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)	○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±5K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



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.高温容器内部の 温度を実験温度まで上昇させた.液滴を液滴 支持枠に懸垂させ,液滴を高温容器内部へ移 動させるのと同時にバックリット画像の録画 と温度測定を行い,データを収集した.実験 は実験条件ごとに5回行った.実験は全て通 常重力環境で行った.液滴寿命および蒸発 度定数は,得られた5つのデータのうち最大 および最小のものを除いた3つのデータの平 均値とした.燃料には軽油の模擬燃料である 正へキサデカン用いた.過去の実験での初期 液滴直径 doは 0.5~0.55 mm 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



で実験を行うことを図り、本実験における do は 0.40 mm±5%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 Paは0.10 MPa, 雰囲気温度 Taは473 K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464K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TypeA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、TypeA 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.5 s 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 d_0^2 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, do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, Pa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 Ta 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, Ta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.5 正ヘキサデカンの液滴直径履歴 および温度履歴





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/d₀)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/do²を雰囲気 温度の関数として示す. 正規化 95vol%液滴寿 命はT_a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573K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、正へ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	各雰囲気温周	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.
- 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」

 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.