

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360350

研究課題名(和文) エンジン高空再着火性能評価のための低圧混相燃焼物理の構築

研究課題名(英文) Formulation of dispersed phase combustion physics at low pressure for evaluation of engine high-altitude relight performance

研究代表者

三上 真人(MIKAMI, Masato)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20274178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：ジェットエンジン高空再着火時の燃料噴霧燃え広がりの理解を深めるために低圧における液滴列燃え広がりの微小重力実験を行った。実験の結果、低圧での燃え広がり速度および燃え広がり限界はともに、大気圧の場合より大きくなることが明らかとなった。これらの圧力依存性について、燃え広がりに関わる素過程を考慮して考察を行った。高温領域の熱伝導速度は圧力に逆比例する。一方、高温領域の広がりの非定常性を考慮すると、その最大半径は圧力の $-1/3$ 乗に比例する。この圧力依存性を有する燃え広がり限界距離を考慮して、低圧におけるランダム分散液滴群の群燃焼発現特性を求めることができた。

研究成果の概要(英文)：This research conducted microgravity experiments of flame spread over fuel-droplet arrays at a low pressure in order to improve understanding of the flame spread in fuel sprays under high-altitude relight condition of jet engines. The results show that both the flame-spread rate and flame-spread limit distance at the low pressure are greater than those at atmospheric pressure. The pressure effect on the flame-spread rate was discussed considering some elementary processes, such as droplet heating and thermal diffusion. The thermal diffusion speed is inversely proportional to the pressure. The pressure effect on the flame-spread limit distance was discussed considering transient process of high-temperature region around a burning droplet. The maximum radius of the outer edge of the high-temperature region is proportional to $-1/3$ power of the ambient pressure. Group combustion occurrence was also demonstrated with a percolation model considering the flame-spread limit.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 液滴 燃え広がり 低圧

1. 研究開始当初の背景

航空機のジェットエンジンが高空で失火した場合、確実に再着火し始動する必要がある。この高空再着火性能は航空エンジンに求められる性能のうち、乗客の安全の観点から最も重要な性能の一つである。エンジン失火時にはタービンおよび圧縮機が停止するため、燃焼室内は高压条件から一気に低压雰囲気となる。このような低压下で再着火・安定燃焼を行う際にはパイロット火炎から各噴射弁の燃料噴霧へと燃え広がりが確実に生じる必要があるが、低压雰囲気における噴霧内の燃え広がり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。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と言える。試行錯誤によらずに燃焼を制御し、確実な高空再着火性能を評価するためには、低压雰囲気での噴霧燃え広がりにおける微視的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

本研究では低压雰囲気での噴霧燃え広がりにおける微視的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を、低压微小重力場における液滴間燃え広がり実験とそれを液滴群全体に適用するパーコレーションモデルの構築を中心として行う。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた液滴列のモデルを示す。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干渉効果に加えて、液滴B-液滴A間の燃え広がりから燃え広がり速度の無次元液滴間隔依存性についても調べた。

各液滴は線径 $14\mu\text{m}$ 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プ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。すべての液滴を生成後、トラバースシステムに固定されたデジタルビデオカメラ (SANYO,

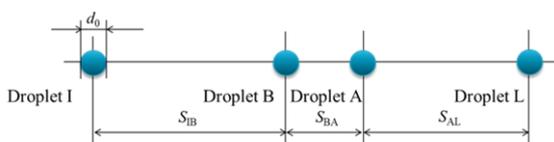


図1 不等間隔液滴列モデル

DMX-FH11) を液滴列の上に移動し撮影を行った。カメラのフレームレートは 240fps である。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。カメラも含むこれらの装置を低压容器内に設置した。

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 50m 級大型落下塔コスモトールにおいて行った。落下実験装置をドラッグシールド内で非接触落下させる二重箱方式とした。通常重力場において落下実験開始信号を送信し、液滴の生成を開始させる。液滴列生成終了後、デジタルビデオカメラの撮影が開始される。落下を開始すると、着火装置が作動する。落下実験開始信号送信後の一連の動作は PLC により制御されている。低压容器内は 25kPa の空気であり、1回の燃焼実験毎に換気を行った。

