

# 微小重力環境における高圧雰囲気中のバイオマス燃料液滴の 蒸発温度履歴

日大生産工(院) ○金子 堅太郎  
電中研 橋本望

日大生産工 野村 浩司

## 1 まえがき

化石燃料の大量消費に伴う地球温暖化の問題や化石燃料の枯渇の不安は、近年深刻な状況である。これらを解決する方法の一つとして植物由来のバイオマス燃料の利用が挙げられる。植物由来のバイオマス燃料は、カーボンニュートラルの性質を有している点や、再生可能エネルギーであること、既存の燃料機関に大幅な変更を加えることなく利用できることなどの点から、化石燃料の代替燃料として期待されている。

種々のバイオマス燃料を実機に用いて、燃料および燃焼特性を調査した例は多くあるが、実機を用いた噴霧燃焼の結果や現象を解析する基礎データは依然不足している。噴霧燃焼を微視的に捉えた単一液滴を取得することは噴霧燃焼現象の解析に有効である。これまで本研究では、高温・高圧雰囲気中にバイオマス燃料の単一液滴を挿入し、その液滴直径履歴を計測してきた。本報では小型落下塔を用いて微小重力環境における液滴の蒸発温度計測を行った。

植物由来のバイオマス燃料の一種であるパームメチルエステル(PME)、比較燃料として単一成分である正ヘキサデカンおよび実用燃料である軽油を用いて液滴蒸発実験を行った。落下塔王を用いて実現した微小重力環境で蒸発する液滴燃料の温度履歴および直径履歴を同時に取得し、微小重力環境および通常重力環境で得られた結果を比較・検討した。

## 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、高温容器、液滴生成装置、液滴移動装置から構成される内部モジュール、制御装置および液滴観察装置からなる。内部モジュールを高圧容器(常用耐圧: 5 MPa)に格納することで高圧実験を可能にする。直径1 mmのステンレス管で作られている懸垂線支持枠に、図1の左上枠内のように、温接点を頂点とする弓型のK種熱電津(直径13  $\mu\text{m}$ )を

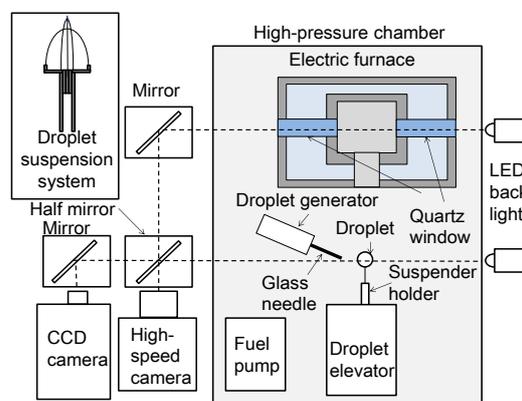


Fig.1 Experimental apparatus.

設置した。直径7  $\mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバを熱電対の頂点で直角に交差させ、微小量のCERAMABOND-569-T (AREMCO 社製)で交点を接着した。実験対象となる液滴は、この交点に懸垂した。熱電対と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバを支えるためにSiCファイバ(直径78  $\mu\text{m}$ )を弓型にして懸垂線支持枠に固定した。小型ピエゾポンプにより颯爽された燃料は、フロンチューブを介して先端直径約40  $\mu\text{m}$ のガラス針から吐出され、熱電対と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバの交点に液滴となって付着・懸垂される。燃料液滴は、スライダ・クランク機構を用いた液滴移動装置によって、液滴生成部の上方に設置された実験部である高温容器内に挿入される。移動に要する時間は165 msであった。高温容器内温度は、シース直径1.6 mmのK種熱電対で計測し、シースで電気シースヒータの出力制御を行うことで、任意の温度に制御した。

高温容器に窒素を充填し、高温容器内を実験温度まで加熱した。実験装置をドラッグシールドカプセル内部に搭載し、落下塔最上部に固定した。高温容器内が実験温度で安定した後、液滴生成部で液滴を生成し、熱電対の温接点に懸垂した。微小重力実験においては、液滴生成部に実験直前まで室温の窒素を流しておくことができなかったため液滴生成部温度は最高で348 Kであった。実

Temperature History of an Evaporating Biomass-Fuel Droplet at High Pressures under Microgravity Conditions

