

三種の炭化水素燃料に関する単一燃料液滴蒸発非定常性に及ぼす雰囲気圧力・温度の影響

日大生産工(院) ○中川 光葉 日大生産工 野村 浩司
日大生産工 菅沼 祐介

1. 緒言

地球温暖化が深刻化し、大きな問題となっている。我々の生活の中で使用されている自動車に大量の化石燃料が使われ、環境負荷の高い物質が発生している。そこで BEV (Battery Electric vehicle) の導入などが対策の候補として挙げられているが、移動体のエネルギーには、エネルギー密度の観点から、液体燃料が望ましい。そして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る e-fuel は理想的である。そのため、今後も液体燃料の燃焼技術の向上は重要である。本研究では、運輸部門で広く使用されているディーゼル機関の燃焼室において、液体燃料の燃焼に使われる噴霧燃焼に注目した。しかしながら噴霧燃焼の詳細なメカニズムは未だ解明されていない。噴霧燃焼において液滴蒸発は、燃焼時間を支配している場合が多い。本研究では、単一燃料液滴を対象として、噴霧燃焼の基礎データを収集し、新しい液体燃料の蒸発シミュレーションに資する知見と基礎データを収集する。

過去の実験の結果、正デカンでは雰囲気圧力の増大に伴って蒸発の非定常性が強くなることがわかった。本報では、ジェット燃料を模擬する単一成分燃料として正デカンを、ガソリンを模擬する単一成分燃料としてイソオクタンを、そして e-fuel の候補として着目されている炭酸ジメチル(DMC)⁽¹⁾を燃料として使用し、各種燃料の液滴蒸発の非定常性に及ぼす雰囲気温度および圧力の影響を調べた。研究目的は、精度の高い液滴蒸発数値モデル構築のための、単一燃料液滴の非定常蒸発機構の解明である。

2. 実験装置および方法

実験装置には野村らで使用した装置を用いた⁽²⁾。実験試料には正デカン、イソオクタンおよび炭酸ジメチル (DMC) を用いた。詳細な実験条件を Table 1 にまとめた。得られた映像を、連続写真にし、自作の画像処理プログラ(autoDDMPX7in)を用いて液滴直径を解析し、液滴直径の時間履歴を求めた。ガラスビーズの直径は、燃料液滴への熱的影響を考慮し初期液滴体積の 5% の液滴直径の 3/4 以下とした。95% 体積液滴蒸発寿命 τ_{95} を初期液滴体積が 95% 蒸発した時間と定義し⁽³⁾、その時間を初期液滴直径の 2 乗で除した値を正規化 95vol% 液滴寿命 τ_{95}/d_0^2 とした。同一条件の実験データから正規化 95vol% 液滴寿命が 5 回のデータの平均値に近い 3 つのデータを抽出した。なお炭酸ジメチルの雰囲気温度 773 K の条件においては、蒸発残留物が発生したため、各実験条件の 1 回目の実験データのみを有効なデータとして採用した。蒸発速度係数は、初期液滴直径を用いて無次元化した無次元液滴直径の 2 乗が 0.5 から 0.15 まで減少する区間を最小 2 乗法により直線近似し、近似直線の傾きの絶対値と定義した。

瞬時蒸発速度係数 K は直径履歴を微分して求めるため、ばらつきが大きくなりやすい。直径データの平均化処理を行った後、微分を行った⁽⁴⁾。そして、 K と液滴直径の 2 乗のグラフを蒸発後期について直線近似し、その傾きを蒸発の非定常性の評価値とした。またその近似直線の縦軸切片を自然対流の影響を受けない微小液滴の蒸発速度係数 k'_{00r} と定義した。蒸発後期の近似直線の求め方を記述する。液滴直径の 2 乗が 0.115 mm^2 を超える瞬時蒸発速度係数のデータを液滴

Table 1 実験条件

Gravity condition	Normal gravity							
Ambient gas	Nitrogen							
Fuel	<i>n</i> -decane		iso-octane			DMC		
Fuel ambient temperature T_a [K]	423±1	473, 573, 673, 773±1	473, 573, 673, 773±1			573±1	673±1	773±1
Fuel ambient pressure P_a [MPa]	0.10, 0.20	0.040, 0.10, 0.20	0.060	0.10	0.20	0.10		
Temperature at droplet generation part T_g [K]	328±5							
Initial droplet diameter d_0 [mm]	0.594~0.615							
Number of experiments	5						1	

