

水の高度利用に関する研究

水を利用した燃焼改善と廃有機物燃焼に関する研究

野村 浩 司 (機械工学科)

1. 緒言

廃有機物を超臨界水処理して得られる燃料には未反応の水が大量に含まれている。処理後の燃料から水を取り除くのも燃焼を安定させる手段ではあるが、エネルギー効率の観点から、水分離を行わずに処理後の燃料を燃焼させる技術確立するのが望ましい^[1]。燃料に水が含まれている場合の拡散燃焼についてバーナ火炎を用いて調べた結果、メタンを燃料とした場合、燃料に70 mol%の水蒸気が含まれていても燃焼することがわかった。また、燃料に含まれる水により、NO_x およびすす排出の低減が達成されることがわかった^[1]。一方で未燃の燃料排出量が増大するという問題が生じたが、超臨界水処理により有機物を水素と一酸化炭素に完全に変換できれば、この問題は解消されると考えられる。本研究では、超臨界水処理装置の性能向上と水による燃焼改善を目的とし、実験を行ってきた。今年度は主として水による燃焼改善効果を基礎的な観点から調べるための実験装置開発および予備実験を行った。実用において超臨界水処理装置と組み合わせられる燃焼器には噴霧燃焼が使われることを想定し、噴霧燃焼の基礎的知見が得られる燃料液滴列を実験対象とした。装置開発においては、液滴列を燃焼させる雰囲気燃料・水蒸気濃度を变化させることができる燃焼容器を実現した。今年度は、雰囲気の燃料蒸気濃度を变化させて、微小重力環境において液滴列の燃え広がり実験を行った。今後は、雰囲気の水蒸気濃度、および燃料液滴の含水率を变化させて実験を行う予定である。

液体燃料を霧化して燃焼させる噴霧燃焼は、ボイラや炉をはじめ、ディーゼル機関などの燃焼器に広く用いられている燃焼方式である。噴

霧燃焼は、燃料微粒子、燃料蒸気および空気からなる極めて不均一な系で起こる現象である。燃料の蒸発・拡散・混合、それによって生じた混合気の燃焼が同時に進行し、かつ影響しあうため、燃焼現象を直接解析することは困難である。噴霧燃焼機構の解明を目的とし、詳細観察が可能な直径1 mm程度の液滴複数個の液滴群を自然対流が発生しない微小重力環境で燃焼させ、噴霧燃焼の単純モデルとして解析する実験的基礎研究^[2-4]が行われてきた。微視的観点からの噴霧燃焼機構へのアプローチである。しかしながら、気相蒸気濃度が液滴群燃焼におよぼす影響を調べた部分予蒸発噴霧を対象とする実験的基礎研究の報告は少ない^[5,6]。

本報では、液滴を直線状に配置した液滴列の周囲を燃料蒸気の予混合気で満たし、微小重力環境において火炎燃え広がり実験を行った。液滴列燃え広がりを与える液滴周囲予混合気の燃料蒸気濃度や液滴間隔の影響を、微小重力実験により調べた結果を報告する。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置概略を示す。装置は、燃焼容

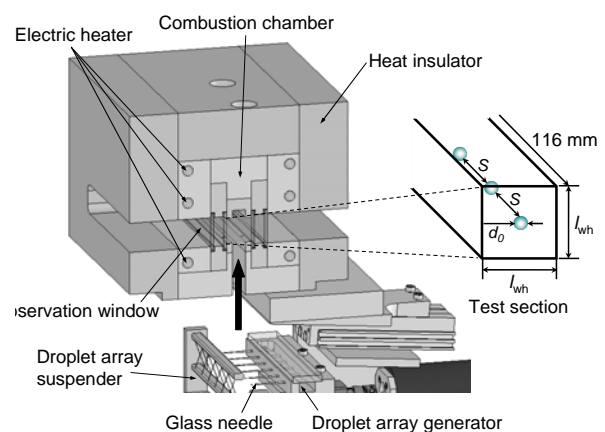


Fig.1 Experimental apparatus.

