■原著論文/ORIGINAL PAPER■

微小重力場におけるランダム分散燃料液滴列の燃え広がり特性

Flame-Spread Characteristics of Randomly-Arranged Fuel-Droplet Arrays in Microgravity

大八木 大史*・八木 一記・重野 悠・三上 真人・小嶋 直哉

OYAGI, Hiroshi*, YAGI, Kazuki, SHIGENO, Hisashi, MIKAMI, Masato, and KOJIMA, Naoya

山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1

Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan

2006年7月20日受付; 2006年10月28日受理/Received 20 July, 2006; Accepted 28 October, 2006

Abstract : In this research, flame-spread characteristics of randomly-arranged one-dimensional fuel-droplet arrays in microgravity were studied. Flame-spread probability was calculated based on a percolation model with the flame-spread-limit distance with evenly spaced droplet arrays. Flame-spread probability depends on occupation fraction of droplet in lattice, and rapidly increases with the occupation fraction. Local flame-spread-limit distance of droplet array with uneven inter-droplet distance was investigated. Flame-spread experiments were performed in microgravity. The fuel droplets were hung on the fibers, and the fuel droplets were arranged in a straight line at uneven inter-droplet distance. N-decane was used as a fuel. Local flame-spread-limit distance of unevenly-spaced droplet array is affected by local droplet interaction and flame spread mode and is larger than that of evenly-spaced droplet array. Flame-spread probability considering the flame-spread-limit distance with uneven inter-droplet distance with uneven inter-droplet distance is larger than that without it.

Key Words : Fuel Droplet Array, Flame Spread, Uneven Inter-Droplet Distance, Flame-Spread Probability, Microgravity

1. 緒言

燃料噴霧における液滴間の燃え広がり現象は、ディーゼ ルエンジンでは着火直後において、ガスタービンエンジ ンでは火炎基部において見られる現象である。この現象 は、前者においては初期燃焼の熱発生において、また、後 者においては火炎の安定性において重要な役割を果たして おり,実用上その機構解明は重要である.燃料液滴間の燃 え広がり現象を理解する上で必要となる最小の形状は直線 燃料液滴列であり、この直線燃料液滴列の燃え広がり現象 を解明するために多くの研究が行われている。特に、等間 隔燃料液滴列の燃え広がりについては、実験的[1-8]、解析 的[9,10],数値計算的[11,12]に多くの現象解明が行われて いる.しかし、実際の噴霧燃焼では液滴は空間にランダム に分散しているため、等間隔燃料液滴列の研究で得られた 知見を噴霧燃焼の燃え広がり現象の解明へとつなげること は困難であった. そこで Umemura · Takamori [13]はパーコ レーション理論を噴霧燃焼に適用し、燃料液滴の燃え広が りに対するランダム分散効果について報告している。パー

コレーション理論[14]とは、格子上にランダムに配置され た粒子のつながりを確率的に示す理論である。パーコレー ション理論を噴霧燃焼に適用する場合,粒子は燃料液滴, つながりは火炎の燃え広がりとなる.また図1に示すよう に,格子上に存在する粒子数が少ない場合は,粒子同士の つながりが小さく,噴霧燃焼の場合を考えると燃え広がり にくく失火しやすい状態となる. これに対して粒子数が多 くなると、粒子同士のつながりは大きくなり巨大なクラス タを形成するようになる.この場合,噴霧燃焼において考 えると燃え広がりやすく大きな群燃焼火炎を形成しやすく なると考えられる. 一般にサイトパーコレーション[14]で は、粒子が格子上で隣り合った場合にそれらの粒子はつな がるとみなされ、格子間隔は重要とはならない.しかし、 実際の燃料液滴間の燃え広がりでは、液滴間隔によって燃 え広がりのモードが変化する[8,9]とともに、ある液滴間隔 以上では燃え広がりが生じない燃え広がり限界[4,6]が存在 し,液滴間隔は燃え広がりにとって重要なパラメータとなる.

