

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04201

研究課題名(和文) エンジン用複雑系混相燃焼物理の構築 ～高空再着火時低圧燃焼から定常高圧燃焼まで～

研究課題名(英文) Formulation of dispersed phase combustion physics for aero engine: from low-pressure combustion in high-altitude relight operation to high-pressure combustion in steady operation of engine

研究代表者

三上 真人 (Mikami, Masato)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：20274178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：航空エンジンの高空再着火時の広範な圧力範囲における噴霧の燃え広がりや群燃焼発生特性の理解を深めるために液滴群要素の燃え広がりとランダム分散液滴群の燃え広がりの微小重力実験を行った。実験の結果、燃え広がりを与える液滴直径比の影響、局所液滴干渉の影響、圧力の影響が明らかとなった。これらの実験から、起点となる液滴まわりに形成される火炎からの熱伝導の影響が明確となり、その液滴の燃焼寿命が燃え広がり限界を律していることも明らかとなった。1.5MPa以上の高圧条件では燃料蒸気吹き出しによる特異な燃え広がり、ランダム分散液滴群の群燃焼発生限界付近でも特異な燃え広がりが観察されており、今後の解明が必要である。

研究成果の概要(英文)：This research conducted microgravity experiments of flame spread over droplet-cloud elements and randomly distributed droplet clouds in a wide pressure range in order to improve understanding of the flame spread and group-combustion excitation in fuel sprays under high-altitude relight condition of aero engines. The experiments elucidated the effects of droplet diameter ratio, local droplet interaction and ambient pressure. The results show that the thermal conduction from a burning droplet to the next unburned droplet plays an important role and the burning lifetime of the base droplet controls the flame-spread limit. Anomalous flame-spread behavior was observed over 1.5 MPa and near the group-combustion-excitation limit in randomly distributed droplet clouds. These phenomena should be elucidated in future researches.

研究分野：燃焼学

キーワード：燃焼 液滴群 燃え広がり 群燃焼 高圧

1. 研究開始当初の背景

航空エンジンに求められる性能の一つに、高空失火時に確実に再着火し始動する高空再着火性能がある。エンジン失火時にはタービン・圧縮機が停止し燃焼器内は高圧条件から大気圧の1/4程度の低圧雰囲気となる。このような低圧下で再着火・安定燃焼を行う際には、パイロット火炎から各燃料噴霧へと燃え広がりが確実に行われる必要がある。定常燃焼に回復すると燃焼器内圧力は燃料の臨界圧力を超える。火炎基部では噴霧の燃え広がりが生じており、火炎全体では噴霧の群燃焼が行われる。しかしながら、低圧から高圧までの幅広い圧力における噴霧の燃え広がりや群燃焼発生特性はほとんどわかっておらず、その燃焼制御において試行錯誤的なものが多く存在しているのが現状である。また、高空再着火の数値計算も試みられているものの、サブモデルが検証されておらず、現象の本質を捉えた基礎研究が不足している。よって、航空エンジン用の噴霧燃焼には低圧から高圧までの幅広い圧力条件での噴霧燃え広がりにおける微視的素過程の正確な把握とそれを液滴群(噴霧)全体に展開することが可能な混相燃焼物理の構築が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、微小重力科学に基づく素過程の極限理解とそれを利用したパーコレーション理論による複雑系挙動解明という先進的アプローチにより、低圧から高圧までの噴霧燃え広がりを支配する微視的過程の正確な把握とそれを巨視的な液滴群全体の挙動把握への展開を行う。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた液滴群要素のモデルを示す。液滴Iは着火用液滴、液滴Bおよび液滴Aが干渉用二液滴、液滴Lは燃え広がり限界確認用液滴である。液滴A-液滴L間の燃え広がり限界に与える二液滴B・Aの干渉効果、液滴AとLの径違い効果、燃え広がり圧力依存性について落下実験施設における微小重力場において実験的に調べた。国際宇宙ステーションにおける長時間微小重力場において、干渉用三液滴を含む液滴群要素の燃え広がり実験、最大152個の液滴から成るランダム分散液滴群の燃え広がり実験も行った。