器、液滴列支持装置、燃料供給ポンプ、液滴列生成装置、液滴列移動装置、点火装置、制御装置および計測機器から構成される。実験空間は、液滴列の列方向に垂直な実験空間断面は正方形であり、燃料液滴はその正方形断面の中心に懸垂する。正方形断面の一片の長さを l_{wh} とすると、断面寸法は 8, 15, 19, 25 および 32 mm と変化させることができる。液滴列方向の実験空間の長さは 116 mm で固定した。燃焼容器壁面や液滴列支持装置は、火炎の熱損失を低減させるため、マシナブルセラミックス製(熱伝導率: $1.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)である。予混合気は、均一に加熱した燃焼容器内部に液体燃料を注入することで生成し、液体燃料の蒸気圧を燃焼容器内温度で制御することにより、目的の気体当量比 ϕ_g に設定した。燃焼容器下部には液滴列支持装置が挿入されるスリットが設けられている。燃焼容器内に予混合気を生成している間は、シャッタによってスリットを密閉した。燃焼実験中は、燃え広がる火炎の既燃側の燃焼容器端は開端とし、未燃側は未燃混合気流速を小さくするため閉端とした。液滴列支持装置には、X字型に交差した直径 $14 \mu\text{m}$ の SiC ファイバが等間隔に 10 組設置されており、その交点に液滴を支持した。液滴間隔 S はファイバを張る間隔で変化させた。点火源から最も遠い第 10 液滴は、燃焼室閉端から $S/2$ の位置に設置した。液滴列生成装置は、フッ化ビニール樹脂バッグ、燃料供給ポンプ、テフロンチューブ、燃料溜め部、10 本のガラス針から構成される。これらの構成品に燃料が満たされた状態で、ガラス針の先端を懸垂線の交点まで前進させる。その後、ポンプにより樹脂バッグから溜め部に燃料を送り、ガラス管先端から燃料を吐出させる。ポンプは高精度に燃料送り出し量の調節が可能である。点火装置には熱線点火方式を採用し、直径 0.29 mm 、長さ 40 mm の鉄クロム線に DC12 V で 3s 通電させることで液滴への点火が行える。燃焼現象の撮影には、耐衝撃仕様の高速度カメラ(撮影速度: 100

fps, 露光時間: open) を使用し、録画開始信号をシーケンサから送信した。燃料には正デカンを使用し、実験は全て大気圧で行った。微小重力環境は日本無重量総合研究所の大型落下塔(微小重力時間 4.5 s)、および日本大学生産工学部の小型落下塔(微小重力時間 1.1 s)を使用して実現した。微小重力実験で行った条件の内、大型落下塔を使用した実験については 1 回の実験結果を、小型落下塔を使用した実験については 3 回の実験結果の平均値を、各実験における燃え広がり速度とした。

3. 実験結果および考察

本燃焼容器における火炎伝播希薄限界以下の気体当量比の雰囲気中に液滴列を挿入し、微小重力環境下において液滴列燃え広がり実験を行った。図 2 に、火炎燃え広がり挙動を示す。文献 7 の分類に従えば、図 2 (a) は、 $S/d_0 = 2$ 、 $\phi_g = 0.5$ の条件における燃え広がりを示したものであり、火炎が液滴を次々と内部に取り込みながら進行していくモード 1 の燃え広がりが観察された。図 2 (b) は、 $S/d_0 = 3.75$ 、 $\phi_g = 0.5$ の条件における燃え広がりを示したものである。火炎が液滴間で一度閉じ、未燃液滴周囲に形成されている可燃混合気層に火炎が触れることで燃え広がりが進行するモード 2 の燃え広がりが観察された。図 2(c) は、 $S/d_0 = 10$ 、 $\phi_g = 0.5$ の条件における燃え広がりを示したものであり、火炎は飛び火的に進行していくモード 3 の燃え広がりが観察された。このような燃え広がりモードは、 S/d_0 に依って変化するが、気体当量比の影響は観察されなかった。図 3 に、初期液滴直径で正規化した燃え広がり速度 V_{sd_0} と周囲気体当量比 ϕ_g の関係を示す。副変数は無次元液滴間隔 S/d_0 とした。気体当量比の増大に伴い、正規化した燃え広がり速度は全ての無次元液滴間隔において増大した。気体当量比が燃え広がり速度に及ぼす影響の大きさを無次元液滴間隔で比較するため、各無次元液滴間隔の $\phi_g = 0.2$ における燃え広

