

通常重力場で得られた単一燃料液滴の蒸発速度係数から自然対流の蒸発促進効果を取り除くスキームの検討

日大生産工(院) ○清水 雄斗

日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介

1. 緒言

地球温暖化の主な原因である二酸化炭素の排出が国際的に大きな環境問題となっている。そのため、脱炭素社会の実現に向けて各国が動きつつあり、ガソリンに代わる燃料の導入、車の電動化やジェットエンジンのハイブリット化などの研究が進んでいる。しかしながら、内燃機関方式の車に代わる電動車の実現や普及には未だ課題が残っており、水素エンジン車に用いられる燃料の水素はガソリンと比較すると体積エネルギー密度において劣っているため、長距離を移動する移動体への使用は難しい。そこで既存の内燃機関に大きな変更を加えることなく利用でき、燃焼時に排出する二酸化炭素を成長時に吸収することから利用時の二酸化炭素の排出量をゼロと見なすことができる点が長所であるバイオマス燃料の利用が求められる。バイオマス燃料に既存の内燃機関を適応させ、効率良く燃焼させるためには、数値シミュレーションによる燃焼予測が不可欠である。移動体の燃料には、エネルギー密度の観点から液体燃料が適しているため、移動体で将来使用されるバイオマス燃料は液体燃料であることが予想される。現在ディーゼル機関やガスタービンの燃焼室などで液体燃料を燃焼させるために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のに適している。本研究の目的は、単一燃料液滴の非定常蒸発機構の解明であり、その先には単一燃料液滴の非定常蒸発を簡便な数値モデルにすることを見据えている。

過去に行った微小重力実験の結果から、初期加熱期間を除けば、瞬時蒸発速度係数は液滴直径2乗の減少に伴って減少することがわかった。ただし、微小重力時間が1.1 sであったため、初期直径が大きな液滴と小さな液滴の瞬時蒸発速度係数履歴の重なりが無く、瞬時蒸発速度係

数が液滴直径の関数になっているか否かを判断できなかった。そこで、自然対流の影響を小さくし、液滴蒸発を液滴が消滅するまで観察するため、通常重力環境・低圧力雰囲気で行った。実験の結果、瞬時蒸発速度係数が液滴直径の関数であることが示唆され、液滴直径の2乗の減少に伴って瞬時蒸発速度係数は緩やかに直線的に減少する傾向が見られた。自然対流が液滴蒸発に及ぼす影響は液滴直径の変化に伴って変化するので、通常重力環境で液滴蒸発現象を観察すると、液滴蒸発そのものの非定常性に自然対流が原因の非定常性が重なって液滴蒸発の非定常性が観察されることになる点に注意を払う必要がある。本報では、雰囲気圧力0.040 および0.10 MPaの条件において、雰囲気温度と液滴初期直径を変化させて液滴の蒸発を観察し、液滴蒸発の非定常性に及ぼす雰囲気温度と液滴初期直径の影響を調べた。また、得られた結果より自然対流の蒸発促進効果を取り除くスキームを検討した。結果を考察し、報告する。

2. 実験装置及び方法

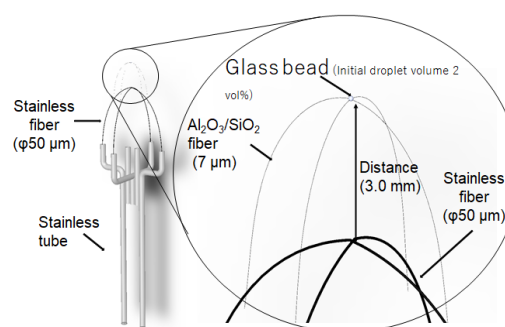


Fig.1 Droplet suspension system.

Scheme for Removing the Evaporation Enhancement Effect of Natural Convection from the Evaporation Rate Coefficient of a Single Fuel Droplet Obtained at Normal Gravity

