

IIII 身近な宇宙，落下塔による微小重力実験 IIIII
(原著論文)

短時間微小重力環境を利用した高圧雰囲気におけるバイオマス燃料液滴の蒸発実験

野村 浩司¹・金子 堅太郎¹・橋本 望²

Experiments on Droplet Evaporation of Biomass Fuel at High-Pressures using Short-Term Microgravity Conditions

Hiroshi NOMURA¹, Kentaro KANEKO¹ and Nozomu HASHIMOTO²

Abstract

Microgravity experiments were performed on droplet evaporation of palm methyl ester (PME). Light oil and n-hexadecane were also examined as a reference fuel. Droplet temperature histories were obtained in addition to droplet diameter histories. Droplet temperature was measured with a K-type thermocouple (diameter: 13 μm). A small droplet (initial diameter: 0.30-0.40 mm) was employed for microgravity experiments in order to make effective use of short term microgravity. The droplet suspension system was improved to minimize the thermal effects of the suspension system on small droplet evaporation. Microgravity experiments at 773 K in the ambient temperature and from 0.1 to 2.0 MPa in the ambient pressure were performed with the CIT drop tower (microgravity duration: 1.1 s). It was found that the temporal variations of an evaporating droplet at normal and microgravity were almost identical when the time axis was normalized by the evaporation lifetime. The effect of natural convection on the droplet temperature at the end of evaporation was negligible.

Keyword(s): Droplet, Evaporation, Biomass fuel, Temperature measurement, Microgravity experiment

1. 緒言

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、既存の燃焼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^{1, 2)}、実機を用いた噴霧燃焼実験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用いて基礎データ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、その直径履歴を計測してきた。液滴蒸発の数値シミュレーションを高度に検証するためには、液滴直径履歴だけでなく、液滴温度履歴による検証も必要である。本報では、小型落下塔を用いて微小重力環境を実現し、燃料液滴の蒸発温度計測を行った。揮発性が低く蒸発に時間の要する燃料の液滴蒸発実験を微小重力時間の短い小型落下塔で行うためには、実験対象とする液滴の直径を小さくする必要がある。そこで、これまでの通常重力実験では 0.5~0.55 mm に設定していた液滴の初期直径を、本報の微小重力実験では 0.30~0.40 mm に設定した。将来的には実験精度を高め、0.30~0.35 mm の範囲に初期液滴直径を設定できるようにしたい。まだ小液滴を用いた燃料液滴の蒸発温度履歴の実験は成功率が低く、得られているデータの数は少ないが、ここに報告する。

実用化が期待されている植物由来バイオマス燃料の一つであるパームメチルエステル (PME) を用いて、液滴蒸

1 日本大学生産工学部機械工学科 〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1
Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Izumi-cho 1-2-1, Narashino, Chiba 275-8575, Japan
2 財)電力中央研究所 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
Central Research Inst. of Electric Power Industry, Nagasaka 2-6-1, Yokosukai, Kanagawa 240-0196, Japan
(E-mail: nomura.hiroshi@nihon-u.ac.jp)

発実験を行った。比較対象燃料として、単一成分の正ヘキサデカンおよび実用燃料である軽油の液滴蒸発実験も行った。雰囲気温度、圧力および燃料種を変化させて実験を行った。蒸発する燃料液滴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

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。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。この高圧容器は、国際宇宙ステーションの KIBO に設置される多目的実験ラック（MSPR）で使用することを想定して試作した小型の高圧容器である。内直径は 100 mm、内のり高さは 229 mm である。高圧容器内の昇圧は、高圧窒素を充填することで行う。昇圧に用いた窒素は高圧容器内に設置された高温容器の内部を充たし、燃料の自発点火を防ぐ。液滴は、液滴生成装置により高温容器下方の液滴生成部で生成され、液滴移動装置のアームに取り付けられた懸垂線に懸垂される。実験開始時には、液滴は懸垂線に懸垂された状態で液滴移動装置のアームにより高温容器下部に設けられたスリットから高温容器に挿入される。

