

自然対流が燃料液滴の瞬時蒸発速度係数に及ぼす影響

日大生産工(院)
日大生産工○外村 大輔
菅沼 祐介日大生産工 野村 浩司
北海道大学 橋本 望

1. 緒言

化石燃料の燃焼により排出される二酸化炭素によって、地球温暖化が深刻な環境問題になっている。既存燃焼機関の燃料消費率削減を図るための改善が求められている。そこで工業的に広く利用されている噴霧燃焼に着目した。噴霧燃焼は、非常に多数の液滴からなる液滴群の燃焼であり、その最小構成単位である単一液滴を対象とする実験は、噴霧燃焼の基礎的データを収集することができる有効な手段である。

単一液滴を用いた蒸発や点火の実験において、詳細数値計算モデルの開発が、特に多成分燃料液滴に関して、現在盛んに行われている。しかしながら、それらの計算結果を検証する実験データは不足している。計算結果を検証するデータには、自然対流の影響を受けていない微小重力実験で得られたデータが適しているが、微小重力時間の制約で、得られるデータは液滴寿命が短い条件のデータに限られてしまう。幅広い蒸発雰囲気条件で実験データを収集するためには、通常重力環境で得られた蒸発実験データから自然対流の影響を受けていない液滴蒸発データを推定する手法を確立する必要がある。液滴蒸発に及ぼす自然対流の影響を明らかにすることを目的とし、本報では蒸発中に変化する液滴直径と自然対流の蒸発促進効果の関係を明らかにした。通常重力および微小重力環境において蒸発実験を行い、瞬時蒸発速度係数の履歴を求め、自然対流が液滴蒸発に及ぼす促進効果の直径依存性を調べた。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は、高圧容器、高圧容器内部モジュール、温度制御装置、液滴観察装置から構成される。高圧容器内部モジュールは高温容器、液滴支持枠、液滴移動装置、液滴生成装置、および熱電対から構成される。実験部は高温容器内であり、液滴生成部から鉛直上方に60 mm離れている。図2に、液滴支持枠を示す。液滴支持枠は曲げ加工をしたステンレス管、直径78 μm のSiCファイバおよび懸垂線によって構成される。液滴支持枠は銀ロウ付によって計6本のステンレス管を固定し、懸垂線を支えるための2本のSiCファイバをアーチ状に張っている。懸垂線には直径7 μm の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ を用い、SiCファイバと同様に2本の懸垂線をアーチ状に張り、頂点を交差させてガラスで接着した。この交点に液滴を懸垂する。液滴の懸垂位置となる懸垂線の交点は、SiCファイバの約3 mm上方とした。液滴はピエゾポンプを用いてガラス針の先端から吐出する。ガラス針をカム機構により往復運動させることで液滴支持枠に液滴を懸垂させる。液滴が $328 \pm 5 \text{ K}$ にて生成されていることを確認するため、液滴の水平方向に約9 mm離れた位置にK種熱電対を設置している。液滴支持枠はスライダ・クランク機構により、高温容器内部まで移動させる。高温容器内部にはK種熱電対を設置しており、PID

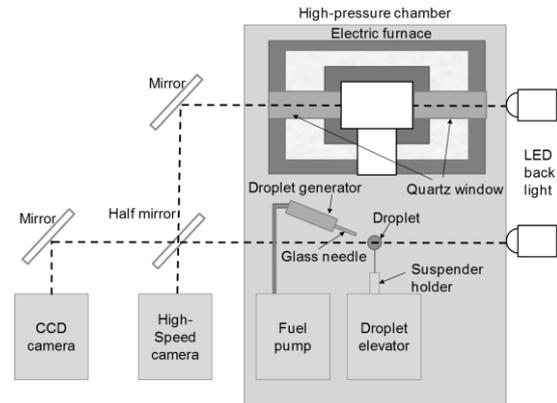


Fig. 1 Experimental apparatus.