4. 研究成果

(1)燃え広がり速度

図2に燃え広がり速度の液滴間隔依存性を示す。縦軸の V_{rd_0} は初期液滴直径に関して正規化された燃え広がり速度である。低压における燃え広がり速度 V_f は液滴B-液滴A間の液滴間隔 S_{BA} とその燃え広がりによした時間から求めた。横軸の液滴間隔 S/d_0 としては S_{BA}/d_0 を用いた。同図には比較のため Mikami ら^①の微小重力場・大気圧下における正デカン等間隔液滴列の燃え広がり実験の結果も示す。

大気圧下の燃え広がり速度と比べると低压下での燃え広がり速度はばらつきが大きい。Mikami ら^①の大気圧下での実験は本低压実験の場合より大きい初期液滴直径である $d_0=1\text{mm}$ の液滴から成る等間隔液滴列を用いている。燃え広がり速度の算出にはすべての液滴列を燃え広がる際の火炎先端の時間変化グラフの傾きを用いており、燃え広がり速度の算出精度が高い。本低压実験では、液滴B-液滴A間の燃え広がり情報のみから燃え広がり速度を算出しているため、等間隔液滴全体の燃え広がり情報から算出する場合よ

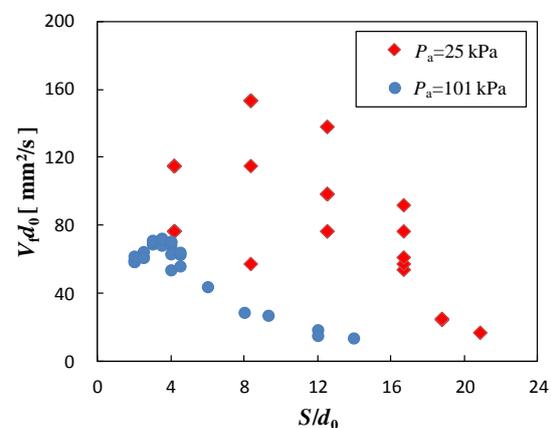


図2 異なる周囲気体圧力における燃え広がり速度 V_{rd_0} の液滴間隔 S/d_0 への依存性

り誤差が大きくなる。この誤差を考慮して図2を見ると、 S/d_0 が12以上の範囲において低圧下での燃え広がり速度 V_{id_0} は液滴間隔 S/d_0 が大きくなるほど小さくなる傾向にあると言える。また、低圧下での燃え広がり速度は大気圧下での燃え広がり速度よりも大きいと言える。

未燃液滴周囲に可燃性混合気層が形成されていない状態での液滴間燃え広がりでは、液滴間隔が比較的小さい場合は未燃液滴の加熱が律速過程となり、液滴間隔が比較的大きい場合は未燃液滴への高温領域の熱伝導が律速過程となる^①。本低圧実験では実験時の気温は296K~303Kであり、平均気温は298Kであった。298Kにおける正デカン液滴表面の気相側当量比 ϕ は大気圧では $\phi=0.13$ 、25kPaでは $\phi=0.55$ である。 $\phi=0.55$ は可燃範囲の下限当量比付近である。296K~303Kにおいては $\phi=0.47\sim 0.76$ の範囲である。燃料濃度は液滴表面から離れるほど低下することから、本低圧実験時には未燃液滴まわりには可燃性混合気層はほとんど形成されていないと言える。未燃液滴が着火し周囲に火炎が形成される過程では、未燃液滴周囲に形成された混合気層内をトリプルフラームが伝播することが知られており、未燃液滴の着火時には当量比1付近の半径方向位置が液滴からある程度離れている必要がある^⑧。よって、本低圧条件においても、未燃液滴が着火されるためには未燃液滴がさらに加熱される必要があり、低圧における燃え広がりを基本的には未燃液滴周囲に可燃性混合気層が形成されていない状態での液滴間燃え広がりと同様に考える。