Figure 2 に懸垂線支持枠の概略を示す。本報では 3 つのタイプの懸垂支持枠について性能評価を行った。支持枠 A は直径 1 mm のステンレス管で作られている。懸垂線支持枠に、直径 $7\ \mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバ（チビアルフ、(株)ニチビ製）を交差させて設置し、その交点に温接点が位置するようにアーチ状に直径 $13\ \mu\text{m}$ の K 種熱電対を設置した。液滴は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバの交点に懸垂した。懸垂線支持枠 B および C（直径 1 mm のステンレス管製）は、支持枠の高温室に挿入される部分を極端に減らし、代わりに直径 $78\ \mu\text{m}$ の SiC ファイバで、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバと熱電対を所定の位置に保持している。縦方向に設置された直線状の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバと温接点を頂点としたアーチ状の熱電対を、熱電対の温接点で交差させ、その交点に液滴を懸垂した。懸垂線支持枠 B の場合、横方向に直線状に張られた SiC ファイバから約 4 mm 上方に、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバと熱電対の交点を設置した。懸垂線支持枠 C の場合、アーチ状に張られた SiC ファイバの頂点から約 3 mm 上方に、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバと熱電対の交点を設置した。熱電対、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ファイバ、および SiC ファイバが交わる交点は、微量の CERAMABOND 569-T (AREMCO 社製) で接着した。

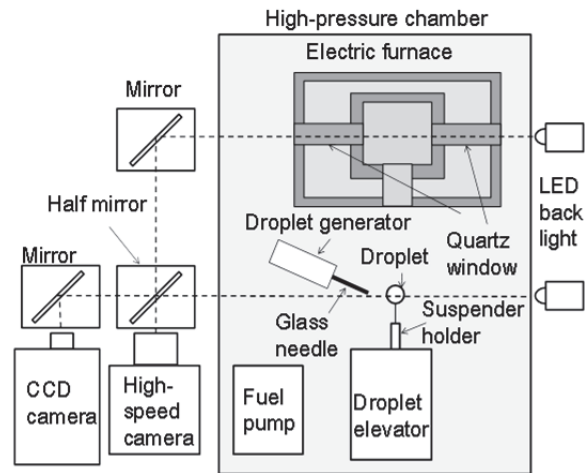


Fig. 1 Experimental apparatus.

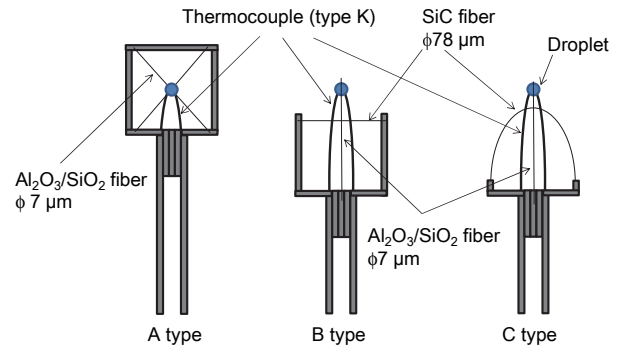


Fig. 2 Suspend holder.

