

燃料液滴列の自発点火限界近傍の点火挙動に関する研究

－ 点火までの蒸発挙動 －

野村 浩司 (日大), 菅沼 祐介 (日大), 森上 修 (九大), 橋本 望 (北大), 稲富 裕光 (JAXA)

Research on spontaneous ignition of fuel droplet array near ignitable limit

(Evaporation behavior before spontaneous ignition)

Hiroshi Nomura*, Yusuke Suganuma*, Osamu Moriue**, Mozomu Hashimoto***, Hiromitsu Inatomi****

*Nihon Univ., Narashino, Chiba 274-8575

E-Mail: nomura.hiroshi@nihon-u.ac.jp

**Kyusyu Univ., Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

***Hokkaido Univ., Sapporo, Hokkaido 060-0808

****ISAS/JAXA, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210

Abstract: Droplet evaporation experiments in high-pressure environments were performed at microgravity produced by the COSMOTORRE drop tower. The purpose is to improve the simulation code of droplet evaporation, which will help us to analyze results of droplet ignition experiments planned to be performed with a TEXUS rocket. Droplet diameter histories were obtained successfully at microgravity. Repeatability of the experiments was confirmed. Normalized droplet evaporation lifetimes were derived from the droplet diameter histories. At sub-critical ambient pressures, the normalized droplet evaporation lifetime increases with the increase in ambient pressure, and then decreases. At super critical ambient pressures, it tends to increase with the ambient pressure.

Key words; Droplet evaporation, High pressure, Spontaneous ignition, TEXUS rocket experiment

1. はじめに

内燃機関は環境負荷低減という社会的な要求を受け、機関の性能向上・小型化・排気浄化が課題になっている。これらの課題を解決する鍵が内燃機関燃焼室内の詳細な燃焼現象解明である。これまで微小重力時間の制約から、自発点火限界近傍の燃料液滴の冷炎挙動を微小重力環境で調べた例はない。自発点火限界近傍の実験データ取得により、自発点火挙動の雰囲気温度依存性が内挿により広範囲に亘って予測可能になると期待される。また、これまで実験が困難であるが故に微小重力実験が行われることがほとんど無かった液滴群の自発点火を研究対象とすることにより、微粒化(「きぼう」第2期後半テーマ) → 自発点火(本提案) → 火炎の燃え広がり(「きぼう」第2期前半テーマ)という実用燃焼器内の噴霧燃焼の一連の過程の理論的な連携が図れる。

点火限界近傍の液滴列の点火は、燃料の蒸発から点火までの過程に時間を要するため、強く自然対流の影響を受ける。点火限界近傍の液滴・液滴列の点火挙動の観察には、長時間の微小重力実験が必須である。現在計画している宇宙実験提案が TEXUS ロケット実験、更にその先に ISS 実験を目指している背景はそこにある。TEXUS ロケット実験では、装置の制約から大気圧雰囲気で行う計画である。実験目的は、

・室温状態から高温空気に曝される複数燃料液滴の点火限界近傍の自発点火における液滴間干渉の影響

の解明(干渉の影響の正負、点火の起こる位置)

- ・熱炎は発生しないと予想される大気圧雰囲気において冷炎の挙動の詳細観察
 - ・単一液滴、二液滴、液滴列の比較(境界条件の違い)
 - ・数値計算結果の検証
- である。

計画中の TEXUS ロケット実験で得られるデータは、大気圧雰囲気における自発点火限界近傍の液滴・液滴列の点火挙動に関するデータである。大気圧雰囲気では冷炎のみが発生すると予測している。冷炎発生後に熱炎が発生する二段点火は加圧雰囲気でないとは観察できない。落下塔実験は短時間微小重力環境であるため、点火限界付近の点火挙動観察は行えないが、短時間で点火が起こる比較的雰囲気温度の高い条件において実験データを取得することはできる。よって、落下塔実験の目標は、高圧・高温雰囲気における液滴・液滴列の自発点火に関連する実験データ取得である。今年度は、自発点火に至るまでの過程に着目し、コスモトール落下塔を使用して高温高圧雰囲気における燃料液滴の蒸発実験を行った。本報は、落下塔実験の結果速報である。