Effects of ambient pressure and temperature on unsteadiness of single droplet evaporation on three hydrocarbon fuels

Koyo NAKAGAWA, Hihoshi NOMURA and Yusuke SUGANUMA

直径が小さい順に並べ、まず液滴直径が小さい方から13個のデータで直線近似を行った。その後、近似を行う液滴直径の上限を1データずつ拡大し、直線近似を行った。各直線近似において偏差の2乗の平均値を計算し、その値が最も小さい近似曲線を蒸発後期の近似直線として採用した。

3. 実験結果および考察

実験結果を Fig.2 に示す。雰囲気圧力 0.10 MPa, 温度 573, 673 および 773 K の雰囲気条件における正デカン, イソオクタンおよび炭酸ジメチル液滴の

直径履歴を示す。縦軸は無次元液滴直径の2乗, 横軸は時間を初期液滴直径の2乗で除した正規化時間である。いずれの燃料においても, 初期加熱期間が観察され, 初期加熱期間後は無次元液滴直径の2乗がほぼ直線的に減少していることがわかる。また, 標準沸点が最も低い炭酸ジメチルが, いずれの雰囲気条件においても, 初期加熱期間後の蒸発速度が一番遅いことがわかる。Fig.3 に, 正デカンの瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗の関係を示す。初期加熱期間の影響が強く表れる期間を排除し, 無次元液滴直径の2乗が 0.30 から 0.90 の範囲を示した。液滴直径の2乗の減少に

