

高温・高圧環境における正デカン単一液滴蒸発の非定常蒸発性と自然対流の影響に関する微小重力実験

○日大生産工 (院) 村上 洋輔

日大生産工

野村 浩司

日大生産工

菅沼 祐介

1 緒言

近年、環境汚染や地球温暖化の防止、低炭素社会実現のため、化石燃料を効率よく利用することが求められている。そこでディーゼルエンジンやガスタービンなど、工業的に広く用いられている噴霧燃焼に着目した。噴霧の最小構成単位である、単一液滴を用いた実験は、噴霧燃焼を単純化して捉えることができるため、噴霧燃焼の基礎データを収集することに適している。実験を容易にするため液滴直径を大きくしたことで、通常重力下で実験を行うと自然対流が発生してしまい、噴霧中の微小液滴の現象とは異なってしまう。自然対流の影響を無視できる微小重力環境において実験を行うことが望ましいが、実験が大がかりになることと微小重力時間の制限があるため、様々な実験条件でデータを取得することが困難である。そこで、比較的微小重力実験が容易な条件で得られた燃料液滴の蒸発履歴と通常重力環境で得られたそれを比較することにより、自然対流の影響を明らかにし、通常重力実験で得られた蒸発履歴から自然対流の影響を取り除く手法の構築を目的とした。本報では、まず液滴蒸発の非定常性と自然対流の影響の非定常性を明らかにする実験を行ったので、その結果を報告する。

2 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は、高圧容器に内部モジュールを挿入する構造になっている。高圧容器の周りに液滴観察装置があり、高速度ビデオカメラとバックライトにより構成される。上下に60mm離れた液滴生成部と液滴蒸発部を同一の高速度ビデオカメラで観察するため、ハーフミラーとミラーが設置されている。高速度ビデオカメラはフレーム速度を200fps、露光時間は998μsに設定して撮影した。高圧容器内部モジュールは、高温容器、その下側に設置された液滴生成装置および液滴移動装置により構成される。液滴移動装置の可動部には液滴支持器が取り付けられており、液滴支持器は曲げ加工をしたステンレス管、懸垂線を支えるための直径78μmのSiCファイバ、液滴懸垂線である2本の交差したAl₂O₃/SiO₂ファイバ、および液滴懸垂線の交点に設置されたガラスビーズから構成される。ガラスビーズの体積は初期液滴体積の2%程度に製作した。液滴は外直径40μmのガラス針の先端から、ピエゾポンプを用いて吐出される。ガラス針をカム機構により前後に往復運動をさせることで、ガラスビーズに液滴を懸垂させる。液滴支持器は液滴移動装置により、高温容器内部の実験部まで、90.1msで移動させる。

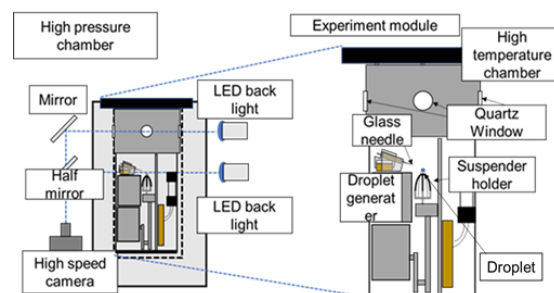


Fig. 1 Experimental apparatus.

実験試料には *n*-decane を用いた。雰囲気気体には窒素を使用し、燃料の自発点火を防止した。液滴生成部温度は 328 ± 5 K、雰囲気温度 T_a は 773 K、雰囲気圧力 P_a は 0.10 および 0.50 MPa、初期液滴直径 d_0 は通常重力下では $0.52 \text{ mm} \pm 5\%$ 、 $0.40 \text{ mm} \pm 5\%$ とし、微小重力下では $0.40 \text{ mm} \pm 5\%$ のみとした。各条件で、通常重力実験を 3~5 回行い、微小重力実験を 3 回行った。

液滴温度の計測は今回行わなかった。そこで過去に金子が取得した初期液滴直径 $0.52 \text{ mm} \pm 5\%$ のデータを使用した¹⁾。初期液滴直径 $0.40 \text{ mm} \pm 5\%$ の温度履歴は、初期直径の違いを補正するため、初期液滴直径 0.52 mm の温度履歴の時間軸を修正 95vol%液滴寿命¹⁾で除し、初期液滴直径 0.40 mm の修正 95vol%液滴寿命をかけることによって得た。

