

水滴混在メタンの拡散火炎

日大生産工(院) ○熊谷 耕一 日大生産工(院) 小山 勇気
日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

廃棄有機物から超臨界水処理技術を用いて得られる燃料の燃焼技術は、化石燃料の枯渇問題および廃棄物による環境破壊の問題を解決する技術の一つと考えられる。超臨界水処理で廃有機物を分解すると、排出物として水素、一酸化炭素、二酸化炭素、低炭素数のハイドロカーボンなどが得られる。本研究の目的は、これら超臨界水処理により排出される可燃性物質の燃焼技術の確立である。本報では、排出される可燃性物質に水蒸気および水滴が多量に含まれることを想定し、水蒸気—水滴—気体燃料（水滴混在気体燃料）の拡散燃焼を調べた。

これまでに、火災を消火することを目的として、火炎と水滴の干渉に関して種々の研究がなされている¹⁻³⁾。しかしながら、拡散火炎の空気側に水滴が含まれている研究が多く、燃料側に水滴が含まれている拡散火炎に関する知見はまだ十分に得られていない。本報では、気体燃料にメタンを用い、メタン—水蒸気混合気およびメタン—水蒸気混合気中に凝縮法により微小水滴を均一分散させた水滴混在メタンの拡散燃焼実験を行なった。

2. 実験装置および方法

2.1 水滴群生成の原理

メタン—水蒸気混合気水滴を均一分散させる方法として、凝縮法を採用した。メタン—水蒸気混合気を冷却することで水蒸気の一部を水滴に凝縮させる方法である。

2.2 実験装置

実験装置全体の概略を図1に示す。実験装置は、主に均一噴霧バーナ、メタン—水蒸気混合気供給装置および計測装置から構成されている。

均一噴霧バーナはノズルバーナであり、加熱部、冷却部およびノズル部から構成されている。ノズル出口直径は10 mmである。冷却部は、

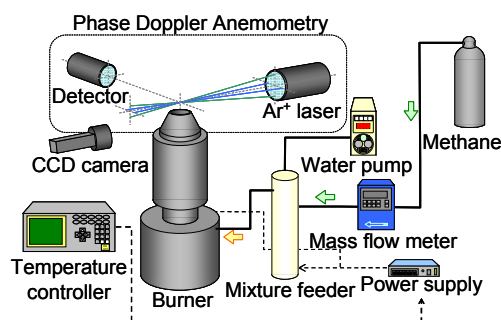


Fig. 1 Experimental apparatus.

温度調節された循環水で金属壁を介してメタン—水蒸気混合気を冷却し、混合気中に水滴群を生成する。冷却部に導くメタン—水蒸気混合気の不飽和度を加熱部の温度で制御することにより、冷却部内での凝縮の時間を変化させ、水滴群の平均液滴直径を独立に制御した。実験は全て大気圧で行った。メタン—水蒸気混合気の気体燃焼実験では、ノズル出口温度を373 Kに保った。

メタン—水蒸気混合気供給装置は、温度が373 K以上に保たれている。ポンプより供給された水を蒸発させて、高圧ボンベからレギュレータを介して導かれたメタンに混合することにより、連続的にメタン—水蒸気混合気を均一噴霧バーナの加熱部に供給する。

計測装置は質量流量計、位相ドップラ流速計 (PDA : phase Doppler anemometry), K 種熱電対および CCD カメラから構成されている。K 種熱電対はメタン—水蒸気混合気供給装置、冷却部入口およびノズル出口の温度計測に用いた。PDA に使用したレーザ光の波長は514.5 nmであり、測定体積は 0.076×0.076

$\times 0.797 \text{ mm}^3$ である⁴⁾。

2.3 水滴混在気体燃料流の特性値および実験パラメータ

水滴混在気体燃料流の特性値として、燃料の質量流量 $\dot{m}_f$ 、ノズル出口平均流速 v_a 、総水モル分率 r_{wt} 、液体モル分率 r_{wl} および水滴群の平均液滴直径 d_m を選んだ。総水モル分率は、水および燃料の質量流量から求めた。ノズル出口における水蒸気モル分率 r_{wg} は、ダルトンの法則が成り立っていることを仮定し、ノズル出口での水の飽和蒸気圧を全圧力で除することによって求めた。液体モル分率は、総水モル分率から水蒸気モル分率を減ずることによって求めた。ノズル出口平均流速は、質量流量計により計測された気体燃料質量流量と水蒸気モル分率から混合気の体積流量を求め、ノズル出口面積で除することにより求めた。水滴混在気体燃料流の平均液滴直径には、ザウダー平均液滴直径を用いた。前述のように、本報では水滴群の平均液滴直径を、均一噴霧バーナの冷却部に導く水蒸気—メタン混合気の不飽和度で制御した。