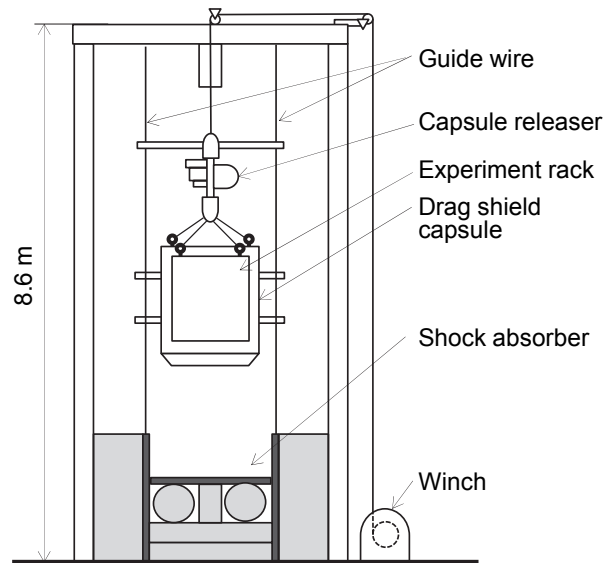


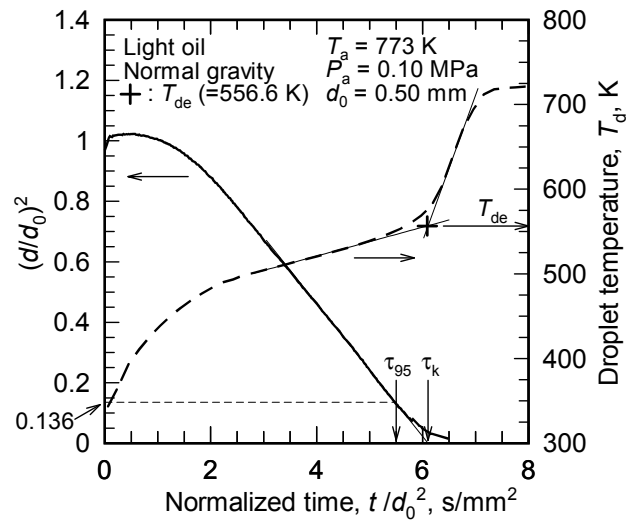
Fig. 3 CIT drop tower.

Table 1 Properties of fuels.

Property	Fuel	PME	<i>n</i> -hexadecane ⁷⁾	Light oil
Density @ 303 K	g/cm ³	0.8636	0.770 @ 293 K	0.8252
Viscosity @ 303 K	mm ² /s	5.627	-	3.292
Critical temperature	K	-	722	-
Critical pressure	MPa	-	14.1	-
Normal boiling point	K	-	560	-
Final boiling point	K	620	-	617
Carbon content	wt%	76.4	85	86.4
Hydrogen content	wt%	12.4	15	13.5

小型ピエゾポンプにより圧送された燃料は、テフロンチューブを介し、ガラス管を引き延ばして製作した先端直径約 40 μm 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。高温容器は内容器と外容器の二重構造になっている。内容器（内直径 30 mm, 内り高さ 30 mm）には電気シースヒータが巻かれ、外容器との間には断熱材が挿入されている。高温容器内温度は、液滴を蒸発させる位置から水平方向に約 9 mm 離れた位置で、シース直径 1.6 mm の K 種熱電対により計測し、シーケンサにより電気シースヒータの出力を電圧制御することで、任意の温度に安定させることができる。

実験は通常重力環境および微小重力環境で行った。微小重力環境を実現するため、**Fig. 3** に示される日本大学生産工学部 (CIT) 津田沼キャンパス内にある小型落下塔を用いた。実験装置を自由落下させることによって、微小重力実験を実現させる施設である。CIT 落下塔は、全高 8.6 m, 自由落下距離 5.4 m, 減速部 0.9 m であり、約 1.1 s の微小重力環境を実現できる。実験装置は実験ラックに配置し、実験ラックの外側に風よけ用のカプセルを装着する。カプセル落下中は、実験ラックはカプセル内を浮遊する。実験ラック底面とカプセルの隙間の初期値は、約 150 mm とした。実験ラックは、高さ 1020 mm, 外直径約 800 mm である。落下塔には 2 本のガイドワイヤが鉛直に設置されており、昇降時および着地時のカプセルの回転を防ぐ。カプセルの昇降はウインチによって行われる。ウインチは落下塔底部脇に設置されており、落下塔上部に取り付けられた 2 つの平滑車を介してワイヤがカプセル切り離し装置に接続されている。落下塔上部にはカプセル切り離し装置を固定するためのガイドレールが設置されている。カプセルの落下の衝撃を効率よく吸収するため、落下塔底部の減速部はスポンジマットとゴムボールで構成されている。ゴムボールは、実験装置の重量および落下距離に応じて空気の抜