液滴直径の履歴は、液滴直径の2乗の時間変化を示すグラフを縦軸・横軸ともに初期液滴直径の2乗で正規化して表した。この液滴直径履歴から瞬時蒸発速度係数 k' を求めた。瞬時蒸発速度係数は、無次元液滴直径の2乗が膨張過程を終えて1に戻ってから0.12に達するまでの区間で求めた。時刻 t_n の瞬時蒸発速度係数は、 t_{n-2} から t_{n+2} の計5つの実験データを最小2乗法で直線近似した直線の傾きと定義した。1回の実験ごとに瞬時蒸発速度係数を求め、同一条件でまとめて、瞬時蒸発速度係数と無次元液滴直径の2乗の関係を求めた。このデータセットを、無次元液滴直径の2乗が0.12~1の区間で0.08の間隔に分割し、それぞれの間隔において無次元液滴直径の2乗、正規化時間、および瞬時蒸発速度係数の平均値を計算した。

液滴蒸発速度に及ぼす自然対流の影響の考察のため、瞬時蒸発速度係数を無次元液滴直径の2乗の関数として表しておく。近似式には、次式を用いた

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

Microgravity experiments for unsteady evaporation of *n*-decane single droplet at high pressures and high temperature.

Yosuke MURAKAMI,

Hiroshi NOMURA, and Yosuke SUGANUMA

3 実験結果および考察

図2に雰囲気圧力0.10および0.50 MPa, 雰囲気温度773 K, 初期液滴直径 d_0 が $0.40\text{ mm} \pm 5\%$ の微小重力実験で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。プロットは実験データ, 実線はその近似曲線である。異なる雰囲気圧力であっても, 無次元液滴直径の2乗が0.7付近までは同一曲線上を変化した。雰囲気圧力が0.10 MPaの場合, その後, 瞬時蒸発速度係数の値はあまり変化せず, わずかに減少した。雰囲気圧力が0.50 MPaの場合, 無次元液滴直径の2乗が0.5付近で瞬時蒸発速度係数は最大となり, その後, わずかに減少した。微小重力環境においても, 蒸発が非定常であることがわかった。

近似式の精度を検証するため, 誤差率を求めた。誤差率は, 実験データから求められた平均値と, 近似式により得られた値の差の絶対値を近似式の値で除した値の平均値である。計算された誤差率は, 最も大きい場合でも5%以下であった。

通常重力環境で得られた瞬時液滴蒸発速度係数から, 液滴蒸発に及ぼす自然対流の促進効果を考察する。自然対流の強さの尺度にはグラスホフ数Grを用いた。グラスホフ数は以下の式で計算した。

$$\text{Gr} = \frac{\rho_{\text{ms}} - \rho_{\text{ma}}}{\rho_{\text{m}} \nu_{\text{m}}^2} g d^3 \quad (2)$$

ここで, ρ_{ms} と ρ_{ma} はそれぞれ液滴表面と無限遠の燃料蒸気と雰囲気気体混合気の密度, ρ_{m} は ρ_{ms} と ρ_{ma} の平均値, ν_{m} は液滴表面と無限遠の混合気の平均動粘度, g は重力加速度, d は液滴直径である。必要となる液滴温度には, 前述の実験データを使用した。液滴の温度は同一条件で取得された3回の実験データをそれぞれの初期液滴直径の2乗で除し, 幅 0.3 s/mm^2 の区間ごとに時間と温度の平均を求めた。無次元液滴直径の2乗と液滴温度の対応には, 液滴温度履歴と無次元液滴直径の2乗履歴を使用した。無次元液滴直径の2乗データと同一修正時刻の液滴温度データが無い場合には, 液滴温度を求めたい修正時刻の前後の液滴温度データを比例配分して液滴温度を求めた。また修正95vol%液滴寿命を用いて時刻を補正する場合には, 3回の実験でえられた修正95vol%液滴寿命の平均値を用いた。

