

微小重力場における燃料液滴の自発点火モデルに関する研究

高橋 晶世 (日本大), 齊藤 允教 (日本大), 菅沼 祐介 (日本大), 三上 真人 (山口大), 嶋田 徹 (JAXA), 菊池 政雄 (JAXA), 石川 毅彦 (JAXA), 稲富 裕光 (JAXA), Eigenbrod Christian (ZARM), 森上 修 (九州大), 高橋 賢一 (日本大), 野村 浩司 (日本大), 田辺 光昭 (日本大)

Study on Spontaneous Ignition modeling of Fuel Droplets under Microgravity

Akiyo Takahashi*, Masanori Saito, Yusuke Suganuma, Masato Mikami, Toru Shimada, Masao Kikuchi, Takehiko Ishikawa, Yuko Inatomi, Eigenbrod Christian, Osamu Moriue, Kenichi Takahashi, Hiroshi Nomura, Mitsuaki Tanabe

*Nihon Univ., Funabashi, Chiba 274-8501

E-Mail: takahashi_akiyo@aero.cst.nihon-u.ac.jp

Abstract: The authors have been working under the theme "Clarification of the interference effects of droplets on cool flame occurrence near spontaneous ignition limit". As part of this, we have developed a simple numerical calculation model that simulates the spontaneous ignition process of droplets, and experiment devices for the space experiments on a sounding rocket. Evaporation model was developed and incorporated into numerical model of droplet array spontaneous ignition. In addition, a new droplet array combustion unit was developed and employed for droplet array evaporation experiments in the drop tower in order to obtain the verification data for numerical simulation.

Key words: Sounding rocket, PHOENIX, Droplet array, Spontaneous ignition

1. はじめに

エンジン燃焼で重要な液体噴霧の自発点火機構解明のため、PHOENIX-II プロジェクト¹⁻⁴⁾が進められている。炭化水素系燃料では、熱炎発生前に冷炎と呼ばれる温度の低い火炎が発生し、その後の熱炎発生時期に影響を与えている。複数液滴が存在する場合の冷炎の発生箇所や発生時期を明らかにすべく、観測ロケットによる微小重力環境下で *n*-Decane 液滴列の自発点火実験を実施予定である。準備研究として、実験の予測と解析のためのツールの開発を目指し、昨年度の前ロードイング研究で、汎用コードを用いた数値計算手法の確立を行った²⁾。昨年度は、液滴の蒸発および液滴表面の温度を、過去の実験結果に基づいた分布を境界条件として与える簡略化手法を採用した。今年度は数値計算モデルの高度化を目標として、蒸発を数値計算で解くコードを、汎用コードを用いず独自に開発した。また、蒸発の検定データの取得のため、ロケット実験で採用予定の燃焼容器よりも高温まで昇温可能な燃焼容器の開発を行い、本学が所有する落下塔を使用して検証用データの取得基盤の整備を行った。

2. 軸対称 2 次元数値モデルへの蒸発モデル組み込み

球状の液滴の列では、全燃料液滴の中心を通る軸をとると、軸対称座標系が設定でき、3 次元現象を 2 次元的に解析することができる。本研究では、これまで簡略化のために、液滴を、直径 1 mm の固体球表面からの質量湧き出しで模擬してきた。最初の 1 秒間

を加熱期間とし、蒸発なし、表面温度が 300 から 400 K に時間に比例して上昇するものとし、その後 9 秒間は表面温度および蒸発定数一定で 1 mm 液滴と同量の蒸気を発生する湧き出しとしてきた²⁾。

今年度はコードを独自開発し、そのコードへ蒸発モデルを組み込んだ。解析場は大気圧一定と考え、1 気圧下の蒸気圧曲線の式を用いた。正デカンに関する潜熱や蒸気圧曲線の数値は全て NIST データに基づいた⁵⁾。また、*n*-Decane の必要な熱物性値は KUCRS の出力に基づいた⁶⁾。の本コードで使用した蒸発モデルを以下に示す。

$$\dot{w}_{decane} \times \frac{V}{A} \times L = q_T \Big|_{r=r_{l-}} - q_T \Big|_{r=r_{l+}}$$
$$\dot{w}_{decane} = \left(\frac{P_{vap}}{R_{decane} T} - \rho_{dec} \Big|_{r=r_{l+}} \right) / dt$$

\dot{w}_{decane} はデカンの質量発生率、 V は気液界面に隣接するセルの体積、 A は液滴の表面積、 L は蒸発潜熱、 q_T は熱伝導による熱流束である。 r_{l-} 、 r_{l+} は気液界面の液相側、気相側を示している。液滴表面温度は蒸発潜熱と熱伝導のバランスで定まる。液滴半径は不変とした。

これによって、液滴表面の非定常な温度変化を再現できた。また 2D コードの作動を確認できた。Fig. 1 に液滴表面温度の時間履歴を示す。時間刻みはクーラン条件に基づいて毎ステップ求めた。Fig. 2 に 2D コードの出力例を示す。コードは液滴内部も解析対象としており、液滴中心位置 0.01 m を中心に、半径方向へ向かって温度が変化していることが確認でき