液滴の加熱時間は低圧ほど小さいと考えられ、これは燃え広がり速度を増大させる方向に作用する。また、熱拡散速度は圧力に反比例することから、25kPaにおいては大気圧時の4倍の熱拡散速度となる。図2 Fig. 7から25kPaでの燃え広がり速度は $S/d_0=4$ 付近では大気圧下での燃え広がり速度の4倍より小さいが、 $S/d_0=12$ 付近では4倍より大きくなっている。 $S/d_0=4$ 付近では熱拡散の影響は小さく液滴加熱の影響が強く現れており、 $S/d_0=12$ 付近では熱拡散の影響に加えて液滴加熱の影響も現れたものと考えられる。

(2)燃え広がり限界

図3に液滴Aから液滴Lへの燃え広がりの可否を干渉二液滴間隔の S_{BA}/d_0 に対して示す。同図には比較のため Oyagi ら^②の微小重力場・大気圧下における正デカン不等間隔液滴列の燃え広がり実験の結果も示す。○は液滴Lへの燃え広がりが可能な条件、×は燃え広がりが不可能な条件である。低圧条件における△の条件は $S_{BA}/d_0=4.2$ では4回中2回液滴Lへの燃え広がりが確認された条件であり、 $S_{BA}/d_0=8.3$ では5回中3回液滴Lへの燃え広がりが確認された条件である。 $S_{BA}/d_0=16.7$ および 18.8 の条件においては、

微小重力時間が不十分であり、燃え広がりが不可能な液滴Lの位置を確認できていない。

燃え広がり限界液滴間隔 $(S_{AL}/d_0)_{limit}$ は○と×の間に存在していると考えられる。図3より燃え広がり限界液滴間隔は低圧の方が大きいと言える。大気圧では S_{BA}/d_0 が7より小さいと S_{BA}/d_0 が小さいほど燃え広がり限界液滴間隔が増大している^{12), 16)}。 S_{BA}/d_0 が7より大きい場合の $(S_{AL}/d_0)_{limit}$ は等間隔液滴列の実験^①から得られた燃え広がり限界である $(S/d_0)_{limit}=14$ とほぼ同じとなっている。低圧下においても大気圧下と同様に S_{BA}/d_0 が小さいほど $(S_{AL}/d_0)_{limit}$ は増大すると考えられる。低圧下において二液滴干渉の影響の無視できる場合の燃え広がり限界はこの図のみから判断するのは困難である。ここには示していないが、 $S_{BA}/d_0=20.8$ の液滴B-液滴A間距離を燃え広がったのは4回中1回であった。これと図3の傾向を合わせて考えると、25kPaの低圧条件における液滴干渉の影響の無視できる場合の燃え広がり限界液滴間隔は20~22程度であると推測される。

ここで燃え広がり限界液滴間隔の圧力依存性について考察する。液滴火炎まわりに形成される高温領域外縁の半径は時間とともに一旦拡大し、最大値をとった後減少する。燃え広がり時には未燃液滴が加熱され可燃性混合気層が着火される必要があるため、ここでは高温領域外縁の代表温度として混合気の着火温度を考える。未燃液滴まわりに可燃性混合気層が形成されるのに必要な温度はこの着火温度より低い温度であるため、燃え広がり限界液滴間隔のように液滴間隔が十分大きい場合には、高温領域外縁が未燃液滴近傍に到達する頃には可燃性混合気層はすでに形成されていると考えられる。先述のとおり可燃性混合気層の形成に必要な液滴加熱の時間は低圧ほど小さいが、燃え広がり限界付近では高温領域外縁の液滴近傍の可燃性混合気への到達が律速となっていると考えられる。Mikami ら^①は未燃液滴まわりに形成された当量比1付近の可燃性混合気層半径

