

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"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, 山本信, 野倉正樹 (IHI 検査計測), Eigenbrod Christian (ZARM), 石川毅彦, 菊池政雄, 嶋田徹, 稲富裕光 (JAXA)

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, Shin Yamamoto, Masaki Nokura, Eigenbrod Christian, 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 of the on-going Japan-Germany joint program on microgravity experiments using a sounding rocket is presented. Experiments on the cool flame dynamics of multiple droplet arrays and droplet pair is planned. The experimental module for TEXUS sounding rocket and the developed numerical simulation model is explained. Along with the developments, a new data analysis technique using deep neural network has been introduced to model the dynamics and test result is presented.

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

1. はじめに

JAXAとDLRの国際協力合意のもと、ISAS公募小規模計画としてPHOENIX-2プロジェクトが2019年度より実施されている。このプロジェクトは、エンジンで利用される噴霧燃焼のうち、液体燃料の微粒子が自発点火する過程を明らかにすることによってロケットエンジンやデトネーションエンジンでの高負荷燃焼の安全性や安定性の制御に役立てようとするものである。さらに高効率化を求めて高圧化した自動車や航空機のエンジン燃焼にも適用できるような普遍的な知見を得ることも同時に目指している。プロジェクトではTEXUS観測ロケットを用いた微小重力実験により高温雰囲気中で自発点火過程を詳細観察し、基準データを取得することを目的とし、実験実施に向けた準備を進めており¹⁾、その2020年度の進捗状況を報告する。

2. 実施概要および進捗

本研究では自発点火現象のうち、危険だが有用でもある爆轟波の発生に関係することが報告されている、冷炎の発生時期や位置、発生後の挙動を詳細観察し、数値モデルを確立すべくロケット実験の装置開発と数値計算モデルの構築を実施している。また、実験では非常に微弱な冷炎の発光(HCHO 自発光@395.2nm)を増幅して記録することから、様々なノイズや外れ値が想定され、データ処理によって現象の本質的な部分だけを抽出する手法の開発も併せて実施している。

2. 1. ロケット搭載装置開発²⁾

搭載装置は液滴生成や高温炉、観測系など中核部である通称 DCU2 (液滴列燃焼装置) と地上支援装置の開発を日本側が担い、ロケット側支援装置 (電源、通信、熱マネジメント等) をドイツが担当している。DCU2 は開発・設計を完了し、製作段階にある (図1参照)。詳細は菅沼らの報告に記載する。電装系のハーネスを除き、年度中に組立完了予定である。支援装置開発はDLRにより予算化され、本年度はこれまでに日独合同での隔週の担当者会議および2回のTIMによりDCU2とのインターフェース調整を行い、現在設計段階にある。2021年6月設計完了予定であり、TEXUS-59での2022年3月打上げを想定してほぼ予定通りの開発進捗である。

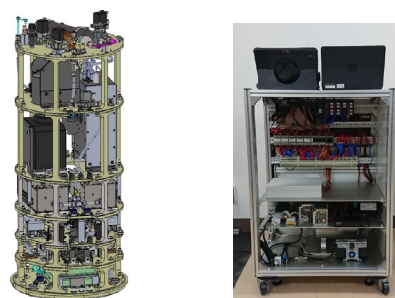


Fig.1 Experimental module for TEXUS sounding rocket, DCU2 (left, by IIC Co., Ltd.) and GSE (right, by CIT, Nihon Univ.).

2.2. 数値計算モデル開発³⁾

計算モデル開発は2段階にて進めた。昨年度までの第1段階では、液相側の燃料液滴の熱・物質保存を考慮せずに、気相における蒸気の拡散や化学反応のみを詳細に解くことを達成した。本年度は液相側も計算に組み込むことができるように気液界面での境界条件を陰的に解く改良を行い、より正確に実験を模擬できるものとした。当初の開発予定を完了し、今後、現象予測や実験条件の最適化のために活用することを予定している。図2に計算結果の一例を示す。図右の温度、蒸発率の履歴から冷炎発生に伴う液相表面の応答が再現されていることが確認できる。また、履歴には複数回の温度上昇が表れており、冷炎振動を予測していることが確認できる。