Yuto SHIMIZU, Hiroshi NOMURA and Yusuke SUGANUMA

実験装置には、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棒から脱落しないようにするため、図1のように懸垂線交点部（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。また、液滴懸垂線の熱容量を減らすため、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバーを支えるSUSファイバーを93 μm から50 μm に変更した。液滴の撮影にはBacklit法を用いて高速度ビデオカメラで記録した。高速度ビデオカメラの分解能を約340 pix/mm、撮影速度を200 fps、低雰囲気温度では50 fpsとした。自作のプログラム[1]を用い、連続画像から液滴直径を計測した。液滴の輪郭を楕円近似し、回転楕円体の体積と等しい体積の球の直径を液滴直径とした。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。雰囲気温度が液滴蒸発の非定常性に及ぼす影響を調べるため、高温部雰囲気温度を303 から873 Kの間で変化させた。液滴生成部温度は、雰囲気温度303 Kの実験においては293 K、373~423 Kにおいては313 $\pm$ 5 K、573~873 Kにおいて328 $\pm$ 5 Kとした。自然対流の影響を抑制するために雰囲気圧力 P_a は0.040 MPaとした。初期液滴直径を0.60, 0.70, および0.80 mm $\pm$ 5% と変化させ、実験を行った。液滴が懸垂線から慣性で脱落し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0.60 mmの場合は125 ms、0.70mmの場合は130 ms、0.80 mmの場合は140msとした。同一実験条件において5回実験を行った。各実験の液滴直径履歴から修正95 vol%液滴寿命を計測し、同一条件の実験データから修正95 vol%液滴寿命がその平均値に近い3 回分のデータを抽出した。

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_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0.2から1の区間で0.08の幅に10分割し、それぞれの分割領域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。

液滴温度は次のように推定した。弓削[2]によれば、剛体球の自然対流熱伝達における代表長さを球体の直径としたヌッセルト数 Nu_d は、自然対流の強さの指標であるグラスホフ数 Gr

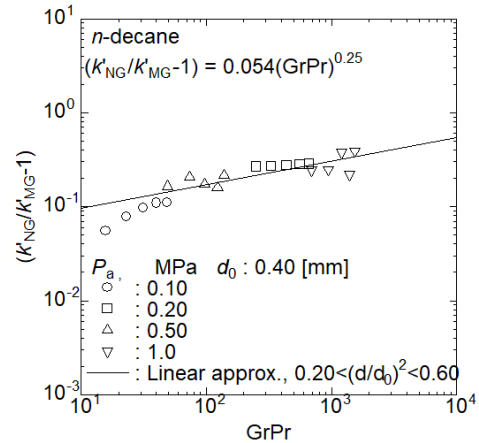


Fig.2 Evaporation enhancement effect of natural convection

とプラントル数 Pr を用いて次式(1)で表されている。

$$\text{Nu}_d = 2 + 0.43\text{Gr}^{1/4}\text{Pr}^{1/4} \quad (1)$$

この式を参考にし、液滴蒸発に及ぼす自然対流の促進効果を評価した。グラスホフ数は次式(2)のように表され、

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_a - T_s)d^3}{\nu^2} \quad (2)$$

g , β , T_a , T_s および ν は、それぞれ重力加速度、膨張係数、雰囲気温度、液滴温度、および動粘性係数である。計算には液滴温度が必要になるので、過去に同一雰囲気温度・圧力・初期直径の条件で金子[3]が習得した温度履歴データを使用した。

自然対流の蒸発促進効果を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を減じた値とした。液滴蒸発に及ぼす自然対流の影響が剛体球の熱伝達に及ぼす自然対流の影響と同じ機構であると考え、次式(3)において実験結果から定数 a を求めた。

$$\frac{k'_{\text{NG}}}{k'_{\text{MG}}} - 1 = \frac{\text{Nu}_{d\text{NG}}}{2} - 1 = \frac{2 + 2a(\text{GrPr})^b}{2} - 1 = a(\text{GrPr})^b \quad (3)$$

通常重力実験における瞬時蒸発速度係数は前述の平均値を、微小重力実験における瞬時蒸発速度係数は関数から通常重力実験における無次元液滴直径の2乗を代入して求めた。蒸発の非定常性が非常に強い期間を除き、無次元液滴直径の2乗が0.2から0.6の期間のデータをブ

ロットした．最小2乗法によりべき乗近似を行ったところ以下のように未知数 a を求めた．

$$k'_{NG}/k'_{MG} - 1 = 0.054(\text{GrPr})^{0.25} \quad (4)$$

指数 b は弓削の理論値である0.25を採用した．実験条件における液滴温度を複数仮定し，準定常蒸発理論から求められたSpaldingの蒸発速度係数の式に仮定した温度を用いて瞬時蒸発速度係数を計算した．また，仮定した温度を用いてグラスホフ数を求め，式(4)を用いて自然対流を考慮した蒸発速度係数を計算した．瞬時蒸発速度係数を実験結果と比較し一致する仮定した温度を液滴温度とした．また，今回得た式(4)を用いて，瞬時蒸発速度係数から自然対流の影響を除くことを試みた．初期加熱期間を除き，異なる初期液滴直径においてプロットが重なる部分の瞬時蒸発速度係数から自然対流の影響を除いた．液滴温度の推定と同様に，液

滴温度を複数仮定しグラスホフ数および蒸発速度係数を求めた．図2のように実験結果の液滴直径および瞬時蒸発速度係数に一致する蒸発速度係数の条件のグラスホフ数を式(4)に代入することで自然対流の蒸発促進効果を求めた．得られた蒸発促進効果により，実験結果の瞬時蒸発速度係数を除することで自然対流の影響を除いた瞬時蒸発速度係数とした．