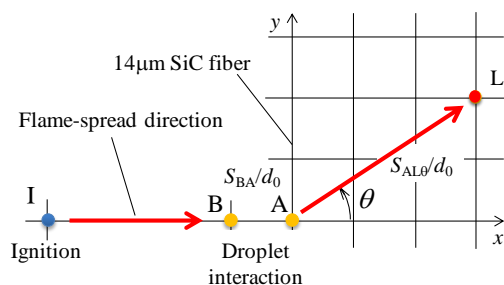


図1 液滴群要素モデル

各液滴は線径14µmのSiCファイバー(Hi-Nicalon, 日本カーボン)の交点に3次元トラバースシステムにより位置決めされた燃料供給用ガラスニードルから所定の燃料を供給することで生成される。燃料の供給量はステッピングモーター駆動の燃料供給シリンジのプランジャー移動量により制御した。燃料としては正デカンを用いた。液滴Iの着火は鉄クロム線の電気加熱による熱面着火装置により行った。

微小重力実験は山口大学工学部内の自由落下距離4.4mの落下実験施設および国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」において行った。

4. 研究成果

(1) 径違い効果

図2に異なる直径を有する液滴A-液滴L間の燃え広がり速度を液滴直径比に対して示す。燃え広がり速度、液滴間隔、直径比を示すうえでの基準液滴は、燃え広がり起点側の液滴Aを用いている。燃え広がり速度 $V_{fd_{A0}}$ は直径比 d_{L0}/d_{A0} が大きいほど小さくなる。これは、液滴Aから液滴Lへの燃え広がり時間における液滴Lの加熱時間の割合の増大のためである。燃え広がり時間を構成する液滴Aから液滴Lへの熱伝導時間と液滴Lの加熱時間の割合は直径比 d_{L0}/d_{A0} のみに依存し、液滴間隔 S_{AL}/d_{A0} に依存しないことも新たに明らかになった。

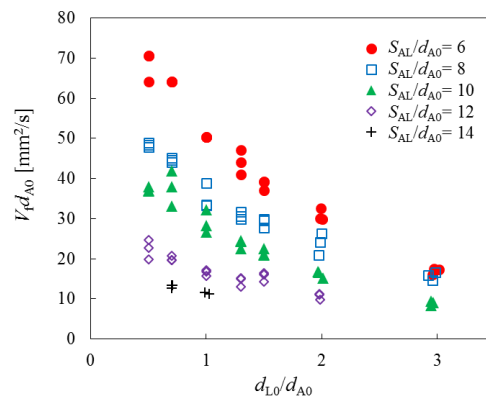


図2 液滴AからLへの燃え広がり速度の液滴直径比への依存性

液滴Aから液滴Lへの燃え広がり限界距離は直径比 d_{L0}/d_{A0} が大きいほど小さくなった。燃え広がり限界距離は液滴Aの燃焼寿命に大きく依存しており、液滴Aから液滴Lへの燃え広がり時間が液滴Aの燃焼寿命の80%となるあたりに燃え広がり限界が存在することも明らかとなった。

(2) 局所干渉効果

図3に干渉二液滴B-A回りの燃え広がり限界分布を示す。液滴B-A間距離 $S_{BA}/d_0=4$ と強い干渉が存在する場合、それらの二液滴回りの燃え広がり限界は直線液滴列の燃え広がり限界距離の $2^{1/3}$ 倍より若干小さい程度

であることが明らかとなった。「きぼう」においては、この再現性を確認するとともに、三液滴が同様の強い干渉を示す場合には、燃え広がり限界が直線液滴列の燃え広がり限界距離の $2^{1/3}$ 倍と $3^{1/3}$ 倍の間となることも明らかとなった。