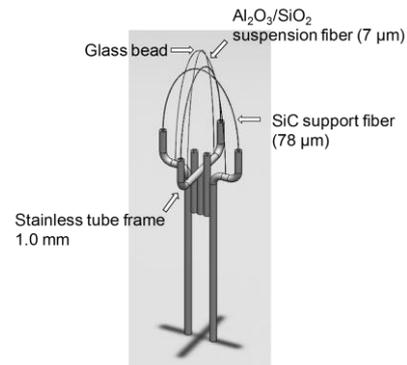


Fig. 2 Droplet suspension system.

温調ユニットによりアナログ温度制御を行う。液滴観察装置は高速度ビデオカメラ、CCDカメラおよびバックライトにより構成される。同時に2台のカメラで液滴を観察するためにハーフミラーとミラーを介して観測を行った。液滴の観察にはバックリット法を採用した。

液滴の自発点火を防ぐため、窒素を用いて高圧容器内の昇圧を行った。高温容器内部の温度を実験温度まで上昇させた。液滴を液滴支持枠に懸垂させ、液滴を高温容器内部へ移動させると同時にバックリット画像の録画と温度測定を行い、データを収集した。実験は通常および微小重力環境で行い、通常重力実験については各実験条件において5回行った。瞬時蒸発速度係数は、撮影された液滴の直径履歴を計測し、ある時刻の直前および直後、計3つの無次元液滴直径の2乗から算出した傾きの符号を反転させた値と定義した。微小重力実験は北海道赤平市にあるコスモトール落下

Effect of natural convection on instantaneous evaporation rate coefficient of fuel droplet

Daisuke TONOMURA, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA and Nozomu HASHIMOTO

塔（重力レベル $>10^{-3}G_0$ ）を用いて実験を行った。微小重力実験は実験回数が1回であることと、瞬時蒸発速度係数はばらつきが大きいことを考慮し、無次元液滴直径の2乗が1以下の範囲において最小2乗法を用いて次式で曲線近似し、瞬時蒸発速度係数 k' を求めた。

$$k' = A_1 + A_2 \times \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - A_3 \exp\left(1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2\right) - A_4 \exp\left(\left(\frac{d}{d_0}\right)^2\right) \quad (1)$$

ここで A_i は、最小2乗法で決めた定数である。通常重力実験における瞬時蒸発速度係数は、無次元液滴直径の2乗を0.05間隔で分割し、5回の実験の瞬時蒸発速度係数の平均値を計算した。瞬時蒸発速度係数は、懸垂線の影響と初期加熱期間を排除するため、 $0.15 \leq (d/d_0)^2 \leq 0.9$ の範囲について計算を行った。燃料には軽油の模擬燃料である正ヘキサデカンを用いた。初期直径 d_0 は0.4から0.8 mmの範囲で変化させ、各条件における初期直径のばらつきは $\pm 5\%$ 以内とした。液滴直径の計測には自作の自動計測プログラム[1]を使用した。

3. 実験結果および考察

図3に本研究によって得られた通常重力環境における正ヘキサデカン液滴の蒸発の様子を示す。雰囲気圧力は、0.10および1.0 MPa、雰囲気温度は773 Kである。液滴の左右および下に黒く見える線が、懸垂線である。画像より、懸垂された液滴はほぼ球形であり、輪郭が明確であることを確認した。

図4に、通常および微小重力環境において得られた瞬時蒸発速度係数と無次元液滴直径の2乗の関係を示す。通常および微小重力環境において得られた瞬時蒸発速度係数の大きさには差が見られたが、曲線の形には大きな差はなく、瞬時蒸発速度係数は、液滴直径の減少に伴って増大し、その後減少することがわかった。微小重力実験の結果から液滴蒸発そのものが非定常であることがわかり、通常重力実験の結果には自然対流の非定常性が更に加わっていると考えられる。