3. 実験結果及び考察

雰囲気温度を変化させて取得した瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗の関係を図3に示す．瞬時蒸発速度係数は，いずれの雰囲気温度においても，初期加熱期間の後期で急激に増大して最大値をとった後に，液滴直径の減少に伴って緩やかに，直線的に減少していることがわかる．液滴直径の減少に伴って瞬時蒸発速度係数が緩やかに減少する期間では，いずれの雰囲気温度

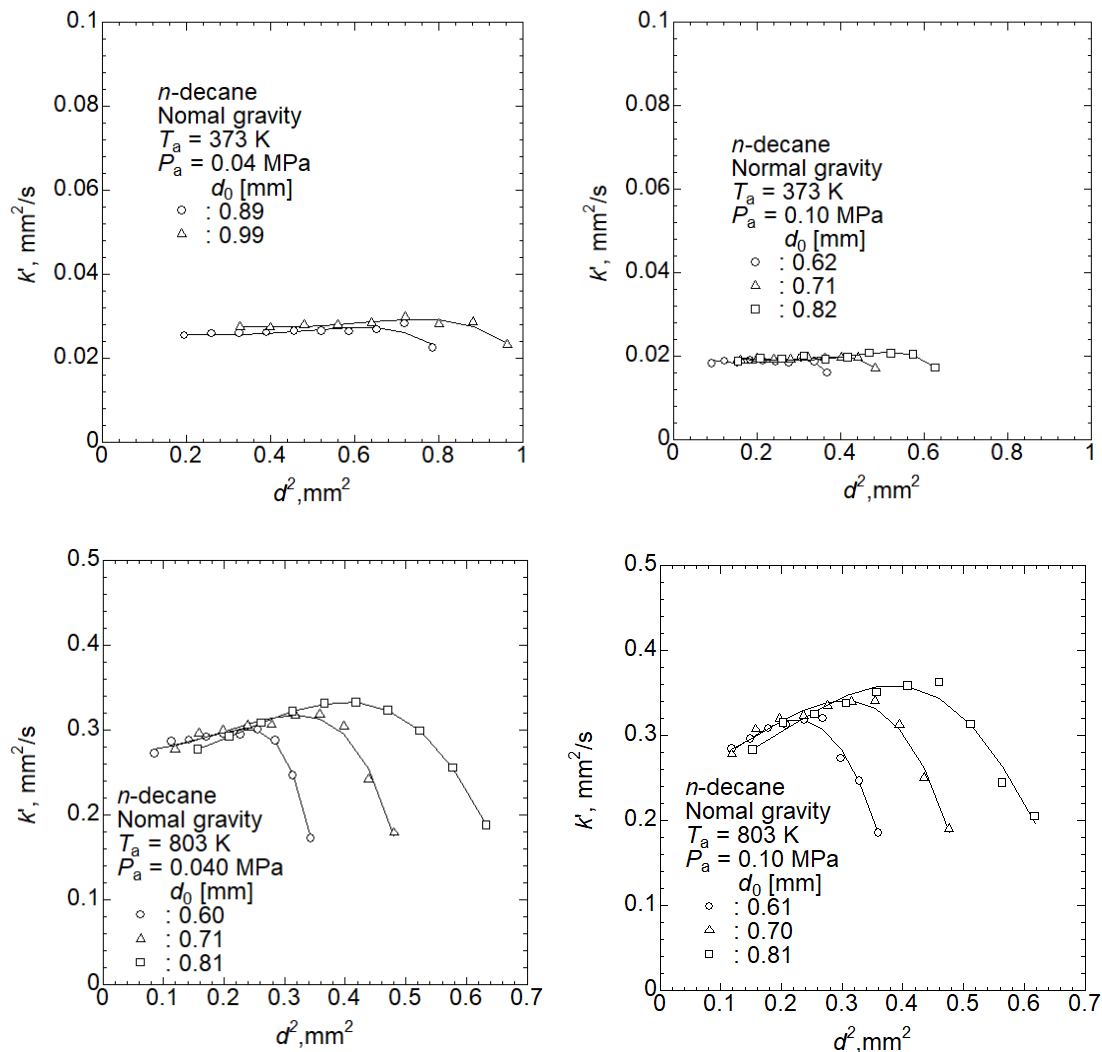


Fig.3 Instantaneous droplet evaporation rate coefficient as a function of squared droplet diameter.

