

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	微小重力場における燃料液滴群の燃え広がり特性に及ぼす液滴干渉の影響
氏名(Name)	吉田 泰子
<p>噴霧燃焼は、液体燃料を数μmから数百μmオーダーに微粒化して燃焼させる方式であり、燃焼時には複数の物理・化学現象が同時に相互作用を及ぼしあいながら進行している。そのため、噴霧燃焼の機構は非常に複雑であり、詳細な解明は未だなしえていない。噴霧燃焼が安定して行われるためには、噴霧を構成するほとんどの液滴が集合火炎に包まれる群燃焼状態が発現する必要がある。ジェットエンジンやガスタービンエンジンのような実機において液体燃料を安定して連続燃焼させるためには、火炎基部における液滴間の燃え広がりを通して群燃焼が発現すると考えられる。したがって、トライアンドエラーに依らず燃焼器の設計を行うためには、噴霧を構成する液滴間の燃え広がり機構の正確な把握と群燃焼が発現する過程を記述することが可能なモデルおよびシミュレーション技術が必要である。</p> <p>これまで噴霧燃焼の機構解明の基礎的な研究として、多くの研究者によって、微小重力場における少数液滴を用いての燃焼・蒸発実験が行われてきた。しかし、それらの研究によって得られた知見と実際の噴霧燃焼の現象の間には未だ大きなギャップがあり、両者がつながらないのが現状である。両者をつなげる試みとして、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」における長時間微小重力環境を用いて、初の液体燃料燃焼実験「ランダム分散液滴群の燃え広がり」と群燃焼発現メカニズムの解明(Group Combustion)が2017年2月より実施された。本研究では、液滴干渉の影響に関する実験結果をもとに、数個の干渉液滴を有する液滴群要素の詳細な燃え広がり限界分布を調べるとともに、ランダム分散液滴群を用いて、群燃焼発現限界付近の条件の燃え広がり挙動に及ぼす局所干渉効果について調べた。</p> <p>2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素実験では、5つの液滴から構成される液滴群要素を用いて燃え広がり実験を行った。液滴群要素は、燃え広がりを開始させるための液滴I、液滴Aからの燃え広がりを観察するための液滴L、干渉の影響を調査するための液滴C、B、Aから構成される。液滴Lの配置を変化させ、液滴Aから液滴Lへの燃え広がり可否を調査することで干渉液滴周りの詳細な燃え広がり限界分布を取得した。また、液滴Aの燃焼寿命に依存して燃え広がり限界が決まると考え、干渉液滴の質量中心位置に仮想的に配置した仮想液滴Mから液滴Lへの燃え広がり限界距離を液滴Aの燃焼寿命に対して求めた結果、燃え広がりの起点となる液滴Aの燃焼時間が増大することで仮想液滴Mからの</p>	

燃え広がり限界距離が拡大することが明らかとなった。

ランダム分散液滴群実験では、最大152個の液滴から構成されるランダム分散液滴群を用いて燃え広がり実験を行った。初期平均液滴直径や総液滴数を変更することにより、平均液滴間隔を変化させた。平均液滴間隔が比較的小さい条件での燃え広がりでは、比較的放射状に燃え広がるが、燃え広がりによって複数の群火炎が結合することにより大きな群火炎が拡大し、群火炎には凹凸が生じる。平均液滴間隔が比較的大きい条件では、一部の液滴に燃え広がる部分燃焼となることから群燃焼発生限界外の条件である。群燃焼発生限界付近の条件では、燃え広がり経路が複雑化し、群火炎が小さいスケールで分散しており、青炎領域も増大する。ランダム分散液滴群で得られた局所燃え広がり特性と液滴群要素で得られた燃え広がり特性を比較した。その結果、群燃焼発生限界付近の条件において、等間隔液滴列の燃え広がり限界距離より大きい液滴間隔において燃え広がりが生じており、干渉効果による局所燃え広がり限界の拡大と液滴干渉以外の周囲の火炎からの予熱により燃え広がり限界の拡大に至ったと予想される条件が見られた。