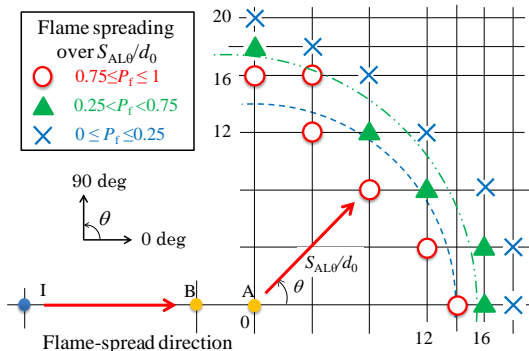


図3 干渉二液滴 B-A 回りの燃え広がり限界分布

(3) 圧力の影響 (燃料蒸気吹き出し無し)

図4に液滴Aから液滴Lへの燃え広がり限界に及ぼす液滴B-液滴Aによる局所干渉効果を異なる三種類の圧力に対して示す。燃え広がり限界は全体に圧力が高いほど小さくなった。干渉効果が現れる S_{BA}/d_0 は圧力が高いほど小さくなった。この図4は両軸を各圧力における干渉効果の無い場合の燃え広がり限界距離で無次元化を行うと、圧力によらない正規化が可能となることも明らかとなった。

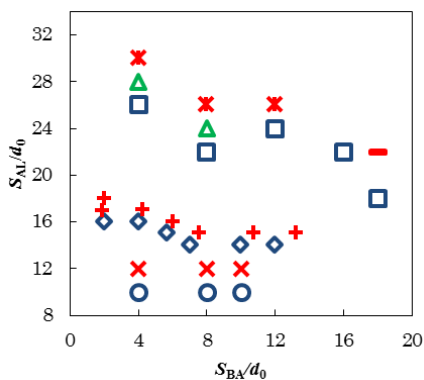


図4 燃え広がり限界距離に及ぼす局所干渉効果の圧力依存性 (上から、25kPa, 100kPa, 200kPa)

(4) 圧力の影響 (燃料蒸気吹き出し有り)

図5に3MPaにおける代表的な燃え広がり挙動を示す。燃え広がり時に燃料蒸気が吹き出しその蒸気への燃え広がりが1.5MPa以上の圧力において観察された。

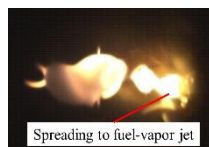


図5 燃え広がりにおける燃料蒸気の吹き出しと蒸気への燃え広がり (3MPa)

図6に局所燃え広がり速度の圧力依存性を示す。1.5MPa以上では、燃料蒸気の吹き出しが生じるようになり、それに伴い、局所燃え広がり速度が増大する場合があることがわかった。燃え広がり速度増大の機構解明が今後必要である。

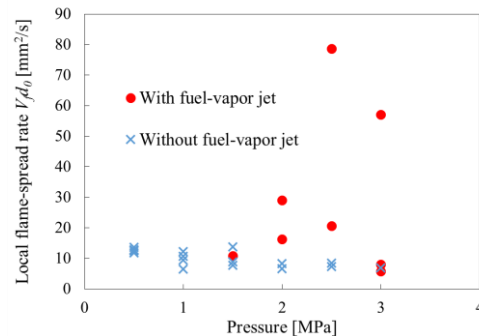


図6 局所燃え広がり速度の圧力依存性 ($S_{BA}/d_0=6$)

(5) ランダム分散液滴群の燃え広がり

液滴群の燃焼は格子下辺の中心付近の一つの液滴の着火から開始されている。単一液滴が着火した際の単独火炎が発生した様子も観察されるが、燃え広がりに伴い群火炎と結合することで、大きい一つの群火炎が拡大し、格子の各辺へと到達している。異なる平均液滴間隔 (S/d_0)_m に対して実験を行い、群燃焼発生限界について調べ、パーコレーション予測との比較を行った。群燃焼発生限界付近では特異な燃焼挙動が観察されており、今後の詳細解明が必要である。