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

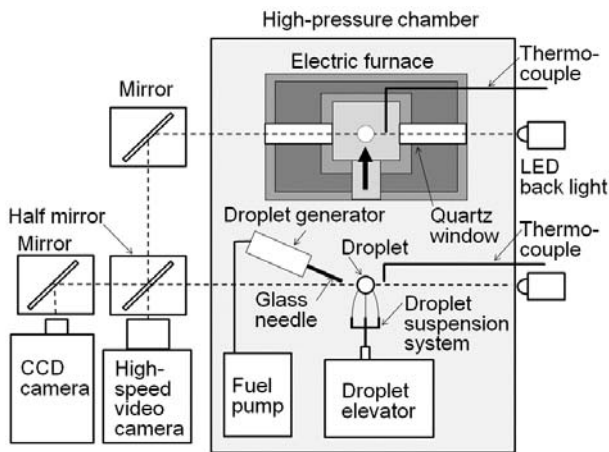


Fig.1 Experimental apparatus.

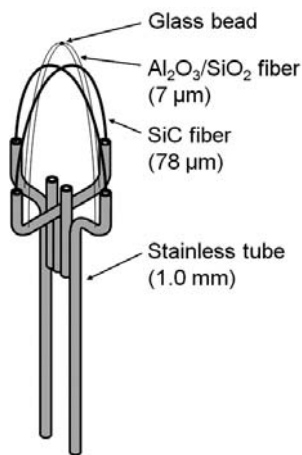


Fig.2 Droplet suspension system.

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．高圧容器内部モジュールは高温容器，液滴支持棒，液滴移動装置，液滴生成装置，高温容器および熱電対から構成される．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，液滴支持棒を示す．液滴支持棒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．液滴支持棒は銀ロウ付によって計 6 本のステンレス管を固定し，懸垂線を支えるための 2 本の SiC 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 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 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．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棒に液滴を懸垂させる．液滴生成部温度を計測するため，液滴の水平方向に約 9 mm 離れた位置に K 種熱電対を設置

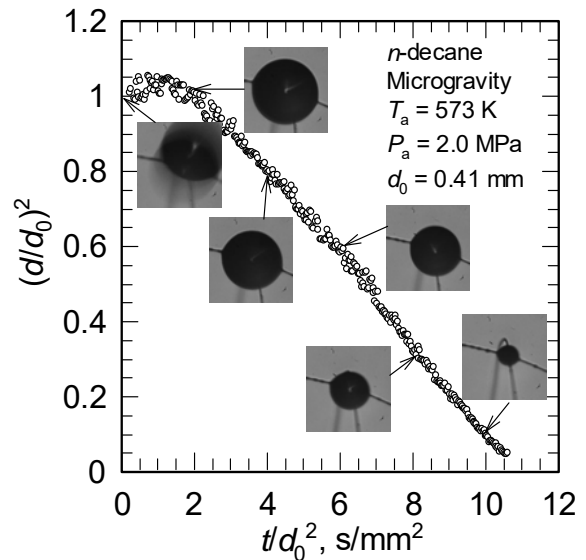


Fig.3 Squared droplet diameter history.

している．液滴支持棒はスライダ・クランク機構により，高温容器内部まで移動させる．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．液滴の観察にはバックリット法を採用した．

液滴の自発点火を防ぐため，窒素を用いて高圧容器内の昇圧を行った．高温容器内部の温度を実験温度まで上昇させた．液滴を液滴支持棒に懸垂させ，液滴を高温容器内部へ移動させるのと同様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．燃料には，TEXUS ロケット実験計画と同じ正デカン（臨界温度：618 K，臨界圧力：2.12 MPa）を使用した．微小重力実験は北海道赤平市にあるコスモトール落下塔（重力レベル $>10^{-3} G_0$ ）を用いて実験を行った．