Kentaro KANEKO, Hiroshi NOMURA, and Nozomu HASHIMOTO

験装置を落下させるのと同時に、液滴生成部で初期直径計測用の液滴画像を記録し、液滴を高温容器に挿入した。液滴の蒸発挙動を高速度ビデオカメラ（撮影速度：200 fps，露光時間：4.9 ms，画像サイズ：800X600 pix）で記録し、落下実験終了後に液滴直径履歴の計測および蒸発中に熱電対の温接点が液滴内部にあることの確認を行った。記録した液滴画像を自作の自動計測プログラムで解析し、液滴直径履歴を取得した。液滴温度履歴は、制御装置のA/D変換機（サンプリング周期：50 ms，分解能：0.1 °C）で取得し、生業装置内に記録した。両履歴は、懸垂線支持枠が実験部に静止した時刻を時間軸の原点として整理した。微小重力環境の実現には、日本大学生産工学部の小型落下塔（微小重力実験約1.1 s）を利用した。

実験パラメータは、初期液滴直径 $d_0$ ，雰囲気温度 $T_a$ ，雰囲気圧力 $P_a$ ，および燃料種である。燃料にはPME，正ヘキサデカンおよび軽油を用いた，雰囲気温度は，673から773 Kの範囲で変化させた。雰囲気圧力は，0.10から2.0 MPaの範囲で変化させた。初期液滴直径は，微小重力環境の実験では0.35 から0.45 mmで一定とし，通常重力環境の場合では0.50 から0.55 MPaの範囲で実験を行い，微小重力環境と比較する場合0.35から0.45 mmで一定とした。図2は，軽油の液滴直径の2乗履歴および液滴温度履歴である。この図を用いて液滴蒸発最終温度 $T_{de}$ を求める方法を説明する。液滴蒸発最終温度は初期上昇期間を経た圧の液滴温度履歴がほぼ直線的になる期間を直線近似した直線と，熱電対温接点が雰囲気に露出したことにより再度温度が直線手液に急上昇する期間を直線近似した直線の交点から求めた。液滴蒸発最終温度を求めた交点の正規化時刻を $t_{de}/d_0^2$ とし，液滴直径の2乗履歴が初期液滴直径の2乗履歴が初期液滴直径の2乗の50%から15%に減少する期間を最小2乗近似して液滴直径が0になるまで延長して求められる正規化液滴寿命を $\tau_k/d_0^2$ とした。

### 3 実験結果および考察

#### 3・1 液滴蒸発最終温度

液滴蒸発最終温度 $T_{de}$ を求めた交点の正規化時刻 $t_{de}/d_0^2$ と $\tau_k/d_0^2$ の比較を行った。PMEの大気圧の条件において得られた結果を図3に示す。各実験条件に付いて3回の実験を行い，全ての結果を図中に示した。いずれの雰囲気温度においても， $t_{de}/d_0^2$ と $\tau_k/d_0^2$ は一致しており，液滴最終温度は準定常的な蒸発が液滴消滅まで続いたと仮定したときの液滴蒸発最終温度を表していると考えられることができる。よって，PMEや軽油などの多細分燃料においては，微小量含まれる高沸点成分の影響を無視されてしまうことに注意しなければならない。

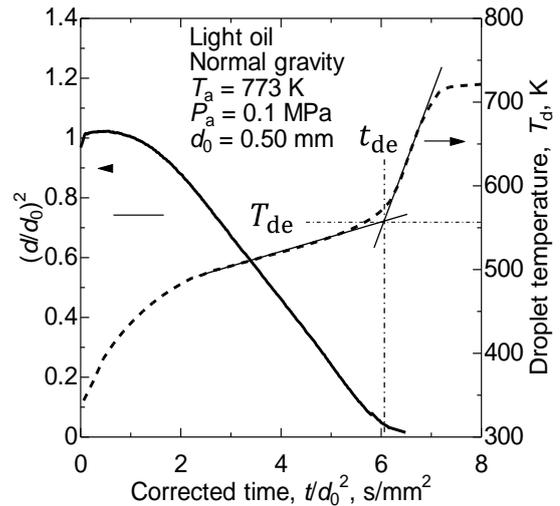


Fig.2 Definition of the droplet temperature at the end evaporation and the corrected evaporation lifetime.