以上により、本研究では燃え広がり限界距離を考慮した パーコレーション理論を用い、等間隔燃料液滴列の実験で 得られた微小重力場における燃え広がり限界距離を用い て、直線状にランダムに配置した液滴列の燃え広がり確率

^{*} Corresponding author. E-mail: z015fb@yamaguchi-u.ac.jp



Fig.1 Particle and connection.

を求める. さらに,微小重力場において不等間隔燃料液滴 列の局所燃え広がり限界距離を調査し,その結果を基に燃 え広がり確率を求める.

等間隔燃料液滴列の燃え広がり限界を考慮したランダム分散燃料液滴列の燃え広がり確率

燃料液滴列の燃え広がりには燃え広がり限界が存在する ことがわかっている[4,6]. Mikami ら[6]が行った微小重力 実験によれば,微小重力場における大気圧・室温雰囲気で の等間隔正デカン燃料液滴列の燃え広がり限界液滴間隔は 初期液滴直径の14 倍程度であることがわかっている.本 研究ではこの値を用いて燃え広がり確率を求めた.

Droplet

(a) All inter-droplet distance less than flame-spread-limit distance.



(b) At least one inter-droplet distance larger than flame-spread-limit distance.

Fig.2 Typical flame-spread behavior for two different flame-spread patterns in microgravity. The white circles are inserted to show the droplet position.





同じ格子数の格子上にある値の占有率で配置された燃料 液滴の配置パターンには多くのパターンが存在する。ここ で、

占有率とは格子数 N に対する

燃料液滴数 M の割合 M/N である.それら同じ占有率での液滴配置パターンは以下の2 つのモードに分けることができる。一つ目のモードはすべ ての液滴間隔が燃え広がり限界距離以下の場合である。こ の場合,火炎は最後の液滴まで燃え広がることができる(図 2(a)). これに対し二つ目のモードはすべての液滴間隔の うち一箇所でも燃え広がり限界距離よりも大きい場所が存 在する場合である. この場合, 火炎は燃え広がり限界距離 よりも大きい場所の前の液滴までしか燃え広がることがで きず,最後の液滴まで燃え広がることはできない(図2(b)). このようにたとえ同じ占有率でも最後の液滴まで燃え広が る場合と燃え広がらない場合とが存在する。ここで、それ らすべてのパターンに対する最後の液滴まで燃え広がるパ ターンの割合を燃え広がり確率として定義する.計算では, 図3のように N 個の格子点の前後に仮想液滴を置き, N 個 の格子上にランダムに M 個の液滴を配置し、そのすべての 液滴間隔が燃え広がり限界距離以下の場合に燃え広がった とし、一箇所でも燃え広がり限界距離以上の液滴間隔が現 れた場合は燃え広がらなかったとした。左端の仮想液滴は 着火用とし、また、右端の仮想液滴は、燃え広がりを判断 する液滴とした.

図4は燃え広がり確率の計算結果である.図4の燃え広がり確率は、格子数N=100、格子点間隔L=2 mmの1次元格子上に、初期液滴直径 $d_0=1 \text{ mm}$ の液滴をランダムに配置した場合であり、燃え広がり限界液滴間隔は $(S/d_0)_{limit}=14$ である。計算回数は各占有率あたり3000回である.この結果から、占有率が増加すると、ある占有率を境に燃え広がり確率が急激に増加することがわかる.一般のサイトパーコレーションでは粒子が隣り合う場合につながると考えるため、一次元配置の場合には占有率が1以外では端から端まで粒子がつながることは無く、ランダム分散効果を調べる上で意味をなさない.これに対し、本研究のように燃え広がり限界間隔を考慮したパーコレーションモデルではランダム配置された液滴間の燃え広がり特性を、1次元不等間隔燃料液滴列を対象に議論できるといえる.

本章では、Mikami ら[6]が行った等間隔燃料液滴列の実 験結果を基にランダム分散燃料液滴列の燃え広がり確率を 求めた.しかし、不等間隔燃料液滴列の燃え広がりにおけ る局所燃え広がり限界は等間隔燃料液滴列の燃え広がり限

Fig.4 Dependence of flame-spread probability on occupation fraction of droplet in lattice (N = 100, L = 2 mm, $d_0 = 1$ mm, $(S/d_0)_{limit} = 14$).