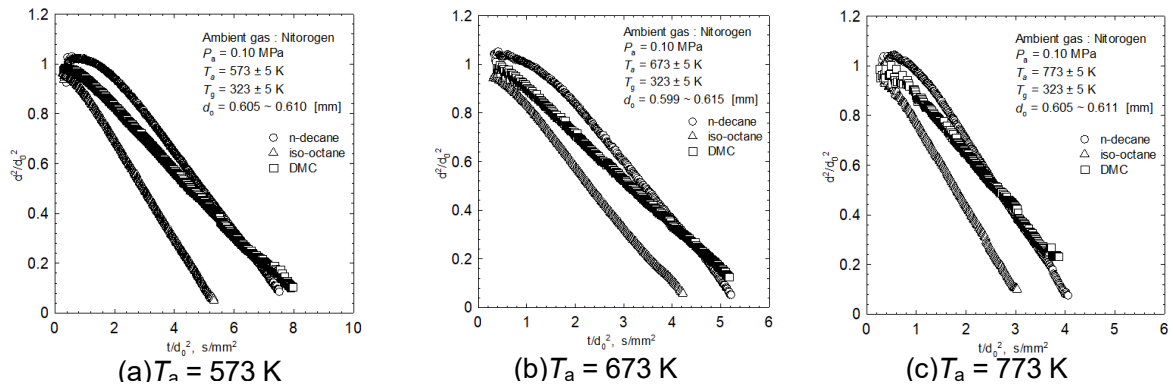


Fig.2 液滴直径履歴

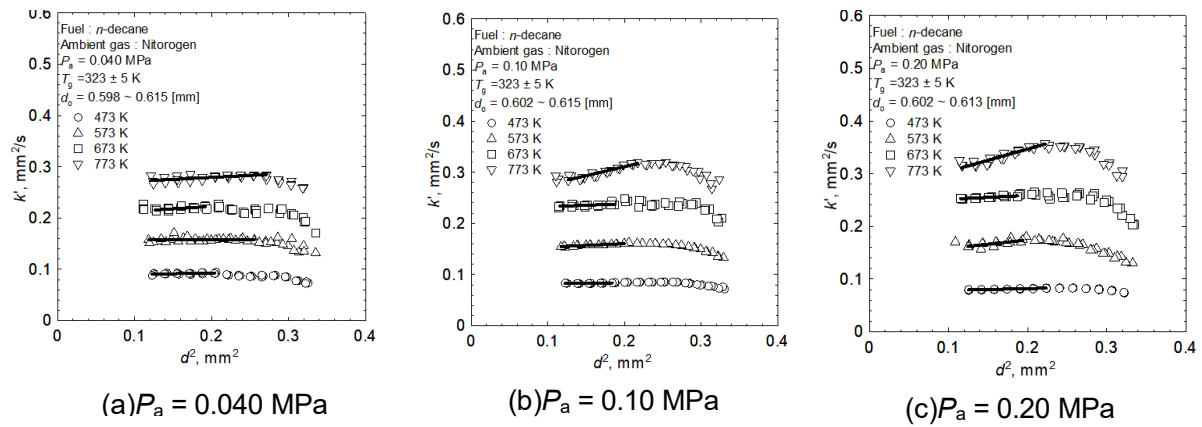


Fig.3 正デカンにおける瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗

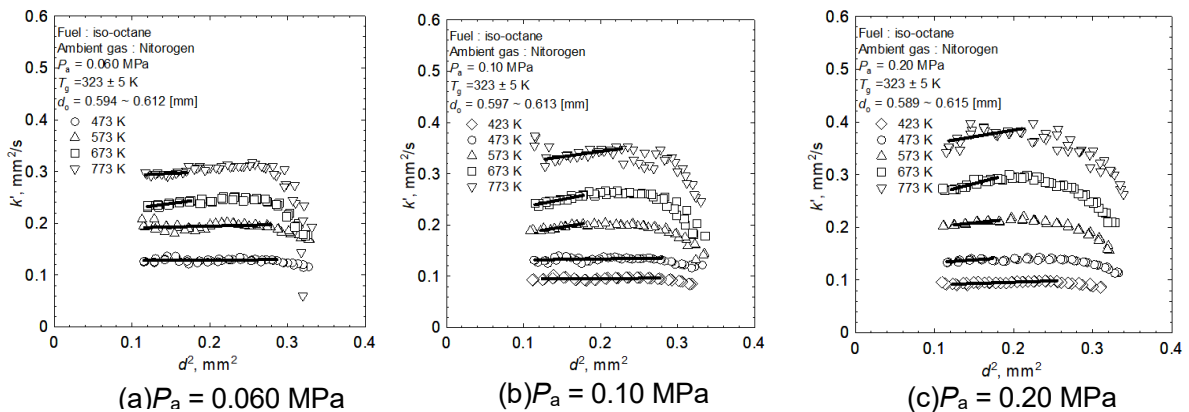


Fig.4 イソオクタンにおける瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗

に伴い、瞬時蒸発速度係数は増大し、その後ほぼ一定もしくは緩やかに減少した。液滴直径が大きい領域で、液滴直径の2乗の減少に伴い瞬時蒸発速度係数が増大するのは、初期加熱期間中の液滴温度上昇に伴う液滴蒸発速度の増大が原因であると考えられる。初期加熱期間終了後、準定常蒸発が実現されれば瞬時蒸発速度係数は一定になるが、実験結果は、液滴直径の減少に伴って瞬時蒸発速度係数が若干もしくは緩やかに減少した。雰囲気温度 773 K の条件では、雰囲気圧力の増

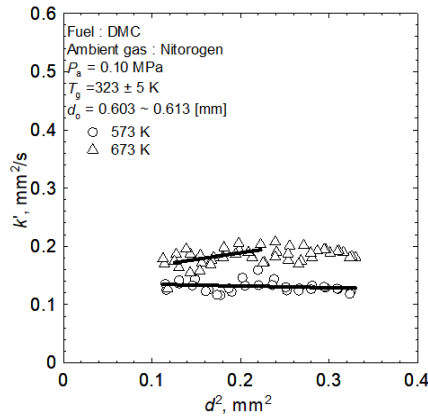
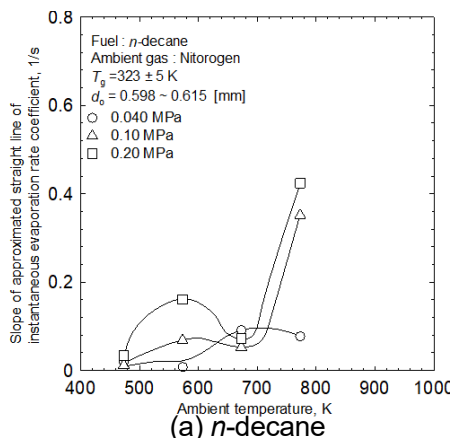
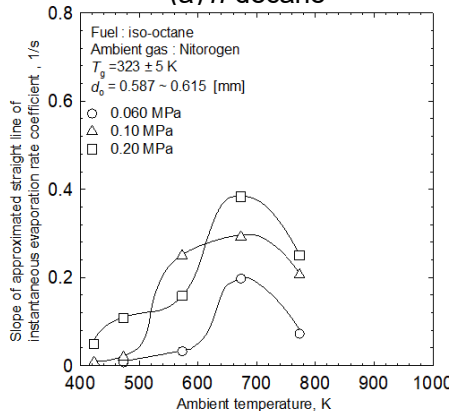


