

複数液滴の冷炎ダイナミクスに関する観測ロケット実験"PHOENIX-2", 2022 年度進捗報告

田辺光昭, 齊藤允教, 菅沼祐介, 野村浩司, 高橋晶世, 高橋賢一 (日本大学), 森上修 (九州大学), 三上真人 (山口大学), 後藤芳正, 山村宜之, 野倉正樹, 山本信 (IHI 検査計測), Eigenbrod Christian (ZARM), 石川毅彦, 菊池政雄, 嶋田徹, 稲富裕光 (JAXA)

FY2022 Status Report of the Sounding Rocket Experiments on Cool Flame Dynamics of Multi-Droplets, "PHOENIX-2"

Mitsuaki Tanabe*, Masanori Saito, Yusuke Suganuma, Hiroshi Nomura, Akiyo Takahashi, Kenichi Takahashi, Osamu Moriue, Masato Mikami, Yoshimasa Goto, Yoshiyuki Yamamura, Masaki Nokura, Shin Yamamoto, Christian Eigenbrod, Takehiko Ishikawa, Masao Kikuchi, Toru Shimada, Yuko Inatomi

*Nihon Univ., Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

E-Mail: tanabe.mitsuaki@nihon-u.ac.jp

Abstract: The status in FY2022 of the Japan-Germany joint project on sounding rocket experiments of cool flame dynamics is presented. The flight model of the core experimental module, DCU2 and GSE had been manufactured and assembled. It is ready to step into test phase. The critical design review on the entire module, TEM2, consists of DCU2 and support systems, had been completed in November '22. Numerical investigation has been done along with the module developments. Droplet interaction during cool flame oscillation is quantified with a newly developed deep-learning based analysis technique. Cool flame propagation through droplet array is found to occur in two distinctive modes, that are transport- and reaction-controlled modes.

Key words; Space experiment, TEXUS sounding rocket, Droplet ignition, Cool flame

1. はじめに

ロケットエンジンやデトネーションエンジンで利用される噴霧燃焼に関する基礎研究として、構成要素である燃料粒子の自発点火・燃焼特性が調査されてきている。このうち、火炎の伝播限界や爆轟発生に関わる「冷炎」の発生とその動的挙動を明らかにすることを目的として、JAXA と DLR の国際協力合意のもと、ISAS 公募小規模計画「PHOENIX-2」プロジェクトを 2019 年度より実施してきた。このプロジェクトでは、直線状に配置された複数の燃料液滴を高温炉に挿入して冷炎が点火・燃焼する過程を詳細に調べることで、エンジンでの高負荷燃焼の安全性や安定性を制御可能とすることを目標としている。軸対称 2 次元現象を実現するために浮力対流を抑えた実験が必要であり、TEXUS 観測ロケットを用いた微小重力場を利用する。これまで実験に向けた搭載装置の開発と、予測およびデータ収集のための数値モデル開発・シミュレーション実施、さらに多変数のダイナミクス解析のための新たな手法開発を進めてきている。本報告では 2022 年度の進捗状況を概説する。

2. 実験装置開発

2022 年度当初に、TEXUS-59 号機で 2023 年春期の打上を想定し、実験装置開発を進めた。搭載装置は液滴生成や高温炉、観測系などからなる DCU2 (液滴列燃焼

装置) と GSE (地上支援装置) の開発を日本で、ロケット側支援装置 (電源、通信、環境条件制御装置等) をドイツが担当している。DCU2 はフライトモデルの製作・組立を行った (図 1 参照)¹⁾。ロケット側支援装置開発は日独合同でのメール会議および TIM を実施しつつすり合わせを行い、温度・圧力などの制御系の試作試験をドイツ国内で終え、11 月 9-11 日に日本大学生産工学部にて日独合同で対面での CDR を実施した。CDR では DCU2 の基礎的な動作のデモ等も踏まえ、TRD, ORD, ソフト/ハードウェアインターフェースの確認・調整を行った。搭載装置全体 (TEM2) としての成立性を確認した。併せて

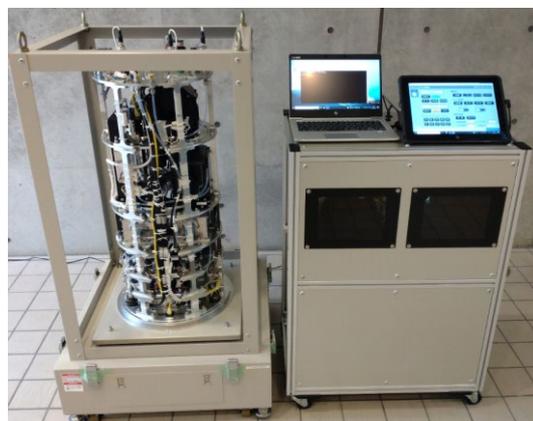


Fig.1 FM of experimental module, DCU2, with GSE

ドイツ国内での各種試験と射場作業等の打合せを実施した。DCU2 のガス供給部品変更の必要性から、実際の打上げ時期については、当初予定よりも後倒し、新たな打上時期を調整することとした。