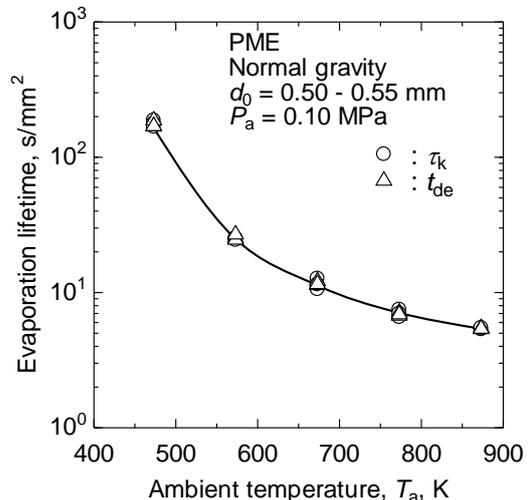


Fig.3 Comparison of evaporation lifetimes of PME derived from droplet temperature history and squared droplet diameter history as a function of ambient temperature.

図4に正ヘキサデカンの液滴蒸発最終温度の圧力依存性について示す。各実験条件について3回から5回の実験を行い，全ての結果を図中に示した。雰囲気圧力および温度の増大に伴い，液滴蒸発最終温度が上昇していることがわかる。いずれの雰囲気温度においても0.10 MPa付近では液滴蒸発最終温度が圧力の増大に伴って急激に上昇しているがそれ以降では徐々に上昇していることがわかる。これは，雰囲気圧力が増大すると液滴の沸点が上昇し，液滴蒸発最終温度も上昇するが，液滴蒸発最終温度は雰囲気温度に漸近するからである。

図5にPMEの液滴蒸発最終温度の圧力依存性について示す。PMEの雰囲気圧力が2.0 MPa，雰囲気温度が473 Kの条件で液滴蒸発最終温度のプロ

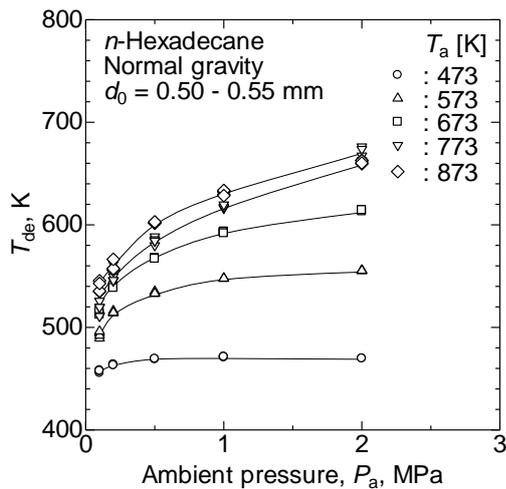


Fig.4 Droplet temperature at the end of evaporation as a function of ambient pressure of n-hexadecane.

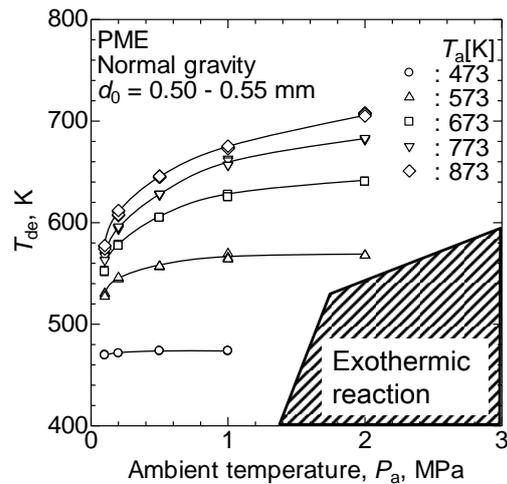


Fig.5 Droplet temperature at the end of evaporation as a function of ambient pressure of PME.

