燃料液滴の蒸発実験における液滴懸垂・温度計測システムの改良

日大生産工(院) 〇村越 好泰 日大生産工(院) 楊 之晨 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介 北海道大学 橋本 望

1. 緒言

現代の生活に化石燃料は欠かせないものとなっているが、化石燃料は近い将来に枯渇することが予想されている。したがって、化石燃料を効率良く利用することが求められている。我々はディーゼルエンジンやガスタービンエンジンなど、世界的に広く利用されている噴霧燃焼に着目した。噴霧は液滴で構成されることから、単一液滴を用いた実験が広く行われている。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。

単一液滴を用いた蒸発や点火の実験におい て,液滴の雰囲気を液滴生成部環境から蒸 発・点火実験環境に移行させるのに要する時 間は、実験開始の初期条件を極力統一するた めに、短いことが理想である。また、今後行 う予定である短時間微小重力実験においては, 液滴の雰囲気を短時間で実験雰囲気に移行さ せることは微小重力時間の有効利用にも繋が る. 過去に行われた研究では、液滴移動速度 を速くすると液滴支持枠が大きく振動してし まうため,液滴を懸垂したまま液滴支持枠を 実験部に移動させることが困難であった[1]. そこで本報では、速い移動速度においても液 滴を懸垂したまま高温容器内へ移動できる液 滴支持枠を考案した.液滴生成部から実験部 への液滴移動時間を短縮したことにより、液 滴生成部温度が実験結果に及ぼす影響がより 顕著になる. そこで本報では, 液滴生成部温 度を 328±5 K の範囲に制限して蒸発実験を 行い, 蒸発速度係数と修正液滴寿命を測定し 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, 高圧容器,高圧容器内部モジュール,温度制 御装置,液滴観察装置から構成される.高圧

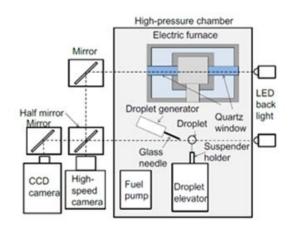
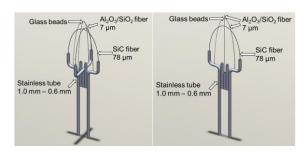


Fig.1 実験装置概略図



Type A Type B Fig.2 液滴支持枠

容器内部モジュールは高温容器,液滴支持枠,液滴移動装置,液滴生成装置,温度制御装置および計測装置から構成される.実験部は高温容器内であり,液滴生成部から鉛直上方に60 mm離れている.図2に,液滴支持枠を示す. Type A は速い移動速度で液滴を移動させるために改良した液滴支持枠, Type B は過去の研究において使用していた液滴支持枠(液滴移動時間:0.165 s)である.液滴支持枠は曲げ加工をしたステンレス管,直径78 μmのSiC ファイバおよび懸垂線によって構成される. Type A の液滴支持枠は銀ロウ付によって計6本のステンレス管を固定し,2本のSiC

Improvement of droplet suspension system for fuel droplet evaporation experiments Takahiro MURAKOSHI, Shishinn YO, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA and Nozomu HASHIMOTO

ファイバをアーチ状に張っている. 懸垂線に は直径 7 μm の Al₂O₃/SiO₂ を用い, SiC ファイ バと同様に2本の懸垂線をアーチ状に張り, 頂点を交差させてガラスで接着した. この交 点に液滴を懸垂する. また, 液滴温度を測定 する実験では、一方の懸垂線を直径 13 μm の K 種熱電対に変更し、懸垂線との交点に熱電 対の温接点を設置する.液滴の懸垂位置とな る懸垂線の交点は、SiC ファイバの約3 mm 上方とした. 液滴はピエゾポンプを用いてガ ラス針の先端から吐出する. ガラス針をカム 機構により往復運動させることで液滴支持枠 に液滴を懸垂させる. 液滴が 328±5 K の雰囲 気で生成されていることを確認するため,液 滴の水平方向に約9mm離れた位置にK種熱 電対を設置している. 液滴支持枠はスライ ダ・クランク機構により、高温容器内部まで 移動できる. 高温容器内部には K 種熱電対を 設置しており、PID 温調ユニットにより温度 制御を行う. 液滴観察装置は高速度ビデオカ メラ, CCD カメラおよびバックライトにより 構成される. 同時に2台のカメラで液滴を観 察するためにハーフミラーとミラーを介して 観測を行った. 液滴の観察にはバックリット 法を採用した.