**Fig. 4** Definitions of the droplet temperature at the end of evaporation and the evaporation lifetimes.

ける速さをパルプ群により調整することが可能である。

高压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。実験装置にドラッグシールドカプセルを装着し、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、実験直前まで液滴生成部に室温の窒素を流しておくことができなかつたため、液滴生成部温度は最高で 348 K であった。液滴の初期温度は、液滴寿命に影響を及ぼすが、液滴蒸発最終温度にはあまり影響を及ぼさないと考えられる。実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。液滴背後の LED ライトを上部のライトに切り替え、液滴の蒸発挙動を高速ビデオカメラ（撮影速度：200 fps, 露光時間：4.9 s, 画像サイズ：800 x 600 pix）で記録した。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³⁾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 変換器（サンプリング周期：50 ms, 分解能：0.1 °C）で取得し、制御装置内に記録した。両履歴は、懸垂線支持棒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。

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。燃料の物性値をまとめて **Table 1** に示す。雰囲気温度は、微小重力実験では 773 K とし、通常重力実験では 473 から 873 K の範囲で変化させ

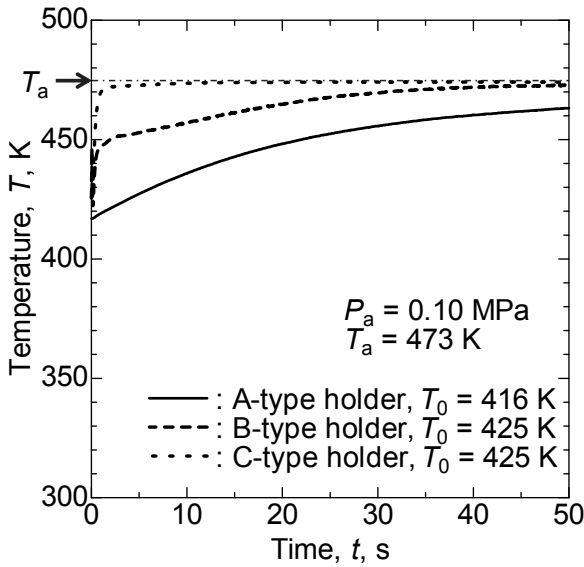


Fig. 5 Effect of suspender holder on temperature measurement.

た。雰囲気圧力は、0.10、1.0 および 2.0 MPa とした。初期液滴直径は、微小重力実験では 0.30~0.40 mm で一定とし、通常重力実験では 0.3~0.43 mm または 0.50~0.55 mm で一定とした。

Figure 4 は、軽油の液滴直径 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後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、熱電対温接点の露出により再度温度が直線的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} とし、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 乗法で直線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 τ_k と比較を行った。また、次節で用いる正規化 95 vol% 液滴寿命は、時刻の原点から、液滴の体積が初期液滴体積の 5% になるまでの正規化時間と定義した。正規化された液滴直径の 2 乗履歴より、液滴体積が初期液滴体積の 9% から 2% に減少する区間を最小 2 乗法で直線近似し、その直線から体積が 5%、すなわち $(d/d_0)^3 = 0.136$ になる正規化時刻を求めた。正規化 95 vol% 液滴寿命は、PME 液滴の低温雰囲気における蒸発のように液滴蒸発最後期に非常に蒸発が遅くなる条件^{3, 4)}、あるいは残留物が確認されるような条件⁵⁾の液滴蒸発寿命を評価する際に用いてきた液滴寿命である⁶⁾。本報においても、PME 液滴が雰囲気圧力 0.10 MPa、雰囲気温度 473 K の条件で蒸発した後に、残留物が観察されている。

