

博士論文

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)

2020年3月

吉田 泰子

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究に関連する従来の研究	2
1.2.1 等間隔液滴列の燃え広がりに関する研究	3
1.2.2 不等間隔液滴列の燃え広がりに関する研究	4
1.2.3 液滴群要素の燃え広がりに関する研究	5
1.2.4 ランダム分散液滴群の燃え広がりに関する研究	6
1.2.5 パーコレーション理論を用いた噴霧燃焼の機構解明に関する研究	7
1.3 国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟「きぼう」における燃焼実験の概要	9
1.4 研究目的	10
参考文献	
第2章 実験装置および方法	14
2.1 はじめに	14
2.2 国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」における燃焼実験施設	

および実験装置	14
2.2.1 実験装置	16
2.2.2 液滴生成装置	16
2.2.3 液滴保持装置	17
2.2.4 着火装置	19
2.2.5 撮影装置	19
2.3 液滴群要素およびランダム分散液滴群の定義	20
2.4 可視光 TFP 法における火炎周辺の温度場測定	21
参考文献	
第3章 2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がり限界に関する調査	27
3.1 はじめに	27
3.2 液滴間隔および燃え広がり時間の無次元化および正規化	27
3.3 仮想液滴 M	28
3.4 実験条件	30
3.5 液滴群要素の燃え広がり挙動	31
3.6 2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がり限界分布	31

3.7	2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がりにおける火炎周辺の温度分布	33
3.8	液滴 A の燃焼寿命	38
3.9	液滴 A の燃焼寿命に対する仮想液滴 M を用いた場合の燃え広がり限界距離の依存性	39

参考文献

第4章	局所干渉燃焼がランダム分散液滴群の燃え広がり特性に及ぼす影響	52
4.1	はじめに	52
4.2	液滴間隔の無次元表示および燃え広がり速度の正規化	52
4.3	実験条件	54
4.4	ランダム分散液滴群の燃え広がり挙動	54
4.5	ランダム分散液滴群の局所燃え広がり特性の解析手法	56
4.6	ランダム分散液滴群の局所燃え広がり速度	60
4.7	2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素における燃え広がり特性とランダム分散液滴群における局所干渉燃焼による燃え広がり特性の比較	62
4.8	ランダム分散液滴群の燃え広がり経路の複雑性	64

4.9 ランダム分散液滴群の燃え広がりにおける大規模着火現象	68
--------------------------------------	----

参考文献

第5章 結論	96
--------------	----

本研究の関連論文	99
----------------	----

謝辞

学位論文の要旨

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

山口大学大学院 創成科学研究科 環境共生系専攻

吉田 泰子

噴霧燃焼は、液体燃料を数 μm から数十 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。

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。

2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素実験では、5個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。

Summary of the Doctoral Dissertation

The effect of droplet interaction on flame-spread characteristics of fuel-droplet clouds in microgravity

Graduate School of Science and Technology for Innovation
Yamaguchi University
Yasuko YOSHIDA

Many researchers have conducted combustion and evaporation experiments using a small number of droplets in a microgravity as a fundamental study to elucidate the mechanism of spray combustion. However, there is still a large gap between the knowledge obtained by those studies and actual phenomenon of spray combustion. From these viewpoints, the liquid-fuel combustion experiments titled "Elucidation of Flame Spread and Group Combustion Excitation Mechanism of Randomly Distributed Droplet Clouds (Group Combustion)" were conducted in 2017 as the first combustion experiment in the Japanese Experimental Module "Kibo" aboard the International Space Station (ISS). Based on the "Group Combustion" results on the influence of droplet interaction, this study investigates the flame-spread limit distribution around droplet cloud elements with a few interactive droplets in detail. Then, using the "Group Combustion" results on the flame spread over randomly distributed droplet clouds, the local droplet interaction effect on the flame spread behavior under the condition near the group combustion excitation limit was investigated.

As droplet-cloud elements, this study used four n-decane droplets, Droplets C, B, A and L, placed at fiber intersections of two-dimensional SiC-fiber lattice with a 4-mm fiber interval in a combustion chamber. The flame spreads over the droplet-cloud element in order of Droplets C, B, A and L. The position of Droplet L relative to Droplet A was varied to investigate the flame-spread-limit distribution around burning Droplet A. The position of Droplet B relative to Droplet A was varied to investigate the effect of two-droplet interaction between Droplets B and A on the flame spread to Droplet L. The position of Droplet C relative to Droplet B were also varied to investigate the effect of three-droplet interaction among Droplets C, B and A. The results show that as the burning lifetime of Droplet A, which is the starting point of the flame spread to Droplet L, increases, the flame-spread limit distance from the center of mass of the interactive droplets increases.

Randomly distributed droplet clouds consisting of up to 152 droplets were used to investigate local flame-spread behavior. By changing the average initial droplet

diameter and the total number of droplets, the mean droplet spacing was varied. If the mean droplet spacing is relatively small, the flame spreads radially, and a large group flame expands due to the combination of multiple group flames. If the mean droplet spacing is relatively large and thus outside the group combustion excitation limit, partial combustion occurs. Under the condition near the group combustion excitation limit, the flame-spread path becomes complicated, group flames are dispersed on a small scale, and the blue flame region also increases. This study compared the local flame-spread characteristics obtained with randomly distributed droplet clouds and the droplet-cloud elements. As a result, under the condition near the group combustion excitation limit, the flame spread occurs at droplet spacings larger than the flame-spread limit distance of droplet array. This is probably caused by the expansion of the local flame-spread limit due to the droplet interaction effect and due to preheating from the surrounding flame.

Various sizes of explosive phenomena in which simultaneous ignition of multiple droplets occur were observed near the group combustion excitation limit. The results show that the explosive phenomenon occurs even though the droplet showing the explosion locates outside the flame-spread limit of the droplet array. The explosive phenomenon is caused by the ignition of a flammable mixture around the unburned droplets heated for a long time and ignited by a flame coming along a complicated flame-spread path. It is considered that a long ignition delay time due to the deep wraparound leads to the expansion of the flammable mixture layer, and an explosive phenomenon occurs. Some explosive phenomena were compared considering the heating time and the initial flame radius of the explosion. The heating time is defined as the time from the ignition time of the droplet, which contributes most to the heating the unburned droplets to form a flammable mixture around them, to the ignition time of the droplet, which is the starting point of the explosion. The initial flame radius of the explosion was obtained based on the outside of the blue flame in the heated direction. The results show that the initial flame radius of the explosion becomes larger and therefore the scale of the explosive phenomenon becomes larger as the heating time of the droplet which is the starting point of the explosion becomes longer.

第1章 緒論

1.1 研究背景

噴霧燃焼は、液体燃料を数 μm から数十 μm オーダーに微粒化し、単位面積当たりの空気と燃料の接触面積を大きくして燃焼させる方式であり、燃焼時には液相と気相が混在するため、燃料の蒸発、拡散、混合、物質移動、熱移動、化学反応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必要がある。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。

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た、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^(1.1)。この宇宙実験では、液滴間の燃え広がりについて、液滴干渉の影響、自由液滴の影響、輻射熱損失の影響の観点から実験が行われた。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。

1.2 本研究に関連する従来の研究

噴霧燃焼の基礎的研究として、燃料噴霧を構成する燃料液滴に着目した要素研究である単一液滴の蒸発・燃焼研究が微小重力場で Kumagai・Isoda^(1.3)によって始められ、理論的・実験的にも多くの研究がなされてきた。さらに、多くの研究者によって微小重力場を利用した少数液滴の燃え広がりに関する知見が多く蓄積されてきた。一方、群燃焼については Chiu ら^(1.4)による定常燃焼理論に基づいた研究がなされている。しかしながら、両者をつなぐ研究はほとんど行われておらず、群燃焼の発現メカニズムを明らかにするに至っていない。

1.2.1 等間隔液滴列の燃え広がりに関する研究

梅村ら^{(1.5),(1.6),(1.7)}は、燃料に正デカンを用いた場合の微小重力場における直線液滴列の燃え広がりについて数学的モデルに基づいて解析を行っている。これより、液滴間の燃え広がりモードには 5 つのモードが存在することを報告している。それらは、着火液滴の拡散火炎が拡大し、次の未燃液滴をその拡散火炎の内側に取り込み、その火炎の熱によって気化が促進され、通過した拡散火炎に燃料蒸気を供給し、火炎を前進させるモード 1 (拡散火炎の通過)、着火液滴の拡散火炎が次の未燃液滴の可燃性混合気層に到達して着火し、予混合火炎が走るモード 2 (引火型)、着火液滴の拡散火炎によって次の未燃液滴まで熱伝導することで予熱し、未燃液滴の可燃性混合気層が自着火するモード 3 (飛び火型)、連続した可燃性混合気層を予混合火炎が伝播する予混合火炎伝播モード、燃え広がりが生じない蒸発モードに分けられる。

Mikami ら^(1.8)は液滴生成の新技术を考案し、極細の SiC ファイバー交点に液滴を生成する自由度を向上させた。これまで燃料液滴を保持するための線として用いられてきた線径 100 μm 程度の石英線の代わりに線形 14 μm の SiC ファイバーを用いることにより、石英線と比較して火炎から保持線への熱損失が小さいこと、保持線から液滴への熱伝導の影響が限りなく小さくすることができること、線径が小さくなることにより線上に保持された液滴の形状を真円に近づけ

ることができることも示しており、より正確な液滴燃焼の研究が可能となると報告している。線径 $14\mu\text{m}$ の SiC ファイバーの交点には先端外径 $40\mu\text{m}$ に引き延ばした極細ガラス管を用いて液体燃料を供給し、そのガラス管を引き抜くことで容易に液滴を生成することを可能とした。そして、この液滴生成技術を用いて室温大気圧下において燃料に正デカンを用いた場合の等間隔液滴列の燃焼実験を行った結果、石英線を用いた Kato ら^(1.9)の研究に比べて燃え広がり速度および燃え広がり限界距離が拡大することを報告している。

Mikami ら^(1.10)は微小重力場において等間隔に液滴を同時に生成した後、高温雰囲気へ挿入し、その燃え広がり挙動について調査を行っている。これより、燃え広がりモードは周囲雰囲気温度が高くなるとモード 3 からモード 2 に遷移し、液滴間隔が比較的小さい条件において予混合火炎伝播モードが発生すると報告している。また、周囲雰囲気温度が高いほど燃え広がり速度および燃え広がり限界距離が拡大することも報告している。また、等間隔液滴列の 300K 雰囲気における燃え広がり限界は $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ であることも報告している。

1.2.2 不等間隔液滴列の燃え広がりに関する研究

Oyagi ら^(1.11)は、不等間隔液滴列を用いることにより、実際の噴霧のような空間内にランダムに存在している液滴を模擬し、局所燃え広がり限界距離の調査

を行った。これより、2 液滴が干渉燃焼した場合、干渉液滴からその先の液滴の燃え広がり限界距離は Mikami ら^(1.10)の等間隔液滴列に比べて増大すると報告している。また、干渉する 2 液滴の間隔が小さいほど燃え広がり限界距離は拡大し、間隔が大きくなると等間隔液滴列に近い値を示すことも報告している。

1.2.3 液滴群要素の燃え広がりに関する研究

Mikami ら^(1.12)は干渉 2 液滴を有する液滴群要素を用いて微小重力場において燃え広がり実験を実施し、干渉液滴 B および A、燃え広がり観察用液滴 L から構成される液滴群要素を用いて、燃え広がり特性について調査している。これより、2 液滴干渉時の燃え広がり限界には方向依存性があり、燃え広がり観察用液滴 L の直前に配置されている液滴 A に対して垂直方向に液滴 L が配置された場合、水平方向に配置された場合に比べて燃え広がり限界は拡大すること、また、その燃え広がり限界は干渉液滴の無次元液滴間隔 S_{BA}/d_0 に依存して液滴干渉効果のない単一液滴周囲の燃え広がり限界分布および干渉 2 液滴間の質量中心に位置する体積 2 倍の仮想液滴における燃え広がり限界分布との関係に基づいてほぼ理解できることを報告している。

Mikami ら^(1.13)は空間中に不規則に様々な液滴直径で分布している噴霧を模擬し、不等直径液滴群要素の燃え広がり実験を微小重力環境で行い、直径の異なる

液滴 A と液滴 L 間の燃え広がり特性を調査している。これより、一定の初期液滴直径の液滴 A に対し、液滴間隔または液滴 L の初期液滴直径が増加すると、燃え広がり速度が低下する。燃え広がり時間は、液滴 A 周りの火炎から液滴 L への熱伝導時間と液滴 L の蒸発を活性化するのに必要な液滴 L の加熱時間の合計として概算される。この熱伝導時間と加熱時間は、液滴間隔とともに増加し、液滴 L の加熱時間は液滴 L の初期液滴直径の 2 乗とともに直線的に増加すると報告している。また、燃え広がり限界付近の条件下で、燃え広がり時間は液滴 A の燃焼寿命の約 80%によって制限されることも報告している。

Iwai ら^(1,14)は航空機での燃焼を模擬するため、高圧環境下での 2 つの干渉液滴を有する液滴群要素を用いた場合の燃え広がり実験を微小重力環境で行っている。燃料には正デカンを用いており、200kPa の圧力下における燃え広がり特性に関して調査した。その結果、200kPa における 2 液滴干渉後の燃え広がりにおいて、燃え広がり限界が拡大することを報告している。また、2 つの干渉液滴に対し、水平方向と垂直方向に液滴を配置して燃焼実験を実施した場合、水平方向よりも垂直方向の方が燃え広がり限界距離が拡大することも述べている。

1.2.4 ランダム分散液滴群の燃え広がりに関する研究

Mikami ら^(1,2)は「Group Combustion」実験で実施されたランダム分散液滴群の

燃え広がり実験結果について報告している。これより、群燃焼発生限界平均液滴間隔が存在すること、燃え広がり挙動は群燃焼発生限界付近の初期条件に大きく影響し、初期条件では液滴群の燃焼寿命が最大になり、大規模な着火現象が発生することが報告されている。

1.2.5 パーコレーション理論を用いた噴霧燃焼の機構解明に関する研究

Umemura・Takamori^(1.15)は、ランダム分散液滴群の燃え広がりを記述するパーコレーションモデルの構築をモード 1 の燃え広がり機構に基づき行った。これより、液滴間隔が狭い場合、つまり、パーコレーション理論では占有率が高い場合において、群燃焼発生確率が高くなることを報告している。

Oyagi ら^(1.11)は、一次元方向にランダムに配置された液滴群要素の燃え広がり確率の計算を実験により得られた局所燃え広がり限界距離を考慮したモード 3 の燃え広がり機構に基づくパーコレーションモデルを用いて調査した。燃え広がり確率はある占有率を境に占有率の増加に伴って急激に増加することを報告している。また、不等間隔液滴列を用いて調査された局所液滴干渉の影響を考慮すると群燃焼が起こる確率が高くなることを報告している。

Mikami ら^(1.16)は Oyagi ら^(1.11)のモード 3 の燃え広がり機構に基づくパーコレーションモデルを 3 次元配置されたランダム分散液滴群の燃え広がりへと拡張し

た。その結果、群燃焼発生確率が平均液滴間隔の増加とともに急激に減少する臨界平均液滴間隔を示した。格子サイズが燃え広がり限界距離の少なくとも約 10 倍の大きさである場合、燃え広がり特性は無限に大きなクラスターでの特性に似ている。燃焼の完了後に残存する未燃液滴の数密度は、臨界平均液滴間隔付近で最大に到達することを報告している。臨界条件では、燃え広がり経路を通る。したがって、液滴群の燃え広がり特性時間スケールは、非常に大きな値を持つ。ランダム分散液滴群の全体的な燃え広がり速度は燃え広がり限界を超えることを除いて、等間隔液滴列の燃え広がり速度とほぼ同じであることも報告している。

Saputro^(1,17)は、2 液滴干渉を有する液滴群要素の燃え広がり実験において得られた液滴間の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を用いて調査を行った。これより、2 液滴干渉によって燃え広がり限界距離が拡大することを考慮することにより、同一の平均液滴間隔においても群燃焼が発生する確率が高くなることを報告しており、周囲雰囲気温度が高くなると燃え広がり限界距離の増大に伴って群燃焼が発生する確率が高くなることを報告している。

1.3 国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟「きぼう」における燃焼実験の概要

これまで少数液滴の燃焼・蒸発実験が短時間微小重力環境を用いて行われてきた。微小重力実験では、比較的大きい液滴を用いることで時間・空間分解能を向上させて燃焼現象を観察することで、現象の本質を抽出することが可能という利点がある。ただし、液滴群の燃焼実験では 100 個程度の液滴を用いるため、すべての液滴の燃焼現象が終了するまでに非常に長い時間がかかる。そこで、長い微小重力時間と質の高い微小重力レベルが必要となる。微小重力環境を得る方法として代表的なのが、落下塔を用いた自由落下法、航空機のパラボリックフライトを用いた方法およびサウンディングロケットを用いた方法がある。落下塔を用いた自由落下法では、良質な微小重力環境が得られる一方で、数秒程度の短い微小重力時間しか得ることができない。航空機のパラボリックフライトでは、数十秒程度の比較的長い微小重力時間を得ることができる一方で、縦方向および横方向から G がかかるため良質な微小重力環境を得ることができない。サウンディングロケットを用いた方法では質の高い微小重力レベルを数分程度得ることができるが、多数の条件の実験を実施するのは困難である。

そこで、本研究では良質な長時間微小重力環境を得るために、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」を微小重力環境として使い、多数の液滴から構成

されるランダム分散液滴群の燃え広がり実験を実施した。この実験を実施することで、液滴間の燃え広がりから群燃焼が発現する間の詳細な現象について調査することができる。

1.4 研究目的

本研究では、液滴間の燃え広がりと群燃焼の発現メカニズムの解明を行うことで、これまで行われてきた少数液滴の燃焼研究成果を群燃焼そして実際の噴霧燃焼へとつなげることを目的としている。実際の噴霧は等間隔に存在しておらず、空間にランダムに多数の液滴が分散している。その燃え広がりには液滴間隔の小さい箇所では液滴干渉の影響を強く受けて変化することが予想される。そこで、本研究では、液滴間の燃え広がりにおける局所干渉の影響について調査した。

液滴群を最小の液滴数で表現した2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素を用いて、強干渉から弱干渉までの様々な配置条件における燃え広がり実験を実施し、詳細な燃え広がり限界分布の取得を試みた。本研究では、液滴群を線径14 μm のSiCファイバーを格子間隔4mm、縦横30 \times 30本の正方格子状に張った液滴保持装置に生成している。液滴が燃え広がった際のSiCファイバーの発光から、液滴群の高温領域における温度場解析も行い、干渉燃焼時の干渉液滴周囲の高

温領域の拡大や干渉液滴からその後の液滴への燃え広がりおよび時間経過における各液滴の熱影響について調査した。

また、最大 152 個の液滴を用いたランダム分散液滴群を用いて、様々な平均液滴間隔における燃え広がり特性を調査した。ランダム分散液滴群の局所燃え広がり特性を調査し、液滴群要素の燃え広がり特性と比較することで、燃え広がりにおける局所干渉効果の相違について確認した。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^(1,2)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、新たな液滴干渉効果について考察を行った。

参考文献

- 1.1 M. Mikami, H. Nomura, Y. Suganuma, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Generation of a Large-Scale n-Decane-Droplet Cloud Considering Droplet Pre-Vaporization in “Group Combustion” Experiments aboard Kibo/ISS”, Int. J Microgravity Sci., 35 (2018), 350202.
- 1.2 M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Space-Based Microgravity Experiments on Flame Spread over Randomly Distributed n-Decane-Droplet Clouds: Overall Flame-Spread Characteristics”, Microgravity Sci. Technol., 30(4) (2018), 535-542.
- 1.3 S. Kumagai, and H. Isoda, “Combustion of Fuel Droplets in a Falling Chamber”, Proceedings Combustion Institute, 6 (1957), 726-731.

- 1.4 H. Chiu, T. Liu, “Group Combustion of Liquid Droplets”, *Combustion Sci. Technol.*, 17 (1977), 127-142.
- 1.5 梅村章, “微小重力下での直線液滴列に沿った火炎伝ぱ (第 1 報, 液滴間火炎伝ぱ様式マップの作成)”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 68 卷 672 号 (2002), 2422-2428.
- 1.6 梅村章, “微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ぱ (第 2 報, 火炎伝ぱ速度特性)”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 68 卷 672 号 (2002), 2429-2436.
- 1.7 梅村章, “微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ぱ (第 3 報, 火炎伝ぱモデル計算)”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 68 卷 673 号 (2002), 2636-2642.
- 1.8 M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays using a new droplet-generation technique”, *Combust. Flame*, 141 (2005), 241-252.
- 1.9 S. Kato, H. Mizuno, H. Kobayashi, and T. Niioka, “Experiments on Flame-spread of a Fuel Droplet Array in a High-pressure Ambient”, *JSME Int. J., Series B*, 41 (1998), 322-330.
- 1.10 M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, Y. Wakashima, M. Kikuchi, S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high temperatures”, *Combust. Flame*, 146 (2006), 391-406.
- 1.11 H. Oyagi, H. Shigeno, M. Mikami, N. Kojima, “Flame-spread probability and

- local interactive effects in randomly arranged fuel-droplet arrays in microgravity”, *Combust. Flame*, 156 (2009), 763-770.
- 1.12 M. Mikami, H. Watari, T. Hirose, T. Seo, H. Saputro, O. Moriue, M. Kikuchi, “Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity”, *J. Thermal Sci. Technol.*, 12 (2017), JTST0028.
- 1.13 M. Mikami, N. Motomatsu, K. Nagata, Y. Yoshida, T. Seo, “Flame spread between two droplets of different diameter in microgravity”, *Combust. Flame*, 193 (2018), 76-82.
- 1.14 K. Iwai, K. Nagata, Y. Yoshida, T. Seo, M. Mikami, “Flame-Spread Characteristics of Droplet-Cloud Element with Two-Droplet Interaction at High Pressure in Microgravity”, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Aerospace Technology Japan*, 16 (6) (2018), 494-499.
- 1.15 A. Umemura, S. Takamori, “Percolation theory for flame propagation in non- or less-volatile fuel spray: A conceptual analysis to group combustion excitation mechanism”, *Combust. Flame*, 141 (2005), 336-349.
- 1.16 M. Mikami, H. Saputro, T. Seo, H. Oyagi, “Flame spread and group-combustion excitation in randomly distributed droplet clouds with low-volatility fuel near the excitation limit: a percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity”, *Microgravity Sci. Technol.*, 30 (2018), 419-433.
- 1.17 H. Saputro, “Study of group combustion excitation in randomly distributed droplet clouds using percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity”, Ph.D thesis, Yamaguchi University, (2015).