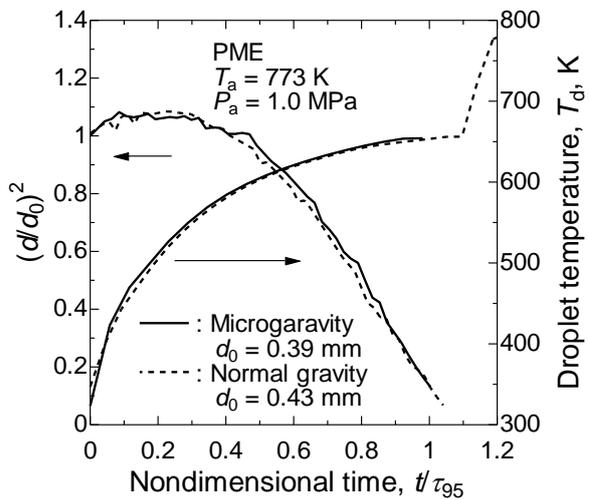
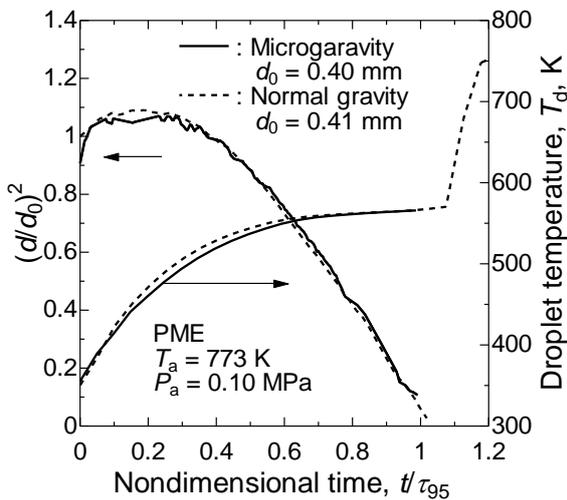


Fig.6 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of PME at atmospheric pressure and 1.0 MPa.

ットが記入されていないのは、この条件において PME液滴の内部で発生する発熱反応の影響により、図2のような方法で液滴蒸発最終温度を正確に算出することができなかったためである。PMEも正ヘキサデカンと同様に雰囲気温度および雰囲気圧力が上昇するに伴い、液滴蒸発最終温度が上昇していることがわかった。

### 3・2 微小重力実験

図6, 7および8に、それぞれPME, 正ヘキサデカンおよび軽油の微小・通常重力環境で得られた液滴直径の2乗履歴および液滴温度履歴を示す。時間軸は95 vol%液滴寿命 $\tau_{95}$ で無次元化した。どの燃料種においても、時間軸が無次元化された無次元液滴直径の2乗履歴および液滴温度履歴が微小重力環境の場合と通常重力環境の場合とほぼ

一致していることがわかる。PMEの場合は、蒸発途中で微小重力環境が終了して液滴が脱落したが、大気圧雰囲気および1.0 MPaの加圧雰囲気においても、微小重力環境下で得られたそれぞれの履歴と一致している。通常重力環境の蒸発の場合、蒸発中の液滴直径の変化によってグラスホフ数は大きく変化するが、ヌッセルト数は蒸発中ほぼ一定であることを実験結果は示していると考えられる。また、両重力環境で得られた液滴温度履歴が時間軸を無次元化することでほぼ一致したことにより、自然対流が液滴蒸発最終温度に及ぼす影響は、本実験精度においては無視できる程度であると推察される。各燃料について、微小重量環境および通常重力環境で得られた液滴蒸発最終温度を比較して図9に示す。正ヘキサデカンおよび軽油については、液滴蒸発最終温度に自然

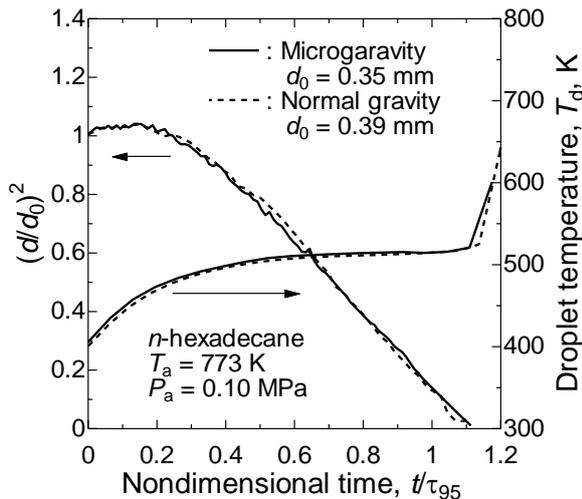


Fig.7 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of n-hexadecane.