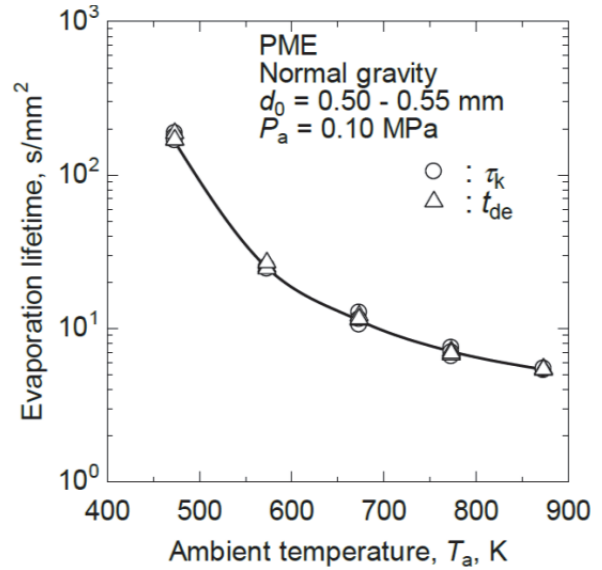


Fig. 6 Comparison of the evaporation lifetimes of PME derived from the droplet temperature history and the squared droplet diameter history as a function of ambient temperature.

3. 実験結果および考察

3.1 懸垂線支持枠の評価

液滴を懸垂せずに、高温容器に懸垂線支持枠 A、B および C を挿入して取得した温度履歴を Fig. 5 に示す。実線が懸垂線支持枠 A、破線が B、点線が C に設置された熱電対で取得された温度履歴である。時刻 0 s、すなわち熱電対の温接点が高圧容器中心に静止した時刻の熱電対指示温度 T_0 は、懸垂線支持枠 A を用いた場合、他の支持枠を用いた場合と比較して 9 K 低くなっている。これは、懸垂線支持枠 A の場合、熱電対の移動経路を熱電対が通過する前に懸垂線支持枠の上の横棒 (Fig. 2 を参照) が通過しているため、経路が冷やされたことが原因と考えられる。時刻 0 s 以降も、懸垂線支持枠 A を用いた場合、温度が雰囲気温度に収束するのに非常に長い時間を要している。熱電対を温度が一樣、物性値が均一な無限に長い円柱であると近似し、気相について軸対称一次元の熱伝導方程式を差分法により数値的に解くことによって求められた熱電対の温度履歴からは、雰囲気温度と初期温度の差の 95% に熱電対温度が達するまでの時間は約 60 ms であった。懸垂線支持枠 A を用いた場合、懸垂線支持枠静止後も支持枠が高温容器中心部の雰囲気を冷却していると考えられる。温度測定部に対する懸垂線支持枠の冷却作用を低減させるため、懸垂線支持枠の改良を行った。懸垂線支持枠 A の枠上部を削除した懸垂線支持枠 B を用いた場合、改善は見られたものの、熱電対指示温度が雰囲気温度と初期温度の差の 95% に