第2章 実験装置および方法

2.1 はじめに

噴霧燃焼のメカニズム解明のために、これまで少数液滴の燃焼・蒸発実験により得られた知見を実際の噴霧燃焼に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」において長時間微小重力環境を利用した「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)」が実施された^(2.1)。本研究では、噴霧燃焼中の液滴間の燃え広がりを模擬し、燃え広がりにおける液滴干渉の影響を調査するため、着火用液滴を含めて5個の液滴から構成される液滴群要素および最大で152個の液滴から構成されるランダム分散液滴群の燃え広がり実験を実施した。本章では燃え広がり実験で利用した実験装置および実験施設の概要について記載する。

2.2 国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」における燃焼実験施設および実験装置

実際の噴霧は数 μm ～数十 μm のオーダーで空間中に存在するが、このような液滴を用いて燃焼を行った場合、燃焼時間および燃焼領域が非常に小さいため、時間・空間分解能の観点から詳細な燃え広がり特性を把握することは困難であ

る。そこで本研究では、液滴直径を約 1mm に拡大して燃焼実験を行う。しかし、液滴径を拡大して燃焼させると火炎近傍での浮力による自然対流の影響が大きい。実際の噴霧では、通常重力場であっても液滴径が非常に微小なため、液滴近傍における浮力の影響は無視できるほど小さく、燃焼時には液滴の周囲に球形の火炎を形成する。しかし、本研究で用いる液滴径では、通常重力下で燃焼させると浮力の影響により、燃焼時の液滴周囲に形成される火炎が縦長になり、実際の噴霧での燃焼現象と異なる。そこで、浮力による自然対流の影響を無視できるほど小さくし、実際の噴霧における燃焼現象と同様にするため、微小重力環境で燃焼実験を行った。微小重力環境を得るための方法として、落下塔を用いた自由落下法、航空機を用いたパラボリックフライトおよびサウンディングロケットを用いた方法等がある。落下塔を用いた自由落下法では、微小重力レベルの質が高く、安価に実験を実施できるメリットがあるが、この方法によって取得できる微小重力時間が数秒程度と短いため、実施できる実験条件が限られてくるデメリットがある。航空機を用いたパラボリックフライトでは、落下塔を用いた自由落下法に比べて、数十秒程度と比較的長い微小重力時間を取得することができるが、縦方向からの G だけでなく横方向からの G も生じることから微小重力レベルの質が低いデメリットがある。サウンディングロケットを用いた方法では、質の高い微小重力レベルを数分間程度取得することができるが、多数の条件で

の実験を実施するのは困難である。本研究では、液滴群要素を用いた燃え広がり実験を実施するにあたり、1条件で5秒程度の時間を要し、数十条件以上の実験を要する。また、最大で152個のランダム分散液滴群の燃え広がり実験を実施するにあたり、1回の実験において液滴群の生成に6分程度、燃焼に最大20秒程度の時間を要することから、長時間かつ質の高い微小重力環境が必要不可欠である。本研究では、それを実現するため微小重力環境に国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」を用いた。「きぼう」における微小重力レベルは $1 \times 10^{-5} G$ である。

2.2.1 実験装置

本研究では、図 2.1 に示す独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が作製した実験装置^(2.2)を用いて長時間微小重力場で液滴群要素とランダム分散液滴群の燃焼実験を行った。アルミ製の燃焼容器内に液滴自動生成装置、着火装置、観察装置が配置されており、燃焼容器に設けたサファイアガラス製の観察窓を通して燃焼容器外からデジタルビデオカメラを用いて燃え広がり観察を行う。

2.2.2 液滴生成装置

液滴を空間に確実に保持し、液滴の配置条件の変更を容易に行えるようにするため、図 2.2 に示す液滴群自動生成装置を用いて、極細ガラス管を通して液体

燃料を供給し、3次元トラバース装置を用いて極細ガラス管を移動することで液滴の生成を可能にしている。ガラス管先端の位置決め精度は X 軸, Y 軸, Z 軸がそれぞれ, $\pm 0.049\text{mm}$, $\pm 0.044\text{mm}$, $\pm 0.033\text{mm}$ である。液滴群自動生成装置は, 先端の内径が $50\mu\text{m}$, 外径が $70\mu\text{m}$ の極細ガラス管, 極細ガラス管へ燃料を供給する配管とシリンジ, シリンジのプランジャを押すための移動ステージによって構成されている。

2.2.3 液滴保持装置

図 2.3 に本研究で用いた液滴保持装置を示す。本研究では液滴支持方法に懸垂液滴法を用い, 直径 $14\mu\text{m}$ の SiC ファイバー (日本カーボン, ハイニカロン) をファイバー保持フレームに 4mm 間隔で張られた 30×30 の正方格子の交点上に液滴を生成した。また, 本研究に用いた SiC ファイバーは光学顕微鏡により選定を行い, 直径 $14\mu\text{m}\pm 10\%$ の値に収まるものを使用した。Mikami ら^(2,3)は, 線径 $14\mu\text{m}$ の SiC ファイバーを用いた液滴生成技術および, 大気圧条件下において液滴列を用いた実験を行い, 2 本の SiC ファイバーの交点に液滴を生成する場合と 1 本の石英線の先端に液滴を懸垂する方法の燃え広がりを与える影響について調査している。これに基づいて, 本研究における SiC ファイバーの熱的影響について示す。

2本のSiCファイバーを液滴保持に用いた場合、液滴と火炎間における保持線の体積および気体の体積をそれぞれ V_f 、 V_g とおく。保持線の持つ熱容量と、気体の持つ熱容量の比は、保持線の比熱および密度を C_{pf} 、 ρ_f 、気体の比熱および密度を C_{pair} 、 ρ_{air} 、とした場合 $V_f\rho_fC_{pf}/V_g\rho_{air}C_{pair}$ と表せる。表2.1に示した物性値を利用して熱容量比を算出する。このとき初期液滴直径は、本研究で使用した1mm、火炎直径は8mmとして計算する。直径14 μm のSiCファイバーを用いた場合、保持線を加熱するのに必要な熱量は、火炎内の気体を加熱するのに必要な熱量の1.8%程度であり、無視できるほど小さい。

保持線を通して液滴内に供給される熱量について考える。保持線を通して液滴に供給される熱量は、保持線の断面積 S_f と熱伝導率 λ_f の積 $S_f\lambda_f$ であり、温度勾配に比例する。液滴直径1mmにおける液滴表面の表面積 S_d 、空気の熱伝導率 λ_{air} を用いて、SiCファイバーと周囲気体から供給される熱量の比 $S_f\lambda_f/S_d\lambda_{air}$ を計算すると $S_f\lambda_f/S_d\lambda_{air}=0.043$ である。液滴表面でのSiCファイバー内の温度勾配は、燃焼初期では気相の温度勾配より小さく、燃焼後期にはほぼ等しくなる。これより、SiCファイバーを通じて液滴内に供給される熱量は気相から液滴に供給される熱量と比較して非常に小さい。これより、初期液滴直1mmにおけるSiCファイバーの影響は無視できるほど小さいと言える。以上の見解については、Faroukら^(2.4)によっても述べられている。

2.2.4 着火装置

本研究では、熱線着火法を用いた。熱線は半ループ状にした直径 0.35 mm の Fe-Cr 線を使用し、外形 0.8 mm、内径 0.4 mm の SUS 管で熱線を保持した。熱線は液滴保持装置の一辺の中央に配置され、熱線を通電加熱することで、近くに配置された液滴を加熱し、液滴群の燃え広がりを開始させた。着火装置の抵抗は約 1 オームで、Fe-Cr 線は 6A の電流により熱線としている。

2.2.5 撮影装置

本研究では、初期液滴直径の計測および液滴群の燃え広がり挙動を取得するため、燃焼容器外に設置されたデジタルビデオカメラ (Canon, EOS 5D MarkII) を用いて、静止画および動画の撮影を燃焼容器に設けられたサファイヤガラス製の観察窓を通じて行った。初期液滴直径は、3 軸移動ステージに取り付けられている 30×146 mm の LED バックライトを用いて、液滴生成後の着火直前にデジタルビデオカメラで静止画を撮影し、その画像から楕円近似を用いたプログラムによって算出した。デジタルビデオカメラの静止画解像度は 5616×3744 pixel であり、静止画像分解能は 41.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。

液滴の燃え広がり挙動の撮影の際には、動画解像度は 1920×1080 pixel であり、動画空間分解能は 122 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。また、動画の撮影速度は 30 fps である。

2.3 液滴群要素およびランダム分散液滴群の定義

本研究では、数個の液滴から構成される液滴群要素および多数の液滴から構成されるランダム分散液滴群の燃え広がり挙動を観察するため、液滴群要素では着火用液滴を含めた 5 つの液滴の液滴配置および初期液滴直径、および最大で 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。

多数の液滴の生成には長時間必要である。正デカンは大気圧下では沸点が 447 K、引火点は 319 K と比較的高く揮発性の低い液体である。しかし、室温下であっても 100 個程度の液滴を有するランダム分散液滴群の場合には液滴群生成中の予蒸発は無視できない。そこで、Mikami ら^(2.1)は生成中の液滴の蒸発速度について調査した。その結果、97 液滴の場合、100 kPa、293 K における蒸発速度定数は $K=1.7 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$ と報告している。この蒸発速度定数を適用することにより着火時の初期液滴直径を 5% のばらつき内に入れることが可能になった。

さらに、Mikami ら^(2.3)この液滴生成手法における液滴生成中の予蒸発が燃え広がりを与える影響についての考察も行っており以下のように報告している。本研究の実験装置内の液滴群近傍の温度は 293 K で一定に維持されており、293 K における正デカンの気液界面の気相側当量比は $\phi^*=0.09$ である。液滴生成後の予蒸発量は着火待ち時間に依存するが、空間内の最大当量比は ϕ^* であり、その値は

可燃範囲の下限当量比（0.5 程度）より十分に小さい。そのため、このような非常に希薄な予混合気中では予混合気火炎伝播は生じない。さらに、Nomura ら^(2.5)は微小重力場の燃料蒸気/空気予混合気中において液滴列の燃え広がり実験を行い、そのような小さい気相当量比は燃え広がりほとんど影響を与えないことを報告している。

2.4 可視光 TFP 法における火炎周辺の温度場測定

液滴が燃え広がる際の温度分布を 14 μm の SiC ファイバーで保持された液滴からの放射に基づく Thin Filament Pyrometry(TFP)法によって測定した。空気の温度伝導率は SiC ファイバーの温度伝導率よりも一桁大きいため、空気中の熱伝導速度はファイバー中よりもはるかに速い。つまり、ファイバーは高温空気によって加熱される。周囲温度変化に対する SiC ファイバーの時間応答性は約 1ms であるため、SiC ファイバーの温度は気体温度変化に急速に追従する^(2.6)。

SiC ファイバーからの発光輝度と温度の相関を求めるため、図 2.4 に示すように、SiC ファイバーの RGB 画像におけるピクセルの赤色値(R 値)を温度に対してプロットした。プランクの法則における放射エネルギー密度の温度依存性を考慮して、フィッティング関数 $R=A\exp(-B/T)$ を使用した。 T は温度、 A および B は定数である。本カメラは赤外線を検出できないため、今回用いた TFP 法では

1150K<T<1450K で有効である。温度の誤差は約 65K 程度である。

参考文献

- 2.1 M. Mikami, H. Nomura, Y. Suganuma, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Generation of a large-scale n-decane-droplet cloud considering droplet pre-vaporization in “Group Combustion” experiments aboard Kibo/ISS”, *Int. J Microgravity Sci.*, 35 (2018), 350202.
- 2.2 M. Kikuchi, Y. Kan, A. Tazaki, S. Yamamoto, M. Nokura, N. Hanafusa, Y. Hisashi, O. Moriue, H. Nomura, M. Mikami, “Current status on preparation of fuel droplet clouds combustion experiment “Group Combustion” onboard the KIBO”, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 12 (2014), Th_25-Th_30.
- 2.3 M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima and S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays using a new droplet-generation technique”, *Combust. Flame*, 141 (2005), 241-252.
- 2.4 T. Farouk, and F.L. Dryer, “Microgravity droplet combustion: effect of tethering fiber on burning rate and flame structure”, *Combustion Theory and Modelling*, 15 (2011), 487-515.
- 2.5 H. Nomura, H. Takahashi, Y. Suganuma and M. Kikuchi, “Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture”, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013), 1593-1600.
- 2.6 M. Mikami, H. Watari, T. Hirose, T. Seo, H. Saputro, O. Moriue and M. Kikuchi, “Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity”, *J. Thermal Sci. Technol.*, 12 (2017), JTST0028.

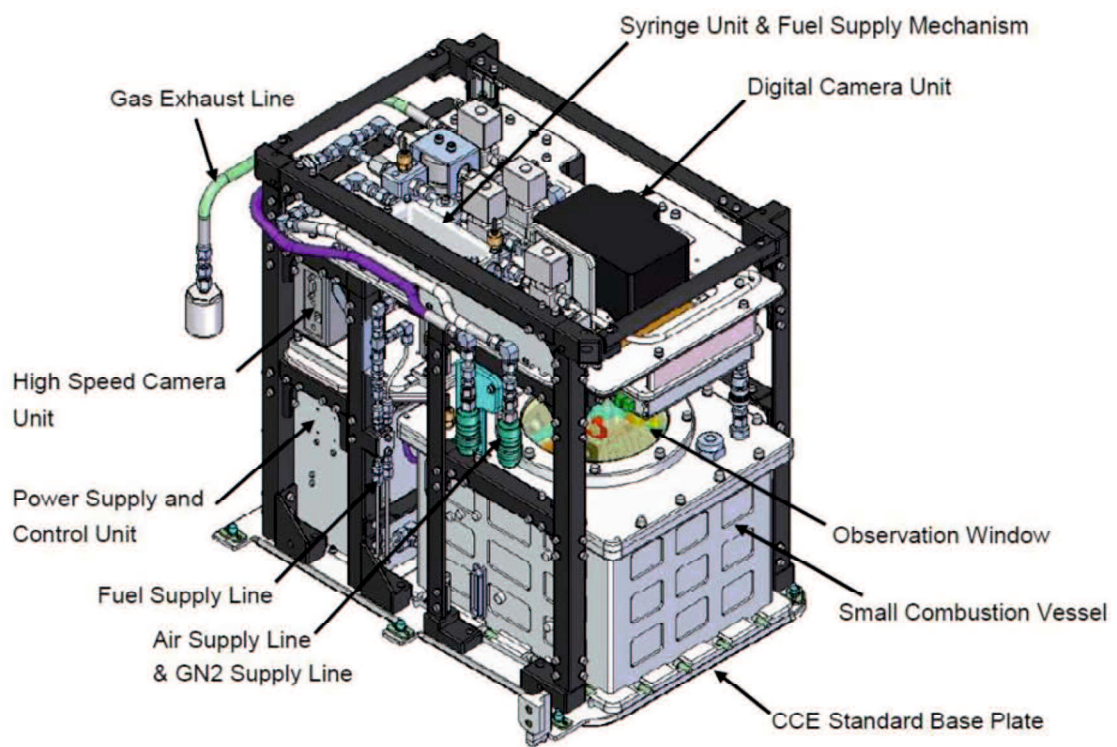


Fig. 2.1 Schematic of the GCEM (Group Combustion Experiment Module) main assembly^(2.2).

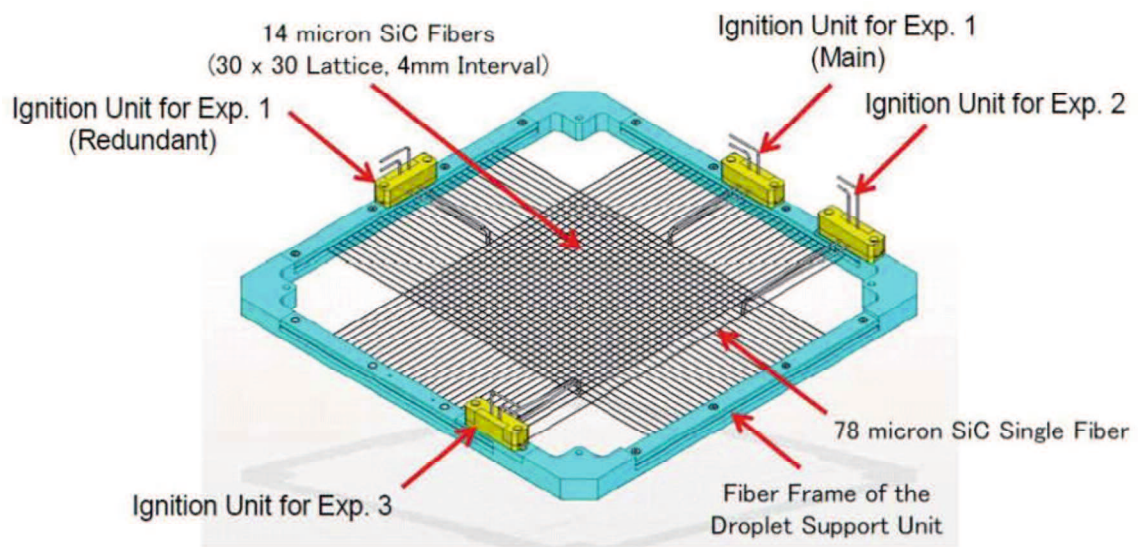


Fig. 2.2 SiC fiber lattice for droplet cloud suspension^(2.2).

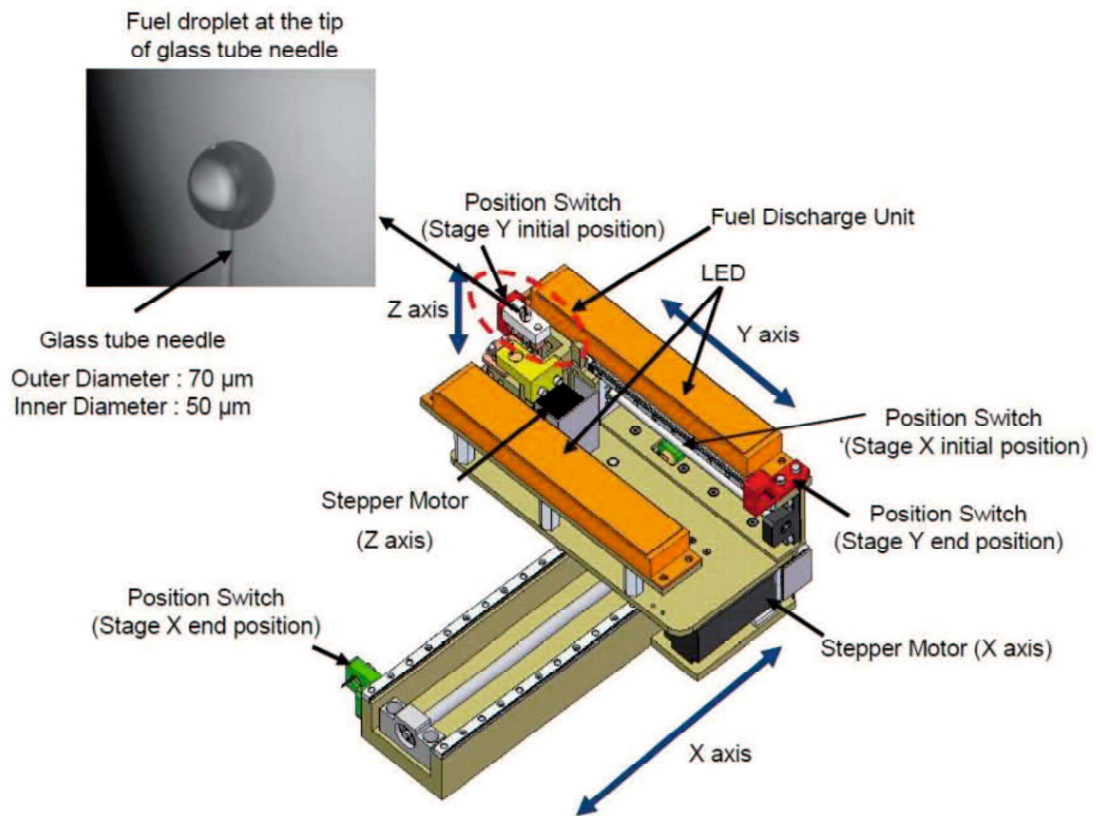


Fig. 2.3 Glass needle for droplet generation and three-dimensional traverse system^(2.2).

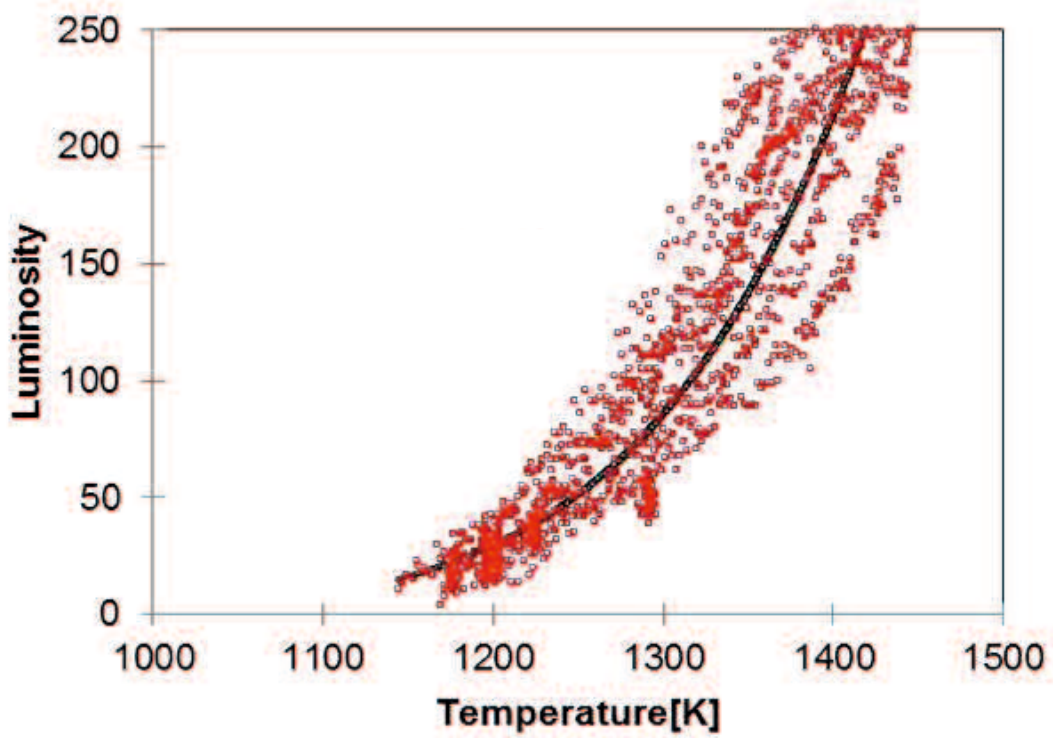


Fig. 2.4 Relation between temperature and luminosity of R value of RGB image of heated SiC fiber.

