

高温・高圧環境における液滴蒸発および液滴蒸発に及ぼす自然対流の影響の非定常性に関する微小重力環境を利用した実験的研究

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。そこで本実験では微小重力環境の実験と通常重力環境での実験を比較することで自然対流の影響を明らかにし、通常重力環境でも自然対流の効果を排除した実験データが得られるスキームを確立することを目的としている。本報では、微小重力実験の結果から得られた自然対流の影響を受けていない単一燃料液滴の蒸発現象そのものに着目し、その非定常性を明らかにした。既報では実験データの傾向が他の雰囲気温度雰囲気圧力と大きく異なっていた 0.10 MPa の条件の微小重力実験を再度行い、幅広い雰囲気圧力に対して統一的な考察を行った。また、通常重力環境でも実験を行い、微小重力環境の実験結果と比較し自然対流の非定常性についても考察したので、その結果を報告する。

2 実験装置及び方法

実験装置は過去に野村らが使用した装置を用いた¹⁾。初期直径を変えても液滴が支持枠から脱落しないようにするため、懸垂線交点部 (液滴を懸垂する部分) に付着させるガラスビーズの体積は初期体積の 2 %程度に作成した。微小重力実験には日本大学生産工学部リサーチ・センター内にある二重箱方式の小型落下塔を使用した。微小重力レベルは約 $10^{-4}G_0$ である。

実験試料には正デカンを用いた。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 とした。微小重力実験では雰囲気温度 T_a を 723, 773, および 823 K, 雰囲気圧力 P_a は 0.10, 0.20, 0.50, および 1.0 MPa で変化させ、初期液滴直径 d_0 は $0.40 \text{ mm} \pm 5\%$ で固定した。通常重力実験では温度データのある 773 K の微小重力実験に対応する圧力で、初期液滴直径を 0.40, 0.52, 0.70, および $0.80 \text{ mm} \pm 5\%$ と変化させた。初期液滴直径 0.7 および 0.8 mm の実験では液滴が懸垂線から慣性で飛ばないようにするため、

液滴生成部から高温容器内の実験部までの距離 60 mm を移動する時間を、初期液滴直径 0.52 mm 以下の場合には 90.1 ms, それより大きい場合は 120 ms とした。各条件で、通常重力実験を 5 回行い、微小重力実験を 5~7 回行った。各実験の液滴直径履歴から修正 95 vol%液滴寿命を計測²⁾し、同一条件の実験データから修正 95 vol%液滴寿命が平均値に近い 3 回分のデータを抽出した。

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²⁾。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²⁾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。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 0.2 に達するまでの区間で求めた。時刻 t_0 の瞬時蒸発速度係数は、 $t_{0.2}$ から $t_{0.2+2}$ 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 0.2~1 の区間で 0.08 の間隔に分割し、それぞれの区間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、次の実験式³⁾を用いた。

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

3 実験結果および考察

図1に、微小重力環境における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。すべての条件において、液滴温度上昇に伴う液滴膨張の期間が終了時点から瞬時蒸発速度係数が大きく増大した。これは、液滴膨張期終了後も液滴温度が引き続き上昇しているからである。その後、雰囲気温度773および823 Kの条件を除くと、瞬時蒸発速度係数は無次元液滴直径の2乗が雰囲気圧力0.10 MPaの場合は0.8付近で、それ以外の雰囲気圧力では0.6付近で最大値に達し、その後ほぼ一定または緩やかに減少した。最大値以降に瞬時蒸発速度係数がほぼ一定となった条件では、準定常的に液滴が蒸発したと考えられる。一方、減少した条件では液滴の蒸発が速くかつ気相が準定常状態になるのに時

Experimental study on unsteadiness of droplet evaporation and natural convection effect on droplet evaporation at high temperatures and pressures using microgravity condition.

Yosuke MURAKAMI,
Hiroshi NOMURA, and Yusuke SUGANUMA

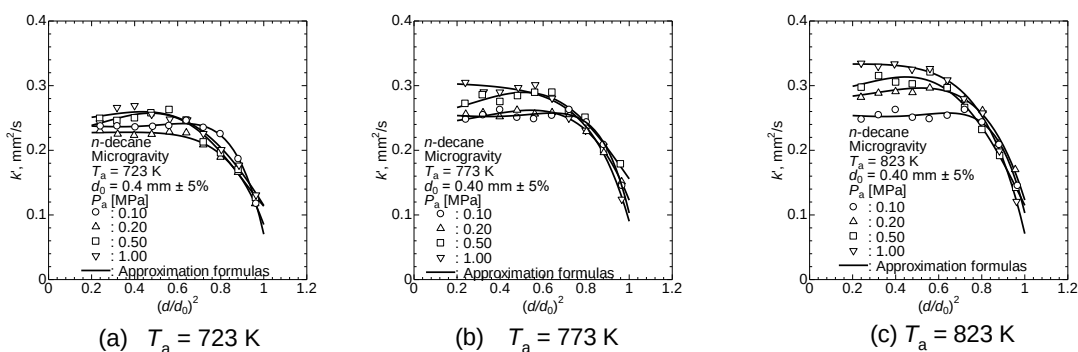


Fig. 1 Instantaneous evaporation rate coefficient as a function of squared dimensionless droplet diameter.