図3に自然対流の蒸発促進効果を調べた結果を示す。縦軸は, 通常重力実験で得られた瞬時蒸発速度係数 k'_{NG} を微小重力実験で得られた瞬時蒸発速度係数 k'_{MG} で除し, 1を減じた値である。横軸は瞬時の液滴直径に対応するグラスホフ数である²⁾。蒸発初期と最終期は蒸発の非定常性が非常に強いので, 無次元液滴直径の2乗が0.2から0.6の区間のデータについてのみ最小2乗法によるべき乗近似を行った。その結果, 自然対流による蒸発促進効果(ヌッセルト数)はグラスホフ数の0.52乗に比例することがわかった。剛体球の自然対流熱伝達から推察されるグラスホフ数³⁾の指数である0.25よりも大きい値であり, 液滴燃焼時の値とほぼ等しいことがわかった。液滴直径の減少に伴って蒸発の促進効果も単調に減少していくと考えられるが, 初期直径 0.40 mm , 雰囲気圧力 0.50 を除いて, 蒸発の後半で促進効果が減少しなかった。これは, 液滴直径が変化する速さに比べて, 液滴周りの自然対流の速度が液滴直径に対応する流速に収束する速さが遅いことが原因である可能性がある。今後, データを増やして考察を行う。

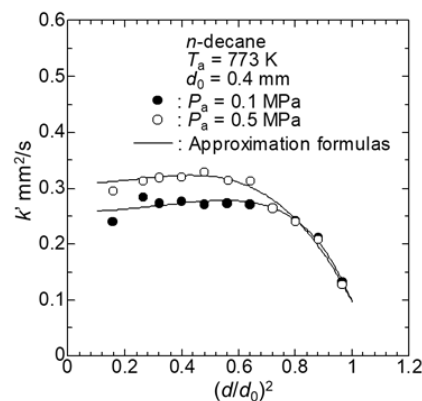


Fig. 2 Instantaneous evaporation rate coefficient as a function of squared nondimensional droplet diameter of two kinds of pressures.

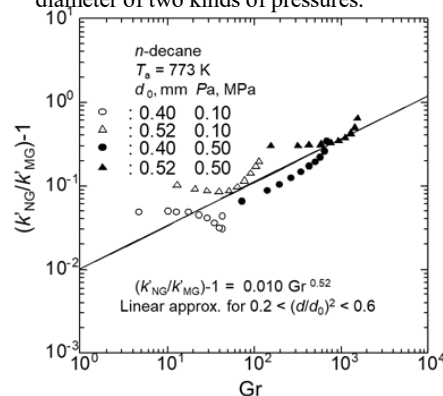


Fig.3 Effect of natural convection on instantaneous evaporation rate coefficient.

4. 結言

通常重力環境および微小重力環境で液滴蒸発実験を行った。微小重力実験の結果から蒸発の非定常性を確認し, 通常重力実験の結果と比較することで, 自然対流の蒸発促進効果を調べた。以下に得られた知見を示す。

- (1) 液滴蒸発の非定常性は蒸発前半に強く現れた。蒸発前半は瞬時蒸発速度係数が圧力によらず同じように変化し, その後圧力が高いほうが変化を続け, そのほぼ一定となり, 最後に減少する
- (2) 蒸発する液滴に及ぼす自然対流の影響は, おおよそ $(k'_{\text{NG}}/k'_{\text{MG}}) - 1 = 0.010 \text{Gr}^{0.52}$ の式で表された。
- (3) 自然対流の蒸発促進効果は, 液滴直径の減少に伴って減少し, 初期液滴直径 0.4 mm , 雰囲気圧力 0.50 MPa の条件を除き, 蒸発後期にはあまり変化しない傾向があった。

参考文献

- 1) 金子 堅太郎, 他, 高温・高圧力環境で蒸発するパーメチルエステル液滴の温度および直径履歴の計測, 日本液体微粒化学会誌 Vol.23, (2014) p.87-94.
- 2) J. Sato. et al., Effects of natural convection on high-pressure droplet combustion, Proc. Combust. Inst., 82 (1990), p.142-150
- 3) 甲藤 好朗, 伝熱概論, 養賢堂, 1964, p. 164.