がり速度で燃え広がり速度を除いた燃え広がり速度比と気体当量比の関係を図4に示す. 図3,4中の黒塗りのプロットは, 燃え広がり途中で予混合火炎が発生した場合の燃え広がり速度比であり, 次段落で考察を行う. 速度比は, 無次元液滴間隔の増大に伴って, 気体当量比への依存性が大きくなることがわかった. モード1の燃え広がりが起こる液滴間隔が密な $S/d_0 = 2$ の場合, 周囲気体当量比が高くなるのに伴って群燃焼火炎先端外縁に予混合燃焼領域が発生・拡大し, 火炎先端での発熱が増大すると考えられる⁶. これにより, 群燃焼火炎の先端液滴からの蒸発が活発になり, 短時間で未燃次液滴との間に連続した可燃燃混合気層を形成するため, 燃え広がり速度が増大すると考えられる. モード2および3の燃え広がりが起こる液滴間隔が大きい場合は, 気体当量比の増大に伴って発達する火炎外縁の予混合燃焼領域が, 未燃次液滴の蒸発を促進すると考えられる. さらに, 可燃混合気層形成に必要な未燃次液滴からの蒸発量が, 気体当量比の増大に伴って減少する. 間隔が大きい条件では, 火炎から未燃次液滴に熱が移動し, 未燃次液滴周囲に可燃混合気層が形成されることにより, 液滴間を火炎が燃え広がる. 結果として, 間隔が大きい方が気体当量比の増大による燃え広がり速度の促進効果が顕著に現れ, 気体当量比に対する速度比の増大率が, 液滴間隔の増大に伴って大きくなったと考えられる.

図5に, 正規化した燃え広がり速度と無次元液滴間隔との関係を示す. 燃え広がり速度の最大値は, 燃え広がりモードが1から2へと遷移する条件に現れると考えられる⁴. 本実験では, $S/d_0 = 3$ の条件で燃え広がりモードの1と2がともに発現しており, $S/d_0 = 3.75$ の条件ではモード2のみが発現した. 燃え広がり挙動の観察結果より, 燃え広がりモードは気体当量比にあまり依存しなかったことから, 無次元液滴間隔が3から3.75の間で燃え広がり速度の最大値が発生したと考えられる. 詳細にグラフを見てみる

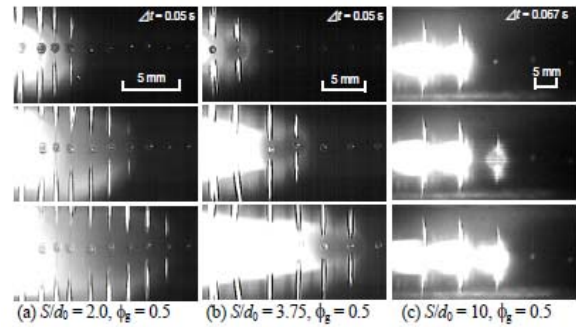


Fig.2 Sequential images of flame spread behavior.

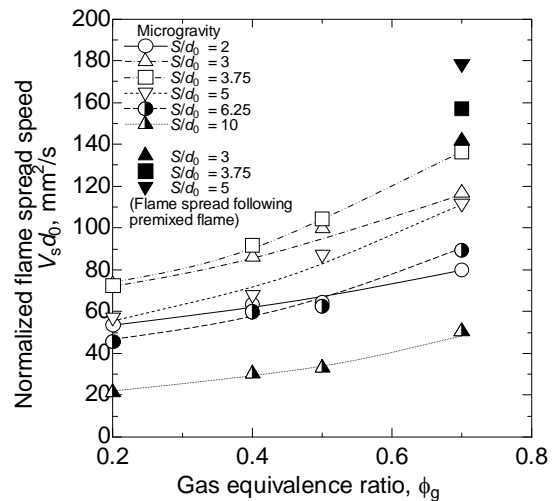


Fig.3 Normalized flame spread speed as a function of gas equivalence ratio.

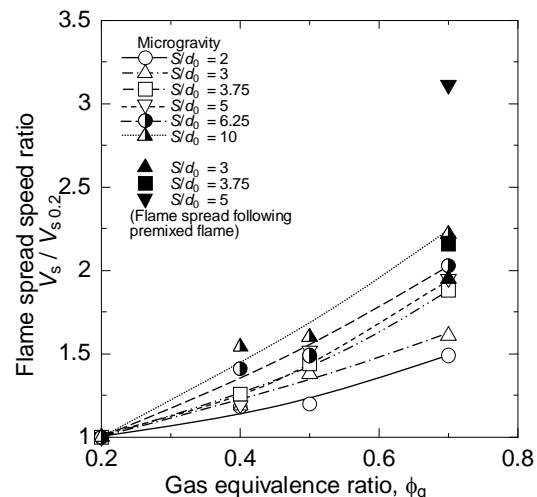


Fig.4 Flame spread speed ratio as a function of gas equivalence ratio.