間を要するために瞬時蒸発速度係数が緩やかに減少と考えられる。すなわち、蒸発前期で液滴周りに形成された大きな蒸気層中で蒸発後期の小さな液滴が蒸発するため、液滴から無限遠の気相蒸気濃度が増大したのと同じ効果が現れたと考えた。

最初に除外した2条件においては、液滴蒸発最終期まで瞬時蒸発速度係数が増大した。これは、雰囲気圧力の増大に伴う沸点上昇により湿球温度が沸点近くまで上昇したため、蒸発期間中に液滴温度が湿球温度に到達しなかったことが原因であると考えられる。同一雰囲気圧力の雰囲気温度723 Kの条件では、湿球温度が雰囲気温度773および823 Kの条件より低いため、蒸発期間中に液滴温度がほぼ一定になったと推察される。

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関数として表す前述の実験式³⁾を用いて近似曲線を得た。図1中の実線が、得られた近似曲線である。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。

$$Gr = \frac{\rho_{ms} - \rho_a}{\rho_m \nu_m} g d^3 \quad (2)$$

ここで、 ρ_{ms} と ρ_a はそれぞれ液滴表面と無限遠の燃料蒸気/雰囲気気体混合気の密度、 ρ_m は ρ_{ms} と ρ_a 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 は時々刻々の液滴直径である。必要となる液滴温度には、前述の実験データを使用した。

図2に雰囲気温度773 Kにおける自然対流の蒸発促進効果を調べた結果を示す。縦軸は、通常重力実験における瞬時蒸発速度係数 k_{NG} 微小重力実験における瞬時蒸発速度係数 k_{MG} で除し、1を減じた値である。横軸は、液滴直径に対応するグラスホフ数である。蒸発の非定常性が非常に強い期間を除き、無次元液滴直径0.2から0.6の期間のデータをプロットした。図からわかるように、雰囲気圧力、初期液滴直径および直径に依存せず、プロットがほぼ一本の線上に存在していることがわかる。最小2乗法によりべき乗近似を行ったところ、グラスホフ数の指数は剛体球の自然対流熱伝達から推察されるグラスホフ数の指数⁴⁾である0.25に近い0.26となった。グラスホフ数が小さい領域でプロットが近似線の下側に存在するが、この点については雰囲気温度や圧力を変えた実験を行い、更に調べる予定である。

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明

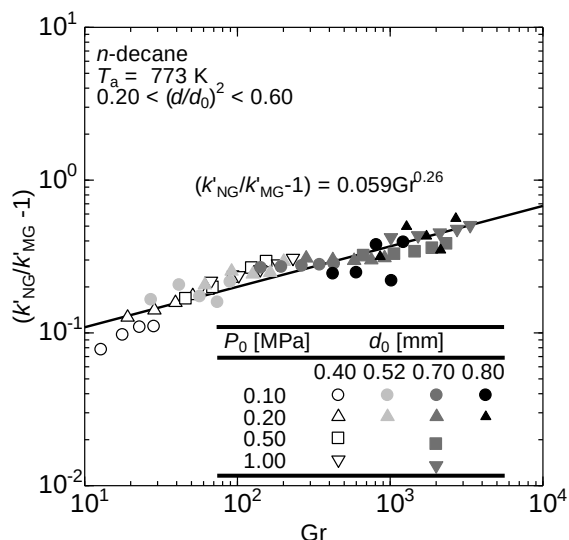


Fig. 2 Effect of natural convection on instantaneous evaporation coefficient.

らかにし、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の時間変化を調べた。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る。雰囲気温度773および823 K、雰囲気圧力1.00 MPaの条件を除いて無次元液滴直径の2乗が0.10 MPaの場合は0.8付近で、それ以外の雰囲気圧力では0.6付近で最大値をとり、その後は減少またはほぼ一定となった。除外した2条件では、瞬時蒸発速度係数が蒸発期間全体に亘って増大した。
- (2) 蒸発中に自然対流が液滴蒸発を促進する効果は $(k_{NG}/k_{MG}) = 1 + 0.059Gr^{0.26}$ の式で表された。

参考文献

- 1) H. Nomura, et al., Microgravity experiments of fuel droplet evaporation in sub- and supercritical environments, Proc. Combust. Inst. 36(2017) p.2425-2432(2017).
- 2) 金子 堅太郎, 他, 高温・高圧力環境で蒸発するパーマ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.
- 3) 村越 好奉, 微小・通常重力環境を利用した高温・高圧力雰囲気における単一燃料液滴の蒸発実験, 日本大学大学院生産工学研究科修士論文, (2016)
- 4) 甲藤 好朗, 伝熱概論, 養賢堂, 1964, p. 164.