0.4

Occupation fraction of droplet in lattice

0.2

0.6

0.8

界と異なる可能性がある. Konishi ら[15]や Mikami ら[16]は 2 液滴間の干渉燃焼について実験的に調査しており,初期 液滴間隔が小さい場合,個々の燃料液滴周囲に独立して火 炎が形成されることができなくなり,単一液滴の火炎より も半径の大きい群燃焼火炎を形成するようになることを報 告している.以下の章では,2液滴および3液滴の干渉に よる火炎径の拡大がそれに隣接する未燃液滴への局所燃え 広がり限界距離にどのような影響を与えるのかについて微 小重力実験により調査するとともに,燃え広がり限界距離 の変化がランダム分散燃料液滴列の燃え広がり確率にどの ような影響を及ぼすかについて調査する.

3. 実験装置および実験方法

本研究で用いた実験装置の概略図を図5に示す.この実 験装置は Mikami ら[6]が提案した液滴同時生成技術を不等 間隔燃料液滴列の実験のために改良したもので、液滴保持 装置,燃料供給装置,液滴列生成装置,液滴除去装置およ び点火装置から構成されている。Mikami ら[6]による装置 と異なる点の一つ目は、ガラス管1本ごとにそれぞれ独立 したシリンジからテフロンチューブを介して直接燃料が供 給される点である。二つ目は液滴除去装置を搭載している 点である. 落下開始前の通常重力場においてガラス管を移 動させない状態でガラス管先端から燃料を一旦出してお き、ガラス管先端にある余分な燃料を液滴除去装置から噴 出される高圧空気によって吹き飛ばし、これによりガラス 管先端まで確実に燃料が充填された状態にする.そして, 移動ステージによりガラス管先端を X 字に張った SiC ファ イバの交点に移動させ液滴を生成する。この二つの改良点 により Mikami ら[6]の実験装置よりも初期液滴直径の精度 を向上させた.



Fig.5 Droplet-array generation apparatus.

燃料液滴は X 字に交差させて張った直径 14 μ m の SiC ファイバの交点で保持した. この位置を変えることにより 液滴間隔を変化させている. この懸垂線交点へは, 先端外 径を 40 μ m になるように細く伸ばしたガラス管から燃料を 供給している.各ガラス管はテフロンチューブを介してマ イクロシリンジとつながっており,シリンジのプランジャ を押す移動ステージのステッピングモータのパルス数を変 化させることによって液滴直径を変化させている.移動ス テージの移動量に1パルス相当の誤差が生じた場合,1mm の液滴直径に対して生じる誤差は約 1.1% である. このよ うにして,初期液滴直径 d_0 は 0.93 mm ~ 1.06 mm の間で 変化させた.

本実験における実験工程は以下のとおりである.はじめ に通常重力場においてガラス管を移動させずにガラス管先 端まで燃料を供給する.次に液滴除去装置より高圧空気を 噴出し,余分な燃料を除去する.次に,ガラス管の先端を 懸垂線交点に近づけるとともに,燃料を供給する.燃料の 供給が完了した後,実験装置を落下させ微小重力場におい てガラス管を引き抜き不等間隔の燃料液滴列を生成する. その後,燃料液滴列の一端の液滴を熱線により着火し燃え 広がりを開始させる.

本実験は、室温・大気圧において行い、燃料には正デ カンを用いた.燃焼挙動はデジタルビデオカメラ (SONY, DCR-HC90)を用いて直接撮影を行い 30 fps の画像を保存 している.本研究における微小重力実験は日本無重量総合 研究所 (MGLAB)の落下施設を用いて行っており、その無 重量レベルは 10^5 G 以下である.



Fig.6 Droplet array to examine the effect of two-droplet interaction on the local flame spread limit distance.

1

0.8

0.6

0.4

0.2

0

Flame-spread probability

4. 不等間隔燃料液滴列の局所燃え広がり限界距離

本章では,液滴の干渉による火炎径の拡大がそれに隣接 する未燃液滴への局所燃え広がり限界距離にどのような影 響を与えるのかについて微小重力実験により調査した結果 を報告する.