第3章 2・3個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がり限界に関する調査

3.1 はじめに

実際の噴霧において液滴は空間にランダムに分散しており、燃料液滴は等間隔に存在しておらず、局所的には液滴間隔が異なる。ある一定の間隔以上に液滴間隔が大きい箇所では液滴間の燃え広がりが生じないと考えられる。このように液滴間の燃え広がりには燃え広がり限界距離が存在する。また、液滴間隔が比較的小さい箇所では局所的に複数の液滴が干渉燃焼し、その後の燃え広がりには影響を及ぼすと考えられており、液滴が干渉燃焼することで燃え広がり限界距離が拡大することが報告されている^(3.1)。この他にも、液滴干渉に関する研究は多く行われてきており、本研究では、2個または3個の干渉液滴を有する液滴群要素を用いて、詳細な燃え広がり限界分布を取得し、その干渉効果について調査した。

3.2 液滴間隔および燃え広がり時間の無次元化および正規化

本研究では5個の液滴から構成され、2個または3個の干渉液滴を有する液滴群要素を用いて、燃え広がり可否を確認し、燃え広がり限界の調査を行った。図3.1より、本研究で用いた液滴群要素は、液滴群要素の燃え広がりを開始させる

着火用液滴 I, 干渉用液滴 C, B, A, 燃え広がり可否を観察するための液滴 L で構成される。液滴間の燃え広がり挙動は液滴中心間隔 S だけでなく、初期液滴直径 d_0 により異なる。Umemura ら^(3.2)の 2 液滴干渉燃焼理論によると、2 液滴間の燃焼過程は初期配置による無次元液滴間隔 S/d_0 のみにより決まることが知られている。また、梅村ら^(3.3)は、液滴間の燃え広がりモードが無次元液滴間隔 S/d_0 により分類できることを報告している。これらより、液滴間の燃え広がりにおいても無次元液滴間隔 S/d_0 が重要なパラメータと言える。本研究においても液滴群の評価に無次元液滴間隔 S/d_0 を用いる。また、液滴間の燃え広がり、拡散と熱伝導により律速されていると仮定し、初期液滴直径 d_0 [mm] を代表長さとする熱伝導特性時間 d_0^2/a [s] により時間 t [s] を除した at/d_0^2 を無次元燃え広がり時間とする。ただし、 a [mm²/s] は空気の温度伝導率である。本研究では、温度伝導率の依存性を考慮せず、初期液滴直径 d_0 について正規化した時間 t/d_0^2 [s/mm²] を用いる。

3.3 仮想液滴 M

液滴 B および A を遠方から見た場合、2 個の液滴は液滴 B および A の質量中心位置に 2 倍の質量(2 倍の体積、 $2^{1/3}$ の直径)の 1 個の液滴の点源として近似することができる。干渉液滴を近似する極限としての 1 個の液滴を仮想液滴 M と

呼ぶことにする。仮想液滴 M は液滴 B および A の質量を足し合わせた 1 つの液滴として考え、液滴 B および A の質量中心位置に質量 2 倍の球状の液滴とする。

Mikami ら^(3,4)は室温大気圧下での微小重力場における等間隔液滴列の燃え広がり特性を調査しており、等間隔液滴列の燃え広がり限界は $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ であると報告している。また、Mikami ら^(3,1)は、微小重力場における 2 個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がりについても調査しており、液滴 B, A の中間に体積 2 倍の仮想液滴 M が存在する場合の燃え広がり限界は $2^{1/3}(S/d_0)_{\text{limit}}=17.6$ であり、実際の燃え広がり限界と概ね一致することを報告している。

本研究において、仮想液滴 M を用いて燃え広がり限界について議論を行う。単一液滴の燃え広がり限界として先ほどの等間隔液滴列の燃え広がり限界距離 $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ を用いる。以降これを SFL1 と称する。2 液滴干渉の場合の燃え広がり限界として、液滴 B, A の中間に配置した質量 2 倍の仮想液滴 M の燃え広がり限界 $2^{1/3}(S/d_0)_{\text{limit}}=17.6$ を用いる。以降これを FSL2 と称する。そして、3 液滴干渉の場合の燃え広がり限界として、液滴 C, B, A の中間に配置した質量 3 倍の仮想液滴 M の燃え広がり限界 $3^{1/3}(S/d_0)_{\text{limit}}=20.2$ を用いる。以降これを FSL3 と称する。

3.4 実験条件

図 3.1 に本研究で用いた液滴群要素の液滴配置の概略図を示す。本研究で用いた液滴群要素は 5 個の液滴から構成されており、液滴 A からの燃え広がりを観察するための液滴 L, 液滴 C, B は液滴 A との干渉の影響を調査するために用いる。着火開始用の液滴 I は液滴 C から 12 mm 離れた位置に配置されており、着火装置によって着火され、燃え広がりを開始する。着火用液滴 I は Oyagi ら^(3.5)によって、液滴 C から遠い位置に配置されているため、その後の燃え広がりには影響を及ぼさないと報告されている。液滴 L の位置を変化させ、液滴 A から L への燃え広がり限界を調査した。液滴 A・L 間の間隔は $S_{AL}=12\sim 24$ mm の範囲で変化させた。また、液滴 L の角度方向を $\theta_1=-45$ deg. ~ 180 deg. の範囲で変化させた。液滴 B・A 間の距離は $S_{BA}=4\sim 12$ mm の範囲で変化させた。液滴 C・B 間の距離は $S_{CB}=4\sim 12$ mm の範囲で変化させた。また、液滴 C の角度方向を $\theta_2=0$ deg. ~ 90 deg. の範囲で変化させた。ほとんどの条件においては初期液滴直径 $d_0=1$ mm を用いている。ただし、燃え広がり限界を詳細に調査する場合において、液滴 A・L 間の液滴間隔 S_{AL} を一定にし、初期液滴直径を $d_0=0.92$ mm ~ 1.15 mm の範囲で変化させ、 S_{AL}/d_0 を変化させた。着火用液滴 I を除く液滴群要素の初期液滴直径 d_0 の標準偏差は 4.5% 未満であった。低揮発性燃料である正デカンを用いたため、最初に生成された液滴は生成開始から着火までの液滴直径の変化は 1%

未満だった。液滴表面での気相側の局所当量比は液滴生成の間で 0.09 であり、可燃範囲の下限よりもはるかに小さい値であることから、燃え広がり開始以前の気化は燃え広がり大きな影響を与えない。

3.5 液滴群要素の燃え広がり挙動

図 3.2 に本研究で得られた液滴群要素の燃え広がり挙動を示す。時間 t は液滴 A の着火時刻から開始する。青炎の視認性が向上するよう各画像の明るさを 0% から 75% に変更し、コントラストを 0% から 50% に変更している。最後の画像は液滴 L が着火した時刻を示している。燃え広がり過程は、拡散火炎から未燃液滴への熱伝導、未燃液滴の加熱、未燃液滴の周囲の可燃性混合気層の形成、混合気層の一端での着火、混合気層の予混合火炎伝播、そして新しい拡散火炎の形成である。予混合火炎と初期拡散火炎は青色である。さすが拡散火炎の内部で生成されると、拡散火炎の色は急激に黄色に変わる。

3.6 2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がり限界分布

図 3.3 および図 3.4 に本研究で得られた液滴群要素の燃え広がり限界分布図を示す。液滴 L が燃え広がった場合を \circ とし、燃え広がらなかった場合を \times とする。燃え広がり限界は \circ と \times の間に存在する。図の縦軸と横軸は液滴 C, B, A および L の平均初期液滴直径 d_0 で正規化している。単一液滴の燃え広がり限界 FSL1 は

一点鎖線，液滴 B，A の 2 液滴干渉時の燃え広がり限界 FSL2 は破線，液滴 C，B，A の 3 液滴干渉時の燃え広がり限界 FSL3 は 2 点鎖線で示している。

図 3.3(a)では，燃え広がり限界は，液滴 A または液滴 B の FSL1 の外側に存在し，FSL2 と概ね一致するが，FSL2 よりも僅か内側に存在する。これは，2 液滴干渉燃焼が燃え広がり限界を拡大することを明確に示している。図 3.3(b)では， $\theta_1=0 \text{ deg.}$ の場合，燃え広がり限界は液滴 A の FSL1 と液滴 B および A の FSL2 に概ね一致する。 $\theta_1=90 \text{ deg.}$ の場合，燃え広がり限界は液滴 A の FSL1 の外側に存在し，液滴 B および A の FSL2 の少し外側に存在する。これは，液滴 C が燃え広がり限界に僅かに影響することを示唆している。図 3.3(c)では，燃え広がり限界は液滴 A の FSL1 に概ね一致し FSL2 はもはや適切な近似ではない。これは液滴 B および A の干渉効果が燃え広がり限界に影響しないことを示している。図 3.4(d)では， $0 \text{ deg.} \leq \theta_1 < 180 \text{ deg.}$ の範囲で FSL2 の少し内側に燃え広がり限界が存在し， $\theta_1=180 \text{ deg.}$ と $-45 \text{ deg.} \leq \theta_1 < 0 \text{ deg.}$ では FSL2 の少し外側に存在する。これは，液滴 C が燃え広がり限界に僅かに影響することを示唆している。図 3.4(e)では， $0 \text{ deg.} \leq \theta_1 < 45 \text{ deg.}$ の範囲で，液滴 B および A の FSL2 の外側と， $\theta_1=45 \text{ deg.}$ 付近の液滴 C および B の FSL2 のいくつかの燃え広がり条件が存在し，FSL2 と FSL3 の間に燃え広がり限界が存在し，この条件においては 3 液滴干渉効果を示している。図 3.4(f)では， $\theta_1=0 \text{ deg.}$ および 90 deg. の燃え広がり限界である。図 3.3(a)

の結果を考慮すると、液滴 B および A の FSL2 が FSL2 の僅か内側に存在する。 $-45 \text{ deg.} \leq \theta_1 < 0 \text{ deg.}$ の領域では、液滴 C が燃え広がり限界に影響を与えることを示唆している。液滴 L は液滴 C の FSL1 の外側に位置するが、液滴 B および A の FSL2 の外側に燃え広がる条件があるためである。従って、液滴 C による液滴 L の予熱により、干渉液滴 B および A の燃え広がり限界が拡大する。

3.7 2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がりにおける火炎周辺の温度分布

図 3.5 および図 3.6 に、液滴 L に燃え広がらない場合の燃え広がり中における TFP 法によって得られた 1200K での SiC ファイバーの高温領域先端位置の時間変化を等温分布で示している。□は液滴 C の着火時刻を示す。△は液滴 A の着火時刻を示す。◇は高温領域が最大となる時刻を示しており、○は◇から一定時間後の時刻を示している。

高温領域が最大となる時刻◇の等温線に着目すると、図 3.5(a)は干渉液滴 B, A の質量中心位置から高温領域が拡大しており、2 個の液滴による強干渉効果により、高温領域は干渉する液滴の質量中心周りに円形に広がる。また、高温領域最大の時刻では、液滴 C の影響はほとんど無く、液滴 B, A の干渉燃焼の影響が支配的である。一方で図 3.5(b), (c)では、高温領域は液滴 B, A の周囲で楕円

形に広がる．図 3.5(b)は，高温領域が最大の時刻から一定時間後も液滴 B, A の質量中心周りに楕円形に干渉燃焼を維持している．図 3.6(c)は，高温領域最大の時刻から一定時間後には液滴 A のみの単一燃焼となっている．

図 3.6(d)も図 3.5(a)と同様に，干渉液滴 C, B, A の質量中心周りに高温領域が円形に広がる．一方，図 3.6(e), (f)では，高温領域は液滴 C, B, A の周囲に楕円形に拡大し，高温領域が最大になった後に液滴 C の燃焼が終了する．その後は液滴 B, A のみの干渉燃焼となる．また，図 3.6(e), (f)の場合には，高温領域が最大のときでも液滴 C の燃焼が影響し，液滴 L が液滴 C の周囲に位置する場合には燃え広がりにも影響を及ぼす．

図 3.7 および図 3.8 に液滴 L に燃え広がる場合の 1200K の高温領域における等温線分布を示す．図 3.4 に示したプロットと同時刻のプロットに加え，+は液滴 L が着火した時刻を示す．各等温線から液滴 L まで等温線に対して垂直な線を引き，各時刻での液滴 L への熱の影響がどの液滴から受けているのかを視覚的にわかりやすくするために示した．

図 3.7(a), (b)および図 3.8(g), (h)は，液滴 L が着火する直前の等温線に対して垂直な線を見ると，液滴 L の着火は液滴 A の燃焼の影響を最も受ける．図 3.7(c)の場合は，液滴 L が着火した際の等温線に対する垂線は，液滴 B から僅かに伸びているため，液滴 L の着火は液滴 B の燃焼の影響を最も受ける．図 3.7(d)の

場合、液滴 L の着火直前の等温線に対する垂線を見ると、液滴 L の着火は液滴 A の影響を最も受ける。これよりも早い時刻に着目すると、液滴 C の影響も強いことがわかる。図 3.7(e), (f)および図 3.8(i)の場合には、液滴 C の燃焼は液滴 L の着火に最も影響を与えている。これは各時刻での等温線に対する垂線が液滴 C から液滴 L へ伸びているからである。液滴 C の周囲の火炎が燃え広がり限界の外側から液滴 L を予熱し、その後、液滴 B および A の FSL2 の外側に位置する液滴 L が着火したと考えられる。液滴 B および A が最も近い配置での強干渉効果がある場合、液滴 C は $\theta=45$ deg.および 90 deg.では、周囲に存在する火炎の燃え広がりにも影響する。

図 3.9 に温度場解析の結果および燃え広がり実験の結果から得られた燃え広がり限界分布を考慮した 2 液滴干渉時の場合の強干渉時から弱干渉時までの燃え広がり限界を示す。図 3.9(a), (c), (e)は実際の実験結果から予測される燃え広がり限界を示す。図 3.9(b), (d), (f)は、図 3.9(a), (c), (e)から予測される燃え広がり限界を示している。青色の 2 点鎖線は、液滴 B, A の 2 液滴干渉時の予想した燃え広がり限界を示しており EFSL(Expected Flame-Spread Limit)と称する。黄色の一点鎖線は各液滴の単一燃焼時の燃え広がり限界 $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ の FSL1 である。3.6 節では Mikami ら^(3.1)の考案した、液滴 B, A の中間に体積 2 倍の仮想液滴 M が存在する場合の燃え広がり限界 $2^{1/3}(S/d_0)_{\text{limit}}=17.6$ を用いて考察を行った。

しかし、図 3.9(a)において仮想液滴 M における燃え広がり限界の内側で液滴 L が燃え広がらない条件があり、実際の実験結果と一致しない条件が存在した。

Mikami ら^(3.1)は、液滴 B・A の無次元液滴間隔 S_{BA}/d_0 に依存して FLS1 および FSL2 の影響の及ぶ範囲が変化すると報告しており、 S_{BA}/d_0 が十分小さい場合、FSL2 は FLS1 よりも大きくなる。 S_{BA}/d_0 が十分大きい場合、FLS1 は、干渉液滴に対して x 方向では FSL2 よりも大きくなる可能性があると報告している。図 3.3 より、実際の結果では楕円形に燃え広がり限界は拡大する。 $S_{BA}/d_0=4$ の場合には、図 3.3(a)に示すように、干渉効果により液滴 A に対して x 方向よりも y 方向に燃え広がり限界が拡大し、 $S_{BA}/d_0=8$ の場合には、図 3.3(b)に示すように、干渉液滴に対して x 方向の燃え広がり限界は FSL2 よりも FSL1 の方が若干大きくなるため、 x 方向の燃え広がり限界は FSL1 の範囲まで拡大する可能性がある。

$S_{BA}/d_0=12$ の場合には、図 3.3(c)に示すように、干渉液滴に対して x 方向の燃え広がり限界は FSL2 よりも FSL1 の方がより大きくなるため、 x 方向の燃え広がり限界は FSL1 に従うと考えられる。また、図 3.5(c)の液滴 L に燃え広がらない場合の干渉液滴周りの温度分布より、液滴 A 着火時の液滴 B、A の高温領域は、各液滴周りに沿って形成されており、液滴 B、A の質量中心位置にくぼみがある。高温領域が最大の時刻では、 x 方向の高温領域は液滴 A 着火時の高温先端位置と概ね同じ位置だが、 y 方向の高温領域が、干渉効果により液滴 B、A の質量

中心位置で若干拡大している。一定時間が経過すると液滴 A 周りにのみ高温領域が形成されていることから、 y 方向の燃え広がり限界は液滴 B, A の質量中心位置で若干拡大すると考えられる。

そこで、FSL2 を基に、楕円の方程式を用いて、 x 方向および y 方向の定数を実際に得られた実験結果から決定し、図 3.9 に示す燃え広がり限界を予測した。図 3.9(b), (d), (f) の条件は、実際の実験では実施していない条件である。そのため、2 液滴干渉時の燃え広がり限界 EFSL は図 3.9(b) の $S_{BA}/d_0=6$ の場合には、液滴 B・A の FSL1 が FSL2 の内側にあるため、図 3.9(a) の $S_{BA}/d_0=4$ の条件と同様の EFSL としている。図 3.9(d) の $S_{BA}/d_0=10$ の場合には、干渉液滴に対して y 方向の定数は図 3.9(c) の $S_{BA}/d_0=8$ の結果よりも小さくなると予想し、 x 方向は液滴 B および A の FSL1 に沿うようにフィッティングした。図 3.9(f) の $S_{BA}/d_0=14$ は、FSL1 と同じ大きさなため、EFSL は存在せず、液滴 B および A の FSL1 のみを示した。 $S_{BA}/d_0=8$ 以降の条件では干渉液滴に対して x 方向の燃え広がり限界は FSL1 となり、 y 方向の燃え広がり限界は、実際に得られた結果を考慮し、液滴 B および A の FSL1 の燃え広がり限界距離に沿うように定数を決定した。

液滴 B, A 間の液滴間隔が大きくなるほど、2 液滴干渉時の燃え広がり限界は x 方向に平らな楕円形に燃え広がり限界が拡大していくと考えられる。液滴 B および A の単一燃焼時の燃え広がり限界が、2 液滴干渉時の燃え広がり限界内に

ある時は、 x 方向の燃え広がり限界は FSL2 と概ね一致するが、図 3.3(a)より、 y 方向の燃え広がり限界は FSL2 より内側になる。2 液滴が強干渉する場合にも、燃え広がり方向依存性より、燃え広がり限界は楕円形に存在すると考えられる。干渉液滴に対して x 方向に液滴 B および A の FSL1 の燃え広がり限界が、FSL2 の燃え広がり限界の外側になると、干渉液滴に対して x 方向の燃え広がり限界は FSL1 となる。そして、干渉液滴の液滴間隔が大きくなるほど、干渉液滴に対して y 方向の燃え広がり限界は縮小してき、最終的には、 $S_{BA}/d_0=14$ のときに完全に単一燃焼時の燃え広がり限界になると考えられる。

3.8 液滴 A の燃焼寿命

図 3.10 に液滴 L に燃え広がらない条件の液滴 A の燃焼寿命 t_{bA}/d_0^2 を液滴間隔 S_{BA}/d_0 に対して示す。ここで、液滴 A の燃焼寿命 t_{bA} を初期液滴直径 d_0 について正規化を行う際の d_0 として液滴 A の初期液滴直径を用いた。これより、液滴間隔 S_{BA}/d_0 もしくは S_{CB}/d_0 が小さくなると、液滴 A の燃焼寿命は液滴干渉効果によって増加する^(3.6)。燃焼寿命が長いほど、高温領域が大きくなる。液滴干渉効果に関しては、多くの研究がなされており、例えば、梅村^(3.7)や Sirignano^(3.8)、による理論的解析、Mikami ら^(3.6)による微小重力場での燃焼実験がある。複数液滴周りに形成される火炎は火炎間の酸素欠乏により 1 つの群火炎となり、火炎の

サイズが拡大するため、群火炎内の温度勾配が低くなり、気化速度が低下し、燃焼寿命が長くなる。上述のように、液滴 A の燃焼寿命は液滴の干渉効果により、干渉液滴の質量中心位置で高温領域が拡大するため、燃焼寿命が長くなる。

3.9 液滴 A の燃焼寿命に対する仮想液滴 M を用いた場合の燃え広がり限界距離の依存性

図 3.11 は液滴 L へ燃え広がらない場合の液滴 A の燃焼寿命 t_{bA}/d_0^2 に対する干渉する液滴の質量中心位置に配置した仮想液滴 M 周りの燃え広がり限界距離 $(S_{ML}/d_0)_{\text{limit}}$ の依存性を示す。 $(S_{ML}/d_0)_{\text{limit}}$ は液滴 L が燃え広がる条件と燃え広がらない条件の間に存在する。 $S_{CB}/d_0=4$ および $S_{BA}/d_0=4$ の場合、液滴 C, B, A の質量中心位置に仮想液滴 M が存在し、 $S_{CB}/d_0=12$ および $S_{BA}/d_0=4$ の場合は液滴 B, A の質量中心位置に仮想液滴 M が存在する。 $S_{CB}/d_0=4$ および $S_{BA}/d_0=4$, $\theta_2=90 \text{ deg.}$ の場合、液滴 C の影響が無視できるように $0 \text{ deg.} \leq \theta_1 < 180 \text{ deg.}$ および $\theta_1=0 \text{ deg.}$ から 180 deg. の範囲をプロットした。一点鎖線は単一液滴の燃え広がり限界距離 $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ を示している。これより、干渉液滴の質量中心位置から燃え広がり限界距離が燃焼寿命と共に増加することを示している。

参考文献

- 3.1 M. Mikami, T. Hirose, H. Watari, T. Seo, H. Saputro, O. Moriue and M. Kikuchi, “Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity”, *J. Thermal Sci. Technol.*, 12 (2017) JTST0028.
- 3.2 A. Umemura, S. Ogawa, N. Oshima, “Analysis of the interaction between two burning droplets”, *Combust. Flame*, 41 (1981), 45-55.
- 3.3 梅村章, “微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ば (第 2 報, 火炎伝ば速度特性)”, *日本機械学会論文集 (B 編) 68 卷 673 号*, (2002), 2636-2642.
- 3.4 M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, Y. Wakashima, M. Kikuchi, S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high temperatures”, *Combust. Flame*, 146 (2006) 391-406.
- 3.5 H. Oyagi, H. Shigeno, M. Mikami, N. Kojima, “Flame-spread probability and local interactive effects in randomly arranged fuel-droplet arrays in microgravity”, *Combust. Flame*, 156 (2009) 763-770.
- 3.6 M. Mikami, H. Kato, J. Sato, M. Kono, “Interactive combustion of two droplets in microgravity”, *Proc. Combust. Inst.*, 25 (1994) 431-438.
- 3.7 A. Umemura, “Interactive droplet vaporization and combustion: approach from asymptotics”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 20 (1994) 325-372.
- 3.8 W. A. Sirignano, “Advances in droplet array combustion theory and modeling”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 42 (2014) 54-86.

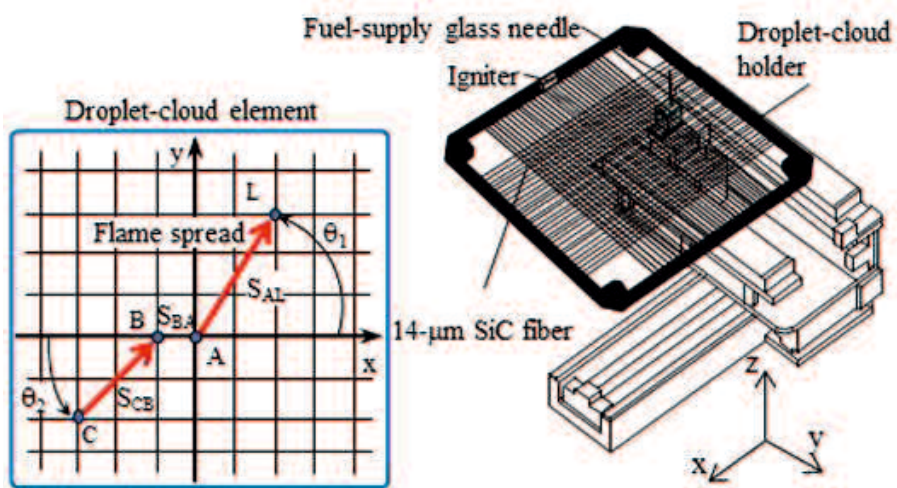


Fig. 3.1 Droplet-cloud-element model for flame spread from Droplet C to Droplet L via Droplets B and A and apparatus for flame-spread experiment.

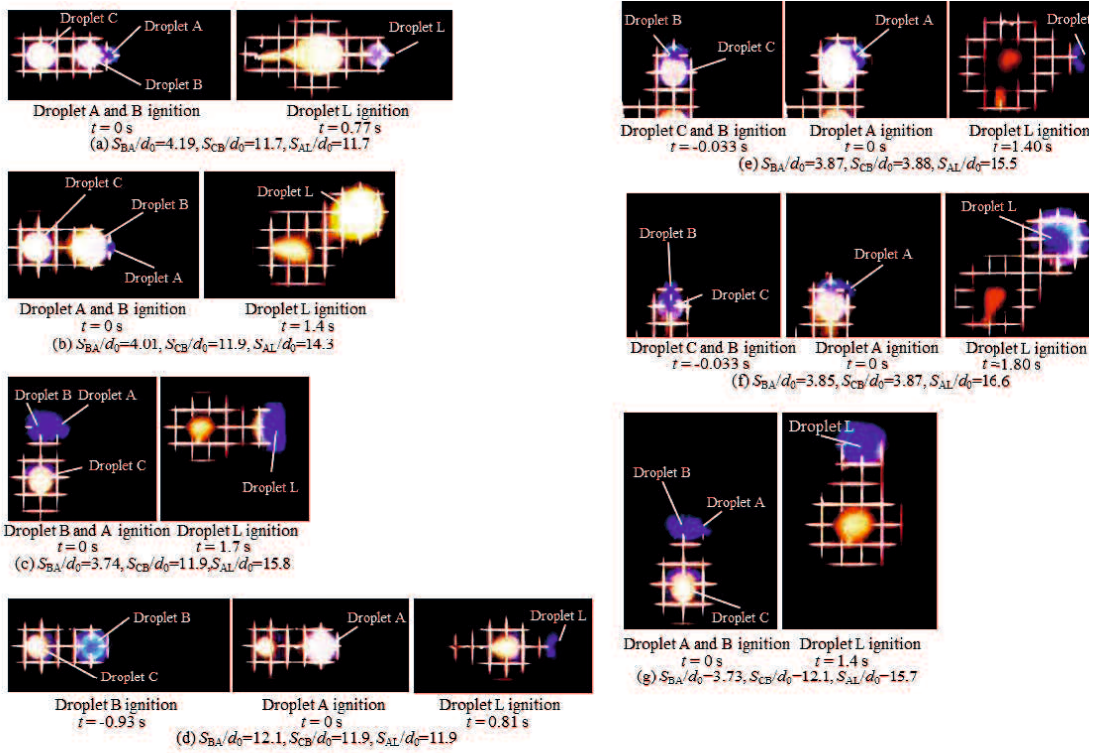
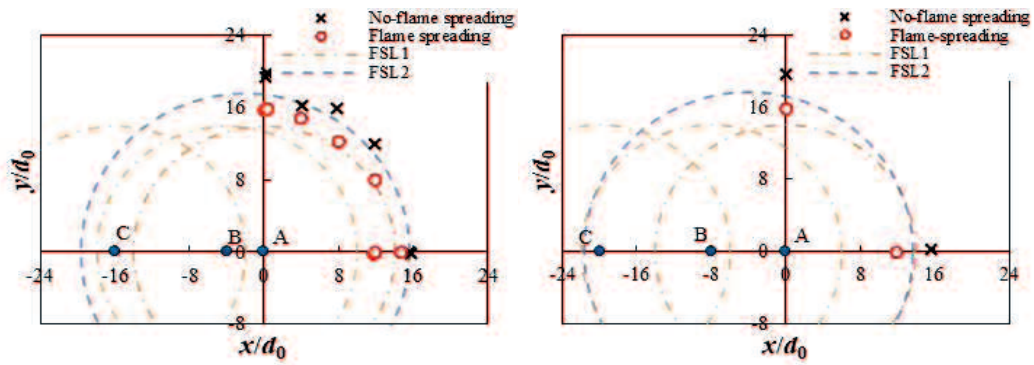
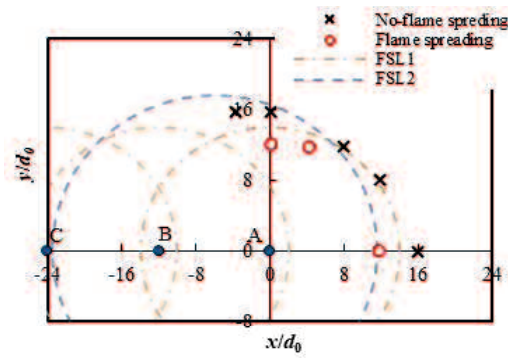


Fig. 3.2 Flame-spread behavior from Droplet C to Droplet L via Droplets B and A for different droplet arrangements.