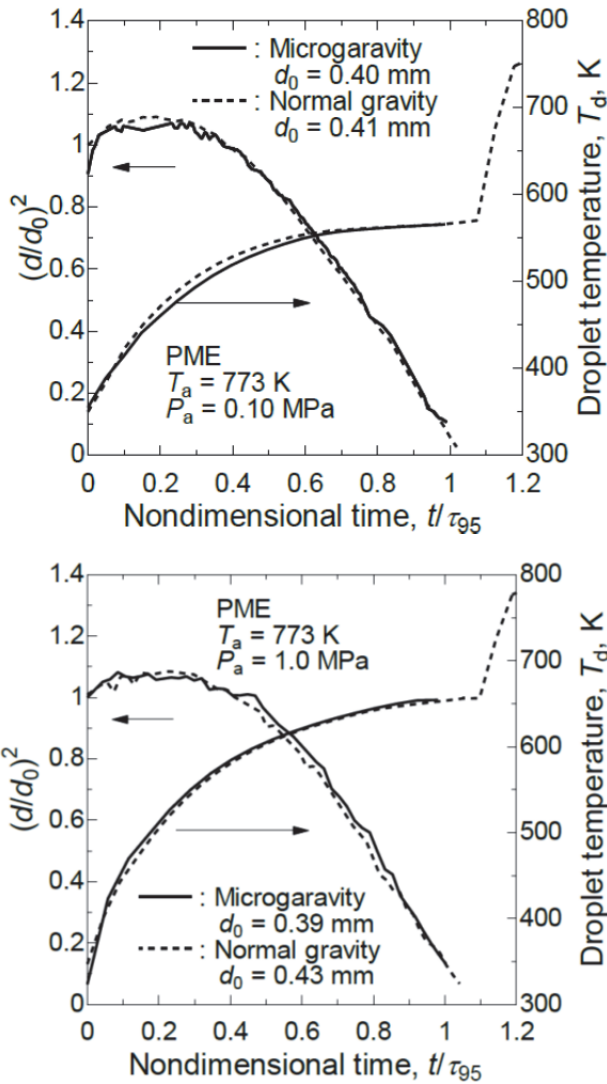


Fig. 7 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of PME at atmospheric pressure and 1.0 MPa.

達するまでの時間は約 33 s であった. 更に改良を行った懸垂線支持枠 C を用いた場合は, 熱電対指示温度が雰囲気温度と初期温度の差の 95% に達するまでの時間は 770 ms となり, 大幅な改善が見られた. よって, これ以降の実験には懸垂線支持枠 C を用いた.

3.2 液滴蒸発最終温度

大気圧・通常重力環境において得られた PME の t_{de} と τ_k を比較し, Fig. 6 に示す. 各条件について 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} と τ_k は一致しており, 液滴蒸発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最終温度を表していると考えられる. 軽油についても同様な結果が得られた. よって, PME や軽油などの

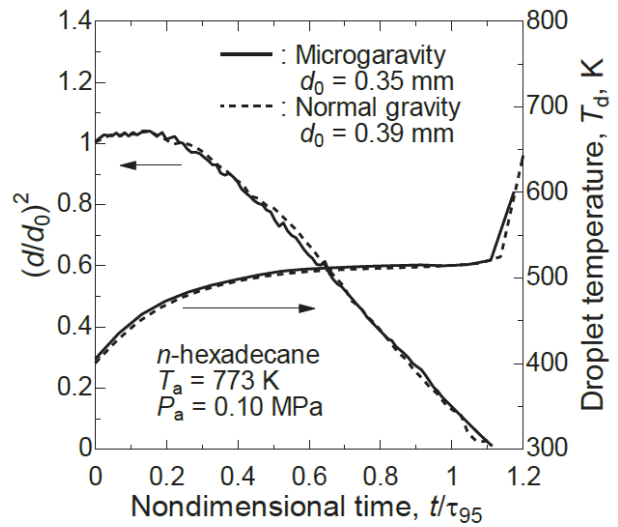


Fig. 8 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of n-hexadecane.

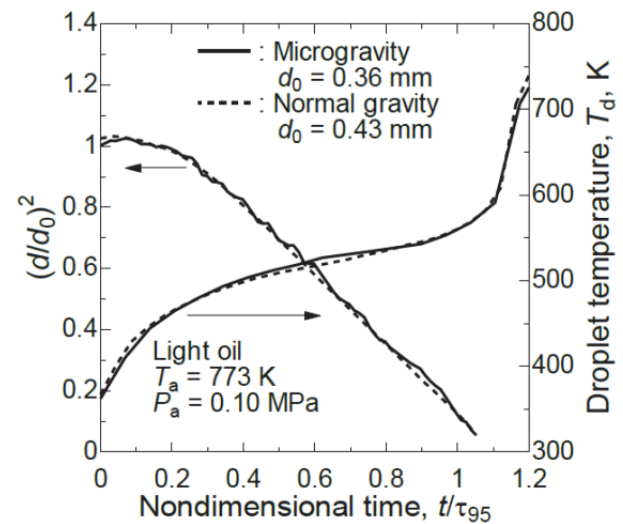


Fig. 9 Droplet temperature and squared normalized diameter histories of light oil.

多成分燃料においては, 微量含まれる高沸点成分が T_{de} に及ぼす影響は無視されてしまうことに注意しなければならない.