と, 燃え広がり速度の最大値を示す無次元液滴間隔は, 気体当量比の増大に伴って若干増大していることがわかる. S/d_0 が 3.0, 3.75, および 5.0, ϕ_g が 0.7 の条件において, 燃え広がり火炎の前

方に予混合伝播火炎が発生する事象があった。燃え広がり火炎に先行する予混合伝播火炎は、これらの条件においてのみ燃え広がり途中で発生することがあった。液滴間隔が密である場合には、液滴に熱を奪われるために発生が抑制されたと推察される。発生した予混合伝播火炎により加熱された液滴が自発点火することにより、後続の群燃焼火炎が進行し、見かけ上の燃え広がり速度を増大させたと考えられる。燃え広がり火炎に先行する予混合伝播が発生した場合の燃え広がり速度は、現象が発生した範囲において増大した。液滴間隔が増大するに伴って、予混合伝播火炎が速くなり後続の燃え広がり火炎の速度も増大したためと考えられる。以上の考察から、無次元液滴間隔がさらに広い条件でも予混合伝播火炎が発生し、より速い見かけ上の燃え広がり速度が計測されることが予想される。

4. 結言

部分予蒸発噴霧燃焼の基礎研究として、燃料蒸気-空気予混合気中に正デカン液滴列を配置し、微小重力環境下において液滴列燃え広がり実験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 燃え広がりモードは無次元液滴間隔に依存して変化するが、気体当量比の影響は観察されなかった。
- 2) 燃え広がり途中で予混合伝播火炎が発生しない場合、無次元液滴間隔の増大に伴い、燃え広がり速度に及ぼす気体当量比の影響は強くなる。
- 3) 燃え広がり速度は、気体当量比に依らず無次元液滴間隔が3から3.75付近で最大となる。
- 4) 燃え広がり途中で予混合伝播火炎が発生する場合、燃え広がり火炎に先行する予混合伝播火炎により燃え広がり速度は増大し、その速度は液滴間隔の増大に伴って増大する。

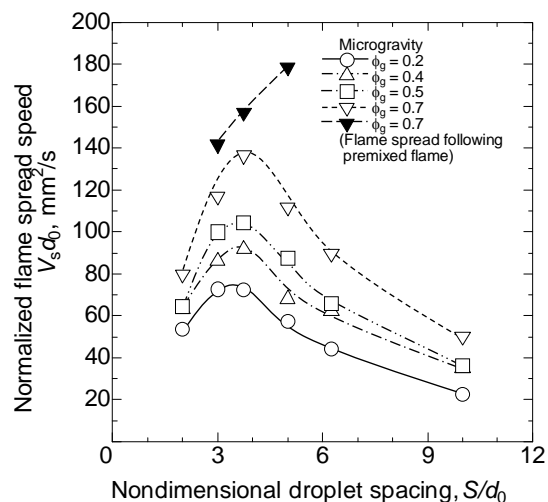


Fig.5 Normalized flame spread speed as a function of nondimensional droplet spacing.

参考文献

- 1) 熊谷耕一, 超臨界水処理された廃有機物を模擬した液滴混在炭化水素燃料の拡散火炎, 日本大学大学院修士論文, 2007.
- 2) Y. Wakashima, M. Kikuchi, S. Yoda, H. Oyagi, M. Mikami, Journal of the Combustion society of Japan, 47-139, 2005, pp.48-57.
- 3) H. Kobayashi, J. Park, T. Iwahashi, T. Niioka, Proceedings of the Combustion Institute, 29, 2002, pp.2603-2610.
- 4) M. Mikami, H. Oyagi, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, Journal of the Combustion society of Japan, 45-134, 2003, pp.238-247.
- 5) 菊池政雄, 山本信, 依田真一, 液滴間火炎伝播メカニズム研究 04-052, 2005, pp.1-29.
- 6) 山本信, 菊池政雄, 依田真一, 野村浩司, 菅沼祐介, 第43回燃焼シンポジウム講演論文集, 2005, pp.256-257.
- 7) 梅村章, 日本機械学会論文集 B 編 68-672, 2002, pp.2422-2428.