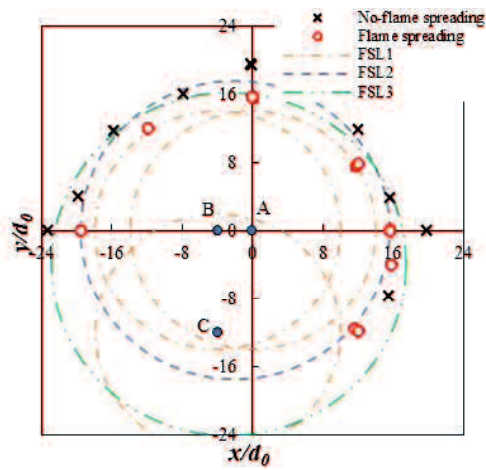
(a) $S_{CB}/d_0=12, S_{BA}/d_0=4, \theta_2=0^\circ$

(b) $S_{CB}/d_0=12, S_{BA}/d_0=8, \theta_2=0^\circ$

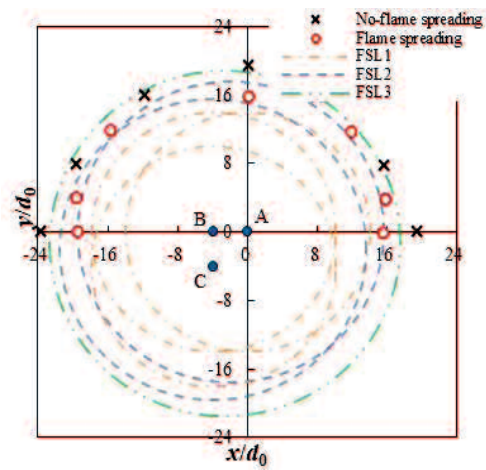


(c) $S_{CB}/d_0=12, S_{BA}/d_0=12, \theta_2=0^\circ$

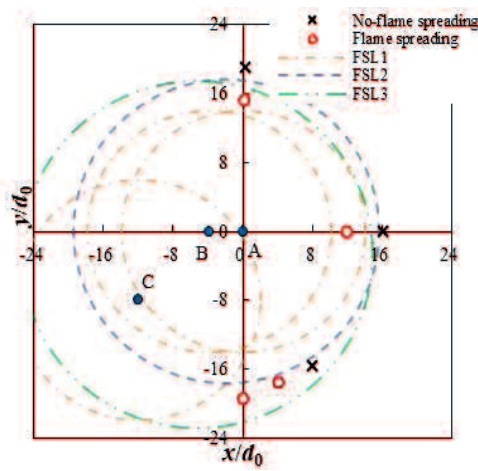
Fig. 3.3 Flame-spread-limit distribution for $S_{BA}/d_0=4, 8$ and 12 where $S_{CB}/d_0=12$ and $\theta_2=0$ deg.



(d) $S_{CB}/d_0=12$, $S_{BA}/d_0=4$, $\theta_2=90^\circ$

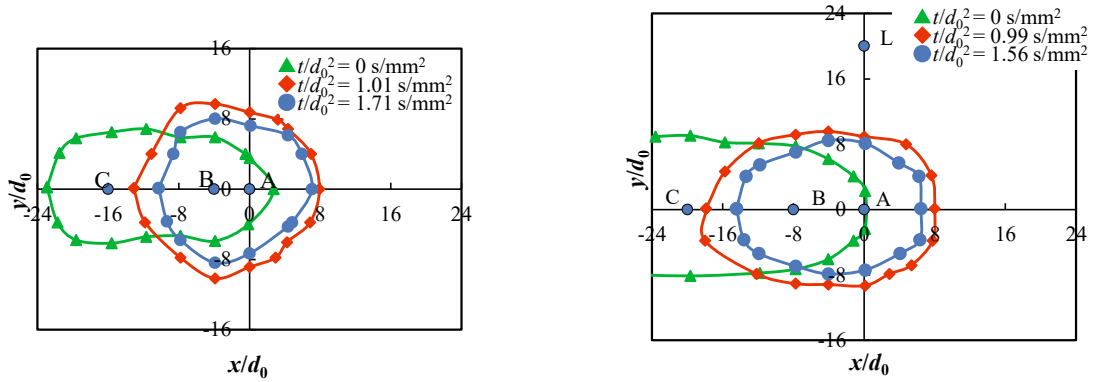


(e) $S_{CB}/d_0=4$, $S_{BA}/d_0=4$, $\theta_2=90^\circ$



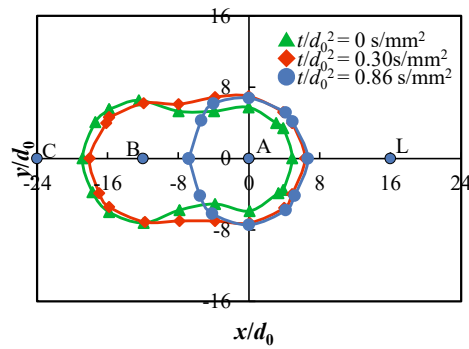
(f) $S_{CB}/d_0=11.3$, $S_{BA}/d_0=4$, $\theta_2=45^\circ$

Fig. 3.4 Flame-spread-limit distribution for $S_{BA}/d_0=4$ where $S_{CB}/d_0=4$ and 12 for $\theta_2=90$ deg. and $S_{CB}/d_0=11.3$ for $\theta_2=45$ deg.



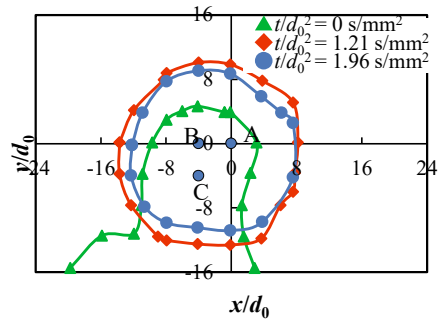
(a) $S_{BA}/d_0 = 3.81$, $S_{CB}/d_0 = 11.9$, $S_{AL}/d_0 = 15.8$

(b) $S_{BA}/d_0 = 7.72$, $S_{CB}/d_0 = 11.9$, $S_{AL}/d_0 = 20.3$

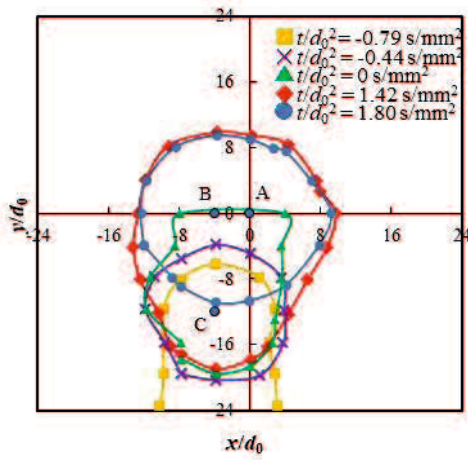


(c) $S_{BA}/d_0 = 11.8$, $S_{CB}/d_0 = 13.1$, $S_{AL}/d_0 = 15.6$

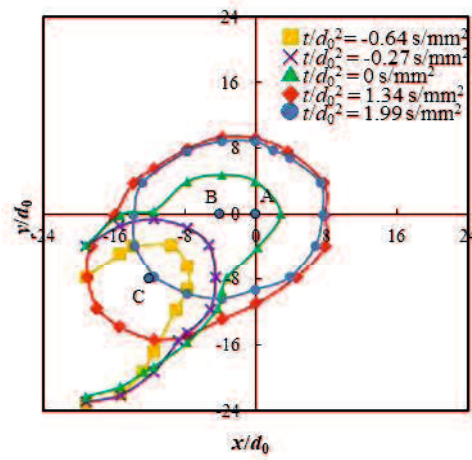
Fig. 3.5 Isothermal line of 1200 K during the flame spread in the case without flame spreading to Droplet L for $S_{BA}/d_0 = 4, 8$ and 12 where $S_{CB}/d_0 = 12$ and $\theta_2 = 0$ deg.



(d) $S_{BA}/d_0=3.85$, $S_{CB}/d_0=3.87$, $S_{AL}/d_0=16.6$

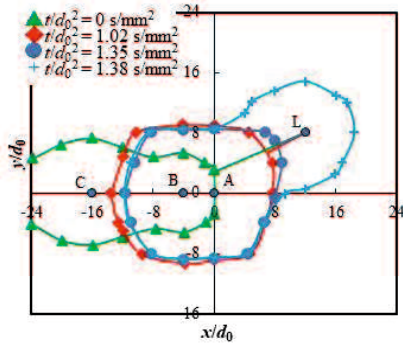


(e) $S_{BA}/d_0=11.7$, $S_{CB}/d_0=3.60$, $S_{AL}/d_0=19.7$

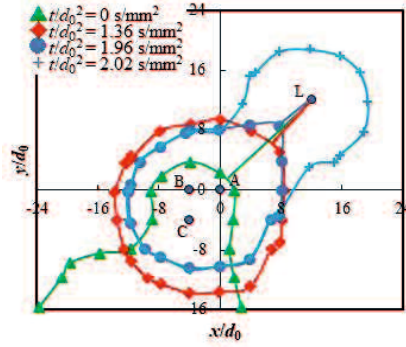


(f) $S_{BA}/d_0=10.5$, $S_{CB}/d_0=3.70$, $S_{AL}/d_0=19.5$

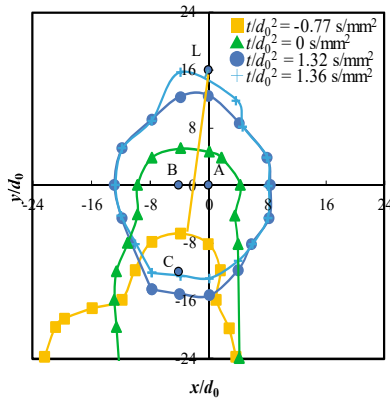
Fig. 3.6 Isothermal line of 1200 K during the flame spread in the case without flame spreading to Droplet L for $S_{BA}/d_0=4$ where $S_{CB}/d_0=4$ and 12 for $\theta_2=90$ deg. and $S_{CB}/d_0=11.3$ for $\theta_2=45$ deg.



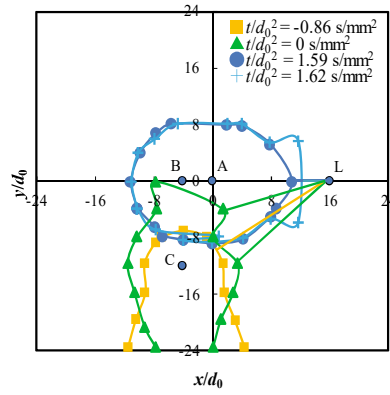
(a) $S_{BA}/d_0=4.01$, $S_{CB}/d_0=11.9$, $S_{AL}/d_0=14.3$



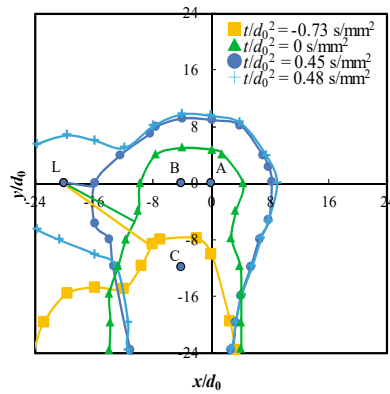
(b) $S_{BA}/d_0=3.85$, $S_{CB}/d_0=3.87$, $S_{AL}/d_0=16.6$



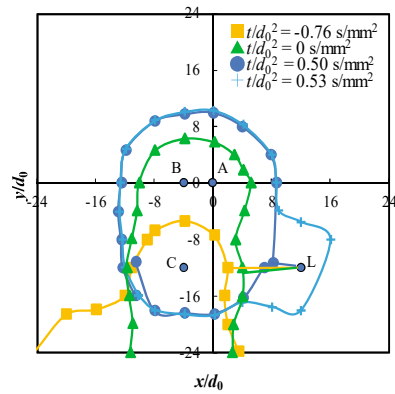
(c) $S_{BA}/d_0=11.7$, $S_{CB}/d_0=3.82$, $S_{AL}/d_0=15.8$



(d) $S_{BA}/d_0=11.9$, $S_{CB}/d_0=3.74$, $S_{AL}/d_0=15.8$

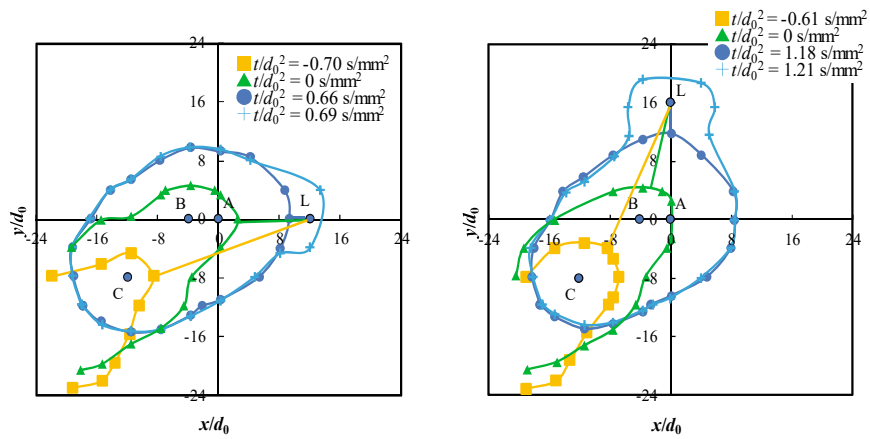


(e) $S_{BA}/d_0=11.7$, $S_{CB}/d_0=4.02$, $S_{AL}/d_0=19.6$

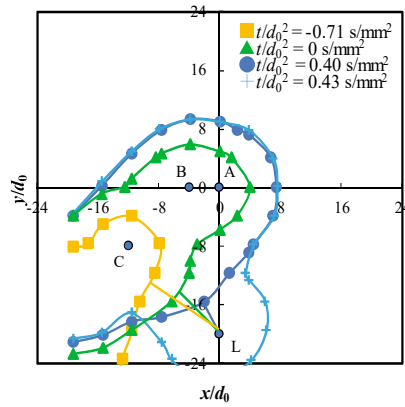


(f) $S_{BA}/d_0=11.7$, $S_{CB}/d_0=3.97$, $S_{AL}/d_0=16.8$

Fig. 3.7 Iso-thermal line distributions of 1200 K during the flame spread in the case with flame spreading to Droplet L near the flame-spread limit.



(g) $S_{BA}/d_0=10.8$, $S_{CB}/d_0=3.66$, $S_{AL}/d_0=12.2$ (h) $S_{BA}/d_0=10.4$, $S_{CB}/d_0=3.89$, $S_{AL}/d_0=15.7$



(i) $S_{BA}/d_0=10.9$, $S_{CB}/d_0=3.86$, $S_{AL}/d_0=19.7$

Fig. 3.8 Iso-thermal line distributions of 1200 K during the flame spread in the case with flame spreading to Droplet L near the flame-spread limit.

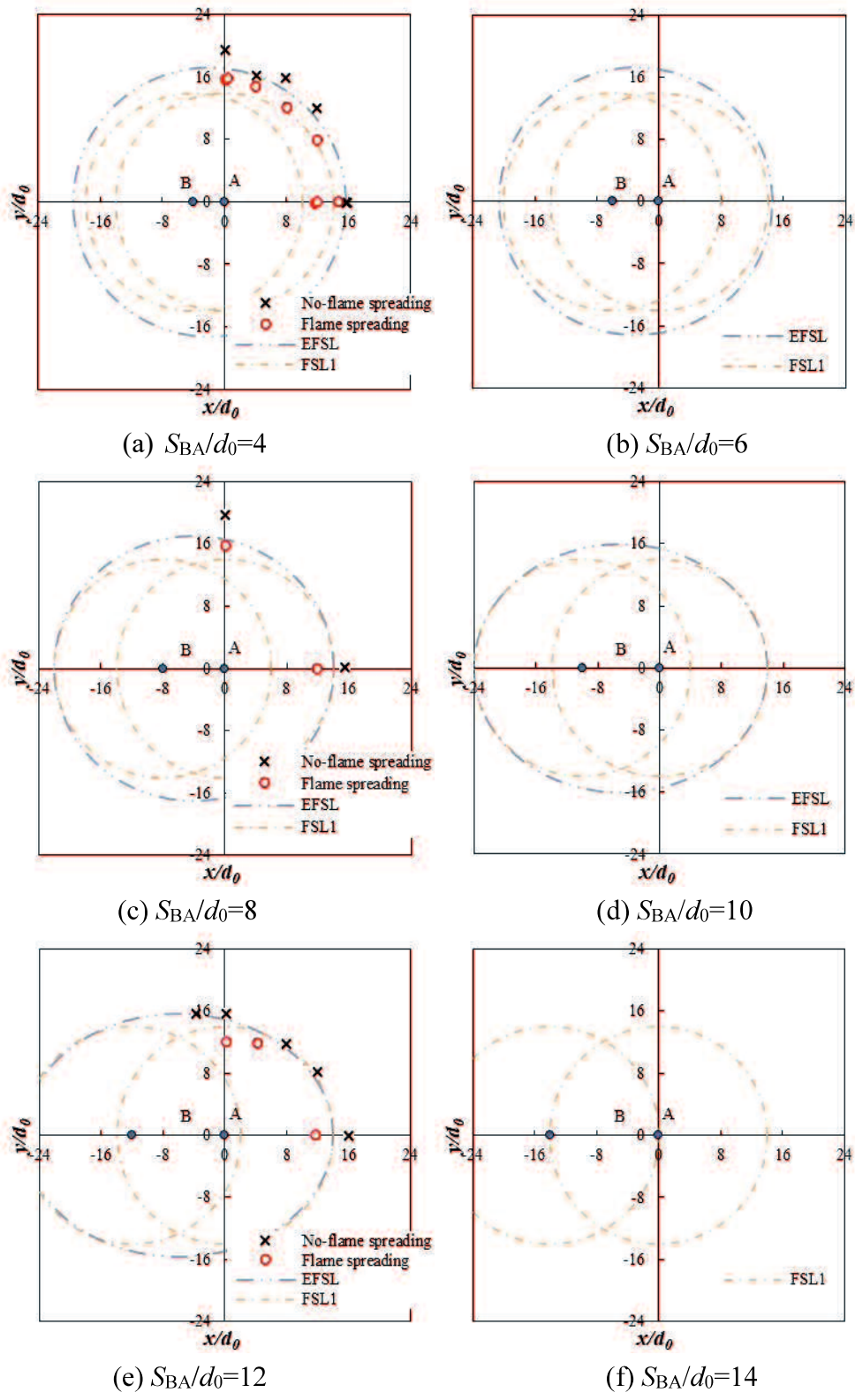


Fig. 3.9 Prediction of flame-spread limit for different degrees of two droplet interaction.

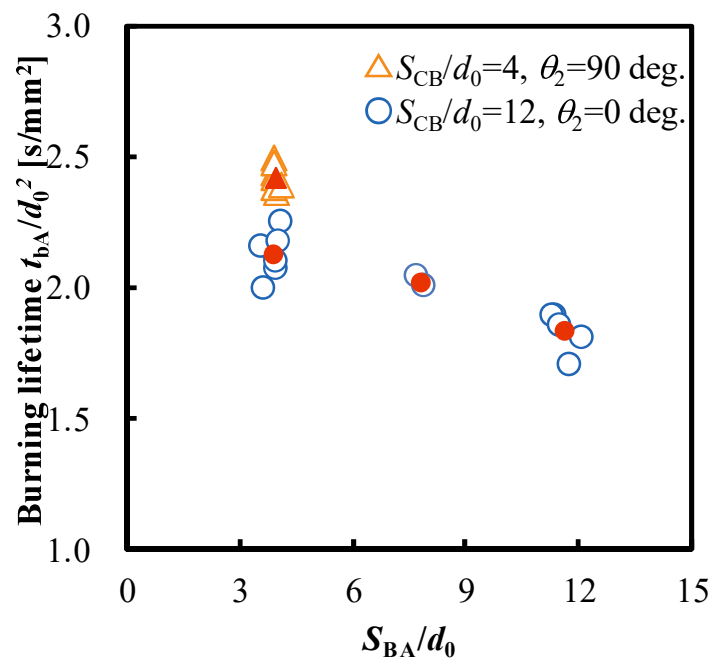


Fig. 3.10 Dependence of burning lifetime of Droplet A t_{bA}/d_0^2 on droplet spacing S_{BA}/d_0 . The solid symbols show average burning lifetime of Droplet A.

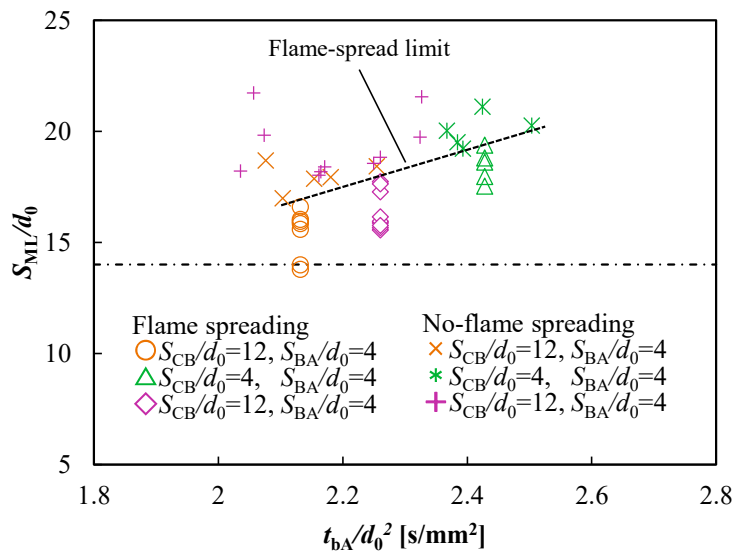


Fig. 3.11 Dependence of flame-spread-limit from the center of the mass of interactive burning droplets on the burning lifetime of Droplet A t_{bA}/d_0^2 . The circle and cross plots show the cases of $S_{CB}/d_0=12$ and $S_{BA}/d_0=4$ with $\theta_2=0$ deg. The diamond and plus plots show the cases of $S_{CB}/d_0=12$ and $S_{BA}/d_0=4$ with $\theta_2=90$ deg. In the case of $S_{CB}/d_0=12$ and $S_{BA}/d_0=4$ with $\theta_2=90$ deg., the data for $\theta_1=0$ to 180 deg. are plotted. The chain line shows the flame-spread-limit distance of a single droplet $(S_{AL}/d_0)_{\text{limit}}=14$.