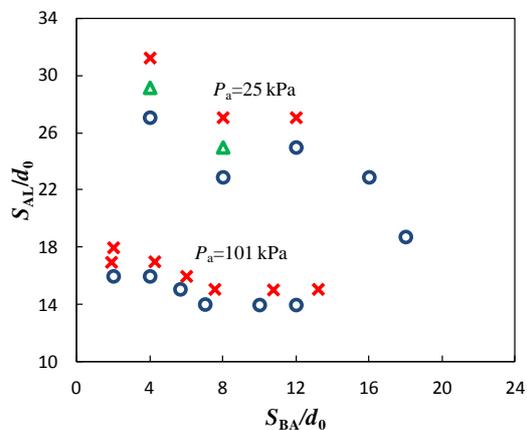


図3 異なる周囲気体圧力における燃え広がり限界距離の液滴B-A間距離への依存性

について初期火炎半径の値をもとに初期液滴直径程度としている。また、液滴近傍の濃度分布は準定常的に扱うことが可能と考えられ、その場合可燃性混合気層半径の圧力依存性は小さいと言える。したがって、燃え広がり限界液滴間隔の圧力依存性に最も大きな影響を与えるのは高温領域外縁半径の最大値の圧力依存性であると考えられる。

火炎から外の領域で液滴から離れた遠方場では、熱・物質の拡散が支配的である。熱・物質の非定常拡散方程式においてフラームシートを仮定し、ある温度 T_c の半径位置の最大値 r_{cmax}/d_0 を求めると周囲気体圧力 P_a の $-1/3$ 乗に比例することがわかる。

(3) 群燃焼発現条件

最後に液滴列燃え広がり微小重力実験で得られた知見をもとに低圧における液滴群の群燃焼発現条件について考察を行って置く。著者らの研究グループでは、燃え広がり限界に関する情報を利用したパーコレーションモデルにより、ランダム分散液滴群の群燃焼発現について調べている^②。格子間隔 L 、一辺の格子数 N の正方格子の格子点上に M 個の液滴を配置する。下辺に存在する液滴から燃焼開始し、その液滴から燃え広がり限界距離 $(S/d_0)_{limit}$ 内に存在する液滴には燃え広がるというルールに従い、個々の液滴への燃え広がり可否の判断を繰り返し、火炎がすべての辺に届いた場合を群燃焼発生とする。 $(S/d_0)_{limit}$ として、微小重力場における液滴列燃え広がり実験から得られた燃え広がり限界液滴間隔 $(S/d_0)_{limit}$ を用いる。図4に $L/d_0=2$ 、 $NL/d_0=400$ の3次元正方格子において平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=22.35$ のランダム分散液滴群の群燃焼が発生した際の様子を示す。図4は本研究の低圧条件を模擬し、 $(S/d_0)_{limit}=20$ と