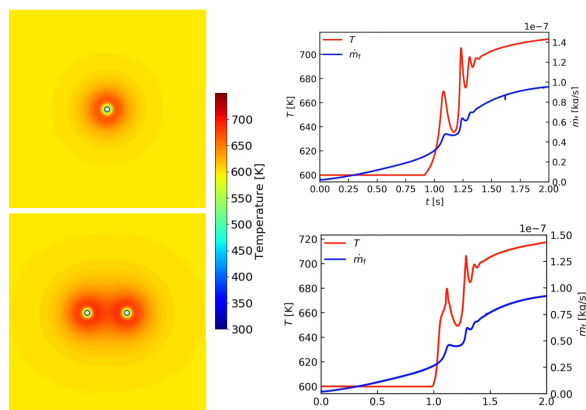


Fig. 2 Simulated cool flame ignition of isolated droplet (upper) and droplet pair (lower). (Ambient temperature: 600 K, left: temperature field at cool flame onset, right: history of droplet surface temperature and evaporation rate)

2.3. データ解析法の開発⁴⁾

図2に示すように、冷炎には温度場と濃度場の発達の位相差があり、自励振動を生じる場合があることが予測されている。冷炎振動はその後の熱炎発生に影響し、つまり爆発現象の支配要因の一つとなることから、機構解明が必要とされている。実験においても、観測予定のHCHO自発光で振動が観測できることを想定している。図3に5液滴の液滴列につき数値シミュレーションで再現した冷炎振動を深層神経回路を用いた変分自己符号化器で解析した結果を示す。空間2次元、時間1次元のデータを学習し、自動で振動を支配している潜在変数を導き、位相平面に振動状態をプロットすることができている。また、この位相平面は線形空間ではないが、平面上での振動場の状態を自己符号化器のデコーダを用いて化学種や温度の空間分布として表すことができるようになった。

このデコーダ出力は学習に用いた数値シミュレーション出力から振動状態の特定に必要な情報以外の情報を取り除いたものとなっていることから、実験で避けられないノイズや外れ値の除去にも有効であると考えており、ロケット実験で取得したデータの質を高めるために利用することが可能である。

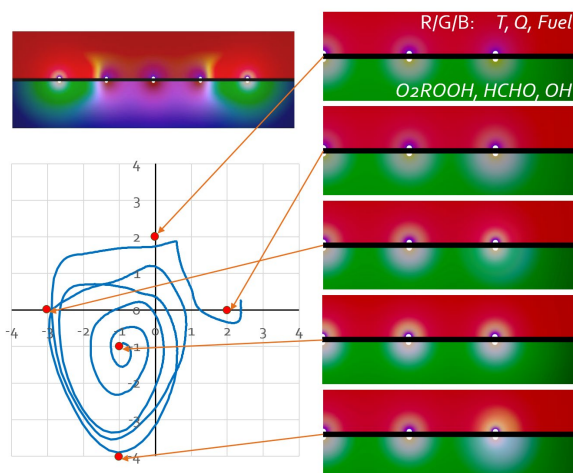


Fig. 3 Example of Variational Auto-Encoder analysis on the cool flame oscillation of 5 straight droplet array. (left: locus on phase space, right corresponding distributions of physical parameters shown in RGB color)

3. まとめ

装置開発および数値モデルの開発、さらに新たなデータ解析法の開発は概ね予定通りの進捗であり、2022年3月の打上げを目指して準備を進めることができた。引き続き、装置組立から試験等を進め、2022年度にデータを取得すべく遂行する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、JAXA 公募地上研究、日本大学学長特別研究、および JSPS 科研費 #JP19K04843 と #JP17K06950 に支援賜りました。

参考文献

- 1) Tanabe, M., et al.; Scope of PHOENIX-2 Sounding Rocket Experiment, “Cool Flame Dynamics in Multi-droplet Ignition”, IJMSA, Vol. 37, DOI: 10.15011/jasma.37.4.370401, (2020).
- 2) 菅沼祐介ほか; 観測ロケットを利用した燃料液滴冷炎燃焼実験の装置開発, IJMSA, Vol. 37, DOI: 10.15011/jasma.37.4.370403, (2020).
- 3) Saito, M., et al.; Numerical Study on the Cool Flame Dynamics of *n*-Decane Fuel Droplets by 2D Simulation with Gas-Liquid Equilibrium, IJMSA, Vol. 37, DOI: 10.15011/jasma.37.4.370402, (2020).
- 4) 田辺光昭; 深層自己符号化器を用いた燃焼ダイナミクスの低次元化解析, in print, (2021).