田俊,
水ミストが添加されたブンゼン火炎に関する研究,第51回燃焼シンポジウム講演論文集,pp.208-209,東京(2013.12).

大上泰寛, 森下晋至, 鶴田俊,
水ミストが予混合火炎の燃焼特性に及ぼす影響,日本実験力学会2013年度年次講演会,由利本荘(2013.8).

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

鶴田 俊 (TSURUDA, Takashi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号: 90197773

大徳 忠史 (DAITOKU, Tadafumi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号: 40452049