

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

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

Preliminary Study for the TEXUS Rocket Experiments on Inter-droplet Interference at Spontaneous Ignition

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

*Nihon Univ., Funabashi, Chiba 274-8501

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

Abstract: Towards PHOENIX II campaign that clarifies the spontaneous ignition characteristics of cool flames around droplet arrays using TEXUS sounding rocket, scientific and technological preparations have been made. A numerical model is developed and the ignition process of the planned droplet arrays have been simulated. The model predicted the location of the onset of ignition to be outside the array, as is suggested by theoretical consideration on the inter-droplet interaction. Cool flame propagation is found to be another pathway of interaction optionally. To meet the TRL4 of the experimental module of new DCU (Droplet Combustion Unit), two major systems are designed and tested. One is a novel droplet suspension system that minimize the disturbance at insertion to the hot chamber; and the other is cool flame detection system. Droplets of 1 mm in diameter is successfully suspended on the apex of crossing two curved SiC filament of 14 micron in diameter. The developed optics with ICCD camera and POD filtering technique successfully catch the cool flame emission that comes from HCHO.

Key words; Sounding rocket experiment, TEXUS, PHOENIX, Droplet array, Spontaneous ignition

1. はじめに

ロケットやガスタービンなどで利用されている噴霧燃焼は、霧化、伝熱による液体燃料の加熱、蒸発、拡散および対流混合と化学反応といった多くの過程が関連し生じる現象であり、直接計算では計算負荷が過大で、モデル化も現状はその基礎となる現象把握の段階にとどまっている。噴霧燃焼過程は噴霧形成、蒸発および自発点火、燃焼の3段階に分類することができ、噴霧の形成および、燃焼過程につき、微小重量場を含む基礎実験が行われ、モデル化が進められてきた。噴霧の自発点火過程はこれまで、噴霧の最小構成要素である単一液滴につき研究され、微小重量場での実験が行われており、球対称1次元系で、高温の燃焼過程に移る前に低温の冷炎が生じることなど、実験結果を詳細に説明できるモデル化を達成している。実際の噴霧は、3次元の現象であるが、3次元配列の液滴群の実験の複雑さと、数値計算の負荷から、そのような系でのモデル化は達成できていない。局所的に見て液滴ペアや液滴列といった液滴群の構成要素に着目し、軸対称2次元系として簡略化すればこれまでの1次元系で扱えない、液滴間の相互干渉が存在する状態での蒸発と自発点火のモデル化が達成でき、その基準実験データが求められている。著者らはこれまで「共通微小重力実

験装置を用いる高圧環境下における点火・燃焼」WG活動¹⁾によりドイツ DLR およびブレーメン大学 ZARM との共同研究として、「自発点火限界近傍条件における冷炎発生機構に与える液滴間干渉効果の解明」のテーマで TEXUS ロケット実験 (PHOENIX II) を行うことを想定した準備を行ってきた¹⁾。2017 年度には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、同テーマを実施し、ロケット実験の実現に向けた予備研究として、液滴列や液滴ペアの自発点火過程を模擬できる簡易数値計算モデルと、それらの実験を TEXUS ロケットに搭載して実施するための装置²⁾の要素開発を行った。

2. 軸対称2次元液滴列自発点火数値予測モデル開発

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、現象を2次元とすることができる。本研究では、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た。液滴間隔は 8 mm である。雰囲気は 570K の空気で、燃料は正デカン、化学反応モデルには、Qiu ら³⁾の簡略化モデル (77 化学種 287 反応)

を用いた。液滴が9個の場合のHCHOの分布をFig. 1に示す。HCHOは冷炎の発生と同時に生成される物質であり、ロケット実験での観察対象である。外側の液滴から冷炎が生じ、液滴列を伝播していくことがわかる。外側では冷炎を生じる連鎖分岐反応の連鎖単体あるOH濃度が高まっていたことなど自発点火過程を詳細に分析するツールが開発できた。