第 4 章 局所干渉燃焼がランダム分散液滴群の燃え広がり特性に及ぼす影響

4.1 はじめに

噴霧燃焼の機構解明のため、噴霧全体の燃え広がり基礎を把握する手段として、噴霧を構成する燃料液滴に着目した研究が多くの研究者によって行われてきた。実際の噴霧では液滴は空間に等間隔に分布しておらず、多数の液滴がランダムに分散して存在している。第 3 章では 2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素の燃え広がり限界について調査した。本研究では、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」における微小重力空間においてランダム分散液滴群の燃え広がり特性について局所干渉の影響について調査し、液滴群要素実験で得られた結果とランダム分散液滴群実験で得られた結果の相違について調査した。また、ランダム分散液滴群の燃え広がり実験で見られた複数液滴の同時着火による大規模な爆着火現象に類似した大小様々な規模の爆発的現象について考察する。

4.2 液滴間隔の無次元表示および燃え広がり速度の正規化

本研究では、図 4.1 に示すような多数の液滴から構成されるランダム分散液滴

群を用いて、液滴間の燃え広がり挙動の調査を行った。第3章と同様に、液滴間の燃え広がりにおいて無次元液滴間隔 S/d_0 が重要なパラメータと言える。本研究においても液滴群の評価に無次元液滴間隔 S/d_0 を用いる。また、ランダム分散液滴群においては、総液滴数 M や液滴配置、初期平均液滴直径 d_0 などが変化すると格子サイズが変わるため、平均液滴間隔 $(S/d_0)_m$ を用いて評価を行う。

本研究で使用したランダム分散液滴群は表 4.1 に示すように、総液滴数 M 、初期平均液滴直径 d_0 の変化によって平均液滴間隔が異なる。平均液滴間隔は、液滴群の次元が異なっても、液滴群の特性を同じ無次元長さを用いて表現することができる利点を持つ。そこで、次元の異なる等間隔液滴列の燃え広がりにおける燃え広がり限界との比較が容易に行えるように平均液滴間隔 $(S/d_0)_m$ を用いた。

ランダムに分散している液滴を図 4.2 に示すように総液滴数 M で分割した領域の中心に再配置したときの隣り合う液滴の間隔を平均液滴間隔と定義すると、2次元での平均液滴間隔は式(4.1)のように表される。

$$(S/d_0)_m = (N_x N_y / M)^{1/2} \cdot L / d_0 \quad (4.1)$$

ここで、 S は液滴中心間隔、 d_0 は初期液滴直径、 N_x は x 方向の格子点数、 N_y は y 方向の格子点数、 L は格子点間隔である。

式(1)を用いて、表 4.1 に示した液滴群の平均液滴間隔をそれぞれ算出した。例えば、図 4.1 に示す液滴群は、格子点間隔 L が 4 mm、 x 方向の格子点数が 30、

y方向の格子点数が30の30×30格子，総液滴数67個，初期液滴直径が1.01 mmから構成されていることから，平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ である．このようにして，各条件の平均液滴間隔 $(S/d_0)_m$ を算出した．

また，液滴間の燃え広がり，拡散と熱伝導により律速されていると仮定し，初期液滴直径 d_0 [mm]を代表長さとする温度伝導特性時間 d_0^2/a [s]により時間 t [s]を除した at/d_0^2 を無次元燃え広がり時間とする．ただし， a [mm²/s]は空気の温度伝導率である．また，初期液滴直径 d_0 [mm]を代表長さとする熱伝導速度 a/d_0 [mm/s]により燃え広がり速度 V_f [mm/s]を除した $V_f d_0/a$ を無次元燃え広がり速度とする．本研究では，温度伝導率の依存性を考慮せず，初期液滴直径 d_0 について正規化した時間 t/d_0^2 [s/mm²]と燃え広がり速度 $V_f d_0$ [mm²/s]を用いる．

4.3 実験条件

図4.1に本研究で用いたランダム分散液滴群のうち総液滴数が $M=67$ 個の場合の液滴配置を例として示す．また，表4.1^(4.1)に本研究で実施したランダム分散液滴群の実験条件を示す．表には，平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=9.2\sim 16.2$ までの総液滴数，液滴配置，初期液滴直径および初期液滴直径の相対標準偏差を示している．

4.4 ランダム分散液滴群の燃え広がり挙動

図4.3に平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件における燃え広がり挙動を示す．液

滴群の燃え広がりには格子下辺の中心付近の一液滴が着火することにより開始される。最初の液滴が着火した時刻を $t=0$ s とした。図 4.3 の $t=0.43$ s では図 4.1 に示す液滴群の着火線周辺の液滴が群火炎を形成しており、それ以降の時刻の画像では 2 つ以上の液滴が同時刻に着火し、爆発のような現象となる箇所を示している。これより、平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件では、火炎は格子上端や右端、左端に到達するが、燃え広がり経路が複雑化しており、群火炎が小さなスケールで分散して発生する。特に $t=4.90$ s の時刻では、8 つの液滴が同時に着火する大規模着火現象が生じている。これらの現象より燃え広がり経路の複雑性が複数液滴の同時着火による爆発現象を引き起こしていると考え、4.8 節では複数液滴の同時着火現象に至る燃え広がり経路について複雑性を調査した。

図 4.4 に異なる平均液滴間の条件での燃え広がり挙動を 1/30 s 毎の比較明合成画像を示す。図 4.4(a) のような平均液滴間が比較的小さい条件での燃え広がりには、燃え広がりに伴って液滴のまわりに形成される火炎は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、比較的放射状に燃え広がり、群火炎には凹凸が生じる。図 4.4(c) のような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。図 4.4(b) のような平均液滴間隔の条件では、燃え広がり経路が複雑化し、群火炎の黄色輝炎領域が連続せず小さいスケールで分散しており、青炎領域も増大する。また、

左下の領域では、複数液滴が同時に着火する大規模着火現象が生じている。

4.5 ランダム分散液滴群の局所燃え広がり特性の解析手法

本研究では、宇宙実験の予備実験として実施された航空機のパラボリックフライトにおける微小重力環境を用いてのランダム分散液滴群の燃焼実験結果より、局所燃え広がり特性の評価方法を考案した^(4.2)。本節ではランダム分散液滴群の局所燃え広がり特性の評価方法について説明する。

図 4.5 に本研究で使用したランダム分散液滴群の液滴配置を示す。30×30 格子中の 24×30 格子の格子点上に 148 個の液滴を生成した。図 4.5 の 142 番液滴を熱線着火装置で着火することで、液滴群の燃え広がりを開始させた。本実験は燃焼時の圧力上昇が燃焼容器の許容圧力以下となるかどうかを確認するために行われたものであり、確実に液滴間で燃え広がるように最小の液滴間距離を 8 mm としている。液滴を付着していない格子点もあるため、不均一な液滴群である。

液滴群の燃え広がり挙動を図 4.6 に示す。これより、燃え広がりが進行する方向を y 方向とした場合、最初に着火した液滴付近では放射状に燃え広がりが進行し、最初に着火した液滴から遠い位置では燃え広がりが進行する y 方向の一方に燃え広がりが進行していることが分かる。図 4.7 に y 方向の液滴着火位置の時間変化を示す。これより、最初に着火した液滴付近では、放射状に燃え広

がりが進行するため、同じ y 方向に位置する液滴がすべて着火するまでに時間がかかるのに対し、最初に着火した液滴から遠い位置では、同じ y 方向に位置する液滴すべてが着火するまでにあまり時間がかからないことから、一方向に燃え広がりが進行していることがわかる。火炎前縁位置の時間変化の傾きは時間とともに徐々にゆるやかになっている。本研究で用いた液滴群は着火位置から遠くなるにつれて、初期液滴直径が小さくなっていることから、液滴間隔 8 mm が同一でも初期液滴直径に対する相対的な液滴間隔が大きいためであると考えられる。

近接する 2 液滴間の局所燃え広がりについて検討を行う。液滴列の燃え広がりとは異なり、液滴群の燃え広がりでは、局所の燃え広がり方向を把握するのが難しくなる。どの液滴まわりの火炎から主として熱を受けて次の液滴へ燃え広がったかが分かれば、局所燃え広がり速度を算出することも可能となる。そこで本研究では、まず初めに、温度分布を用いた方法、着火後の初期火炎の輝度分布を考慮した方法、等間隔液滴列の燃え広がり速度との比較を用いた方法、の 3 つの方法により、局所燃え広がり方向の把握法の検討を行った。

1 つ目に、燃え広がりが進行する方向の温度分布による方法について検討する。SiC ファイバーの高温先端位置の温度分布を用いて検討した。図 4.8 で示す画像より、図 4.9 に 1200 K の SiC ファイバーの高温先端位置の時間変化の空間分布

を示す。これより、 $t=0.198\text{ s}$ で着火した 89 番液滴への熱の影響について考える。各時刻の等温度線に 89 番液滴から垂線を下ろすことで、垂線の方角により、89 番液滴への熱移動方向の推移がわかる。105 番液滴が着火した $t=0\text{ s}$ から 0.033 s までは、105 番液滴から 89 番液滴に向かって熱が移動している。しかしながら、106 番液滴が着火した $t=0.067\text{ s}$ から 0.132 s までは 106 番液滴から 89 番液滴へと熱が移動している。90 番液滴が着火した $t=0.165\text{ s}$ では、90 番液滴の影響が少し見られるが、106 番液滴からの影響の方が強く、 $t=0.198\text{ s}$ で 89 番液滴が着火している。よって、89 番液滴への燃え広がりには主として 106 番液滴からの熱移動により行われていると考えることができる。

2 つ目に、着火後の初期火炎の輝度分布による方法を検討する。図 4.10 の左側は赤い四角の液滴が着火した画像である。右側は左図の RGB 画像をピクセルの赤色値(R 値)を 0 から 255 の発光輝度で示した輝度分布である。これより、着火した液滴の周囲を見ると、初期火炎の輝度は 89 番液滴と反対側で輝度が低いことから 89 番液滴からの熱の影響を最も受けて着火していると考えられる。

3 つ目に等間隔液滴列の燃え広がり速度と比較する方法について検討する。図 4.8 に示すように、 $t=0.198\text{ s}$ で着火した 89 番液滴の周囲で既に着火している 4 つの液滴全てについて、89 番液滴への 2 液滴間の局所燃え広がり速度を算出する。105 番液滴が着火した時刻を 0 s とすると、 0.067 s 後に 106 番液滴が着火、

0.165 s 後に 90 番液滴と 107 番液滴が着火，そして，0.198 s 後に赤い四角の 89 番液滴が着火する．表 4.2 に示すように，赤い四角の液滴と各液滴との着火時刻差と局所液滴間隔から局所燃え広がり速度を算出し，2 液滴の初期液滴直径の平均値で正規化した．そして，算出した結果と Mikami ら^(4.3)の等間隔一次元液滴列の燃え広がり速度との比較を行い，図 4.11 に示すように，等間隔液滴列の燃え広がり速度に対する局所燃え広がり速度の増加割合を算出した．そして，周囲の液滴の中で増加割合が最小値となった条件は他の二つの方法で局所燃え広がり方向と判断された条件であり，106 番液滴から最も熱の影響を受けて着火したと判断した．その結果，89 番液滴への局所燃え広がり速度は 106 番液滴からの $V_{fd0}=46.86 \text{ mm}^2/\text{s}$ となる．

以上の 3 つの方法により検討した結果，すべての方法で同様の結果が得られたことから，ここでは，局所液滴間隔と等間隔液滴列の燃え広がり速度との比較により算出した液滴群の局所燃え広がり速度の関係を図 4.12 に示す．着火線の周囲にある液滴は着火線からの熱の影響を受けて着火したと考えられるため，局所燃え広がり速度を算出する際はそれらの液滴を除いて算出した．これより，本研究では初期液滴直径に幅を有しているため，得られた局所燃え広がり間隔も $S/d_0=9$ 以上の広い領域に分布していることがわかる．図 4.12 には Mikami ら^(4.3)の室温大気圧の微小重力場における等間隔正デカン液滴列の燃え広がり速度

も比較のため示す。局所燃え広がり速度は等間隔液滴列の燃え広がり速度と同程度から3倍近いものまで存在していることがわかる。また、 $S/d_0=14$ 以上と等間隔液滴列では燃え広がらない条件においても局所燃え広がりが可能な条件が存在することから、液滴群では着火の要因となった液滴以外の既に着火して群火炎を形成している液滴からの熱の影響を受けるため、燃え広がり速度が増加し、燃え広がり限界も大きくなったと考えられる。

4.6 ランダム分散液滴群の局所燃え広がり速度

4.5節の解析手法を用いて宇宙実験で実施した燃焼実験から得られたランダム分散液滴群の局所燃え広がり速度を算出した。

図 4.13 に平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=16.1$ および $(S/d_0)_m=15.2$ の場合の1秒毎の燃え広がり写真の比較明合成画像を示す。液滴群の燃え広がりには格子下辺の中心付近の一液滴を着火することにより開始される。図 4.13(a)では、火炎は格子上端や左端に到達しておらず、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^(4.4)。図 4.13(b)では、燃え広がり経路が複雑化し、群火炎が小さなスケールで分散して発生する。また、火炎は格子の全辺に到達しており、群燃焼は発生している。

図 4.14 に液滴群の近接した2液滴間の局所燃え広がり速度における局所液滴

間隔の依存性を示す。図 4.14(a)は平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=16.1$ の条件であり、局所液滴間隔は $S/d_0=8.7\sim 16.0$ の間に分布している。群燃焼発生限界外の条件にもかかわらず液滴列の燃え広がり限界 $(S/d_0)_{limit}=14$ を超えて燃え広がる条件が存在する。しかし、液滴 15, 26 のように液滴 9, 10 と同程度の液滴間隔にもかかわらず燃え広がらない条件もある。図 4.14(b)は、平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=15.2$ の条件であり、局所液滴間隔は $S/d_0=8.3\sim 16.8$ の間に分布している。図 4.14(a)では燃え広がらなかった条件でも平均液滴間隔が減少したことにより燃え広がることわがる。また、液滴列の燃え広がり限界 $(S/d_0)_{limit}=14$ を超えて燃え広がる条件が多く存在する。

図 4.15 に TFP 法^(4.5)による 1200K における SiC ファイバーの高温先端位置に基づく空間温度分布を $(S/d_0)_m=15.2$ の条件について示す。高温先端位置は各液滴の着火時刻を示している。図 4.15 より、液滴 15 は $t=3.07$ s で着火し、その直前の $t=2.67$ s で液滴 10, 11 の 2 液滴干渉燃焼が影響したと考えられる。Yoshida ら^(4.6)は 2 または 3 液滴干渉時、高温領域が干渉液滴の質量中心まわりに拡大することを報告している。また、2 液滴の強干渉時の燃え広がり限界は 2 倍の体積の液滴の燃え広がり限界 $(S/d_0)_{limit}=17.6$ で近似できる^{(4.5), (4.6)}。液滴 15 と干渉液滴 10, 11 の質量中心からの間隔は $S/d_0=16.5$ であり、2 液滴干渉時の燃え広がり限界内に位置している。液滴 6, 9, 10 も同様に干渉液滴の質量中心からの間隔が 2 液

滴干渉時の燃え広がり限界内に位置している。次に、液滴 42 は $t=6.67$ s で着火し、その直前の $t=6.47$ s で液滴 41, 43, 44 の 3 液滴干渉燃焼が影響したと考えられる。3 液滴の強干渉時の燃え広がり限界は 3 倍の体積の液滴の燃え広がり限界 $(S/d_0)_{\text{limit}}=20.2$ より若干小さい値であり^(4,6)、干渉液滴 41, 43, 44 の質量中心からの間隔は $S/d_0=19.0$ であることから、3 液滴干渉時の燃え広がり限界内に位置していると考えられる。そして、液滴 26 は $t=2.67$ s で着火し、それ以前に $t=1.93$ s で液滴 14, 20 の 2 液滴干渉燃焼が影響したと考えられる。しかし、干渉液滴 14, 20 の質量中心からの間隔は $S/d_0=18.5$ であり、2 液滴干渉時の燃え広がり限界外に位置している。これは液滴 14, 20 の 2 液滴干渉燃焼以外の周囲液滴の火炎からの予熱もしくはその他の効果により着火に至ったと考えられる。液滴 30, 33, 38, 40 も同様にして着火に至ったと考えられる。

4.7 2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素における燃え広がり特性とランダム分散液滴群における局所干渉燃焼による燃え広がり特性の比較

4.6 節で述べたとおり、ランダム分散液滴群の局所燃え広がり速度の分布より、等間隔液滴列の燃え広がり限界である $(S/d_0)_{\text{limit}}=14$ より無次元液滴間隔が大きい場合でも燃え広がる条件が複数存在することが明らかとなった。本節では、平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件を用いて、2・3 個の干渉液滴を有する液滴群要素に

における燃え広がり特性を適用してランダム分散液滴群の燃え広がりを考慮した場合の両者の燃え広がり特性の差異について調査した。

図 4.16 に平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の液滴配置図に液滴群要素における燃え広がり限界線を各液滴に適用した。FSL1 は黄色の一点鎖線，FSL2 は青色の破線，FSL3 は緑色の二点鎖線としている。青色のプロットは液滴を示しており，赤色のプロットは燃え広がり限界外に位置しているにもかかわらず燃え広がった液滴を示している。これより，液滴群要素では液滴間距離が大きいため燃え広がらないと予想される液滴の中にもランダム分散液滴群では燃え広がる条件が複数存在することがわかる。これらは，既に形成された周囲の火炎によって未燃液滴の周囲気体温度が上昇し，未燃液滴が加熱されたことにより予蒸発し，未燃液滴表面に可燃性混合気層が形成される。そして，熱伝導距離が減少したことにより，初期液滴配置は燃え広がり限界外ではあるが，未燃液滴周囲の可燃性混合気層が燃え広がり限界内にまで到達し，燃え広がりが生じたと考えられる。ここで熱伝導距離とは，火炎前縁から可燃性予混合気層の後縁までの距離のことである。

4.4 節より，平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ では，複数の液滴が同時に着火することで大規模な爆発的現象が生じている。図 4.16 においてその箇所を見ると，爆発の起点となる液滴の燃え広がりには，その直前の液滴との間隔が FSL1 の燃え広が

り限界外より大幅に外側に配置されているにもかかわらず燃え広がりが生じた箇所であることがわかる。これより、この爆発的現象は、爆発の起点となる液滴とその直前の液滴の間隔が大幅に大きく、液滴群要素における燃え広がり限界外より大幅に外側に位置している場合に発生する。既に形成されている火炎からの熱伝導により、未燃液滴が加熱される。その未燃液滴表面に可燃性混合気層が形成され、形成された可燃性混合気層の大きさが爆発的現象の大きさを決めていると考えられる。

4.8 ランダム分散液滴群の燃え広がり経路の複雑性

4.4 節より、群燃焼発生限界付近の条件における燃え広がり挙動は複雑化し、小さな群火炎が分散して発生することが明らかになっている。これより、ランダム分散液滴群の燃え広がり経路の複雑性が全体の燃え広がりにどのような影響を及ぼすか調査した。

図 4.17 に本研究で得られたランダム分散液滴群における無次元燃え広がり経路距離と平均液滴間隔の関係を示す。実際に燃え広がった各液滴間の距離を最初に着火した液滴から終着点の液滴まで全て足し合わせた距離を燃え広がり経路距離とし、それを最初に着火した液滴から燃え広がりの終着点となった液滴までの直線距離である最短距離で除したものを無次元燃え広がり経路距離とし

た．無次元燃え広がり経路距離が 1 に近いほど燃え広がり是最初の着火位置から放射状に近く燃え広がることになり，無次元燃え広がり経路距離が大きいほど燃え広がり経路が迂回していて複雑性が高いとなる．この評価方法を用いてランダム分散液滴群の燃え広がりの複雑性を異なる平均液滴間隔の条件で比較した．これより，平均液滴間隔が比較的小さい $(S/d_0)_m=9.2$ の密な条件では，無次元燃え広がり距離は値が比較的小さく狭い範囲に分布しており，燃え広がりの複雑性は低いと言える．一方，それ以外の平均液滴間隔が比較的大きい群燃焼発生限界付近の条件では，無次元燃え広がり経路距離は，極端に大きな値を示す条件も複数存在することから，燃え広がり経路の複雑性が高いと考えられる．特に $(S/d_0)_m=14.5$ の条件では無次元燃え広がり経路距離が約 3.5 と他の平均液滴間隔の条件に対して，最大値を示す経路が存在している．以下では平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件について詳しく調査を行った．

図 4.3 に平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件における最初の液滴が着火した時刻を $t=0$ s とした時の燃え広がり挙動を示す．液滴群の燃え広がり格子下辺の中心付近の一液滴を着火することにより開始される．図 4.3 の $t=0.43$ s では図 4.1 に示す液滴群の着火線周辺の液滴が群火炎を形成しており，それ以降の時刻の画像では 2 つ以上の液滴が同時刻に着火し，爆発のような現象となる箇所を示している．これより，平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の条件では，火炎は格子上端や

右端，左端に到達するが，燃え広がり経路が複雑化しており，群火炎が小さなスケールで分散して発生する．特に $t=4.90$ s の時刻では，8つの液滴が同時に着火する大規模着火現象が生じている．これらの現象より燃え広がりの複雑性が複数液滴の同時着火による爆発現象を引き起こしていると考え，複数液滴の同時着火による爆発的現象に至る燃え広がり経路について，その複雑性を調査した．

図 4.18 に平均液滴間隔 $(S/d_0)_m=14.5$ の燃え広がり経路を示す．緑の矢印が燃え広がり経路を示しており，ピンクの丸で囲った 3 つの箇所において爆発的現象が生じた．また，ピンク色のプロットがされている液滴を爆発の起点となる液滴とする．単一液滴もしくは複数液滴の同時着火における爆発的現象の生じた箇所は，図 4.16 の赤いプロットで示した液滴と同様の箇所で発生する．爆発的現象を定義するため，爆発の起点となる液滴の着火時に形成される初期火炎の火炎半径を基に通常の着火による火炎半径と比較することにより求めた．火炎半径は，図 4.19 に示す爆発の起点となる液滴の着火時の画像より求め，加熱された方向からの火炎半径の青炎の外側を基準とした．図 4.18 の①内の爆発の起点となる液滴の着火時の画像は図 4.19(a)に示しており，これより火炎半径を求めると，約 13.7 mm であった．図 4.18 の②内の爆発の起点となる液滴の着火時の画像は，図 4.19(b)であり，火炎半径は約 8 mm であった．図 4.18 の③内の爆発の起点となる液滴の着火時の画像は図 4.19(c)であり，火炎半径は約 14.2 mm で

あった。また、通常の着火時の火炎半径も同様に求めた結果、約 4 mm であることから、爆発の起点となる液滴の着火時の火炎半径が通常の着火時に形成される火炎半径より約 2 倍以上となる場合に爆発的現象とした。

これらより、爆発現象は、単一液滴もしくは複数液滴の爆発の起点となる液滴がその直前の液滴の液滴群要素における FSL1, FSL2, FSL3 のいずれかの燃え広がり限界よりも外側に位置しており、着火時もしくは着火直後に形成される初期火炎の火炎半径が通常の着火と比較して 1.8 倍以上大きく形成されている場合と定義する。

図 4.20 に図 4.18 で示した複数液滴の同時着火による爆発現象が生じた 3 つの箇所の燃え広がりにおける無次元燃え広がり経路距離について示す。各燃え広がり経路の条件において左側に複数液滴の同時着火に至る燃え広がり経路を示している。複数液滴の同時着火が生じたピンクの液滴の着火より一つ手前の液滴を 1 として一液滴ごとに燃え広がり経路を順番に遡っていき、ピンクの矢印で示され液滴までの番号を横軸とし、無次元燃え広がり経路距離を縦軸としたグラフを右側に示している。図 4.20(a), (c)においては、無次元燃え広がり距離が最大となる液滴位置が存在しており、燃え広がり経路においてその液滴位置以降の燃え広がり経路が特徴的な複雑性を示していると言える。また、図 4.20(a), (c)の条件では、対応する爆発現象を示す図 4.3 の $t=4.90$ s および $t=8.37$ s の画像

より、着火時の火炎の大きさが比較的大きいことがわかる。また、これらの条件では、燃え広がり経路に着目すると、燃え広がり経路の迂回の回り込みが深くなっており、ピンクの液滴の周囲を多くの液滴が囲んでいる。これより、周囲の火炎から徐々に加熱され、液滴の予蒸発が進行し、予混合気層が拡大し、着火時の火炎が大きくなり、爆発のような現象となると考えられる。ただし、図 4.20(a)においては、回り込んだ経路の中に液滴 10 から伸びる別の燃え広がり経路が存在している。この燃え広がり火炎の方が①内の液滴群に近いことから、このような別の経路の燃え広がりが①内の液滴群を主に加熱し、液滴 9 以降の深い回り込みによる長い着火遅れが可燃性混合気層の拡大につながり、爆発的現象に寄与したものと考えられる。図 4.20(b)のように経路の複雑性は小さくても爆発的現象が生じた条件においても、別経路の燃え広がりが影響した可能性がある。

4.9 ランダム分散液滴群の燃え広がりにおける大規模着火現象

図 4.3 に示した条件において数液滴の同時着火における爆発的現象が生じた。本節では、この爆発的現象の発生要因について調査した。

4.8 節より、図 4.20(a)において別の経路からの火炎が複数の未燃液滴を加熱し、深い回り込みによる長い着火遅れが可燃性混合気層を拡大させることにより、爆発的現象に寄与したと考えた。既に形成された周囲の火炎によって未燃液滴が

加熱されたことにより予蒸発し、未燃液滴周りに可燃性混合気層が形成される。未燃液滴が加熱される時間が長いほど未燃液滴表面に形成される可燃性混合気層が拡大し、それが着火されることで爆発的現象が生じたと考えられる。このときの着火時の火炎は通常の着火時に形成される初期火炎の大きさに比べて非常に大きく形成されることから、爆発の起点となる未燃液滴が周囲の火炎からどの程度の時間をかけて加熱されるかにより、着火時もしくは初期火炎の大きさ、すなわち爆発現象の規模が決定されると考えられる。

そこで、簡易的に未燃液滴の加熱時間を算出した。ここで、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を加熱時間とした。ここで、先ほど爆発的現象が生じた3つの箇所における加熱時間をそれぞれ算出した。

まず、図 4.21 に燃え広がり経路 1 における燃え広がり経路と燃え広がり挙動を示す。この条件における未燃液滴の可燃性混合気層の形成に最も寄与したと考えられる液滴と爆発の起因となった液滴は、図 4.21 の上図にピンクの液滴として示している。この二つの液滴の着火時刻は、それぞれ $t=0.93$ s から $t=4.87$ s であり、加熱時間は 3.93 s である。次に図 4.22 に燃え広がり経路 2 における燃え広がり経路と燃え広がり挙動を示す。この条件における未燃液滴の可燃性混合気層の形成に最も寄与したと考えられる液滴と爆発の起因となった液滴の着

火時刻はそれぞれ、 $t=6.07$ s から $t=7.83$ s である。これより加熱時間は 1.76 s である。最後に燃え広がり経路 3 について図 4.23 に示す。この条件における燃液滴の可燃性混合気層の形成に最も寄与したと考えられる液滴と爆発の起因となった液滴の着火時刻はそれぞれ、 $t=4.63$ s から $t=8.37$ s である。これより加熱時間は 3.74 s である。これらの加熱時間と 4.10 節により求めた、爆発の起点となる液滴の着火時の初期火炎の火炎半径より比較する。燃え広がり経路 1 における加熱時間は 3.93 s であり、初期火炎の火炎半径は約 13.7 mm であった。燃え広がり経路 2 における加熱時間は 1.76 s であり、初期火炎の火炎半径は約 8 mm であった。燃え広がり経路 3 における加熱時間は 3.74 s であり、初期火炎の火炎半径は約 14.2 mm であった。これらより、加熱時間が長い燃え広がり経路 1 や 3 における爆発の起点となる液滴の着火時の初期火炎半径は加熱時間が短い燃え広がり経路 2 の初期火炎半径よりも数 mm 大きいことから、加熱時間が長いほど初期火炎半径が大きくなることがわかる。このように、爆発の起点となる液滴の加熱時間は爆発的現象を評価するうえで重要なパラメータであると言える。

参考文献

- 4.1 M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Space-Based Microgravity Experiments on Flame Spread over Randomly Distributed n-Decane-Droplet Clouds: Overall Flame-Spread Characteristics”, *Microgravity Sci. Technol.*, 30 (2018), 535–542.
- 4.2 Y. Yoshida, N. Sano, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, Y. Kan, M. Kikuchi, “Analysis of Local Flame-Spread Characteristics of an Unevenly Arranged Droplet Cloud in Microgravity”, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 35(2) (2018), 350203.
- 4.3 M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, and S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays using a new droplet-generation technique”, *Combustion and Flame*, 141 (2005), 241-25.
- 4.4 M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, O. Moriue, T. Sakashita, M. Kikuchi, Y. Kan, “Recent Accomplishment of “Group Combustion” Experiments aboard Kibo on ISS”, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 36 (2019), 360301.
- 4.5 M. Mikami, T. Hirose, H. Watari, T. Seo, H. Saputro, O. Moriue, M. Kikuchi, “Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity”, *J. Thermal Sci. Technol.*, 12 (2017), JTST0028.
- 4.6 Y. Yoshida, K. Iwai, K. Nagata, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity”, *Proc. Combust. Inst.*, 37 (2019), 3409-3416.