た。なお、液滴半径は 5×10^{-4} m である。

ただし、現状の 2D コードは、簡便のため理想化・単純化を行っている。例えば、移流の無視や、空気の密度一定などである。今後 2D コードによる気相反応の再現までを目指して、まずこれらの課題を克服し、次に液滴径の変化、気相反応と、継続的に改良を実施する。

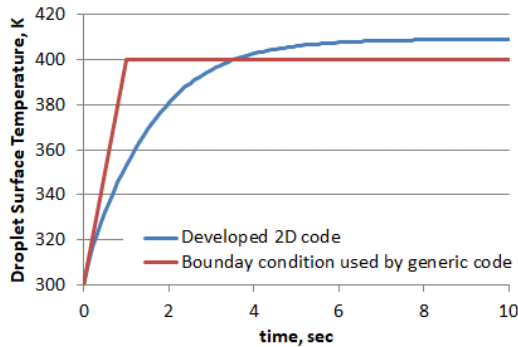


Fig. 1 Droplet Surface Temperature.

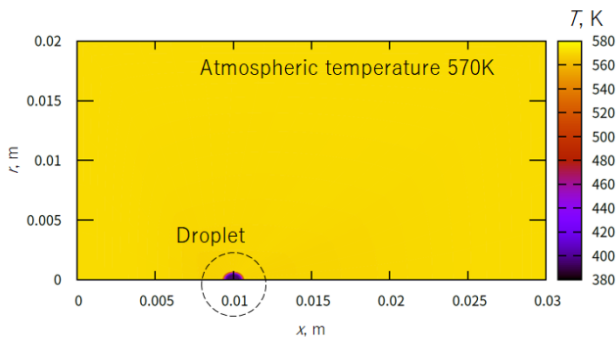


Fig. 2(a) Temperature Distribution.

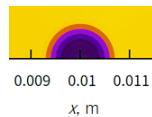


Fig. 2(b) Enlarged View of Around Droplet.

3. 蒸発実験用燃焼容器製作

数値計算検証用の基礎データ取得基盤整備のため、落下塔での実験でも検証できるよう高温型の燃焼器の開発を新たに行った。燃焼容器の写真を Fig. 3 に示す。

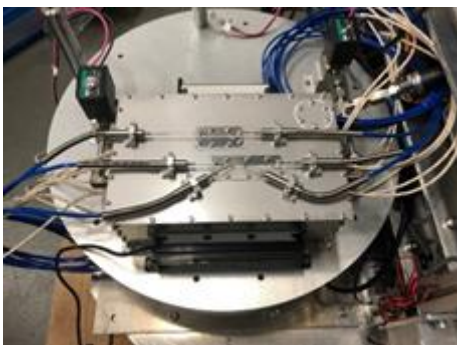


Fig. 3 High Temperature Furnace for Drop Tests.

また、Fig. 4 に燃焼器に設置した熱電対と液滴列との位置関係、Fig. 5 に FM を想定した装置構成にて実施した燃焼器の昇温試験の結果を示す。温度は Fig. 4 に示す位置 a—e にて K 型熱電対を用いて取得した。図より、目標温度の 610 K まで約 23 分で到達し、30 分程度で温度が安定している様子がわかる。以上より、要求温度までの昇温性能が確認できた。また、Fig. 6 の結果より、液滴近傍における各熱電対の温度のばらつきも最大 5.9 K と、要求性能である 10 K の範囲に収まることが確認できた。

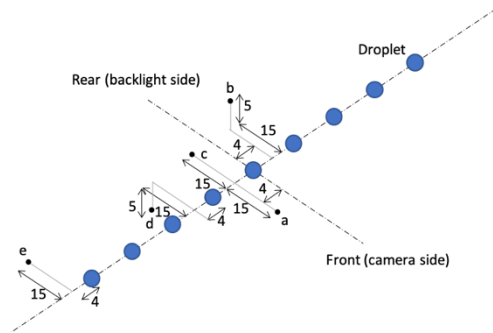


Fig. 4 Schematic of Thermocouple Arrangement

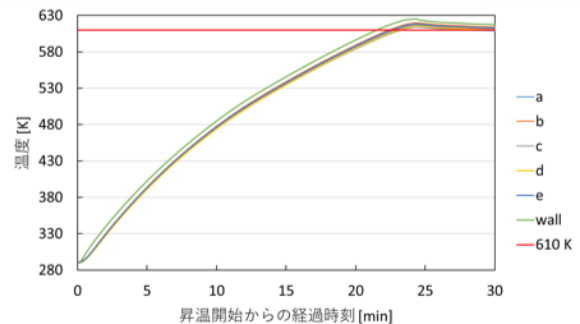


Fig. 5 Temperature Time History (0-30 min.)