4.1. 2 液滴干渉時の局所燃え広がり限界距離

2 液滴干渉時の局所燃え広がり限界距離を調査する微小 重力実験では、図6のように懸垂線上に4つの燃料液滴を 配置した燃料液滴列の実験を行った.液滴 B と A による 干渉の影響による液滴 Α と L の間における局所燃え広が り限界距離の違いを調べるため、液滴 B と A の間隔 S_{B4} は $2 \text{ mm} \sim 14 \text{ mm}$ の間で、液滴 A と L の間隔 S_{4L} は 14 mm ~ 18 mm の間で変化させた. また, 初期液滴直径 d₀ は 0.93 mm ~ 1.14 mm の間で変化させており、無次元液滴間隔と しては $S_{BA}/d_0 = 1.9 \sim 14$, $S_{AL}/d_0 = 14 \sim 18$ で変化させてい る.なお本研究では、図6のような液滴間隔のパターンを パターン $S_{BA}/d_0 - S_{AI}/d_0$ と呼ぶことにする. 例として S_{BA}/d_0 = 2.0, S_{AL}/d₀ = 16 の場合はパターン 2.0-16 である. 実験で は、着火用の液滴 I を熱線により加熱することにより燃え 広がりを開始させている。液滴 I は、観察対象としている 液滴 B, A および L への熱線の影響を小さくするためのも のであり、液滴 I と液滴 B との間の距離 S_{IB} は 12 mm とし ている. 初期液滴直径 d₀ は 0.93 mm ~ 1.14 mm の間で変 化させたため、 $S_{IB}/d_0 = 10.5 \sim 12.9$ である。Mikami ら[8]の 報告によると微小重力場において 2 液滴の火炎が独立して 燃焼するのは液滴間隔が S/d₀ > 11 の場合であることから, 本研究の S_{IB}/d₀ においては液滴 B に対する液滴 I の干渉の 影響が小さいと言える。また逆に、あまり液滴間隔を大き





(b) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 6.0-16.

Fig.7 Typical flame-spread behavior for two different droplet array patterns in the case of two-droplet interaction. The white circles are inserted to show the droplet position.



Fig.8 Flame-spread-limit distance of fuel droplet arrays with uneven inter-droplet distance in the case of two-droplet interaction.

くすると液滴 B への燃え広がりを失敗する可能性があるために、本研究の S_{IB}/d_0 は等間隔燃料液滴列の燃え広がり限界の $(S/d_0)_{limit} = 14$ [6]より小さく設定した.

図7に燃え広がりの直接写真を示す.なお、図中の時間 t/d_0^2 は液滴 B が着火してからの時間である. ここでは $S_{41}/$ d_0 は16と等しいが S_{BA}/d_0 がそれぞれ2.0および6.0と異な る場合を示した. パターン 2.0-16 の場合では液滴Lまで燃 え広がることができたが、パターン 6.0-16 の場合では液滴 Lまで燃え広がることはできなかった.このように液滴 B とAとの干渉により局所燃え広がり限界 $(S_{AI}/d_0)_{limit}$ が変化 することがわかった.今回行った実験結果のすべてを図8 に示す.また、図8には等間隔燃料液滴列の燃え広がり限 界距離[6]も示す. この結果を見ると, 液滴間隔 S_{B4}/d₀ が小 さい時は液滴 AL 間の燃え広がり限界距離 $(S_{AL}/d_0)_{limit}$ が大 きくなることがわかる.これに対して、液滴間隔 SBA が大 きくなると局所燃え広がり限界距離は等間隔燃料液滴列の 燃え広がり限界距離に近い値を示すようになっていること がわかる.このことから、液滴間隔 SBA が小さい場合では 液滴同士の干渉効果により燃え広がり限界距離が増加した と考えられる.