3.3 微小重力環境における液滴の蒸発温度履歴

Figures 7, 8 および 9 に, それぞれ PME, 正ヘキサデカンおよび軽油の微小重力環境および通常重力環境で得られた液滴直径 2 乗履歴および液滴温度履歴を重ねて示す. 時間軸は 95 vol% 液滴寿命 τ_{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 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でほぼ一致していることがわかる. PME

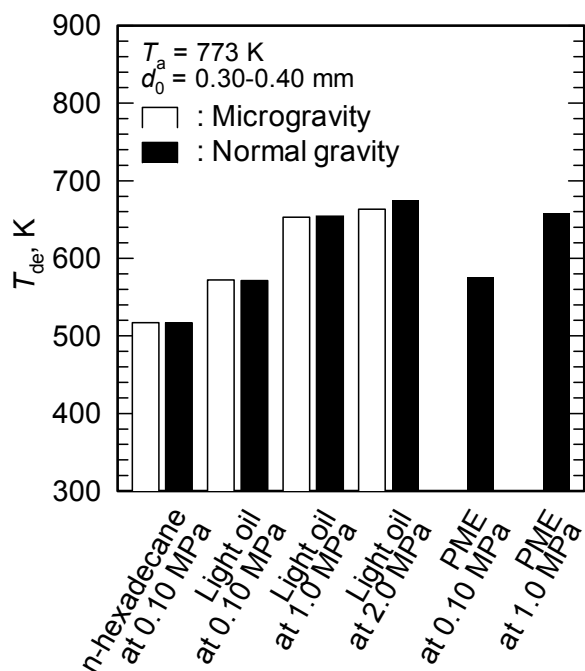


Fig. 10 Droplet temperature at the end of evaporation under normal and microgravity conditions.

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、微小重力環境下の両履歴は通常重力環境で得られたそれぞれの履歴と一致している。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、微小重力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 Fig. 10 に示す。各実験データは 1 回の実験で得られた値である。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⁸⁾のと同じ理由であると考えられる。すなわち、液滴温度の見積もりにおいては、ルイス数を 1 と見なしても大きな誤差を生じないことが結論づけられる。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。

以上の結果より、比較的微小重力実験が容易な液滴直径履歴取得を微小重力環境で行い、自然対流が液滴蒸発寿命に及ぼす影響を把握することによって、通常重力環境で得られた液滴温度履歴を微小重力環境で得られるであろう液滴温度履歴に変換することが可能であると考えられる。

4. 結言

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。得られた結果および知見を以下に示す。

- 微小重力環境において、蒸発中の燃料液滴の温度履歴を取得することに成功した。
- 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。
- 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。

謝辞

本研究は、JAXA ワーキンググループとして「宇宙環境利用科学委員会」から研究費の補助を受け、微小重力実験装置の製作を行った。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. Hamasaki, C. Jaqin and E. Kinoshita: Trans. Jpn. Soc. Mechanical Engineers B, **69** (2003) 1712 (in Japanese).
- 2) K. Yamane, A. Ueda and Y. Shimamoto: Soc. Automotive Engineers Jpn. Trans., **32** (2001) 25 (in Japanese).
- 3) M. Suzuki, H. Nomura, N. Hashimoto and Y. Ujiie: Atomization, **17** (2008) 74 (in Japanese).
- 4) M. Suzuki, H. Nomura and N. Hashimoto: Trans. JSASS Space Tech. Japan, **7** (2009) Ph_43.
- 5) M. Suzuki, H. Nomura and N. Hashimoto: Soc. Automotive Engineers Jpn. Trans., **40** (2009) 1351 (in Japanese).
- 6) H. Nomura: J. Comb. Soc. Jpn., **56** (2013) 23 (in Japanese).
- 7) R. C. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling: The Properties of Gases & Liquids 4th edition, 657, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- 8) 甲藤好郎: 伝熱概論, 239, 養賢堂, 1964.

(2014 年 9 月 1 日受理, 2014 年 10 月 7 日採録)