

氏名	へるまん さぶとろ HERMAN SAPUTRO
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第674号
学位授与年月日	平成27年9月30日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) システム設計工学系専攻
学位論文題目	Study of Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Using Percolation Approach Based on Flame-spread Characteristics in Microgravity
論文審査委員	主査 山口大学 教授 三上 真人 山口大学 教授 加藤 泰生 山口大学 教授 西村 龍夫 山口大学 准教授 田之上 健一郎 山口大学 准教授 瀬尾 健彦

【学位論文内容の要旨】

In this dissertation, a study of group combustion excitation in randomly distributed droplet clouds using percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity is presented.

One of the most important issues in spray combustion science is how to understanding the mechanism of the group combustion of liquid fuel spray, especially the excitation mechanism of the group combustion and the role of fuel droplets in it. The group combustion is required in stable spray combustion. Flame spread among fuel droplets plays an important role in excitation of the group combustion. The investigation on the flame-spread phenomenon has been performed in a simplified system of fuel droplets. Experiments of flame-spread of fuel droplets have been performed in microgravity actively. However, the experiment has limitation in the number of droplets due to relatively short microgravity durations in the ground based facilities. It is difficult to conduct flame spread experiments of large scale droplet clouds in microgravity.

This study has simulated the flame-spread behavior in randomly distributed large-scale droplet clouds with a low-volatility fuel equal size droplets and group combustion excitation by using a percolation approach. This study created a percolation model based on so-called “Mode 3” flame-spread with paying attention to the flame-spread limit distance $(S/d_0)_{limit}$ which was obtained in microgravity experiment of flame-spread droplet array and droplet cloud element with n-decane as a fuel. The simulation applies a simple flame-spread rule that the flame can spread to droplets existing within the flame-spread limit distance $(S/d_0)_{limit}$, which varies with the flame-spread direction and droplet interaction. Therefore, the study is classified as follows: 1)

Simulating flame-spread behavior of randomly distributed droplet clouds without considering droplet interaction. These simulations were created based on microgravity experimental results of evenly spaced droplet array. 2) Simulating flame-spread behavior of randomly distributed droplet clouds considering two-droplet interaction. This simulation was created based on microgravity experiments of droplet-cloud elements.

The percolation theory describes macroscopic connection characteristics in randomly distributed particle cloud with near field connection rule. When the percolation theory is applied to fuel spray combustion, the droplet is characterized as the particle. The flame spread rule between droplets is characterized as the connection rule. Droplets are arranged at lattice points in two-dimensional (2D) lattice or three-dimensional (3D) lattice. The group combustion of droplet cloud is defined to appear if the flame starting from a side in 2D droplet arrangements and a face in 3D droplet arrangements reaches the other sides in 2D droplet arrangements and the other faces in 3D droplet arrangements.

Mean droplet spacing $(S/d_0)_m$ of droplet cloud, lattice size NL/d_0 and lattice point interval L/d_0 were varied in order to investigate their effects on the occurrence probability of group combustion (OPGC) and the flame-spread behavior in large-scale droplet clouds. $(S/d_0)_m$ for 0.5 OPGC is defined as the critical mean droplet spacing $(S/d_0)_{critical}$, which separates the droplet cloud into two groups if the lattice size becomes infinity; relatively dense droplet clouds in which the group combustion is excited through flame spread and dilute droplet clouds in which the group combustion is never excited.

The main conclusions of flame-spread simulation of randomly distributed droplet clouds without and with considering two-droplet interaction are as follows:

1. The occurrence probability of group combustion, OPGC, rapidly decreases around the critical mean droplet spacing $(S/d_0)_{critical}$ as the mean droplet spacing $(S/d_0)_m$ is increased. When the lattice size, NL/d_0 , is increased, the OPGC graph approaches a step function in which OPGC is unity for $(S/d_0)_m$ less than the threshold value and zero for $(S/d_0)_m$ greater than the threshold value, and the critical mean droplet spacing $(S/d_0)_{critical}$ approaches the threshold value.
2. $(S/d_0)_{critical}$ is affected by the ambient temperature and pressure. $(S/d_0)_{critical}$ is greater at higher temperature and at lower pressure.
3. $(S/d_0)_{critical}$ in 3D droplet arrangement is greater than that in 2D droplet arrangement.
4. The $(S/d_0)_{critical}$ considering two-droplet interaction is higher than that without considering two-droplets interaction. The effect of two-droplet interaction on $(S/d_0)_{critical}$ in 2D droplet arrangements is almost similar to that in 3D droplet arrangements.
5. Even when the group combustion occurs, a portion of the droplets remains unburned. The number of unburned droplets attains maximum for the mean droplet spacing slightly greater than the critical mean droplet spacing.
6. The ignition time of the last burned droplet has a wide range of values, and the averaged ignition time attains maximum around the critical mean droplet spacing, showing the characteristic time of flame spread in randomly distributed droplet cloud attains maximum. Thus, the flame spread rate over the droplet cloud also has a wide range of values around the critical mean droplet spacing.