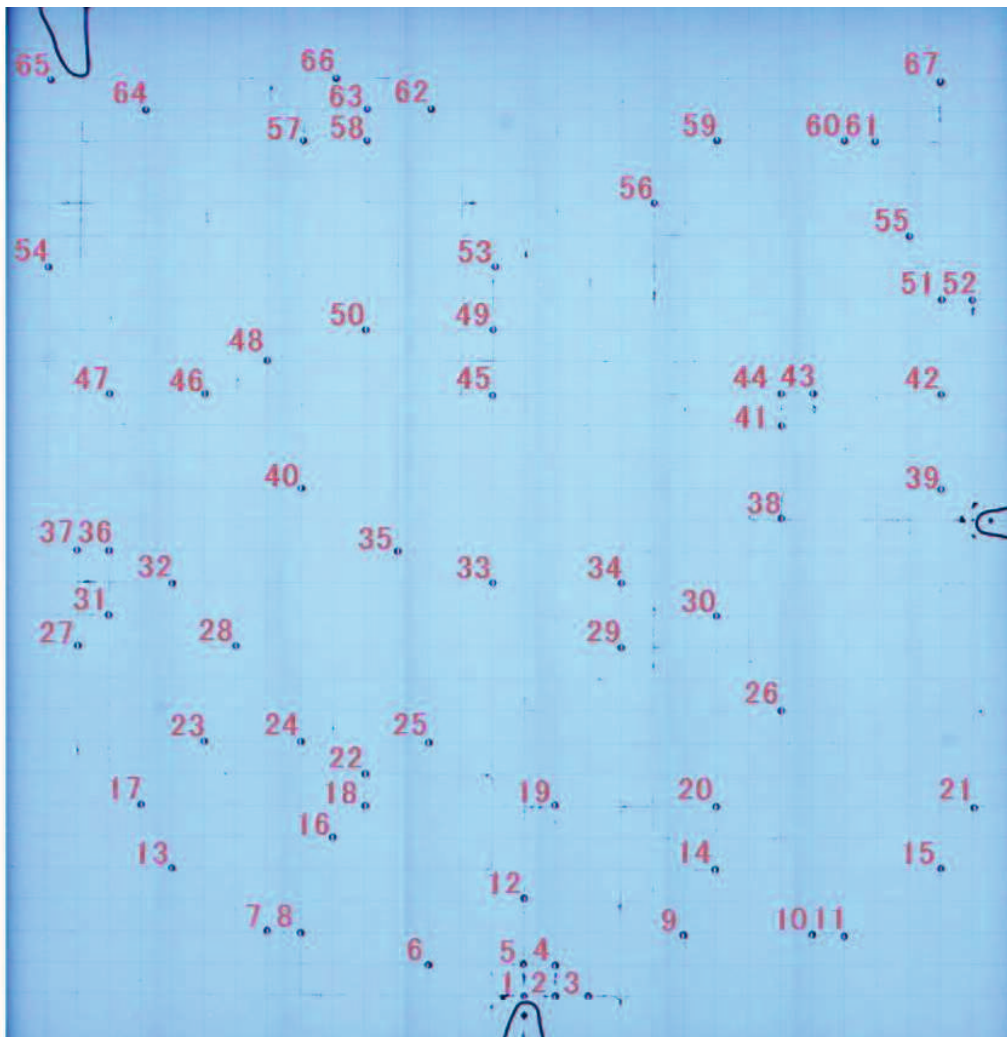
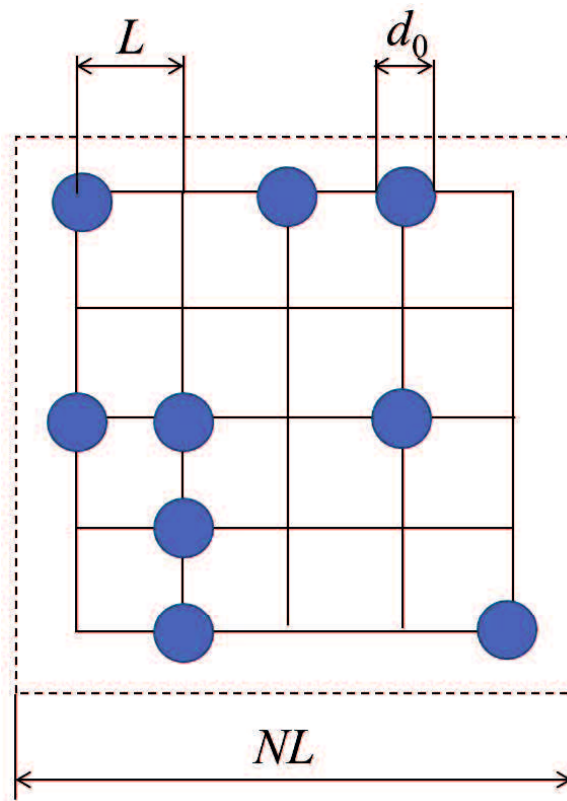


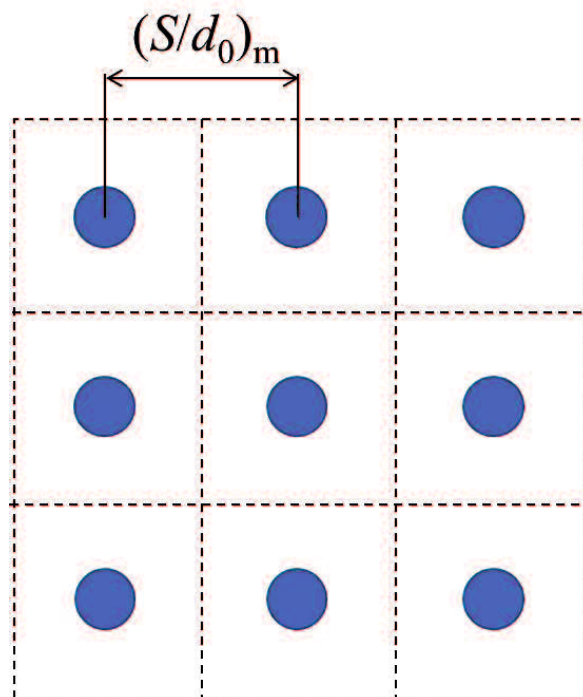
Fig. 4.1 Backlit image of a randomly distributed droplet cloud with a total droplet number of 67 droplets.

Table 4.1 Test conditions^(4.4)

Test No.	$(S/d_0)_m$	M	d_0 [mm]	RSD[%]
1	9.2	152	1.05	2.7
2	11.6	97	1.05	4.5
3	12.1	67	1.21	2.7
4	13.2	80	1.01	3.2
5	13.3	81	1.00	3.6
6	13.3	67	1.10	2.8
7	14.2	67	1.03	2.8
8	14.5	67	1.01	2.1
9	15.2	67	0.97	3.2
10	16.1	67	0.91	2.2
11	16.2	67	0.91	2.4



(a) Before rearrangement



(b) After rearrangement

Fig. 4.2 Rearrangement of randomly distributed droplet cloud to droplet cluster with even mean droplet spacing $(S/d_0)_m$

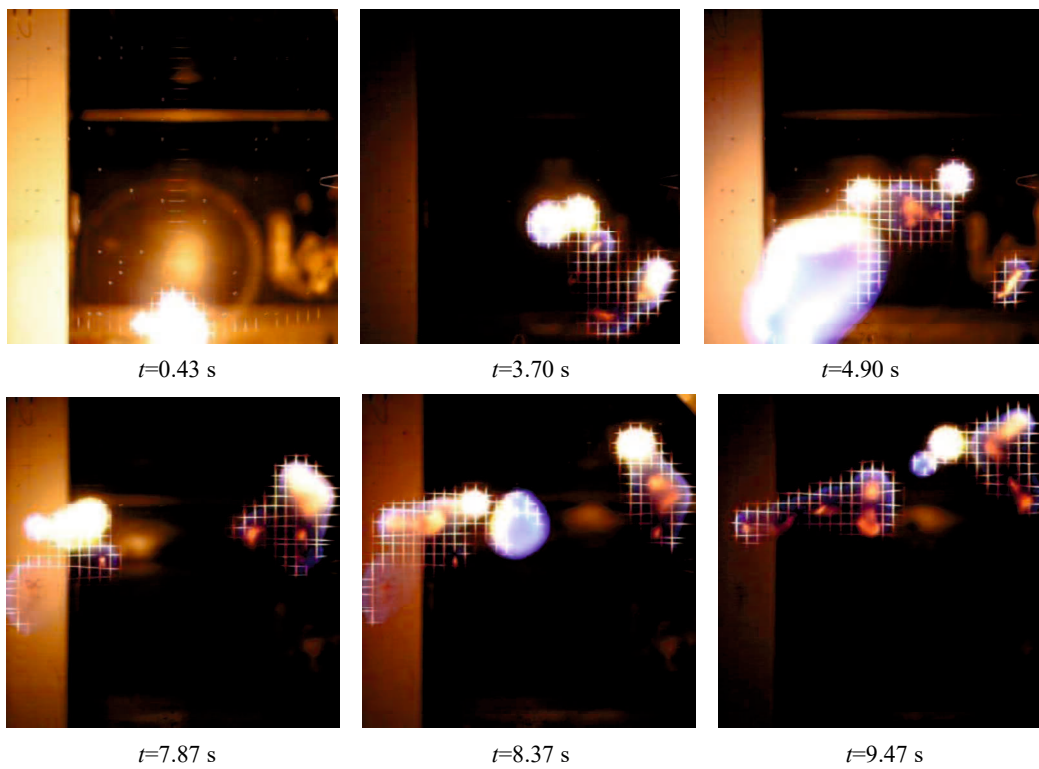
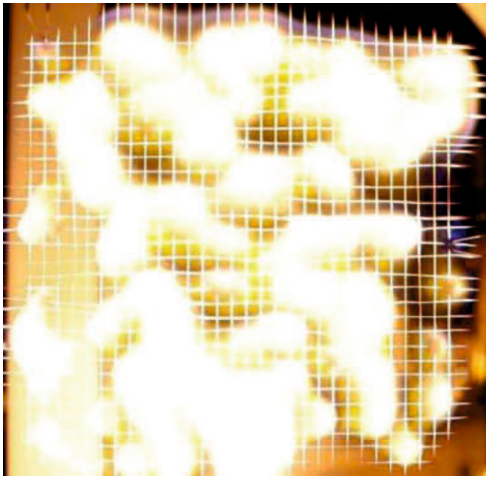
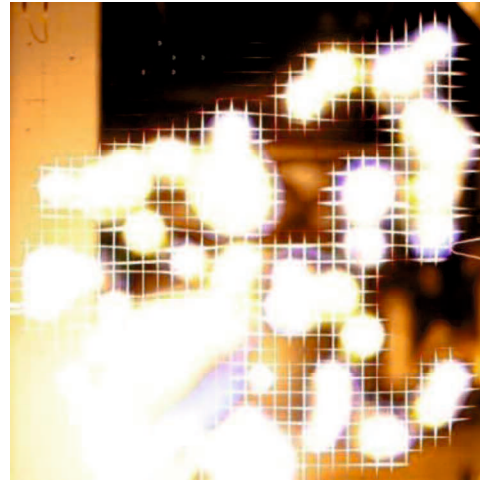


Fig. 4.3 Flame-spread behavior for mean droplet spacing $(S/d_0)_m=14.5$ of randomly distributed droplet cloud.



(a) $(S/d_0)_m=9.2$, $d_0=1.05$ mm, $M=152$



(b) $(S/d_0)_m=14.5$, $d_0=1.01$ mm, $M=67$



(c) $(S/d_0)_m=16.2$, $d_0=0.91$ mm, $M=67$

Fig. 4.4 Lighten-composite images of flame-spread behavior with 1/30 s interval for different mean droplet spacings, $(S/d_0)_m$, of randomly distributed droplet clouds.

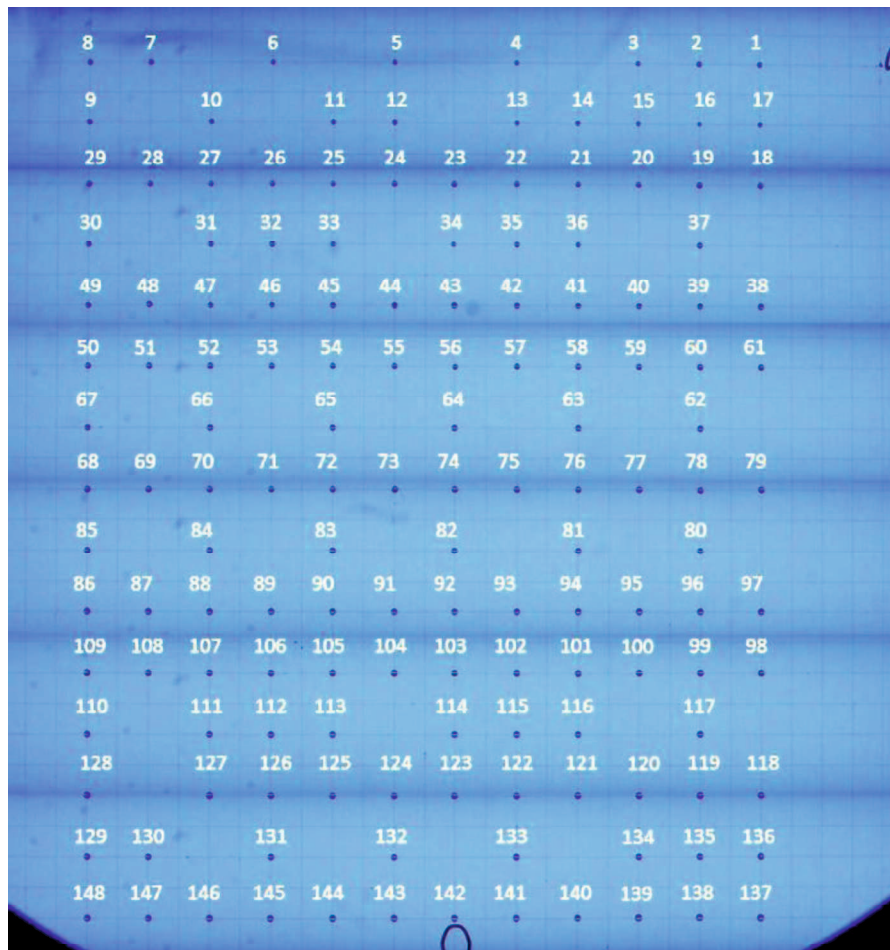


Fig 4.5 Droplet arrangement on SiC-fiber lattice and droplet identification numbers for a parabolic flight experiment.

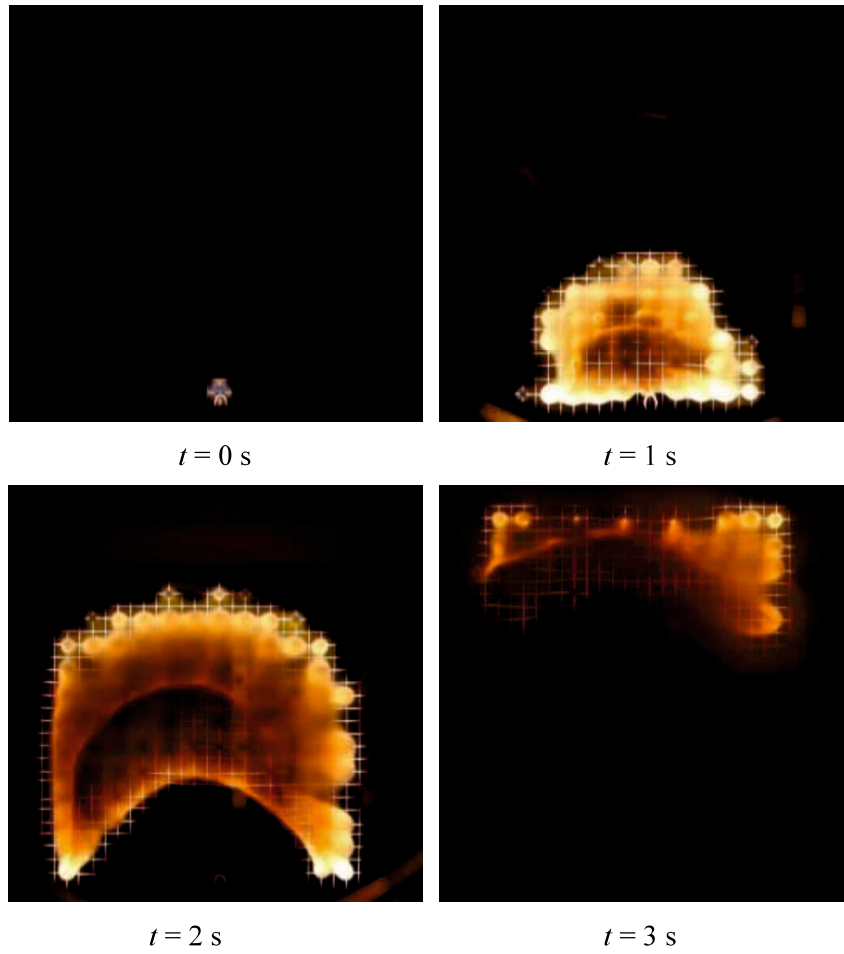


Fig. 4.6 Sequential images of flame-spread behavior in a parabolic flight experiment.

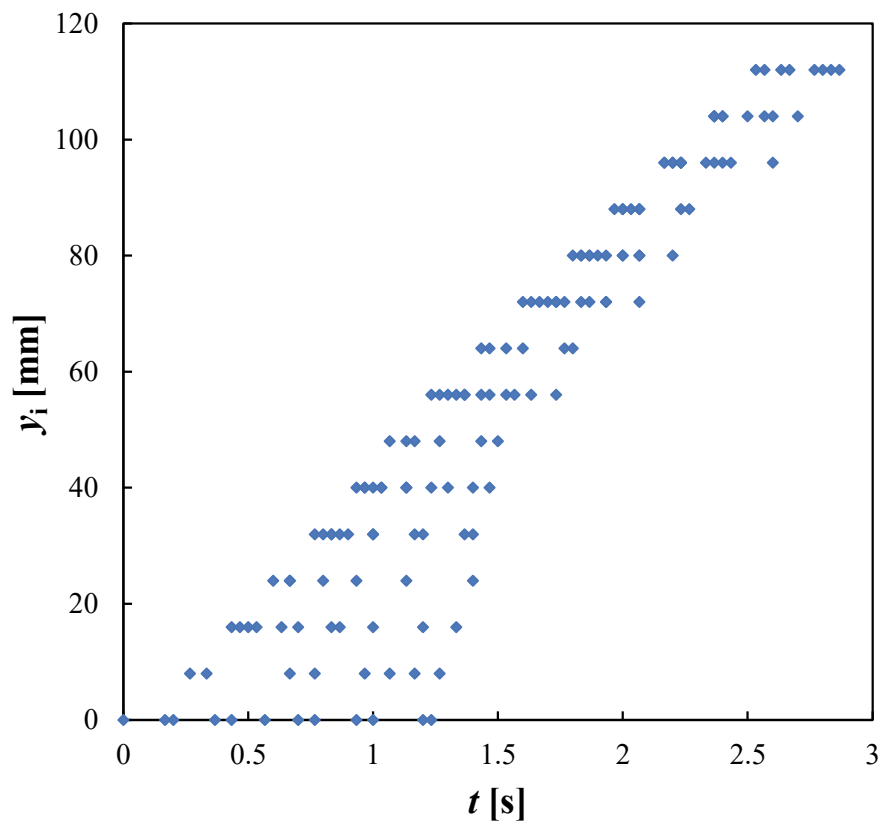


Fig. 4.7 Temporal variation of droplet ignition position y_i in y -direction in a parabolic flight experiment.

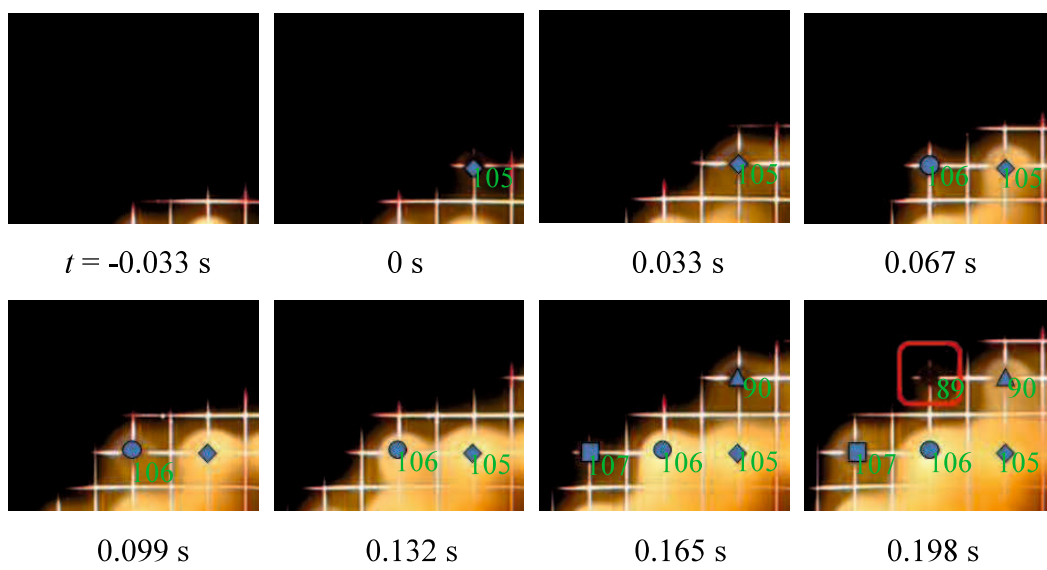


Fig. 4.8 Sequential photographs of flame spread to Droplet 89 in a parabolic flight experiment.