図5に自然対流の蒸発促進効果について示す。球の熱伝達に及ぼす自然対流の影響を示した式を参考にし、縦軸は通常重力環境で得られた瞬時蒸発速度係数 k'_{NG} と微小重力環境で得られた瞬時蒸発速度係数 k'_{MG} の比から1を減じた値である。比をとる瞬時蒸発速度係数には、無次元液滴直径の2乗が同じ k'_{NG} と k'_{MG} を用いた。横軸はレイリー数である。レイリー数の計算に必要な液滴温度は、過去に熱電対を用いて液滴温度を通常重力環境で計測したデータを用いた。液滴温度の無次元液滴直径に対する履歴は、初期直径および重力環境に依存しないと仮定した[1]。また、混合気の物性値には、液滴表面近傍の混合気物性値と無限遠の窒素物性値の平均値を用いた。両雰囲気圧力条件とも、レイリー数の指数は約0.5となり、熊谷ら[2]が液滴の燃焼速度定数に及ぼす自然対流の影響として求めたグラスホフ数の指数とほぼ一致することがわかった。しかしながら、Agostonら[3]が剛体球を用いて燃焼速度に及ぼす自然対流の影響として求めたグラスホフ数の指数は0.30であり、それとは一致しなかった。蒸発の非定常性が原因として考えられるが、詳細は現在考察中である。また、雰囲気圧力が異なると結果が同一直線上に分布しなくなる理由も現在調査中である。

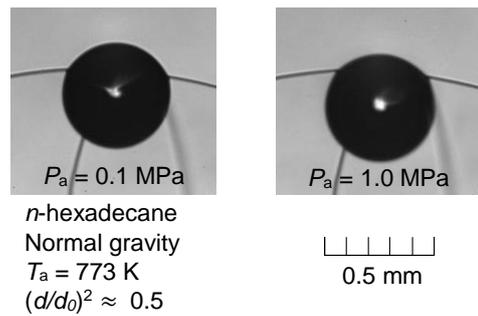


Fig. 3 Backlit image of evaporating droplet.

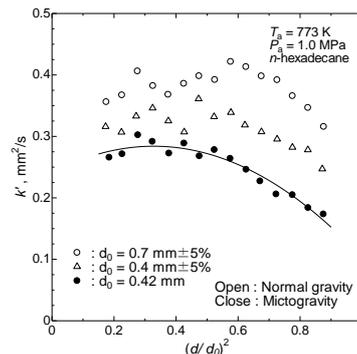


Fig. 4 Instantaneous evaporation rate coefficient at normal and microgravity as a function of squared nondimensional droplet diameter.

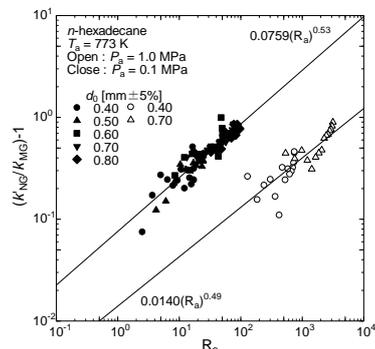


Fig. 5 Effect of natural convection on instantaneous evaporation rate coefficient.

4. 結言

通常および微小重力環境、雰囲気圧力0.10および1.0 MPaにおいて、初期液滴直径を0.4から0.8 mmの範囲で変化させて正ヘキサデカンの瞬時蒸発速度係数を取得した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 瞬時蒸発速度係数は、初期加熱期間の後、液滴直径の減少に伴って増大し、その後減少する。微小重力環境においても瞬時蒸発速度係数は同じ変化を示すため、自然対流の影響を排除しても液滴蒸発は非定常であることがわかった。
- 2) 瞬時蒸発速度係数に及ぼす自然対流の影響を示すレイリー数の指数は約0.5であることがわかった。

「参考文献」

1. 金子堅太郎, 他, 微粒化 19: 447-452 (2013).
2. Okajima, S., Kumagai, S., Proc. Comb. Inst. 19: 1021-1027(1982).
3. Agoston, G.A. et al., Jet Propulsion 28: 181-188(1958).