この結果が干渉効果による火炎拡大によるものかを検証 するために,液滴間隔 S_{BA}/d_0 に対する液滴 A の火炎半径 (液滴 A の中心から液滴 L 方向の火炎先端までの距離) につ いて調べた.図9 には液滴 A 周囲に形成された輝炎,青 炎の最大半径の結果をまとめたものを示す.この結果を見 ると,液滴間隔 S_{BA}/d_0 が減少するとともに液滴 A の火炎半 径が増加していることがわかる.また,図8 と図9 とを比 較してみると燃え広がり限界距離が増加する液滴間隔 S_{BA} と火炎先端位置が増加する液滴間隔 S_{BA} はほぼ一致してお り,干渉の影響による火炎半径の拡大が隣接する未燃液滴 への局所燃え広がり限界距離を増加させたと考えられる.

8 Maximum flame radius of Droplet A $R_{f}^{}/d_{
ho}^{}$ Blue flame 7 Luminous flame 6 5 4 3 2 0 5 10 15 Dimensionless inter-droplet distance between Droplet B and A $S_{_{BA}}/a_{_{O}}$

Fig.9 Maximum flame radius of Droplet A.

4.2. 3 液滴干渉時の局所燃え広がり限界距離

図8に示されるとおり、2液滴干渉により局所燃え広が り限界距離が最も大きくなったのは S_{B4}/d₀ が 4 以下の場合 であった.本節では、同様の S_{B4}/d₀ の 2 液滴に 3 液滴目を 干渉させることにより,2液滴干渉時には燃え広がらなかっ た S₄₁/d₀ = 17 での燃え広がりが可能となるかどうかを調べ た. 微小重力実験では図 10 のように懸垂線上に 5 つの液 滴を配置した燃料液滴列の実験を行った.なお本研究では, 図 10 のような液滴間隔のパターンをパターン SCB/do-SBA/ d_0 - S_{AL}/d_0 と呼ぶことにする。例として $S_{CB}/d_0 = 1.9$, S_{BA}/d_0 = 1.9, S_{AI}/d_0 = 17の場合はパターン 1.9-1.9-17 である. S_{AI} は 18 mm に固定し, *S_{BA}* が 2 mm の場合には *S_{CB}* を 2 mm ~ 10 mm 間で変化させ, S_{B4} が 4 mm の場合には S_{CB} を 2 mm ~ 4 mm の間で変化させた. 初期液滴直径 d₀ には 1.06 mm を用いたため、無次元液滴間隔としては $S_{BA}/d_0 = 1.9$ の場合 $S_{CB}/d_0 = 1.9 \sim 9.4$, $S_{BA}/d_0 = 3.8$ の場合 $S_{CB}/d_0 = 1.9 \sim 3.8$ で あり、 $S_{4I}/d_0 = 17$ である。2 液滴干渉による局所燃え広が り限界距離の調査の時と同様に、着火用液滴 I と液滴 C と の間の距離 S_{IC} は基本的に 12 mm として実験を行った.た だし,パターン 9.4-1.9-17 の場合のみ S_{IC} = 10 mm とした. これは、限りある微小重力時間内で液滴 A から L への燃え 広がりの可否を評価する時間を確保するためである.

図 11 および図 12 に燃え広がりの直接写真を示す.図 11



Fig.10 Droplet array to examine the effect of three-droplet interaction on the local flame spread limit distance.



(b) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 3.8-1.9-17.

| . <u>∨</u> γ | ¥ ∳. | V of all . | • ¥ M |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| $t / d_0^2 = 0.00 \text{s/mm}^2$ | 0.06s/mm ² | 0.09s/mm ² | 2.6 s/mm ² |

(c) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 5.5-1.9-17.



(d) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 7.5-1.9-17.

| b) | | ₩ . | V W |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| $t / d_0^2 = 0.00 \text{s/mm}^2$ | 0.47s/mm ² | 0.50s/mm ² | 2.1s/mm ² |

(e) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 9.4-1.9-17.

Fig.11 Flame-spread-behavior of different droplet array patterns at $S_{BA}/d_0 = 1.9$ in the case of three-droplet interaction. The white circles are inserted to show the droplet position.