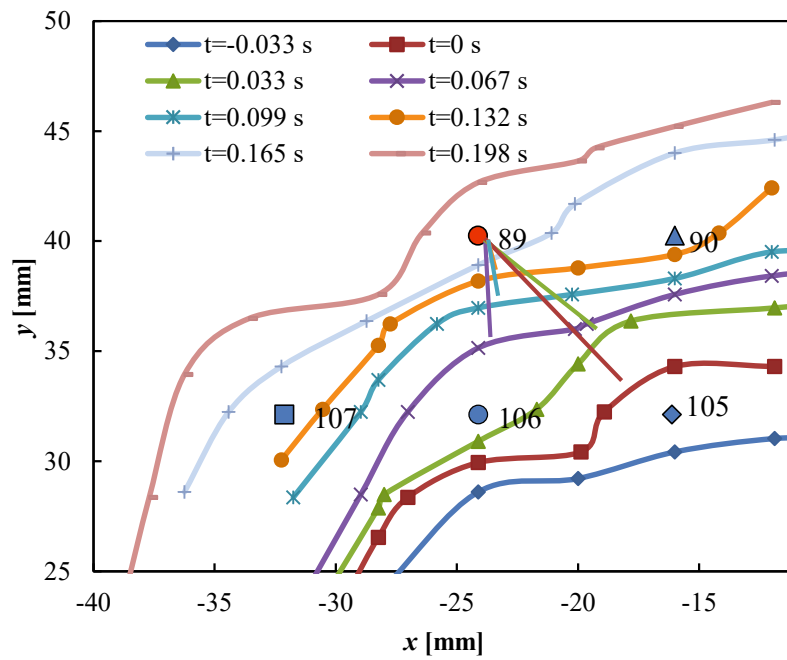


Fig. 4.9 Temporal variations of isothermal line measured from 1200K position of SiC fibers obtained by TFP method in a parabolic flight experiment.

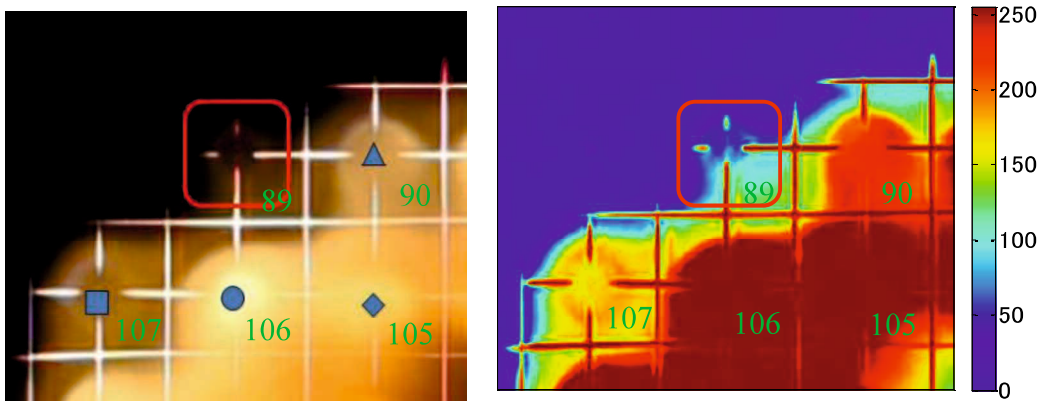


Fig. 4.10 Luminance distribution of the Red value (R value) of RGB image in a parabolic flight experiment.

Table 4.2. Local flame-spread rate to Droplet 89 from neighboring Droplets 90, 105, 106 and 107 in a parabolic flight experiment.

Base droplet No.	S/d_0	Local flame-spread rate $V_f d_0$ [mm^2/s]	Linear droplet array $V_f d_0$ [mm^2/s]
106	10.2	46.9	21.3
105	14.4	44.4	13.7
90	10.1	190.2	21.7
107	14.8	259.7	13.2

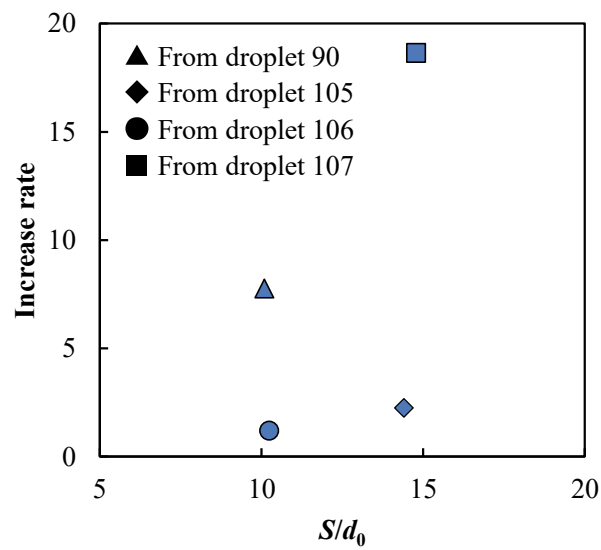


Fig. 4.11 Increase rate of the local flame-spread rate of droplet cloud to Droplet 89 from neighboring droplets relative to the flame-spread rate of linear droplet array⁽³⁾ in a parabolic flight experiment.

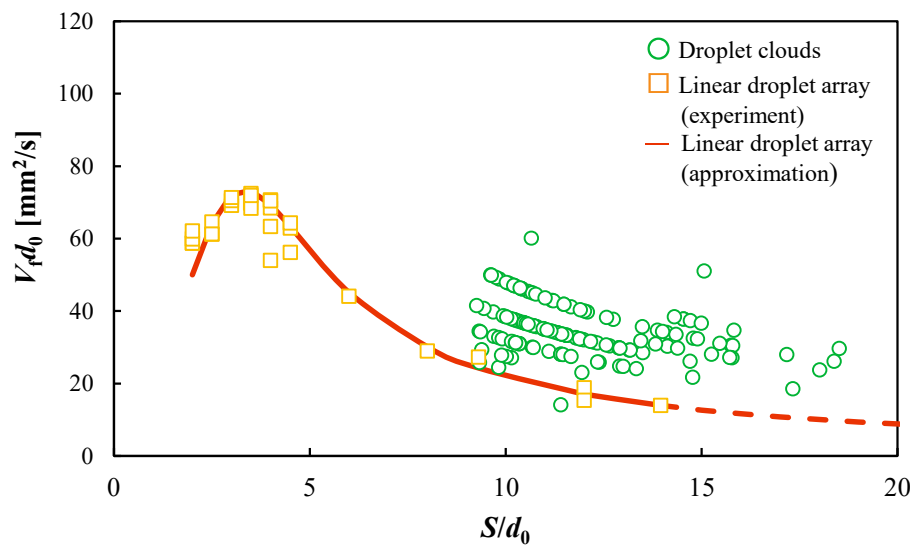
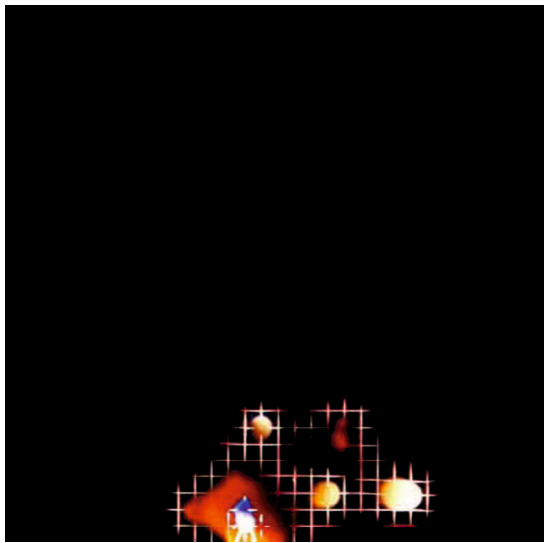
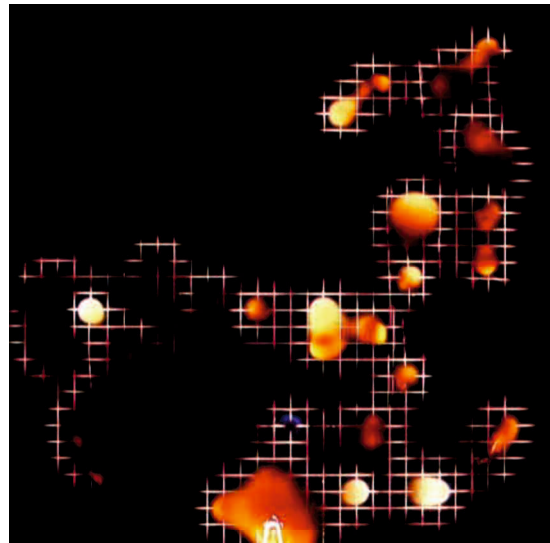


Fig.4.12 Dependence of the local flame-spread rate on local droplet spacing.
 The flame-spread rate of linear n-decane droplet array in microgravity is also plotted in a parabolic flight experiment.

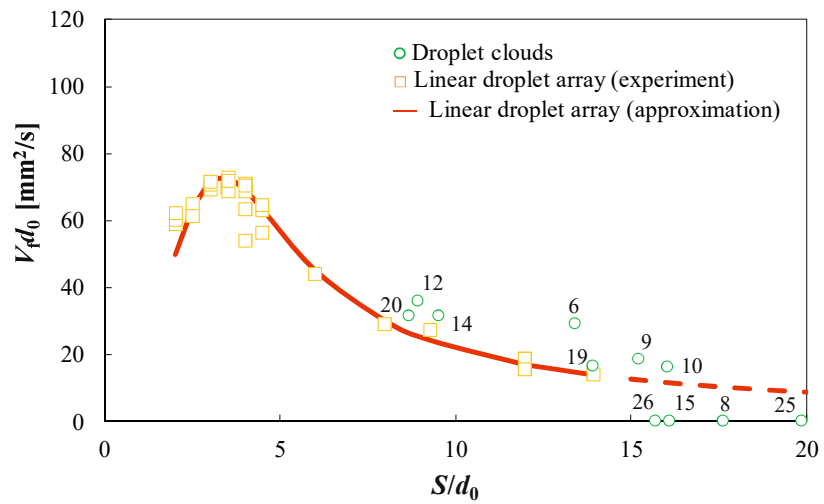


(a) $(S/d_0)_m=16.1$

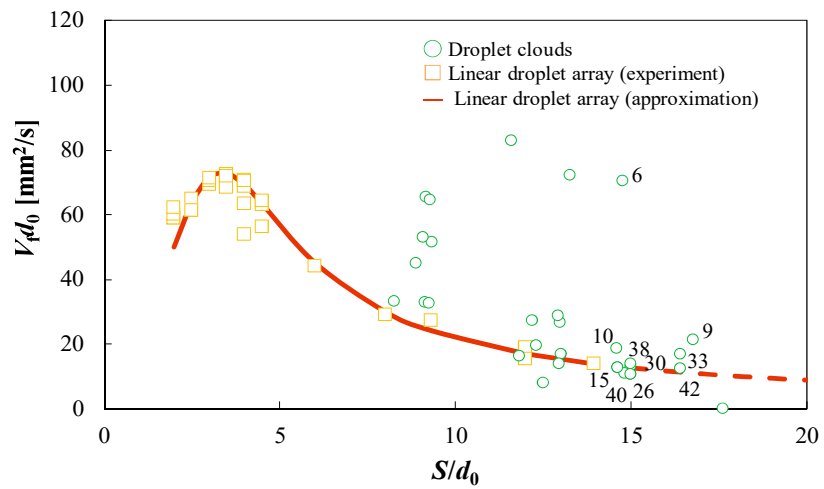


(b) $(S/d_0)_m=15.2$

Fig. 4.13 Lighten-composite images of flame-spread behavior with 1 s interval for different mean droplet spacings, $(S/d_0)_m$, of randomly distributed droplet clouds.



(a) $(S/d_0)_m=16.1$



(b) $(S/d_0)_m=15.2$

Fig. 4.14 Dependence of the local flame-spread rate of droplet cloud on the local droplet spacing. The flame-spread rate of linear droplet arrays⁽³⁾ is also plotted.

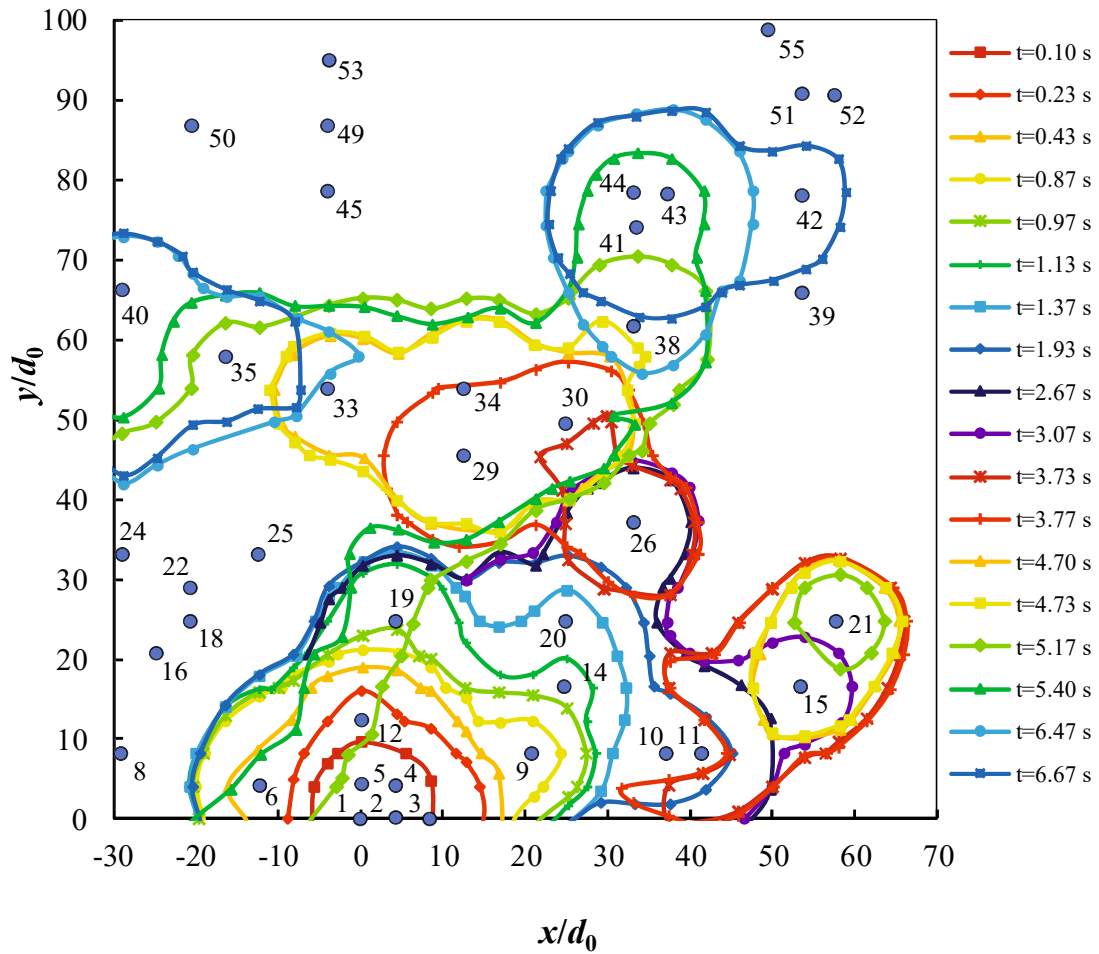


Fig. 4.15 Temporal variations of isothermal line of 1200 K obtained by TFP method for the mean initial droplet diameter $d_0=0.97$ mm and mean droplet spacing $(S/d_0)_m=15.2$.

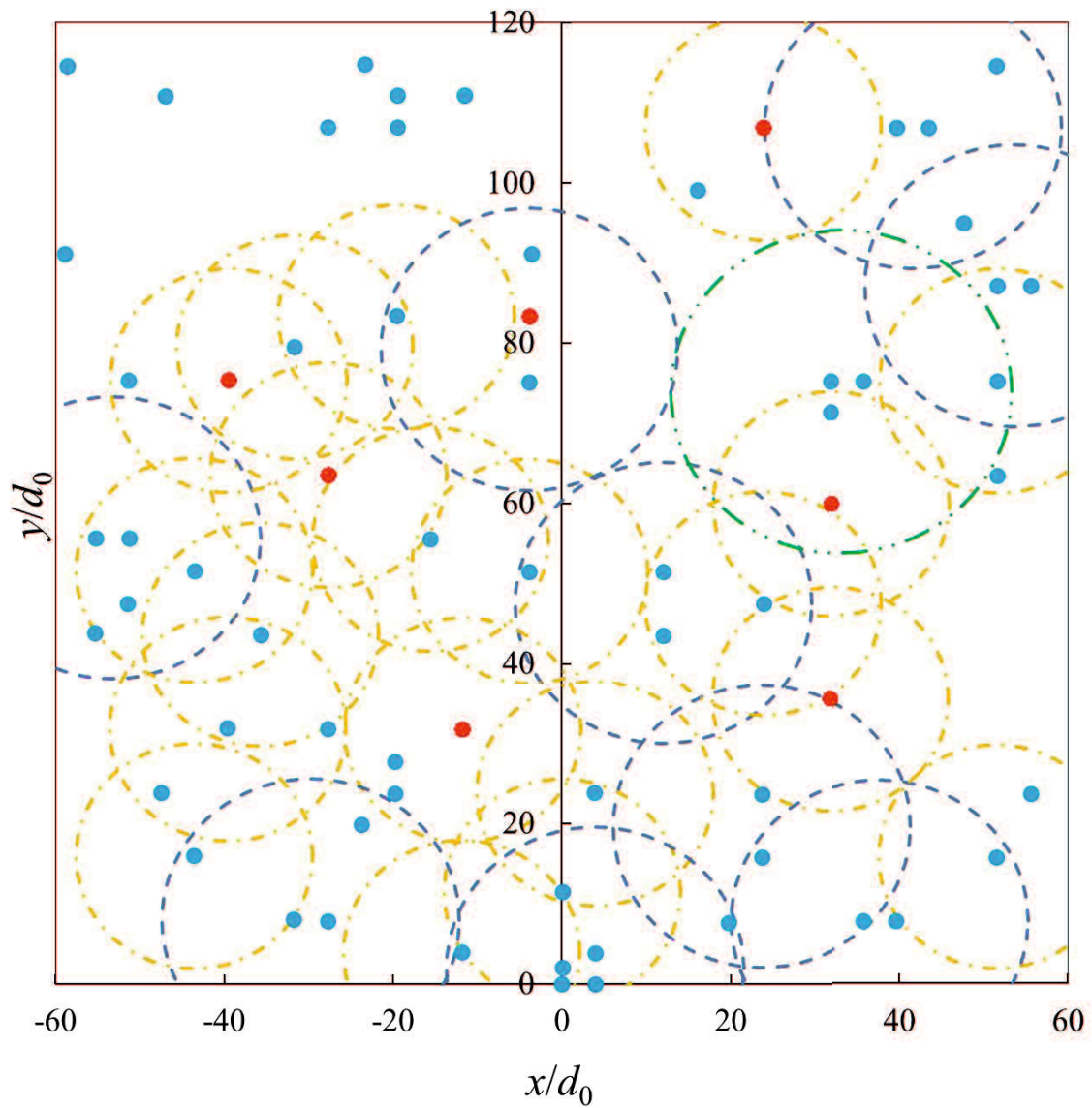


Fig. 4.16 Droplet arrangement of randomly distributed droplet cloud applying flame-spread limit in droplet cloud elements for mean droplet spacing $(S/d_0)_m=14.5$. Chain line is FSL1. Dotted line is FSL2. Two-dot chain line is FLS3.

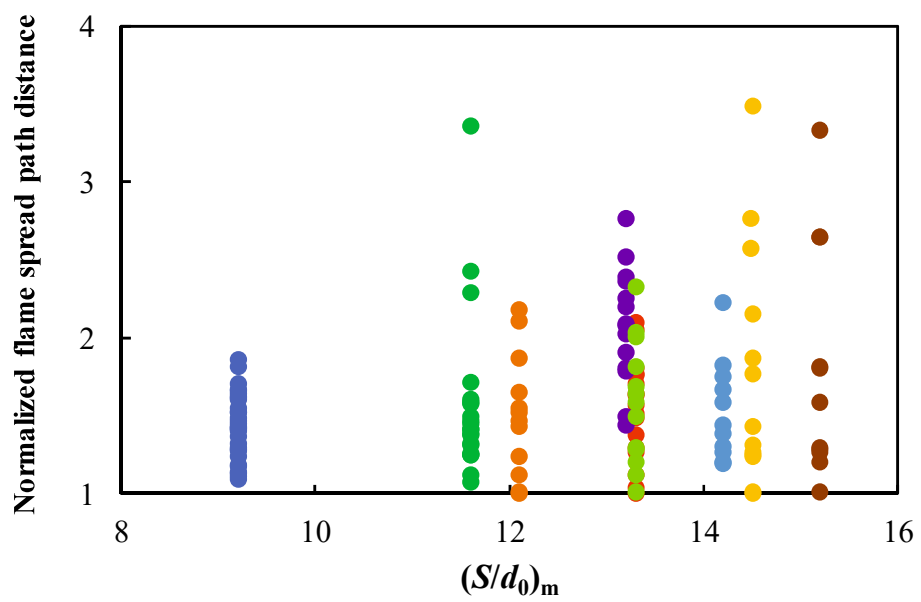


Fig. 4.17 Dependence of the normalized flame spread path distance of droplet cloud on the mean droplet spacing.

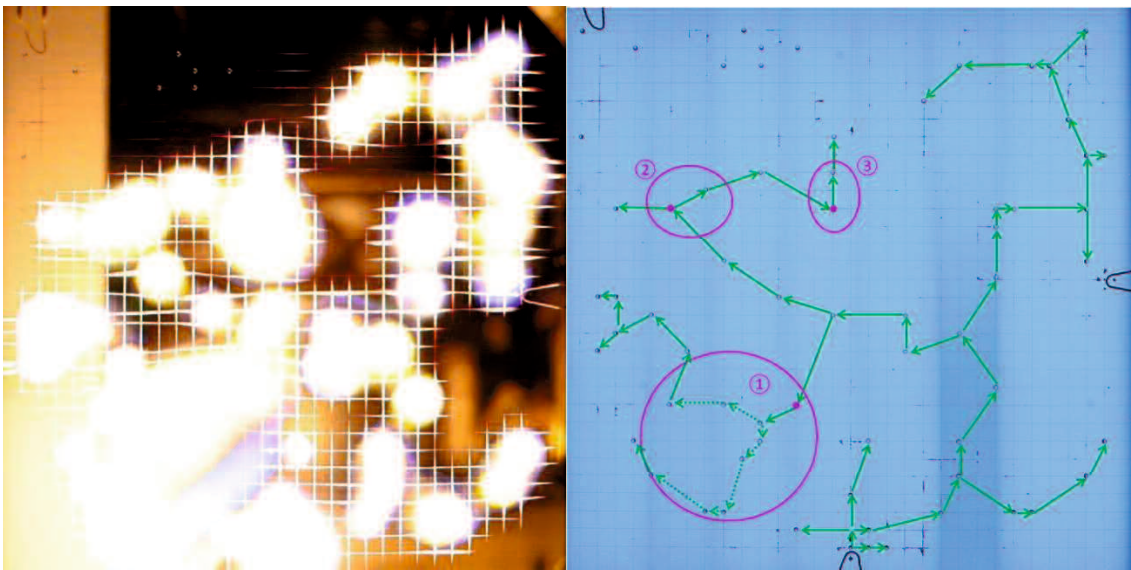
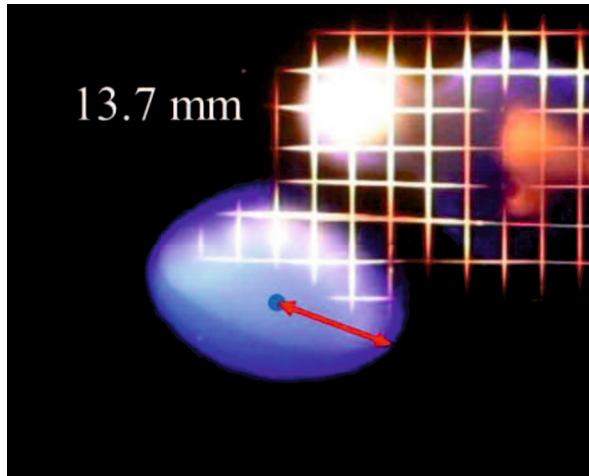
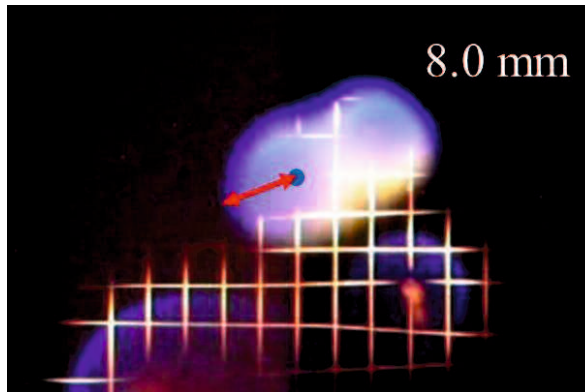


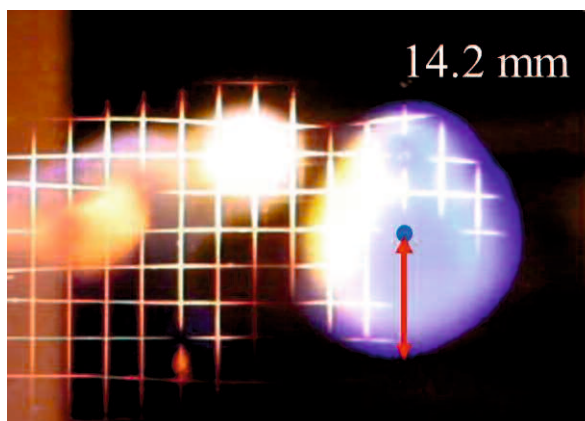
Fig. 4.18 Flame-spread path and the locations where explosive phenomena occurred at mean droplet spacing $(S/d_0)_m=14.5$.