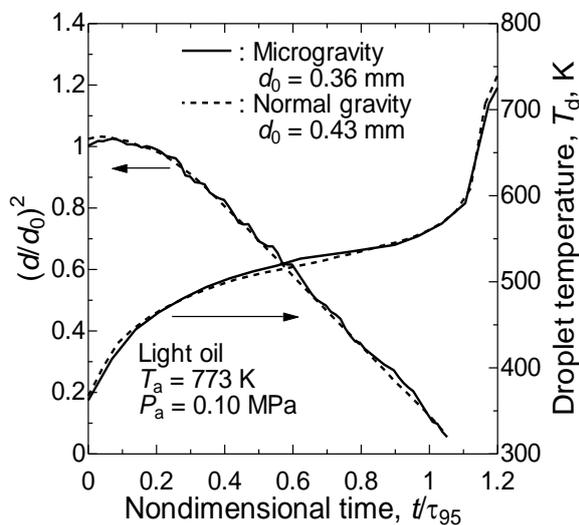


Fig.8 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of light oil.

対流が及ぼす影響が無視できる程度であることが確認できた。これは、湿球温度に及ぼす強制対流の影響が小さいのと同じ理由であると考えられる。PMEは蒸発途中で微小重力環境が終了したため、微小重力環境で液滴蒸発最終温度を取得することはできなかった。単一成分である正ヘキサデカンおよび多成分燃料である軽油の液滴蒸発最終温度が自然対流の影響を受けていないことから、PMEについても微小重力環境で得られる液滴蒸発最終温度は通常重力環境で得られたそれにほぼ一致すると推察される。

## 5 まとめ

微小重力環境および通常重力環境において、PME、軽油および正ヘキサデカンについて蒸発中の液滴温度計測実験を行った。得られた知見を以下に示す。

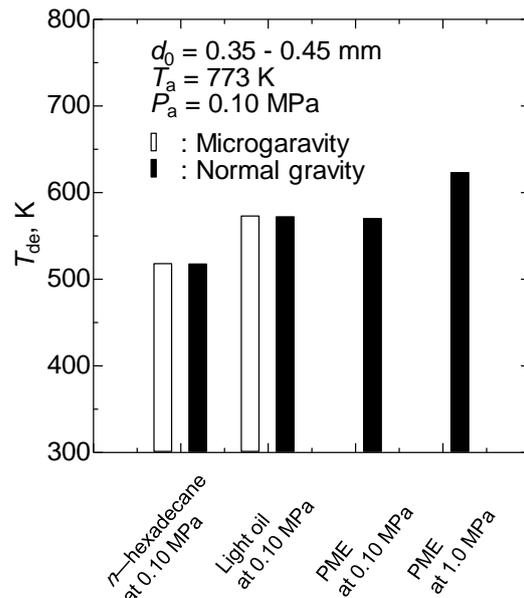


Fig.9 Droplet temperature at the end of evaporation under normal and microgravity conditions.

- (1) PMEおよび正ヘキサデカンは雰囲気温度および雰囲気圧力の上昇に伴って、液滴蒸発最終温度が上昇する。
- (2) 液滴温度履歴の時間軸を液滴寿命で無次元化することにより、微小重力環境で得られた液滴温度履歴と通常重力環境で得られたそれはほぼ重なる。
- (3) 液滴蒸発最終温度に及ぼす自然対流の影響は無視できる程度である。

## 「参考文献」

- 1) 浜崎和則, JAQIN Choesnul, 木下英二, パーム油メチルエステルによる渦流室式ディーゼル機関の燃焼特性, 機械学会論文集, B69(2003)p.1712-1718.
- 2) 山根浩二, 植田淳史, 嶋本讓, 直接噴射式バイオディーゼル燃料機関の燃焼および排気特性に及ぼす植物油種類と高圧噴射の影響, 自動車技術会論文集 32-2(2001)p.25-30
- 3) 鈴木真人, 野村浩司, 橋本望, 氏家康成, バイオマス燃料液滴の蒸発・燃焼と微小重力実験装置の開発, 微粒化シンポジウム講演論文集 17-58(2008)p.74-80.
- 4) 松本隆宏, 野村浩司, 氏家康成, 山崎博司, 橋本望, 高温・高圧環境におけるパームメチルエステル液滴の蒸発, 日本エネルギー学会論文集 19(2010)p.290-291.
- 5) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂 (1964)p.239-240.