昨年度までは実験温度の上昇に伴って液滴生成部温度が上昇していた. そこで本実験では高温容器内部に入れている断熱材をより断熱効果が高いものに交換した. また, 高圧容器には液滴生成部に水平方向から窒素を送ることができる給気孔を設けた. 液滴生成部温度が高い場合には液滴周辺に直接冷たい窒素を吹きかけることで, 液滴生成部温度を 328±5 Kに調整した. 給気量と排気量を同じになるように調整することで, 高圧容器内圧力を一定に保ちながら液滴生成部の冷却を行うことができる.

液滴の自発点火を防ぐため,窒素を用いて高圧容器内の掃気を行った.高温容器内部流を行った.高温容器内部液滴支持枠に懸垂させ,液滴を高温容器内部の最重させるのと同時にバックリッ集した.客間である。 動させるのと同時にバックリッ集した.実験は実験条件ごとに5回行った.実験は全で上れて変が表がでいた。 な実験条件ごとに5回行った.実験は全発とは実験条件ごとに5回行った。 変しまが最小のものを除いた3つのデータのありままが最小のものを除いた3つのデータのありままが最上である。 および最小のものを除いた3つのデータのありままが最上である。 がよび最小のものを除いた3つのデータのありままが、 が直とした。燃料には軽油の模擬燃料での初期である。 であったが、微小重力実験においてより広範囲の雰囲気条件

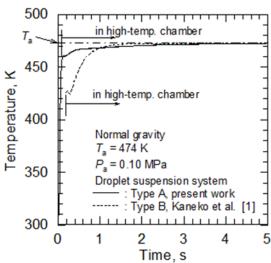


Fig.3 液滴支持枠が雰囲気温度に及ぼ す影響

で実験を行うことを図り、本実験における d_0 は $0.40~mm\pm5\%$ とした。液滴直径の計測には 自作の自動計測プログラム[1]を使用した.

3. 実験結果および考察

3.1. 液滴支持枠の評価

Type A の液滴支持枠を用い, 直径 0.4 mm の 液滴を 0.090 s で液滴生成部から実験部まで移 動させることに成功した. 2本の懸垂線の内の 1 本を熱電対に変更した Type A の液滴支持枠 を用い、液滴を懸垂せずに液滴支持枠を実験部 に移動させて取得した温度履歴を図3に示す. 雰囲気圧力 P_a は0.10 MPa, 雰囲気温度 T_a は473Kとした. 過去の実験と生成部温度を一致させ るため、Type A を用いた実験においても生成部 温度は調整しなかった. 比較のために、Type B の液滴支持枠を用いて同様な方法で過去に取 得された温度履歴も図中に示す. 液滴支持枠が 移動を開始した時刻を0sとしている. 前述の ように、移動時間は Type A が 0.090 s, Type B が 0.185 s である. 液滴支持枠が実験位置に静 止した直後における Type A および Type B の熱 電対指示温度はそれぞれ約464 K および約426 Kであり、Type Aの方が設定雰囲気温度に近い 温度を示していることがわかる. これは、Type Aの支持枠の場合,液滴懸垂部の上方に全く何 もないこと,熱電対と懸垂線を固定させるガラ スビーズに強度を持たせる必要がないために 小さくできることなどが理由と考えられる.