(a) Explosion location①

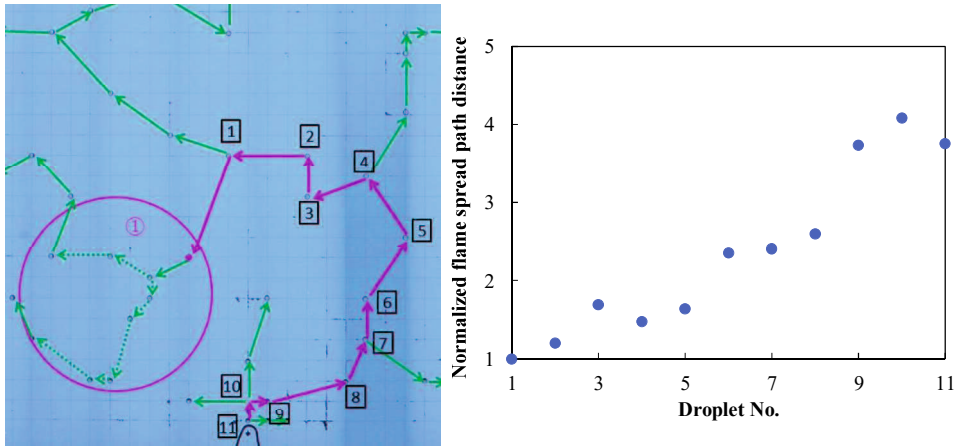


(b) Explosion location②

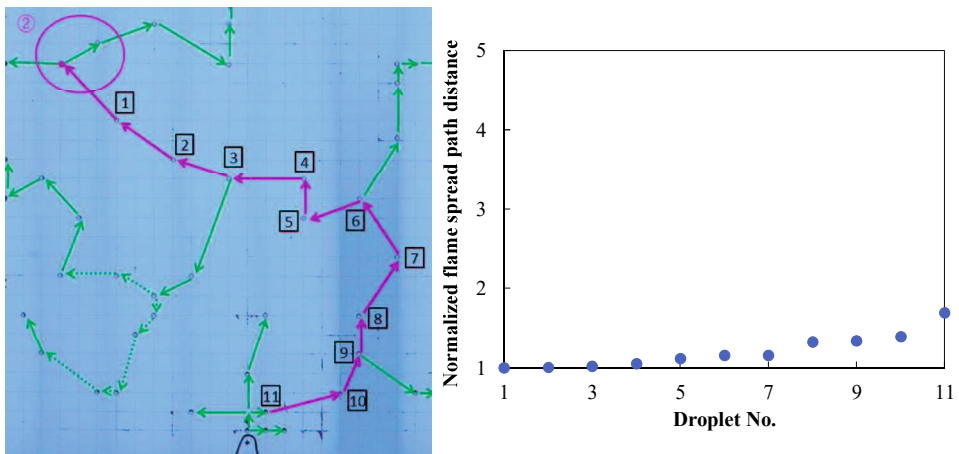


(c) Explosion location③

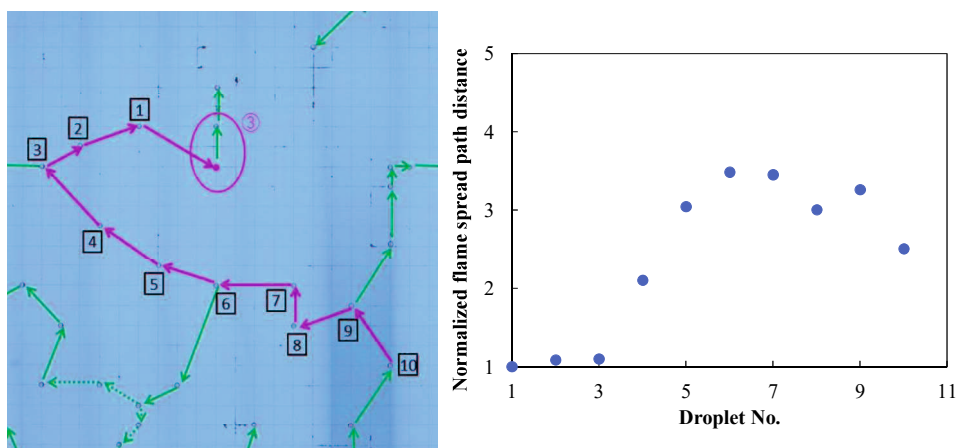
Fig. 4.19 Image of the ignition timing of the droplets for the starting point of the explosion phenomena.



(a) Flame-spread path 1



(b) Flame-spread path 2



(c) Flame-spread path 3

Fig. 4.20 Normalized flame-spread path distance to the location of simultaneous ignition of multiple droplets.

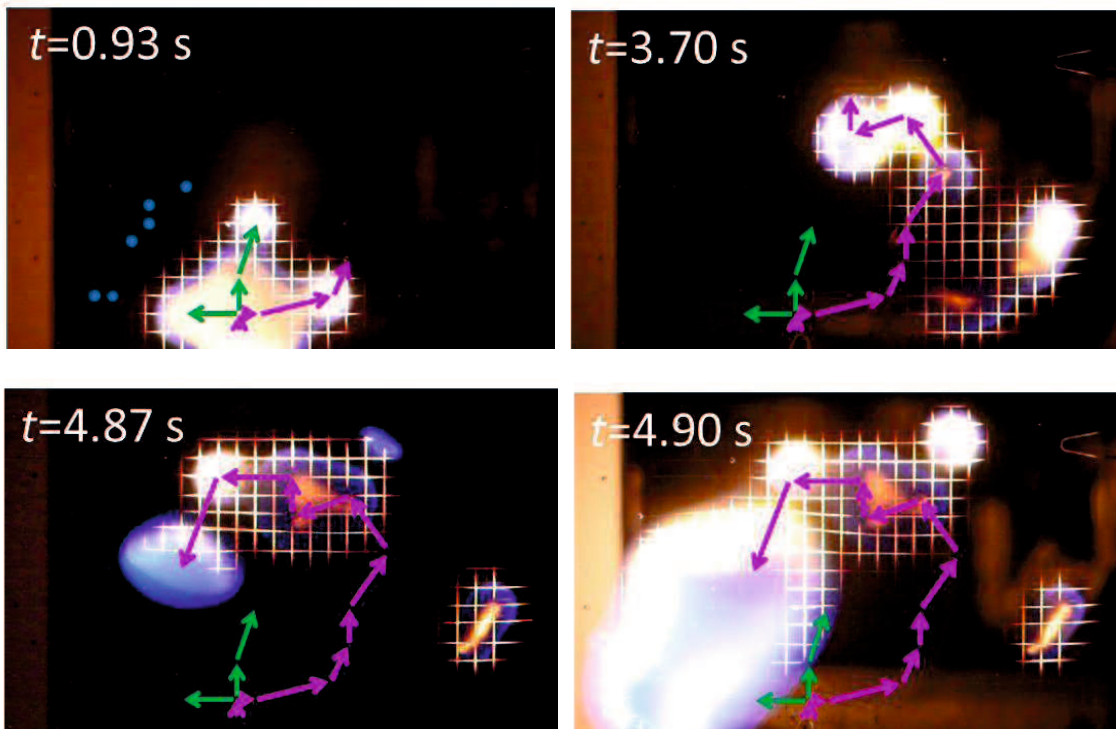
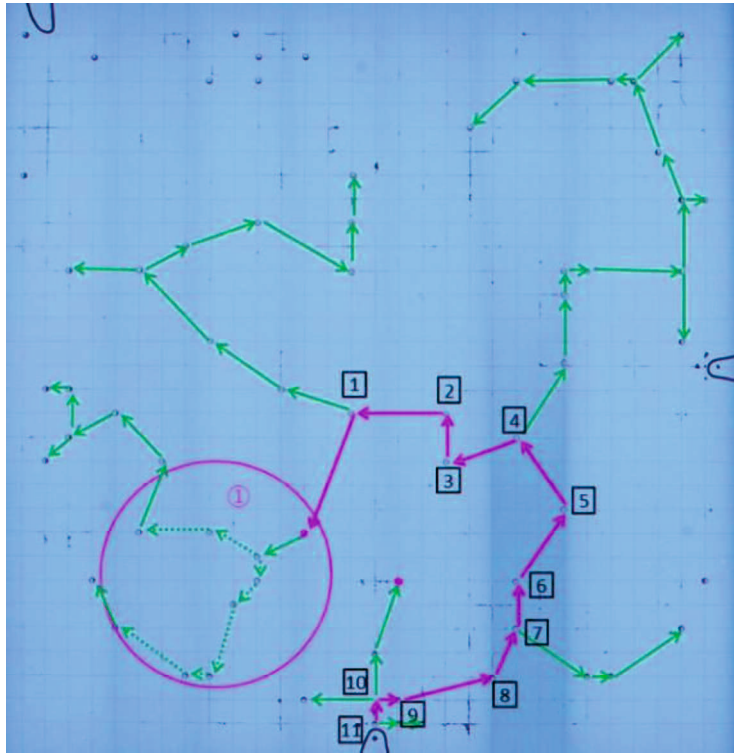


Fig. 4.21 Flame spread behavior of flare-spread path 1.

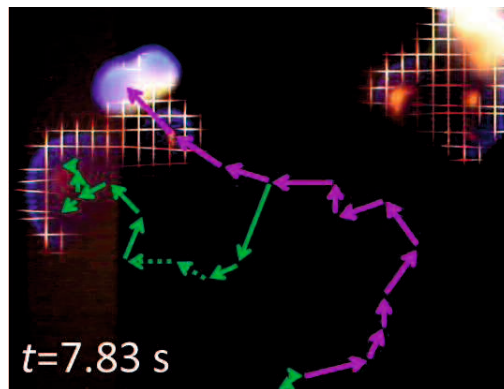
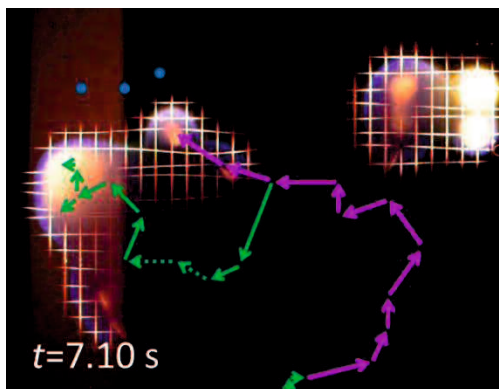
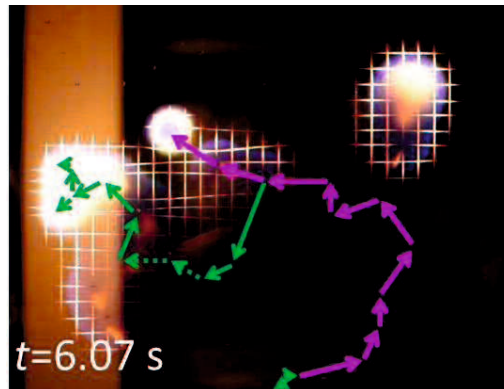
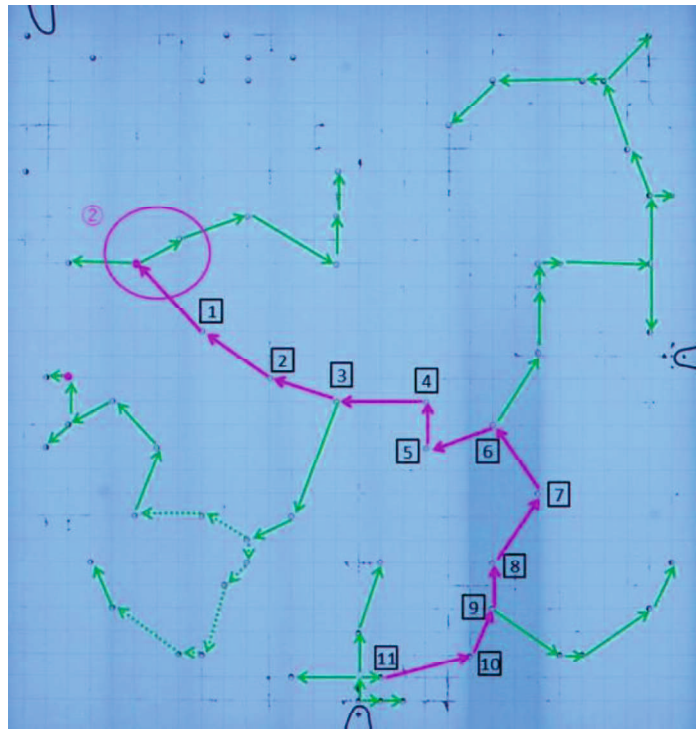


Fig. 4.22 Flame spread behavior of flare-spread path 2.

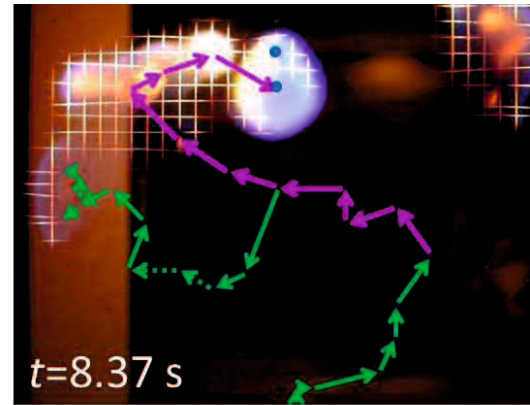
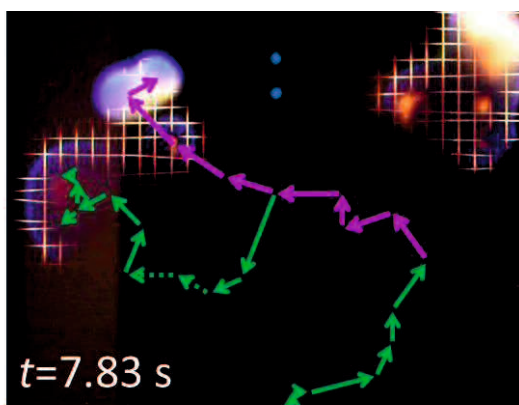
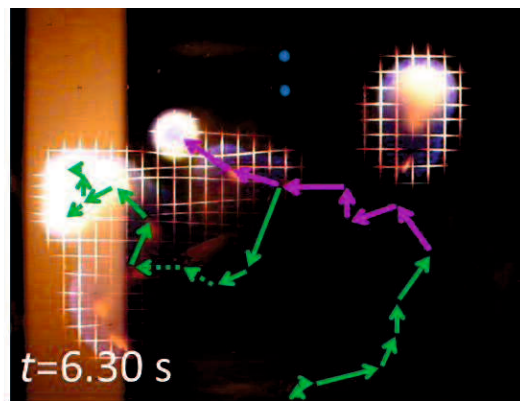
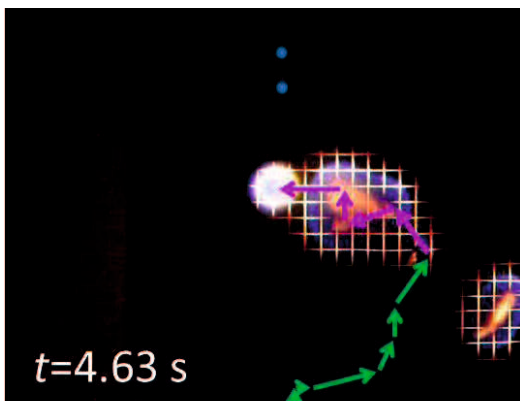
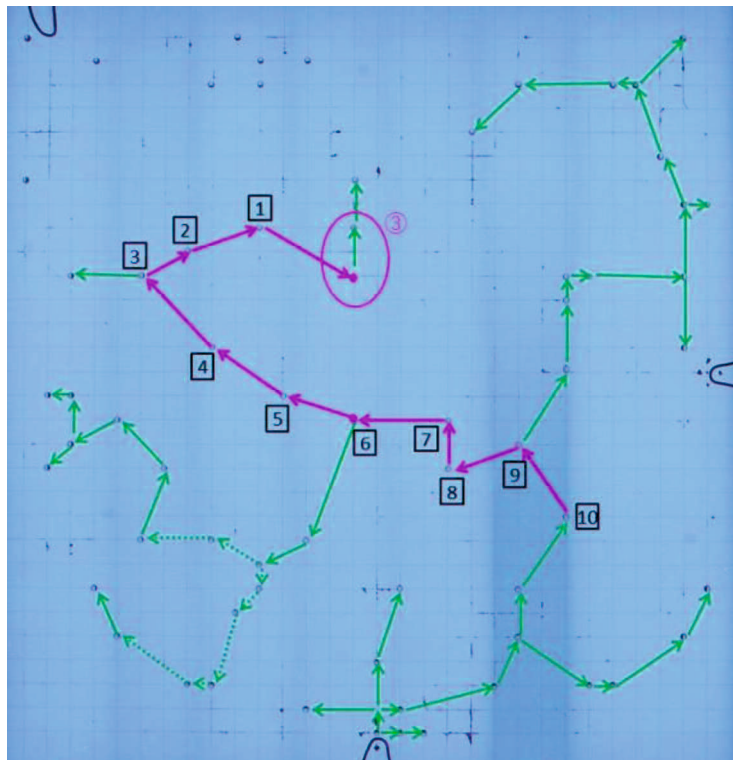


Fig. 4.23 Flame spread behavior of flare-spread path 3.

第5章 結論

噴霧燃焼の機構解明のため，これまで行われてきた液滴燃焼の知見を噴霧燃焼へとつなげる試みとして，国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」において，2・3個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における局所干渉の影響について調査した．以下に得られた知見を示す．

- (1) 2・3個の干渉液滴による強干渉燃焼がある場合，高温領域は球状に拡大する．
- (2) 干渉液滴の質量中心位置の仮想液滴 M から液滴 L への燃え広がり限界距離は燃え広がりの起点となる液滴 A の燃焼寿命(燃焼時間)が液滴干渉により増大することで拡大する．
- (3) 液滴群要素における干渉液滴である液滴 B, A 間の液滴間隔が大きくなるほど，2液滴干渉時の燃え広がり限界は，干渉液滴 B, A に対して x 方向に平らな楕円形に燃え広がり限界が拡大していく．液滴 B および A の単一燃焼時の燃え広がり限界 FSL1 が，質量2倍の仮想液滴が干渉液滴 B, A の質量中心位置にあるときの燃え広がり限界 FSL2 の内側にある時は，干渉液滴 B, A に対して x 方向の燃え広がり限界は液滴 B, A の2液滴干渉時における

FSL2 と概ね一致し、 y 方向の燃え広がり限界は FSL2 より内側に存在すると考えられる。しかし、干渉液滴に対して x 方向に液滴 B および A の FSL1 の燃え広がり限界が、FSL2 の燃え広がり限界の外側になると、干渉液滴に対して x 方向の燃え広がり限界は FSL1 となる。そして、干渉液滴の液滴間隔が大きくなるほど、干渉液滴に対して y 方向の燃え広がり限界は縮小していき、最終的には、干渉液滴 B および A の無次元液滴間隔が $S_{BA}/d_0=14$ のときに完全に単一燃焼時の燃え広がり限界になると考えられる。

- (4) 液滴群要素実験で得られた燃え広がり特性とランダム分散液滴群で得られた局所燃え広がり特性を比較した結果、群燃焼発生限界付近の条件において、液滴群要素では液滴間距離が大きいため燃え広がらないと予想される条件においても、ランダム分散液滴群では燃え広がる条件が複数存在した。これは、既に形成された周囲の火炎によって未燃液滴の周囲気体温度が上昇し、未燃液滴が加熱されたことにより予蒸発し、未燃液滴表面に可燃性混合気層が形成される。そして、熱伝導距離が減少したことにより、初期液滴配置は燃え広がり限界外ではあるが、未燃液滴周囲の可燃性混合気層が燃え広がり限界内にまで到達し、燃え広がり限界が拡大したと考えられる。
- (5) 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は燃え広がりの複雑性の影響

を大きく受けていることが示唆された。燃え広がり経路が大きく迂回し、回り込みが深くなり、回り込んだ経路の周辺に、別の燃え広がり経路が存在する。この別経路の燃え広がりが未燃液滴を加熱して予蒸発し、未燃液滴周りに可燃性混合気層が形成される。深い回り込みによる長い着火遅れ時間が未燃液滴周りの可燃性混合気層の拡大につながり、爆発的現象に寄与したと考えられる。

本研究の関連論文

1. Y. Yoshida, N. Sano, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, Y. Kan, M. Kikuchi, “Analysis of Local Flame-Spread Characteristics of an Unevenly Arranged Droplet Cloud in Microgravity”, *International Journal of Microgravity Science and Application*, 35 (2018), 350203-1-6.
(本文との関連：第 4 章)
2. M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, T. Sakashita, M. Kikuchi, Y. Kan, “Space-based microgravity experiments on flame spread over randomly distributed n-decane-droplet clouds: overall flame-spread characteristics”, *Microgravity Science and Technology*, 30 (2018), 535-542.
(本文との関連：第 1 章, 第 4 章)
3. Y. Yoshida, K. Iwai, K. Nagata, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura, “Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (2019), 3409-3416.
(本文との関連：第 3 章)
4. Y. Yoshida, T. Seo, M. Mikami, M. Kikuchi, “Temperature-field analysis of flame spread over droplet-cloud elements with interactive droplets in microgravity aboard Kibo on ISS”, *International Journal of Microgravity Science and Application*, 36(2019), 360303-1-6.
(本文との関連：第 3 章)

謝辞

本研究を行うにあたり，山口大学大学院創成科学研究科三上真人教授，瀬尾健彦准教授には多大なるご支援と，ご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。並びに，本研究の共同研究者として，多大なるご支援とご協力をいただいた，山口大学エンジンシステム工学研究室液滴班の宇根山凌さん，松本昂大さん，千頭勇斗さんに心より感謝申し上げます。

また，研究室で多大なるご支援とご協力をいただきました，小口瞳史さん，朝日優介さん，宮出堯幸さん，游誠さん，井元大貴さん，桑田孝俊さん，齊木勇志さん，西村凌平さん，平古場健吾さん，浅尾真奈杜さん，清水研一さん，常藤飛鳥さん，橋本大輝さん，樂市昌也さん，ラグワスレン ビャンバツォグさんに心より感謝申し上げます。

最後に研究に支障がないよう温かく見守ってくれた家族に心から感謝申し上げます。

2020年1月6日 吉田 泰子