メタンの質量流量は 0.6×10^{-3} から $1.5 \times 10^{-3} \text{ g/s}$ の範囲で変化させた。総水モル分率を 0 から 80 mol%，および液体モル分率を 0 から 76 mol% の範囲で変化させた。水滴混在気体燃料の液滴直径計測には PDA を使用し、点火を行う前にノズル出口中心から 5 mm 上方で計測した。また、CCD カメラに記録した画像により、ノズルに保炎された拡散火炎の火炎長 h を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 メタン—水蒸気混合気の燃焼実験

燃料質量流量を一定にし、総水モル分率を変化させて撮影した火炎の直接写真を図 2 に示す。総水モル分率の増大に伴い、火炎長が減少し、輝炎も小さくなることがわかる。輝炎の縮小は、水蒸気を添加したことにより火炎温度が減少したためだと考えられる。図 3 に総水モル分率と火炎長の関係を示す。総水モル分率の増大に伴い、ノズル出口平均流速が増大しているにもかかわらず、火炎長が減少していることがわかる。これは、総水モル分率の増大に伴ってメタンが水蒸気で希釈され、火炎温度が低下し、自然対流が弱くなったことが原因だと考えられる。また、実験を行った全ての燃料質量流量に対し、総水モル分率が 80 mol% 付近で火炎の吹き消えが観察された。燃料の質量流量の増大に伴い、火炎の吹き消えが起こる総水モル分率は若干減少した。これは、燃料の質量流量の増

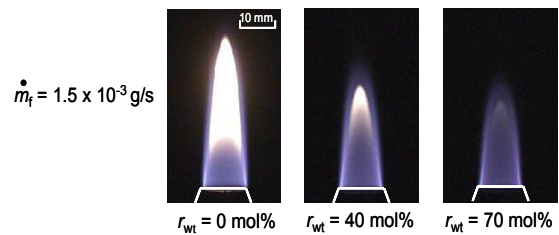


Fig. 2 Direct images of diffusion flame of water vapor-methane mixture.

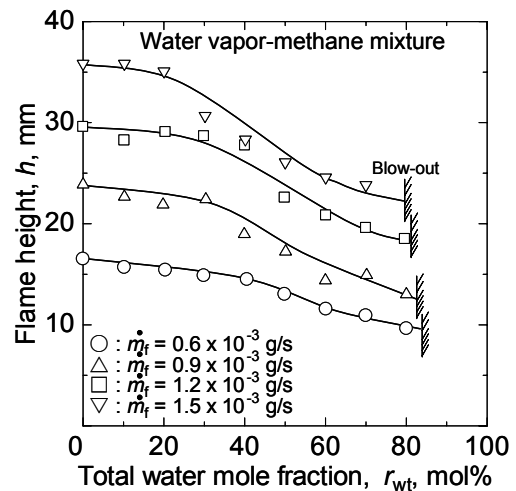


Fig. 3 Relationship between total water mole fraction and flame height at a constant fuel mass flow rate.

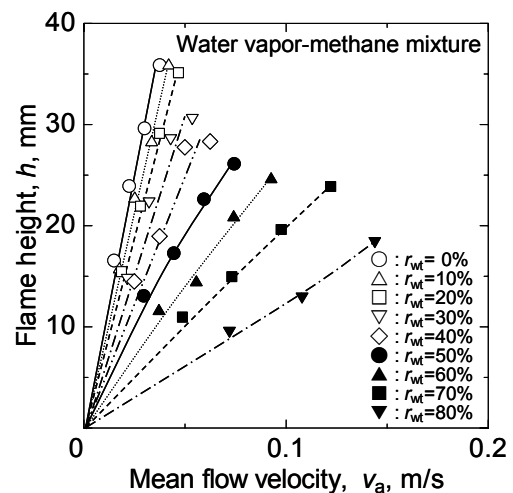


Fig. 4 Relationship between mean flow velocity at nozzle exit and flame height at a constant total water mole fraction.