3. 数値シミュレーション・解析法開発

複数液滴についての数値シミュレーションモデルを開発してきており、冷炎の自発点火、振動、伝播について予測データを得ている。

冷炎振動は非線形系の振動であり、現象を支配する状態変数と観測量(物理変数)との変換を深層神経回路で行うことで、数値実験のデータから状態変数ベクトルの時間発展を導く手法を開発してきた。振動挙動を状態変数で張った位相空間上の軌跡として描く手法を開発してきたが、本年度は位相空間の座標から振動モード毎のエネルギー比率を求める手法と、異なる境界条件での異なる振動を一つの位相空間上に描く手法を開発した。図2の左図に単一液滴と、二液滴の液滴間側および二液滴の外側で生じる冷炎振動がとる軌道と同じ位相空間に描いた例を示す。単一(赤線)と外側(緑線)の振動の軌跡は近く、液滴間干渉のある液滴間での振動だけが離れていることが分かり、干渉度合いを位相空間上の距離として評価することができている。右図には単一と液滴間での冷炎振動について位相を揃えて温度分布の差を取り、その時間変動のうち干渉を表す振動モード成分を示した。二液滴の対称軸方向(横方向)とそれに垂直方向では温度差が逆(赤⇄青)になることが分かる。液滴間干渉が生じる位置や位相を分析できるようになった。

図3に液滴列における冷炎伝播の様子を示す。上図が冷炎の自発点火限界温度以下の雰囲気温度 500K の場合で下図が限界温度以上の 600K の場合である。自発点火限界以下では液滴は隣の液滴からの熱・物質伝達で燃え広がる輸送律速の挙動であった。自発点火可能な高温雰囲気下では、個々の液滴が隣の液滴からの熱・物質共有を待たずに、自ら次々に冷炎を生じる反応

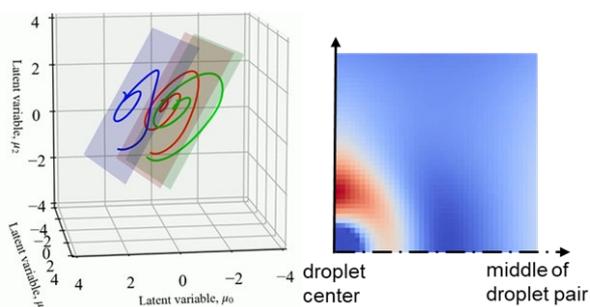


Fig.2 Trajectory of cool flame oscillation on phase plane (left, Red: Single droplet; Green/Blue: outside/inside of droplet pair) and amplitude distribution of temperature oscillation for a typical droplet-interaction mode (right)

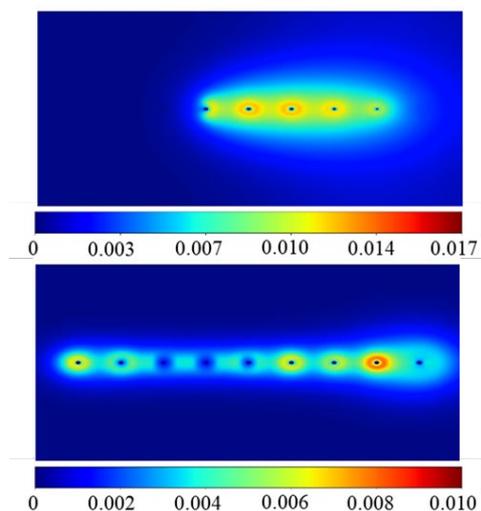


Fig.3 Cool flame propagation through droplet array (distribution of CH_2O mass fraction, upper: transport-controlled case; bottom: reaction-controlled case)

律速での伝播が生じた。このように冷炎の2つの伝播モードが生じることを明らかにした。これら予備的な研究については学会報告・論文等^{2,4)}で成果公開した。

4. まとめ

日本が担当する実験装置本体の製作・組立を完了し、試験段階に移行した。ドイツ担当の支援装置は製作段階に進んだ。打上日程は2024年度を目途に調整中である。また、数値計算や解析法での成果・準備研究でも成果を積み上げることができた。

謝辞

本研究は ISAS 小規模計画、日本大学学長特別研究、および JSPS 科研費 #21K14347, #JP19K04843, #JP17K06950 に支援賜りました。

参考文献

- 1) 菅沼祐介, 他; 微小重力環境を用いた複数液滴の冷炎ダイナミクスの解明 -PHOENIX2 プロジェクト状況進捗報告-, JASMAR-34 (2022).
- 2) 家村和輝, 他; 燃料二液滴で生じる冷炎振動に関する位相空間を用いた研究, JASMAR-34 (2022).
- 3) Iemura, K. et al.; Analysis of spatial-temporal dynamics of cool flame oscillation phenomenon occurred around a fuel droplet array by using variational auto-encoder, *Proc. Combust. Inst.*, in press (2022).
- 4) Ikezawa, H. et al.; Influence of Difference in Ambient Temperature and Inter-Droplet Distance on Cool Flame Spread Behavior of Fuel Droplet Array, 44th COSPAR (2022)