液滴初期直径 d_0 は $0.4 \text{ mm} \pm 10\%$ とした．雰囲気温度 T_a は，2.5 s の微小重力時間で初期直径 0.4 mm の液滴が蒸発を完了する 573 K とした．雰囲気圧力 P_a は 0.10 から 3.0 MPa の範囲で変化させた．各雰囲気条件で 1~2 回の微小重力実験を行い，計 9 回分のデータを取得した．液滴直径の計測には，自作の画像解析プログラム⁽¹⁾を使用した．

3. 実験結果

図 3 に，雰囲気温度 573 K，雰囲気圧力 2.0 MPa の微小重力環境で取得された液滴直径履歴を示す．縦軸は液滴直径を初期液滴直径で除した無次元液滴直径の 2 乗であり，横軸は時間を初期液滴直径で除した正規化時間である．時刻の減点は液滴が高温容器内の実験位置に到達した時刻である．図中の画像

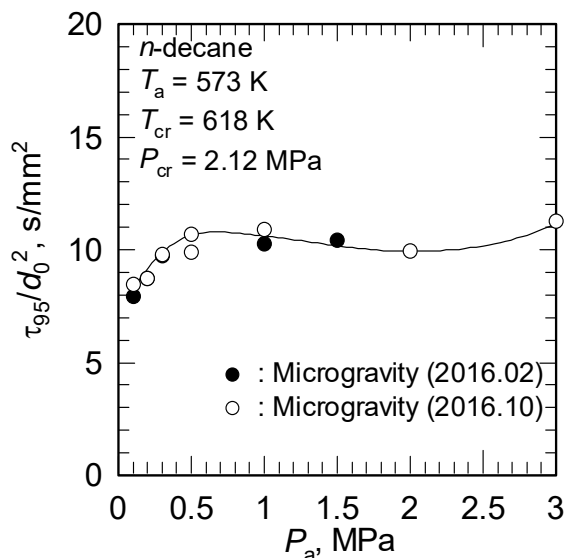


Fig.4 Normalized droplet lifetime of 95 vol% evaporation as a function of ambient pressure.

は、それぞれの時刻に撮影された液滴のバックリット画像を示している。実験位置に到達した直後の液滴は振動して変形しているが、振動が減衰した後はほぼ球形を保っている。初期加熱期間を経た後、準定常蒸発理論に則り、液滴直径の2乗はほぼ直線的に減少している。液滴直径履歴から、図4に正規化95vol%液滴寿命を計測した結果を示す。正規化95vol%液滴寿命は、液滴体積が初期体積の5%になったときの修正時刻である。液滴蒸発速度の一つの指標である。図中には、昨年度取得したデータの一部も記載した。昨年度の結果と今年度の結果は、概ね一つの曲線上に存在しているので再現性は得られていると考える。雰囲気圧力0.5 MPaで行った2回の実験の結果が約10%異なっている原因については今後精査する。雰囲気温度573 Kの条件では、雰囲気圧力の増大に伴って正規化95vol%液滴寿命は増大し、その後緩やかに減少することがわかった。また、雰囲気圧力が燃料の臨界圧力を超えると再び緩やかな増大に転じることもわかった。

4. 結言

コスモトール落下塔を使用した微小重力実験を9回行い、液滴蒸発に及ぼす雰囲気圧力の影響を調べた。全ての実験で蒸発履歴を取得できた。また、昨年度取得したデータとも食い違いは生じず、実験の再現性が確認できた。今後、液滴が高温容器内の実験位置に置かれた時点の液滴温度を地上実験で取得して蒸発実験の初期条件を確定し、JAXA研究WG活動中に準備した液滴蒸発シミュレーションコードによる計算結果との比較を行う。比較結果は、シミュレーションコードの高度化に反映させる。

謝辞

本実験は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙環境利用専門委員会により公募された平成28年度短時間微小重力実験テーマとして行われた。貴重な実験機会を頂いたことに謝意を表す。

参考文献

- 1) H. Nomura, T. Murakoshi, Y. Sukanuma, Y. Ujiie, N. Hashimoto, and H. Nishida; Microgravity Experiments of Fuel Droplet Evaporation in Sub- and Supercritical Environments, *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 36, DOI: 10.1016/j.proci.2016.08.046 (2016).