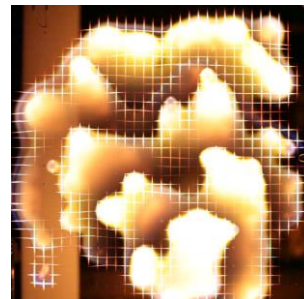


図7 ランダム分散液滴群の1秒毎の燃え広がり挙動の比較明合成画像 ((S/d_0)_m=11.9)

燃え広がり素過程の局所干渉効果および燃料蒸気吹き出しの影響の無い圧力の影響を考慮し、ランダム分散液滴群の燃え広がりに展開し群燃焼発生特性を記述するパーコレーションモデルの改良を行った。1.5MPa以上の圧力において現れた特異な燃え広がり挙動、群燃焼発生限界付近で観察された特異な燃焼挙動をモデルに組み入れるためには、さらなる現象解明が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

① Mikami, M., Saputro, H., Seo, T., Oyagi, H.,

Flame spread and group combustion excitation in randomly distributed droplets with low-volatility fuel near the excitation limit: a percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity, *Microgravity Sci. Technol.*, 査読有, Vol. 30, 2018, to appear.

doi.org/10.1007/s12217-018-9603-z

- ② Mikami, M., Motomatsu, N., Nagata, K., Yoshida, Y., Seo, T., Flame spread between two droplets of different diameter in microgravity, *Combust. Flame*, 査読有, Vol. 193, 2018, pp. 76-82.
https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.03.004
- ③ Mikami, M., Nomura, H., Suganuma, Y., Kikuchi, M., Suzuki, M., Generation of a large-scale n-decane-droplet cloud considering droplet pre-vaporization in "Group Combustion" experiments aboard Kibo/ISS, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 査読有, Vol. 35, 2018, p. 350202.
DOI: 10.15011/jasma.35.350202
- ④ Yoshida, Y., Sano, N., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Kan, Y., Kikuchi, M., Analysis of local flame-spread characteristics of an unevenly arranged droplet cloud in microgravity, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 査読有, Vol. 35, 2018, p. 350203.
DOI: 10.15011/jasma.35.350203
- ⑤ Mikami, M., Watari, H., Hirose, T., Seo, T., Saputro, H., Moriue, O., Kikuchi, M., Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity, *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, Vol. 12, 2017, p. JTST0028.
http://doi.org/10.1299/jtst.2017jtst0028

〔学会発表〕 (計 20 件)

- ① 宇根山凌, 亜・超臨界圧力における正デカン液滴列の燃え広がり特性の調査, 日本機械学会中国四国学生会第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 2018 年
- ② 岩井健太郎, 高圧における液滴間燃え広がり微小重力実験と液滴群燃え広がり解析, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017 年
- ③ Mikami, M., Flame-spread behavior over randomly distributed droplet clouds in "Group Combustion" experiments aboard Kibo/ISS, The 7th International Symposium on Physical Sciences in Space, 2017 年
- ④ Saputro, H., A Percolation approach considering flame-spread limit based on microgravity experiments of flame spread of droplet arrays at different ambient temperatures and pressures, 11th Asian Microgravity Symposium-2016, 2016 年
- ⑤ Sano, N., Flame-spread characteristics of n-decane droplet arrays at different ambient pressures in microgravity, The 6th

International Symposium on Physical Sciences in Space, 2015 年

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三上 真人 (MIKAMI, Masato)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号: 20274178

(2) 研究分担者

瀬尾 健彦 (SEO, Takehiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号: 00432526

(3) 連携研究者

菊池 政雄 (KIKUCHI, Masao)

宇宙航空研究開発機構・有人宇宙部門・研究員

研究者番号: 80371144

野村 浩司 (NOMURA, Hiroshi)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 30246847

(4) 研究協力者

サプトロ ヘルマン (SAPUTRO, Herman)

佐野 成太 (SANO, Narita)

本松 直也 (MOTOMATSU, Naoya)

吉田 泰子 (YOSHIDA, Yasuko)

岩井 健太郎 (IWAI, Kentaro)

永田 拳太郎 (NAGATA, Kentaro)

宇根山 凌 (UNEYAMA, Ryo)