短時間で液滴を液滴生成部温度雰囲気から 実験温度雰囲気に移動させることに成功した が、1s付近から Type A の指示温度の方が Type B よりも若干低い値を示した. これは、Type A の方が Type B より液滴支持枠の部品が多いため、実験部を冷却する効果が若干増したからだと考えられる. 5s以降においては、Type A の指示温度も雰囲気温度に対して-2 K 以内になることがわかった. 以上のことから、Type A の液滴支持枠が液滴に及ぼす影響は小さいと考えられる.

図 4 に、液滴移動中の液滴温度履歴を示す. 液滴温度履歴のサンプリング周期は Type A が 0.01 s, Type B が 0.05 s であった. Type A の液滴支持枠を使用した実験と Type B の液滴支持枠を使用した実験で、液滴生成部温度に 3 K の違いがあったため、次式で液滴温度 T_d を無次元化した.

$$\frac{T_{\rm d} - T_0}{T_{\rm a} - T_0} \tag{1}$$

ここで、 T_0 は液滴生成部温度である。液滴支持枠の移動開始時刻から液滴温度の計測を開始している。時間は do^2 で正規化し、液滴支持枠が実験位置で静止した時刻を0としている。液滴支持枠が実験位置に静止した直後におけるType A 液滴支持枠を用いて計測された無次元温度は0.077であるのに対し、Type B 液滴支持枠を用いた場合のそれは0.139であった。Type A 液滴支持枠を用いる場合には液滴初期直径を小さくしたが、移動時間を短縮したことによって、実験部に液滴が静止した時の液滴温度は低くなったと考えられる。

3.2. 液滴温度履歴および直径履歴

正へキサデカン液滴を Type A 液滴支持枠に 懸垂し、液滴の液滴直径履歴と液滴温度履歴を 取得した。図 5 に結果を示す。液滴支持枠が実 験位置で静止した時刻を正規化時間で0としている。生成部温度は 308 K, d_0 は 0.41 mm であった。約 0.3 s/mm²以降,液滴温度はほぼ一定となり,無次元液滴直径の二乗はほぼ直線的に減少していることがわかる。

3.3. 蒸発速度係数

図 6 に、 P_a が 0.10 MPa の条件において計測された正へキサデカンの蒸発速度係数 k を T_a の関数として示す。本実験結果と過去の結果はほぼ等しい値を示している。また、 T_a が 873 K の条件において、過去に得られた k よりも本実験で得られたk の方が若干小さいことがわかる。これは、本実験と過去の実験では液滴生成部温度が異なることが理由と考えられる。表 1 に本実験および過去の実験における生成部温度の平均値を示す。過去の実験における生成部温度のデータは取得していなかった。そのため、過