Fig.5 炭酸ジメチルにおける瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗



(a) n-decane



(b) iso-octane

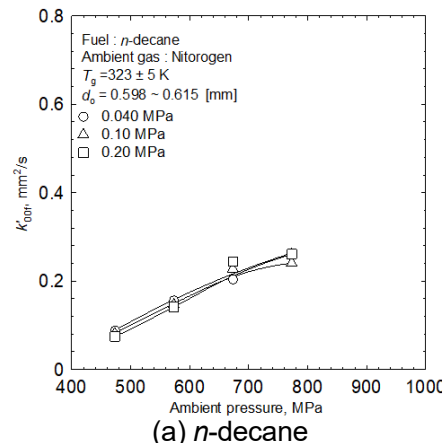
Fig.6 正デカンおよびイソオクタンの液滴蒸発の非定常性

大に伴う沸点上昇により、初期加熱期間が液滴寿命に占める割合が大きくなり、かつ蒸発後半の非定常性が増すことにより、瞬時蒸発速度係数が上凸の曲線になることがわかる。

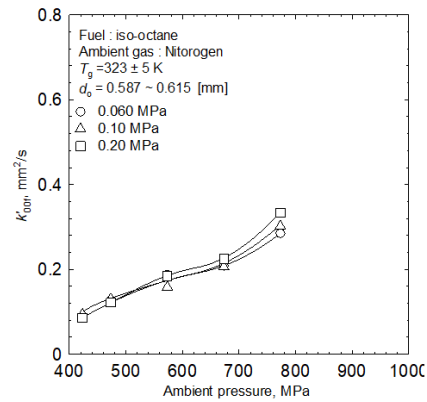
Fig.4に、イソオクタンの瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗の関係を示す。雰囲気温度 673 および 773 K の条件で、正デカンの雰囲気温度 773 K の条件と同様に、瞬時蒸発速度係数が上凸の曲線になることがわかる。正デカンと異なり、雰囲気温度 573 および 673 K の条件においても、液滴蒸発後期に液滴蒸発の非定常性が顕在化していた。

Fig.5に、炭酸ジメチルの瞬時蒸発速度係数と液滴直径の2乗の関係を示す。前述の蒸発残留物のために瞬時蒸発速度係数が算出できた条件が少なく、雰囲気圧力 0.10 MPa の条件について、雰囲気温度 573 および 673 K の2つ条件の結果をまとめて示す。同一条件の正デカンおよびイソオクタン液滴と比較すると、蒸発の非定常性はイソオクタンほど顕著ではなく、正デカンのそれに近いことがわかる。今後、実験条件を増やしてデータを取得する予定である。

Fig.6に、正デカンおよびイソオクタン液滴について、蒸発後期における蒸発の非定常性を示す。縦軸は、蒸



(a) n-decane



(b) iso-octane

Fig.7 自然対流の影響を受けない微小液滴の蒸発速度係数 k'_{00f}

発後期における瞬時蒸発速度係数の液滴直径の2乗に対する傾きである。横軸は雰囲気温度である。いずれの燃料においても、雰囲気温度 473 K における液滴蒸発の非定常性は非常に小さかった。この雰囲気温度だと、最も自然対流の影響を強く受ける雰囲気圧力 0.20 MPa の正デカンの場合でも自然対流の蒸発促進効果は、液滴直径が 0.3 mm の時点でおおよそ 15%程度⁽⁴⁾である。よって、蒸発中に液滴直径が減少して自然対流の促進効果が小さくなっても、蒸発の非定常性に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