大に伴い、ノズル出口平均流速が増大するからと考えられる。図4にノズル出口平均流速と火炎長の関係を示す。ノズル出口平均流速の増大に伴い火炎長が増大し、総水モル分率の増大に伴い、傾きが緩やかになっている。図4のデータを補間することにより、ノズル出口平均流速を一定とした場合の、総水モル分率と火炎長の関係を求めた。結果を図5に示す。総水モル分率の増大に伴い、火炎長が直線的に減少していることがわかる。これは、総水モル分率の増大に伴う燃料質量流量および火炎温度の減少が原因だと考えられる。ノズル出口平均流速が大きい場合の方が、総水モル分率の変化による燃料質量流量の変化が大きいため、直線の傾きが急峻になっている。

3.2 水滴混在メタンの燃焼実験

メタン質量流量、総水モル分率、平均液滴直径を一定にし、液体モル分率を変化させて撮影した火炎の直接写真を図6に、液滴直径分布を図7に示す。液体モル分率の増大に伴い、火炎長が増大し、輝炎が大きくなっているのが確認された。これは、蒸気水滴になったことで、水蒸気によるメタンの希釈量が減少し、すす核の生成が活発になったからと推察される。また、水蒸気の一部が液滴に置換されたことで、輝炎周囲の青炎の厚みが増大していることが確認された。このことから、水滴が反応帯に突入していることが推察される。図8に液体モル分率と火炎長の関係を示す。液体モル分率の増大に伴って火炎長が増大し、その後減少した。火炎長が増大する液体モル分率の範囲では、水滴を含まないメタン—水蒸気混合気の場合と同様(図3を参照)、水蒸気モル分率の減少により、火炎温度が増大していると考えられる。火炎長が減少する液体モル分率の範囲では、液滴の蒸発潜熱による火炎冷却の効果が強く現れ、火炎温度が減少していると考えられる。また、火炎長が減少する液体モル分率の範囲では、総水モル分率が大きい水滴混在メタンの方が火炎が高くなることがわかる。これは、総水モル分率が大きい水滴混在メタンの方が水蒸気モル分率が大きいため、水滴の蒸発が抑制され、火炎温度が高くなったことが原因だと考えられる。

図9に水蒸気モル分率と輝炎のノズル中心軸上厚みの関係を示す。比較のために、メタン質量流量が同じである水滴を含まないメタン—水蒸気混合気の実験結果も図に示した。水蒸気モル分率の増大、すなわち液体モル分率の減少に伴って、輝炎の厚みが減少していることがわかる。また、メタン—水蒸気混合気水滴を付加すると、輝炎厚みが減少することがわかる。

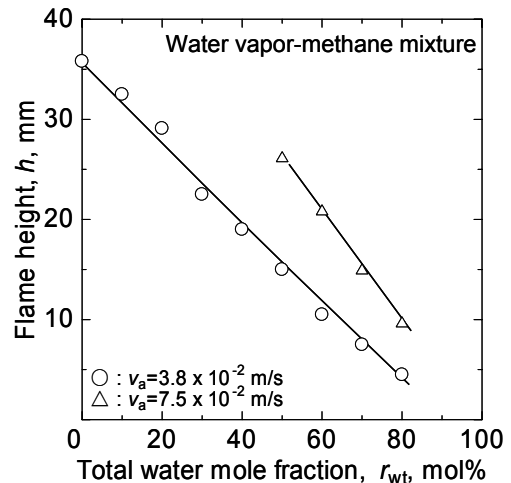


Fig. 5 Relationship between total water mole fraction and flame height at a constant mean flow velocity at nozzle exit.

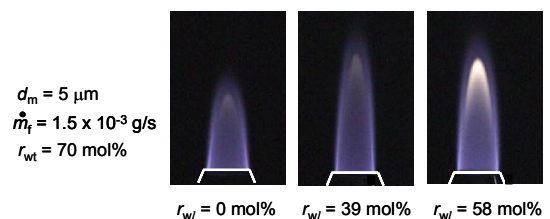


Fig. 6 Direct images of diffusion flame of water vapor-droplets-methane mixture.

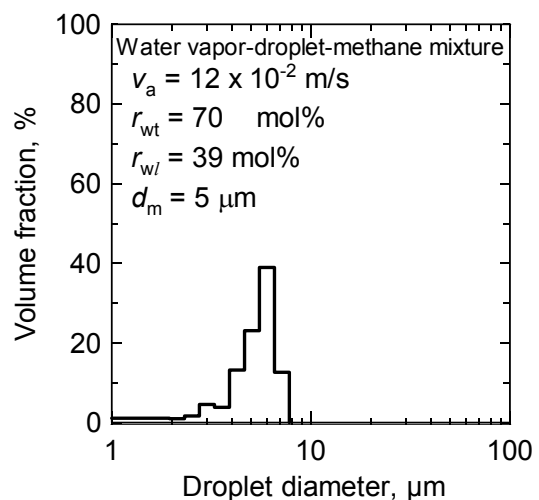


Fig. 7 Droplet diameter distribution.