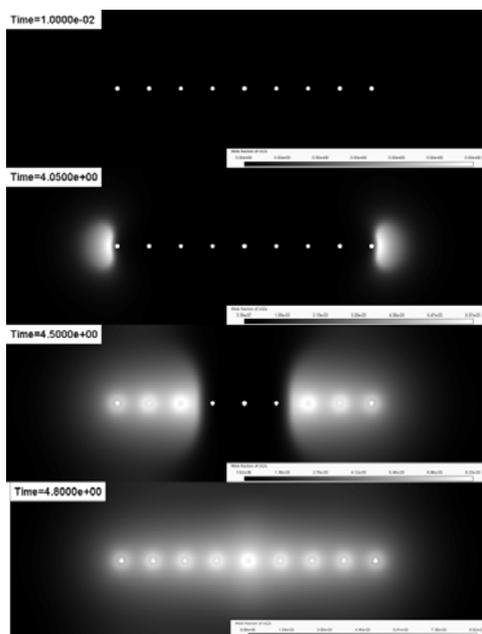


Fig. 1 Simulated HCHO distribution around 9 droplet array during ignition process.

3. DCU(Droplet Combustion Unit)の要素開発

TEXUS ロケット実験にはPHOENIXで実績のあるDCUを基に自発点火用の改修を実施する予定である。主要な要素についてDCUの設計手法を踏襲することで実績のある装置とし、TRL4を満足させるが、液滴の懸垂機構と光学系が新規開発要素となる。

液滴の懸垂機構について、自発点火は温度感度が高いことから、燃焼室への液滴挿入時に燃焼室内の高温空気が冷却されることを防ぐために、液滴の挿入方向前方あるいは液滴近傍に熱容量のある物体がない形状を考案し、直径1.5mm程度までの液滴保持性能と、平均加速度-7.7g(0.13sec)の落下塔にて耐G性を確認した。開発した懸垂機構の全体と液滴の拡大図をFig. 2に示す。

冷炎が自発点火する際の微弱なHCHOの自発光を捉えるための光学系の要素実証でZARM落下塔で実績のあるICCDカメラ(Lambert HICAM500)に搭載性を考慮した4本のカメラレンズを試験し、結果、Sigma f135 mm F1.8がHCHOの発光波長での透過率と開口ともに優れることを見出し、DCUの設計に反映した。また、同時にPOD(固有直交分解法)を用いたノイズ低減法を開発した。直径1mmの正デ

カン単一液滴周りに冷炎が生じる瞬間の自発光像と定常燃焼中の自発光像をFig. 3に示す。PODでは自発点火直後の時間変化の速い現象では画像は平滑化されずに詳細が保存され、その後の定常現象ではランダムノイズ低減ができていていることを確認した。

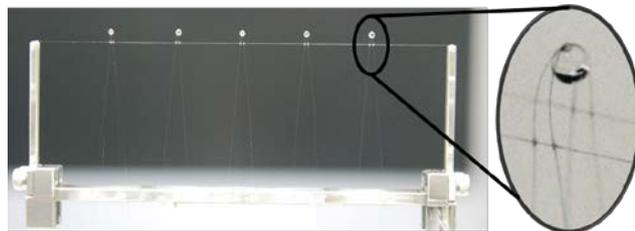


Fig. 2 Droplet array suspender and a suspended droplet.

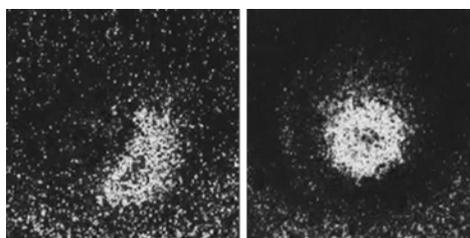


Fig. 3 POD reconstructed image of igniting cool flame around a fuel droplet. (left: at the onset of cool flame, right: 1 sec after ignition)

4. まとめ

TEXUS ロケットを想定した液滴列の自発点火実験につき、数値モデル化と装置開発を行い、実験で得られる象の詳細な分析のためのツールが完成すると共に実験要求に即したDCU2の改修設計を実現し、実験の実現可能性を見出すことができた。

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) 森上修, 他; 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チームの2015年度活動報告および展望, 宇宙環境利用シンポジウム(第30回)(2016).
- 2) 齊藤允教, 他; TEXUS ロケットを利用した燃料液滴の自発点火実験に関する予備研究JASMAR-29, (2017)
- 3) Liang Qi, et al.; Development of a Reduced n-Decane/ α -Methylnaphthalene/Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Mechanism and Its Application for Combustion and Soot Prediction, *Energy Fuels*, 30, 10875–10885, (2016)