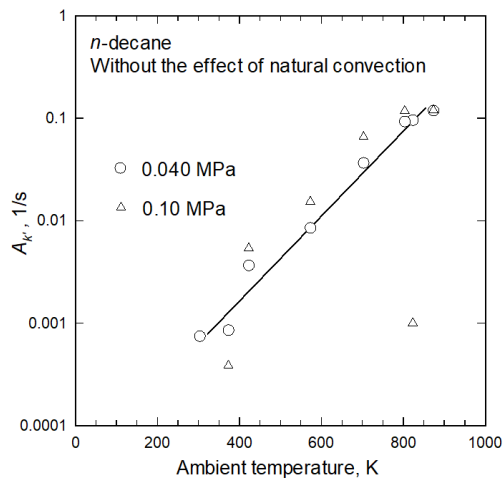


Fig. 4 Slope of instantaneous evaporation rate coefficient as a function of ambient temperature.

度においても、異なる初期液滴直径のプロットが概ね重なることがわかる。

液滴直径の減少に伴って瞬時蒸発速度係数が緩やかに減少する期間では、異なる初期液滴直径のプロットが概ね重なったことから、自然対流の蒸発促進効果も、本実験条件の範囲であれば、初期液滴直径に依存しない液滴直径の関数であることがわかった。また、雰囲気温度 803 K において概ねプロットが重なる部分の傾きが、0.040 MPa の場合に比べて 0.10 MPa の場合の方が急峻になっていることがわかる。これは雰囲気圧力による自然対流の蒸発促進効果が増大したからだと考えられる。

瞬時蒸発速度係数から(4)式を用いて自然対流の影響を除き、異なる初期液滴直径のプロットが概ね重なる区間を最小2乗法により直線近似し、その傾き A_k と y 切片の値 k_0' を求めた。ここで、 A_k は液滴蒸発の非定常性の度合いを示し、 k_0' は液滴が十分に小さく、自然対流の影響が無視できる場合の蒸発速度係数だと考えた。結果を図3および4に示す。図3において、自然対流の影響を除いたあとも液滴蒸発が促進される非定常性が確認された。また、雰囲気圧力 0.040 MPa においては、雰囲気温度の増大に伴い瞬時蒸発速度係数の非定常性である A_k が対数関数的に増大することがわかった。しかしながら、0.10 MPa では 373 K および 823 K において傾向とは異なる結果だった。今後、再実験および異なる雰囲気圧力での実験を行い、更にデータを収集し、傾向の精査を行う。

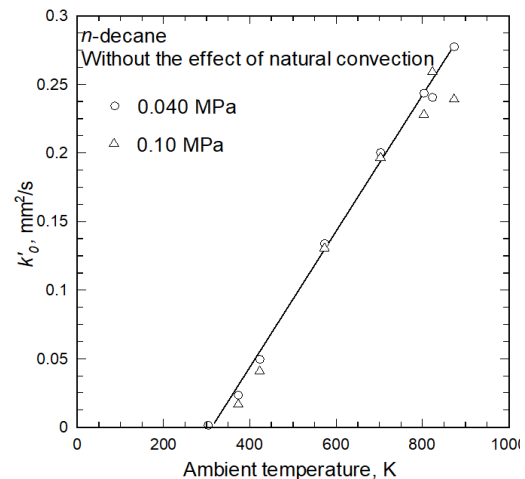


Fig. 5 Estimated evaporation rate coefficient for fine droplets as a function of ambient temperature.

また、 k_0' に関しては、どちらの雰囲気圧力においても、雰囲気温度の上昇に伴って、 k_0' は一次関数的に増大した。また、 k_0' の値に雰囲気圧力の影響が見られなかった。今後、更に高い雰囲気圧力の実験データを取得し、 k_0' に及ぼす雰囲気圧力の影響を調べる。

4. 結言

燃料液滴蒸発について、雰囲気温度や雰囲気圧力が瞬時蒸発速度係数に及ぼす影響を通常重力環境で調べた。自然対流の影響を抑制するため、低雰囲気圧力条件で実験を行った。また、0.040 MPa の実験結果と比較するため 0.10 MPa で実験を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) 自然対流の蒸発促進効果は

$$k'_{NG}/k'_{MG} - 1 = 0.054(\text{GrPr})^{0.25}$$

の式で表された。

(2) 自然対流の影響を除いた瞬時蒸発速度係数の非定常性 A_k は 0.040 MPa において雰囲気温度の上昇に伴い増大した。

(3) k_0' は雰囲気温度の上昇に伴って増大した。

参考文献

- 1) 清水 雄斗, 野村 浩司, 菅沼 祐介, 燃焼シンポジウム予稿集, A121 (2020).
- 2) 弓削達雄, ASME, J. Heat Transfer, C82, 214
- 3) 金子 堅太郎, 他, 日本液体微粒化学会誌 23: 87-94 (2014).