また、群燃焼発生限界付近の条件で観察された複数液滴の同時着火における爆発的現象と類似した大小様々な規模の爆発的現象について、液滴群要素の燃え広がり特性や燃え広がり経路の複雑性等の観点から調査した。その結果、爆発的現象は等間隔液滴列の燃え広がり限界よりも外側に位置しているにもかかわらず燃え広がりが生じた条件において発生した。燃え広がり経路が複雑化したことにより、燃え広がり経路が深く回り込み、既に着火している別経路の火炎から長い時間加熱され、未燃液滴周囲に可燃性混合気を形成し、深い回り込みによる長い着火遅れ時間が可燃性混合気層の拡大につながり、爆発的現象が発生したと考えられる。複数の爆発的現象を、爆発の起点となる液滴の加熱時間と初期火炎半径を基に比較した。未燃液滴の可燃性混合気層の形成に最も寄与したと思われる火炎の中心となる液滴の着火時刻から爆発の起点となる液滴の着火時刻までの時刻を加熱時間とした。その結果、爆発の起点となる液滴の加熱時間が長くなるほど爆発時の初期火炎半径が大きくなり、爆発的現象の規模も大きくなると考えられる。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	吉田 泰子
審査委員	主 査： 三上 真人
	副 査： 望月 信介
	副 査： 田之上 健一郎
	副 査： 葛山 浩
	副 査： 瀬尾 健彦
論文題目	微小重力場における燃料液滴群の燃え広がり特性に及ぼす液滴干渉の影響 (The effect of droplet interaction on flame-spread characteristics of fuel-droplet clouds in microgravity)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>噴霧燃焼機構の解明のため、これまで液滴燃焼研究により得られてきた知見を液滴群燃焼の機構解明へとつなげる試みとして、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」において、液滴群の燃え広がり実験を行った。少数の干渉液滴を有する液滴群要素と最大 152 個の液滴を用いるランダム分散液滴群の燃え広がり実験を行い、液滴間の燃え広がりを通して群燃焼が発現する過程における液滴干渉の影響について調査した。その結果、液滴干渉による燃焼時間増加が干渉液滴の質量中心まわりに燃え広がり限界距離を拡大させることが明らかとなった。また、群燃焼発現限界付近の条件のランダム分散液滴群の燃え広がりにおいては、この液滴干渉による燃え広がり限界拡大により説明可能な局所燃え広がりが生じるだけでなく、燃え広がり経路が複雑に迂回することで、未燃液滴の予蒸発が進行し燃え広がり限界が拡大すること、また、その際に爆発的現象も発生することが明らかとなった。</p> <p>本論文は 5 章から構成されている。</p> <p>第 1 章において、液体燃料の主要な燃焼法である噴霧燃焼に関する背景を述べ、その安定燃焼には燃料噴霧の群燃焼が必要であり、その群燃焼の発現に重要な役割を果たす燃料液滴間の燃え広がりに関する研究が多くなされてきていることを述べている。微小重力場を利用した液滴間の燃え広がりに関する基礎研究のこれまでの動向をまとめたうえで、地上の設備では得られる微小重力時間は数秒程度と限られるため、実際の噴霧により近い多数の液滴を燃焼させる大規模な液滴群の燃え広がり実験を国際宇宙ステーションで行う意義を述べている。そして、国際宇宙ステーションにおいて少数液滴から成る液滴群要素を用いて燃え広がりにおける液滴干渉効果を詳細に調べ、さらに、ランダム分散液滴群を用いて液滴群の燃え広がりにおける局所干渉効果の確認を行うという目的を述べている。</p> <p>第 2 章においては、本論文で対象とするすべての実験で用いる装置およびデータ取得法について述べている。</p>	

(別紙様式第 10 号)

第 3 章においては、2 個または 3 個の干渉液滴まわりに形成される火炎から次液滴への燃え広がり限界について調べた結果をまとめ、考察を行っている。単一液滴まわりの燃え広がり限界、干渉液滴の質量中心に想定した仮想液滴まわりの燃え広がり限界を参照値として、また、TFP 法による温度場計測結果も参考に、燃え広がり限界分布について考察を行った。その結果、強い干渉を伴う場合、干渉による燃焼時間増大により干渉液滴の質量中心まわりに燃え広がり限界が増大することが明らかとなった。

第 4 章においては、最大 152 個から成るランダム分散液滴群の燃え広がりについて調べた結果をまとめ、考察を行っている。局所の燃え広がり経路を第 3 章で得られた液滴群要素の燃え広がり実験から得られた燃え広がり限界の観点から確認を行った結果、多くの場合は液滴群要素の燃え広がり限界内の液滴へと燃え広がっていることが確認できたが、群燃焼発現限界付近の条件においては、例外的な条件も確認された。考察の結果、群燃焼発現限界付近では燃え広がり経路が複雑に迂回することで、未燃液滴の予蒸発が進行し燃え広がり限界が拡大すること、また、その際に爆発的現象も発生することが明らかとなった。

第 5 章においては以上により得られた知見をまとめている。

公聴会における主な質問内容は、温度計測手法に関するもの、液滴群要素とランダム分散液滴群の違いに関するもの、液滴群の平面配置と立体配置の違いに関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上により、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 4 編）

(a) 査読のある雑誌

- 1) 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. Application*, Vol. 35, No. 2, 350203-1~6, 2018.
- 2) Mikami, M., Yoshida, Y., Seo, T., Sakashita, T., Kikuchi, M., Kan, Y., "Space-based microgravity experiments on flame spread over randomly distributed n-decane-droplet clouds: overall flame-spread characteristics", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 30, Issue 4, 535-542, 2018
- 3) Yoshida, Y., Iwai, K., Nagata, K., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Sakashita, T., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., "Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 37, 3409-3416, 2019.
- 4) Yoshida, Y., Seo, T., Mikami, M., Kikuchi, M., "Temperature-field analysis of flame spread over droplet-cloud elements with interactive droplets in microgravity aboard Kibo on ISS", *Int. J. Microgravity Sci. Application*, Vol. 36, No. 3, 360303-1~6, 2019.