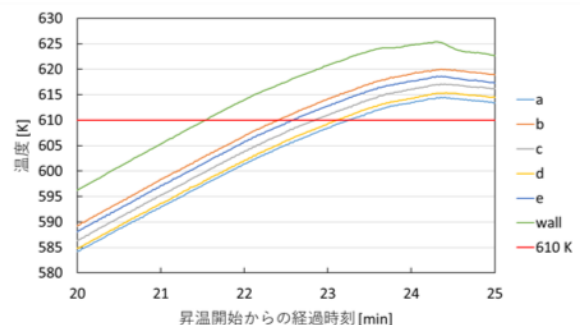


Fig. 6 Magnified Temperature Time History (20-25 min.)

Fig. 7 に落下カプセルおよびカプセル内に設置した Droplet Combustion Unit (DCU) を示す。落下実験は日本大学が所有する落下塔にて実施した。落下塔により得られる微小重力時間は約 1.2 秒である。落下時の空気抵抗は二重構造のカプセルのうち外側のカプセルが受けることで、DCU が設置される内カプセル

は空気抵抗の影響なく自由落下を行うことで微小重力環境を作り出すことができる。液滴の撮影には、高解像度 CMOS カメラ (DMK33UJ003, The Image Source) を用いて観察した。落下実験では、微小重力環境下において液滴列支持装置の燃焼器内への挿入動作が正しく動作する事が確認できた。液滴の挿入については、液滴列支持装置の挿入から実験位置での停止にかけて生じる減速 G により脱落する恐れがある。高温になるほど液滴の粘性が減少し、液滴の保持が困難になる事が予想されたが、Fig. 8 に示すように 610 K の実験条件においても保持できることが確認できた。また、落下時の衝撃でも液滴列支持装置他、故障することなく運用できることが確認できた。以上より、落下塔を用いた基礎データ取得基盤の整備が達成できた。また、本成果は、ロケット実験に向けた装置の TRL 向上にも貢献し得る成果と言える。

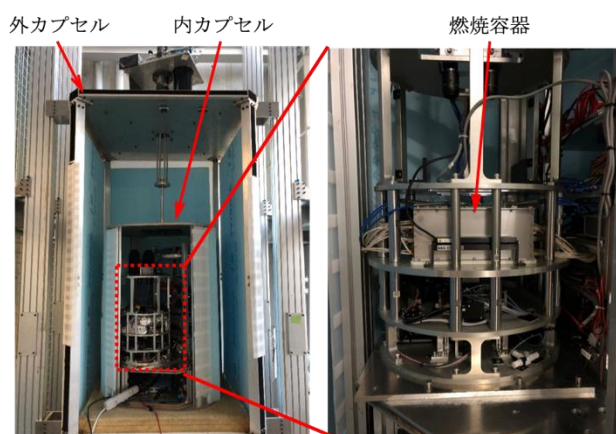


Fig. 7 Configuration of the DCU and Drop Capsule.

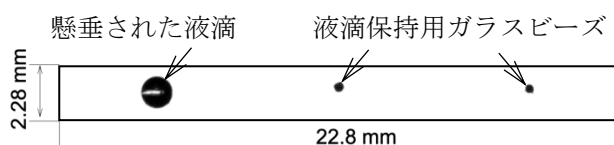


Fig. 8 Backlit image of inserted droplet.

4. まとめ

蒸発を組み込んだ 2D コードの作動を確認できた。汎用コードで使用した境界条件と比較して、非定常な温度変化を再現できており、より精度の高い計算の実施が可能となった。

液滴燃焼ユニット (DCU) へ高温燃焼容器を据え付け、各種インターフェースに問題のないことを確認した。落下時の衝撃等でも DCU の各装置が問題なく稼働することを確認できた。以上より、落下塔でのデータ取得基盤の整備が達成された。

謝辞

本研究は JAXA 宇宙環境利用専門委員会のフロントローディング研究として実施されました。ここに

謝意を表します。

参考文献

- 1) 齊藤允教, 他; TEXUS ロケットを利用した燃料液滴の自発点火に関する予備研究, 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会(2017).
- 2) 田辺光昭, 他; 自発点火時の液滴間干渉効果に関する TEXUS ロケット実験に向けた準備研究, 宇宙環境利用シンポジウム (第 32 回) (2018).
- 3) 齊藤允教, 他; TEXUS ロケットを利用した n-Decane 液滴列の冷炎発生に関する準備研究 (数値計算による液滴列の自発点火の予測), 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会 (2018).
- 4) 菅沼祐介, 他; TEXUS ロケットを利用した n-Decane 液滴列の冷炎発生に関する準備研究 (燃焼実験装置の開発), 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会(2018).
- 5) Linstrom, P.J. et al.; NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology, (2018).
- 6) A. Miyoshi; KUCRS software library, revision 2011.01.07, available from the author. See the web: <http://akrmys.com/KUCRS/> for update information.