これらのことから、輝炎厚みは、水滴の蒸発潜熱より水蒸気によるメタンの希釈に強く影響を受けていることが推察される。メタン–水蒸気混合気の場合、水蒸気モル分率が 20 mol% 付近から急激に輝炎厚みが減少する。一方、水滴混在メタンの場合、水蒸気モル分率が 10 mol% 付近から急激に輝炎厚みが減少する。メタン–水蒸気混合気に水滴を混ぜると輝炎厚みが減少するのは、水滴が火炎から蒸発潜熱を奪い、火炎温度が低下したことが原因だと考えられる。また、水滴が混入することにより、輝炎厚みが急激に減少する水蒸気モル分率が減少したのは、水滴から蒸発した蒸気が火炎近傍の水蒸気モル分率を増大させたからだと推察される。

4. 結言

連続生成均一噴霧ノズルバーナを用いたメタン–水蒸気混合気および水滴混在メタンの拡散燃焼実験を行った。以下に得られた知見を記述する。

- (1) メタン–水蒸気混合気拡散火炎の火炎長を総水モル分率を変化させて計測した。燃料質量流量を一定とした場合、総水モル分率の増大に伴って、火炎長が減少し、輝炎が小さくなる。ノズル出口平均流速を一定とした場合、総水モル分率の増大に伴って、火炎長は直線的に減少した。実験を行った全ての燃料質量流量に対し、総水モル分率が 80 mol% 付近で火炎の吹き消えが観察された。
- (2) 水滴混在メタンの火炎長を、総水モル分率および液体モル分率を変化させて計測した。液体モル分率の増大に伴い、火炎長が増大し、その後減少した。また、水滴の混入により、輝炎が大きくなった。

謝辞

本研究は、学術フロンティア推進事業共同研究プロジェクトの一部として行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kuldeep, Prasad., Chiping, Li., and K. Kailasanath., “Simulation of water mist suppression of small scale methanol liquid pool fires”, *Fire Safety Journal* 33,(1999) pp.185-212.
- 2) Richard, J., Garo, J. P., Souil, J. M., Vanetelon, J. P. and Knorre, V. G., “Chemical and

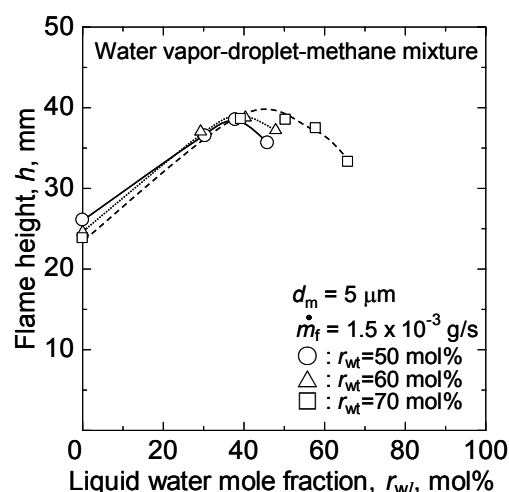


Fig. 8 Relationship between liquid water mole fraction and flame height.

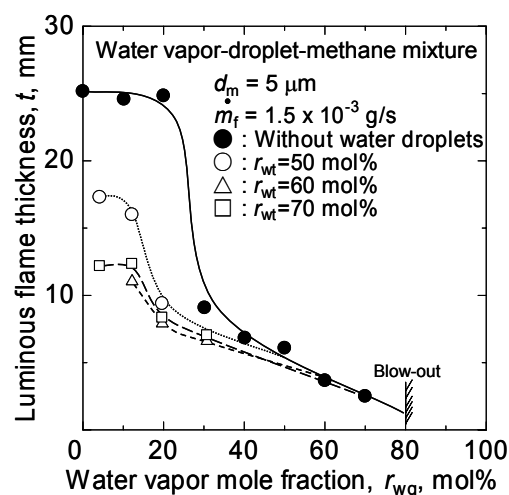


Fig. 9 Relationship between luminous flame thickness and water vapor mole fraction at a constant fuel mass flow rate.

physical effects water vapor addition on diffusion flames”, *Fire Safety Journal* 38,(2003) pp.569-587.

- 3) Ndubizu, C. C., Ananth, R., Tatem, P. A. and Motevalli, V., “On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame” *Fire Safety* 31,(1998) pp.253-276
- 4) Dantec PDA manual, Dantec Inc, (2002) pp.7-6