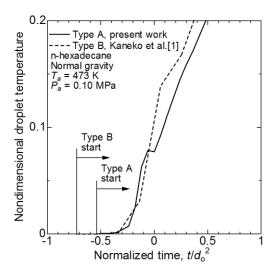


Fig.4 移動中の液滴温度履歴の比較

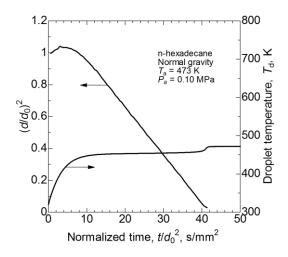


Fig.5 正ヘキサデカンの液滴直径履歴 および温度履歴

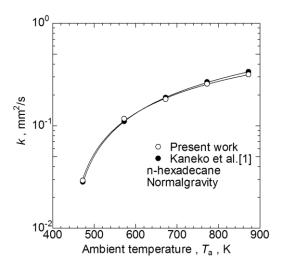


Fig.6 正ヘキサデカンの蒸発速度係数

去の実験における生成部温度は、過去に Type B の液滴支持枠を用い、懸垂線として K 種熱電対 を採用して得られた液滴温度履歴から,移動開 始前の液滴温度を求めた. なお, 生成部温度と 生成部における液滴温度がほぼ一致すること を確認している. 表 1 から, 過去の実験では Taが 573 K以下の条件では生成部温度が 323 K よりも低く, また, Taが 873 K の条件では 333 K よりも高くなっていることがわかる. Taが高い 条件の液滴蒸発においては、蒸発の後半まで液 滴温度が上昇し続ける. k は $(d/d_0)^2$ が 0.5 から 0.15 に減少する期間を最小2乗近似した直線 の傾きの絶対値と定義しているので、蒸発期 間後半まで液滴初期温度が影響を及ぼし、時 刻Os(液滴が実験部に静止した時刻)におけ る液滴温度が低い本実験の k が、雰囲気温度 873 K において小さく測定されたと考えられ る.

3.4. 正規化 95vol%液滴寿命

図7に、Paが 0.10 MPa における正へキサデ カンの正規化 95vol%液滴寿命 τ 95/ d_0^2 を雰囲気 温度の関数として示す. 正規化 95vol%液滴寿 命は Ta が 473 および 573 K の条件においては ほぼ同じであった. また, 673 K以上の条件に おいて、過去に得られた正規化 95vol%液滴寿 命よりも本実験で得られたそれの方が大きか った. Ta が473 および573 Kの条件においては, 液滴生成部温度が高いことが液滴寿命を短く し、移動速度が速いことが液滴寿命を長くした ため、両効果が相殺し、ほぼ同じ値を示したと 考えられる. 一方,773 K以上の条件において は、本実験の方が液滴生成部温度が低いため、 移動時間が短くなったことと相まって正規化 95vol%液滴寿命が長くなったと考えられる. し たがって, 液滴寿命が液滴支持枠の移動時間と 比較して短い条件においては、液滴支持枠の移 動時間が正規化 95vol%液滴寿命に及ぼす影響 が大きいと考えられる.

4. 結言

小型落下塔の微小重力時間を有効に活用するため、初期直径を小さくして液滴蒸発実験を行った。液滴直径の減少に伴って、高温容器に液滴を挿入する間の液滴温度上昇が増大するため、液滴移動時間を短縮した。高速移動に伴う液滴の脱落を防止するため、液滴支持枠を改良した。通常重力環境、雰囲気圧力0.10 MPa の条件において雰囲気温度を473から873 K の範囲で変化させ、正ヘキサデカンの蒸発速度係数および正規化 95vol%液滴寿命を取得し

Table.1 各雰囲気温度における生成部温度

Ambient temperature [K]	473	573	673	773	873
present work [K]	323.6	324.6	330.8	325.4	327.4
Kaneko et al.[1] [K]	314.7	315.4	323.6	328.5	341.4

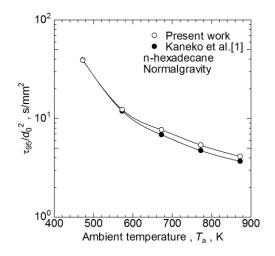


Fig.7 正ヘキサデカンの正規化 95vol%液滴寿命

た. また、液滴生成部の温度を 328±5 K の範囲で一定とした. 得られた知見を以下に示す.

- 新たに開発した液滴支持枠を用いることで、直径 0.4 mm ± 5%の正へキサデカン液滴を 0.090 s で高温容器内の実験部に移動させることができた。
- 2) 液滴初期直径を小さくして実験を行った が、移動時間を短縮したことにより、実験 部到達時の液滴温度は低くなった.
- 3) 液滴の移動時間は、雰囲気温度が高い条件 以外では、蒸発速度係数にはあまり影響を 及ぼさない。
- 4) 液滴寿命が短い条件ほど、液滴の移動時間 が液滴寿命に及ぼす影響は大きい.

「参考文献」

1) 金子堅太郎, 他, 高温・高圧力環境におけるパームメチルエステル液滴の蒸発温度 履歴, 微粒化シンポジウム講演論文集, 19(2013) 447-452.