【論文審査結果の要旨】

液体燃料を利用する燃焼器において安定燃焼が行われるためには燃料噴霧の群燃焼の発生が必要である。連続燃焼を行う噴霧燃焼では、火炎基部において液滴間の燃え広がり後に群火炎が形成される。液滴間の燃え広がりにはこれまで、少数液滴を用いた微小重力実験を中心に行われてきているが、その知見が噴霧燃焼に活かされているとは言いがたい。本研究では、両者をつなぐことを目的とし、微小重力場において得られた液滴間の燃え広がり特性に基づいてランダム分散液滴群における燃え広がりおよび群燃焼発現を記述するパーコレーションモデルを構築した。このモデルにより、群燃焼発現に関する臨界点近傍の特性について明らかにした。本研究は、少数液滴燃焼の知見から噴霧燃焼の解明へとつなぐ燃焼学上の意義が大きいだけでなく、燃料分散系の燃焼限界に関する知見にも繋がるため工学的意義も大きい。

本論文は5章から構成されている。

まず第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、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行うことは難しいとその問題点を指摘している。そして、この問題点を解決するために、微小重力場でこれまで得られてきている液滴間燃え広がり知見を大規模なランダム分散液滴群の燃え広がりへと適用するパーコレーションモデルを構築する本研究の方針を述べている。

第2章においては、微小重力場でこれまで得られてきている液滴間燃え広がり知見を大規模なランダム分散液滴群の燃え広がりへと適用するためのパーコレーションモデルについて述べている。液滴列の燃え広がり実験から得られた燃え広がり限界距離の概念をもとにした液滴群の燃え広がりモデルおよび群燃焼についての新たな定義について説明している。また、第4章で必要となる液滴同士の局所干渉効果を燃え広がり限界間隔を通してモデルに考慮する手法についても説明を行っている。

第3章においては、パーコレーションモデルを用いたランダム分散液滴群の燃え広がり特性と群燃焼発現特性について詳細に調べている。まず、群燃焼発生確率を導入し、その値が液滴群の格子上の占有率の増大に伴いある占有率近くで急激に増大するパーコレーション特有の特性を示すことを確認している。実噴霧では空間に格子が存在しないため、格子に依存しない液滴群特性として、平均液滴間隔を導入することで、ある平均液滴間隔近傍で群燃焼発生確率が急激に変化する臨界平均液滴間隔の存在を示している。この臨界点近傍では液滴群燃焼の特性時間が極大となり、パーコレーション特有の特性が液滴群燃焼でも見られること、また、臨界点近傍では未燃液滴数が最大となり、燃え広がり速度は大きくばらつくなど、臨界点近傍の特性が詳細に示された。さらに、これらの特性の、周囲気体温度依存性、圧力依存性についても示している。最後に、各条件での燃え広がり限界間隔を代表長さとした新たな無次元化を提案し、これにより周囲気体条件に依らず、臨界平均液滴間隔を統一的にまとめることができることを示している。

第4章においては、局所2液滴干渉効果をモデルに組み入れ、臨界点近傍における燃え広がりおよび群燃焼発生特性を調べている。その結果、2液滴干渉により、臨界平均液滴間隔は増大すること、また、その増加割合は2次元液滴配列と3次元液滴配列の場合と同等であり、より簡略化されたモデルである2次元液滴配列を用いて群燃焼発生特性を調べることの可能性を示している。

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、実際の噴霧と今回のモデルの違いに関するもの、数値計算手法に関するもの、今後の研究の具体的な進め方に関するもの、他の燃焼系への知見の適用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3編)

(a)査読のある雑誌

- 1) Mikami, M., Sano, N., Saputro, H., Watari, H., Seo, T., “Microgravity Experiment of Flame Spread over Droplets at Low Pressure”, Int. J. Microgravity Sci. Appl., Vol. 31, No. 4, 172-178, 2014.

(b)査読のある国際会議の会議録

- 1) Saputro, H., Seo, T., Mikami, M.,, Simulating flame-spread behavior in large scale of droplet clouds with considering two-droplet interaction, Proc. 17th Annual Conference of Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-Asia2014-058, USB, 2014
- 2) Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., “Study of Flame Spread Behaviour in Large-scale 2-D Droplet Clouds Without Interactive Effect Using Percolation Approach”, Proceedings of 24th International Symposium on Transport Phenomena, No.80-110, 2013