では $S_{BA}/d_0 = 1.9$, $S_{AL}/d_0 = 17$ で一定であるが S_{CB}/d_0 を 1.9 から 9.4 で変化させたものである. パターン 1.9-1.9-17 お よびパターン 9.4-1.9-1.7 の時には火炎は液滴 L まで燃え広 がることはできなかったが, パターン 3.8-1.9-17, パター ン 5.5-1.9-17, パターン 7.5-1.9-17 の場合には火炎は液滴 L まで燃え広がることができた. また,図 12 には $S_{BA}/d_0 =$ 3.8, $S_{AL}/d_0 = 17$ で一定であるが S_{CB}/d_0 を 1.9 と 3.8 で変化 させたものである. この条件では,いずれの場合も火炎は 液滴Lまで燃え広がることができなかった. 今回行った実 験結果のすべてを図 13 に示す. この結果を見ると,液滴 C, B, A の間隔が最も小さい場合の組み合わせ (パターン 1.9-1.9-17) において燃え広がらないことがわかった. これ



⁽b) Flame-spread behavior for the droplet array pattern 3.8-3.8-17.

Fig.12 Flame-spread-behavior of different droplet array patterns at $S_{BA}/d_0 = 3.8$ in the case of three-droplet interaction. The white circles are inserted to show the droplet position.

より、3 液滴目を干渉させることにより、局所燃え広がり 限界距離が増大する条件があることがわかった.反応帯の 位置は青炎と考え、図 14 にそれぞれの青炎の最大火炎半 径を示す.燃え広がった場合と燃え広がらなかった場合の 青炎の最大火炎半径を比較すると、燃え広がった場合の青 炎の最大火炎半径は燃え広がらなかった場合の最大火炎半 径よりも大きいことがわかった.このことから燃え広がり 限界距離は青炎の最大火炎半径に影響されることがわかる.

次に,最大火炎半径が変化した理由について考察する. Mikamiら[16]によると同時燃焼する2液滴間の干渉効果は 液滴間隔が小さいほど大きいが,今回の実験結果では,パ ターン1.9-1.9-17の火炎半径が一番大きいわけではなかっ た.これは,パターン1.9-1.9-17の場合では液滴CからB



Fig.13 Flame-spread modes of fuel droplet arrays with uneven interdroplet distance in the case of three-droplet interaction ($S_{AL}/d_0 =$ 17).



Fig.14 Maximum flame radius of Droplet A.

への燃え広がりが、Umemura [9]が提案し Mikami ら[8]が実 験的に確認している燃え広がりモードにおけるモード 1, つまり拡大火炎が未燃液滴を取り囲んだ後に未燃液滴の蒸 発が活性され火炎が拡大するモードだったのに対し、パ ターン 3.8-1.9-17, 5.5-1.9-17 の場合では液滴 C から B への 燃え広がりがモード 2, つまり未燃液滴は拡大火炎に加熱 され液滴周囲に可燃性混合気を形成した後、可燃性混合気 に拡大火炎が到達し着火するモードだったために液滴 B, A の周囲に形成される火炎が拡大したと考えられる。パター ン 7.5-1.9-17 の場合では液滴 C から B への燃え広がりが モード 3, つまり未燃液滴は拡大火炎により加熱され可燃 性混合気を形成した後に自着火するモードであり、液滴 B, Cの周囲に形成される火炎が拡大したと考えられる。しか し、パターン 9.4-1.9-17 の場合も液滴 C から B までの燃 え広がりはモード3であるが液滴Cと液滴Bの間隔が大 きくなったために液滴 C と B との間の干渉が小さくなっ たために液滴 B, A 周囲に形成された火炎半径が拡大しな かったのではないかと考えられる. このように不等間隔燃

Table 1 Appearance frequency of droplet array patterns in the case of two droplet interaction ($N = 100, L = 2 \text{ mm}, d_0 = 1.0 \text{ mm}$).

| 1 | (| , | · · · | / |
|---------------|------|------|-------|------|
| Pattern | 2-16 | 4-16 | 6-16 | 8-16 |
| Proportion[%] | 11 | 6.1 | 3.3 | 1.7 |

Table 2 Appearance frequency of droplet array patterns in the case of three droplet interaction (N = 100, L = 2 mm, $d_0 = 1.0$ mm).

| Pattern | 2-2-16 | 2-4-16 | 4-2-16 | 2-6-16 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Proportion[%] | 4.8 | 2.7 | 2.7 | 1.5 |

料液滴列の燃え広がりでは液滴同士の干渉とともに燃え広 がりのモードが影響を及ぼすと考えられる.