正デカン液滴については、雰囲気温度の増大に伴って概ね液滴蒸発の非定常性が増した。雰囲気圧力 0.10 および 0.20 MPa の雰囲気温度 673 K における非定常性の減少については、今後更なる実験を行って検証する。雰囲気圧力 0.040 MPa の条件では、高温雰囲気において非定常性が弱まる傾向が観られた。イソオクタン液滴の場合、雰囲気圧力に依らず、液滴蒸発の非定常性は雰囲気温度の増大に伴って増大し、高温雰囲気において減少した。また、イソオクタン液滴の場合、雰囲気圧力 0.060 MPa と 0.10 MPa の間では圧力の増大に伴って液滴蒸発の非定常性が増したが、雰囲気圧力 0.10 MPa と 0.20 MPa の間では雰囲気圧力の増大に伴って液滴蒸発の非定常性が概ね減少した。いずれの雰囲気圧力条件においても、雰囲気温度 673 K において最も非定常性が強まることがわかった。

Fig.7 に、正デカンおよびイソオクタン液滴について、fig.3 および 4 の近似直線の切片の値を示す。切片の値は、 k' と d^2 の関係が液滴蒸発の後期に直線関係にあることを仮定して推測した液滴直径がゼロの時の液滴蒸発速度係数 k'_{oor} である。横軸は雰囲気温度とした。雰囲気温度の増大に伴い、 k'_{oor} は直線的に増大した。正デカンにおいては、顕著な雰囲気圧力依存性は確認されなかった。イソオクタンにおいて、 k'_{oor} は、雰囲気温度の増大に伴い直線的に増大した。イソオクタン液滴についても、 k'_{oor} は雰囲気温度の増大に伴って増大した。雰囲気温度 673 K 以上でその増大幅が大きかった。低雰囲気温度においては大きな雰囲気圧力依存性は観られなかったが、雰囲気温度 773 K において、 k'_{oor} は雰囲気圧力の増大に伴って増大した。今後、落下実験とを行い、微小重力実験で得られた液滴蒸発速度係数と通常重力実験で得られた k'_{oor} を比較・考察する予定である。

4. 結言

通常重力環境において、正デカン、イソオクタンおよび炭酸ジメチル液滴の蒸発実験を行い、液滴蒸発の非定常性に及ぼす雰囲気圧力・温度の影響を調べた。得られた知見を列挙する。

- (1) 同一雰囲気条件においては、3種の燃料の中でイソオクタンが最も蒸発が速く、次いで正オクタン、炭酸ジメチルの順であった。
- (2) 正デカン液滴については、雰囲気温度の増大に伴って概ね液滴蒸発の非定常性が増した。イソオクタン液滴の場合、雰囲気圧力に依らず、液滴蒸発の非定常性は雰囲気温度の増大に伴って増大し、高温雰囲気において減少した。
- (3) 瞬時液滴蒸発速度係数と液滴直径の2乗の関係が、液滴蒸発の後期に直線関係にあることを仮定して液滴直径がゼロの時の液滴蒸発速度係数を推測した。正デカンの微小液滴蒸発速度係数には、本実験範囲では、圧力に依存性しなかった。

参考文献

- (1) 光藤 健太, 保坂 知幸, 米谷 直樹: Chaimae Bariki, Joachim Beeckmann, Heintz Pisch, Christoph Kraus, Felix Fellner, Georg Wachtmeister: 炭酸ジメチルの詳細反応モデルおよび層流燃焼速度式の構築と筒内燃焼シミュレーション, 第 32 回内燃機関シンポジウム予稿集
- (2) H. Nomura, T. Murakoshi, Y. Suganuma, Y. Ujiie, N. Hashimoto, H. Nishida: Microgravity Experiments of Fuel Droplet Evaporation in Sub- and Supercritical Environments, 36(2017), 2425-2432.
- (3) 中川光葉, 野村浩司, 菅沼祐介: デカン単一液滴蒸発の非定常性に及ぼす雰囲気圧力の影響に関する微小重力実験 第 31 回微粒化シンポジウム, A124
- (4) 清水 雄斗, 野村 浩司, 菅沼 裕介: 単一燃料液滴蒸発における雰囲気温度が液滴温度非定常性に及ぼす影響, 第 30 回微粒化シンポジウム, B111