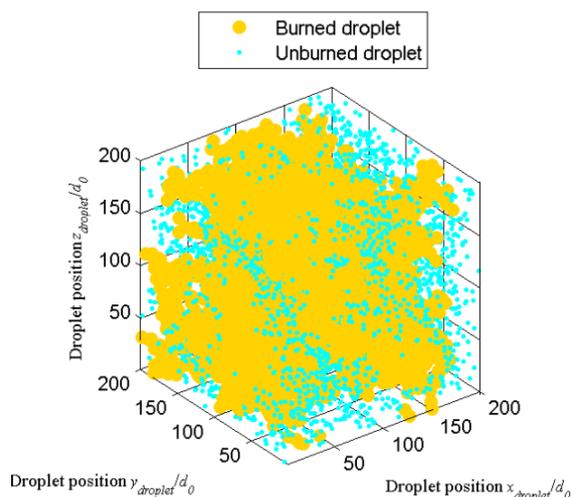


図4 微小重力実験により得られた燃え広がり限界距離を考慮したパーコレーションモデルによる臨界数密度における群燃焼発現シミュレーション

において計算を行っている。図3に示されるとおり、局所の液滴干渉により燃え広がり限界液滴間隔は増大するが、ここではその効果は考慮していない。

平均液滴間隔 $(S/d_0)_m$ が小さい密な噴霧では群燃焼が極めて高い確率で発生可能であるが、ある $(S/d_0)_m$ 付近で $(S/d_0)_m$ の増大に伴い群燃焼発生確率が急激に低下することが知られている。群燃焼発生確率が0.5前後となる場合の平均液滴間隔 $(S/d_0)_m$ の値から群燃焼発生確率0.5に相当する場合の $(S/d_0)_m$ を直線補間により求め、それを臨界平均液滴間隔 $(S/d_0)_c$ とした。大気圧条件では $(S/d_0)_c=15.81$ 、低圧条件では $(S/d_0)_c=22.35$ である。これらの値はいずれも各圧力条件における燃え広がり限界液滴間隔 $(S/d_0)_{limit}$ よりも大きい。低圧条件と大気圧条件の臨界平均液滴間隔の比は $22.35/15.81=1.41$ であり、燃え広がり限界液滴間隔の比 $20/14=1.43$ と近く、燃え広がり限界の増大に比例して臨界平均液滴間隔が増大すると言える。今後、より長時間の微小重力環境を利用した高精度な実験により、燃え広がり限界液滴間隔の情報を得ることが必要である。

<引用文献>

- ① Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Wakashima, Y., Kikuchi, M., Yoda, S.: *Combust. Flame* 146 (2006), pp. 391-406.
- ② Oyagi, H., Shigeno, H., Mikami, M., Kojima, N.: *Combust. Flame* 156 (2009), pp. 763-770.

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1件)

- ① 三上真人, 佐野成太, Herman SAPUTRO, 渡利英利, 瀬尾健彦, 低圧における液滴間燃え広がり微小重力実験, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 査読有, Vol. 31 No. 4, 2014, pp.172-178.
http://www.jasma.info/journal/wp-content/uploads/sites/2/2014/10/2014_p172.pdf

[学会発表] (計11件)

- ① 佐野成太, 微小重力場低圧雰囲気における不等間隔燃料液滴列の燃え広がり特性の実験的調査, 日本マイクログラビティ応用学会第28回学術講演会, 2014年11月26日~28日, イーグレ姫路(兵庫県・姫路市)
- ② Saputro, H., Simulating flame-spread behavior in large scale of droplet clouds with considering two-droplet interaction, 17th Annual Conference of ILASS-Asia, 2014年10月26日~28日, Shanghai (China)
- ③ Saputro, H., Simulating Flame-spread Behavior of Randomly Distributed Droplet

Clouds Based on Percolation Theory and Microgravity Experiment of Droplet Array, 35th International Symposium on Combustion, 2014年8月3日～8日, San Francisco (USA)

- ④ 瀬尾健彦, パーコレーションモデルを用いた二次元液滴群の燃え広がり特性に関する検討, 日本マイクログラビティ応用学会第27回学術講演会, 2013年11月27日～29日, 芝浦工業大学(東京都・江東区)
- ⑤ Mikami, M., A Ground-based Research for Fuel Droplet Cloud Combustion Experiment “Group Combustion” on KIBO/ISS, 5th International Symposium for Physical Science in Space, 2013年11月3日～8日, Orlando (USA)
- ⑥ Saputro, H., Study of Flame Spread Behaviour in Large-scale 2-D Droplet Clouds Without Interactive Effect Using Percolation Approach, 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013年11月1日～5日, 山口東京理科大学(山口県・山陽小野田市)
- ⑦ 渡利英貴, TFP法を用いた燃料液滴群要素の燃え広がり特性の実験的調査, 熱工学コンファレンス2013, 2013年10月19日～20日, 弘前大学(青森県・弘前市)
- ⑧ Mikami, M., Experimental Study on Flame Spread of Droplet-cloud Elements with Two-droplet Interaction in Microgravity, The 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2013年9月1日～4日, Chania (Greece)
- ⑨ Hirose, T., Dependence of Flame-spread-limit Distance from Interactively Burning n-DECANE Droplets on Flame-spread direction in Microgravity, 34th International Symposium on Combustion, 2012年7月29日～8月3日, Warsaw (Poland)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三上 真人 (MIKAMI, Masato)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 20274178

(2) 研究分担者

瀬尾 健彦 (SEO, Takehiko)

山口大学・大学院理工学研究科・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・宇宙科学研究所・

研究員

研究者番号: 80371144

森上 修 (MORIUE, Osamu)

九州大学・大学院工学研究員・准教授

研究者番号: 70363124