5. 不等間隔燃料液滴列の燃え広がり限界を考慮した ランダム分散液滴列の燃え広がり確率

第4章では局所燃え広がり限界距離が液滴間干渉により 増大することが明らかになった。本章では、その結果を考 慮して、直線状にランダムに配置した燃料液滴列の燃え広 がり確率を求める。

はじめに、 ランダム分散燃料液滴列における液滴配列パ ターンの出現頻度を調べる.格子数が N = 100,格子点間 隔が L/d₀ = 2 の場合について出現する液滴配列パターンの 数を計算した.計算では異なるランダム分散燃料液滴列の 配置を 1,000,000 回行い,等間隔液滴列の燃え広がり限界 (S/d₀)_{limit} = 14 を超える最も小さい液滴間隔である S/_{d0} = 16 を含むパターンのうち、その直前の2液滴配列および3液 滴配列の出現した割合が最も多いものから4番目までのパ ターンをそれぞれ表1および2に示す。この結果を見ると、 S/d₀ = 16の前の2液滴の間隔を調べた場合では、液滴Aと Bとの間隔が小さいパターンほど多く出現しており、S/d₀= 16の前の3液滴の間隔を考慮した場合では、液滴A, B, C の間隔が小さいパターンほど多く出現していることがわか る. また, S/d₀ = 16 の前の 2 液滴の間隔を考慮した場合の パターンであるパターン 2-16 が 11 % と出現頻度が高いの に対し, S/d₀ = 16 の前の 3 液滴の間隔を考慮した場合のパ ターンの中で最も高い頻度で出現したパターン 2-2-16 の場 合では出現率は4.8%と比較的小さい値であった。よって、 3 液滴においても局所燃え広がり限界距離は増加するが燃 え広がり確率を考えた場合,その影響は小さいと考えられ る.本研究では、各液滴間隔がそれぞれの直前の2液滴間 干渉のみを受けた場合の局所燃え広がり限界以下であれば 最後の液滴まで燃え広がるとして燃え広がり確率を計算し た.

図 15 の燃え広がり確率は,格子数がN = 100,格子間隔 がL = 2 mm,初期液滴直径が $d_0 = 1$ mm で,液滴を格子上 にランダムに配置した場合である。計算回数は各占有率で 3000 回である。この計算結果から,干渉効果による燃え広 がり限界距離の増大は燃え広がり確率を増加させることが わかる。

6. 結言

本研究では、燃料液滴を直線状にランダムに配置した燃料液滴列の燃え広がりに関する研究を行った。一般的な パーコレーション理論を噴霧燃焼に適用するために局所燃 え広がり限界を考慮したモデルを提案し、燃え広がり確率 を計算した。不等間隔燃料液滴列の局所燃え広がり限界距 離は微小重力実験により求めた。以下にまとめを示す。

(1) 不等間隔燃料液滴列の局所燃え広がり限界距離は、燃



Fig.15 Dependence of flame-spread probability on occupation fraction of droplets (N = 100, L = 2 mm, $d_0 = 1.0$ mm).

料液滴の配置形状によっては等間隔燃料液滴列の燃え 広がり限界距離よりも大きくなることがわかった.

- (2) 不等間隔燃料液滴列の局所燃え広がり限界距離は,直前の液滴干渉とともに燃え広がりのモードによる火炎 半径の拡大に影響を受けることがわかった。
- (3) 不等間隔燃料液滴列の局所燃え広がり限界距離を考慮したランダム分散燃料液滴列の燃え広がり確率は、等間隔燃料液滴列の燃え広がり限界距離を用いた場合の燃え広がり確率よりも増加することがわかった。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラムが推進している宇宙環 境利用に関する地上研究公募プロジェクトの補助を受けて 行われた.また,本研究を行うにあたり当時本学学生であっ た淺野光君の多大な協力を得たことに謝意を表する.

References

- Reichenbach, R., Squires, D. and Penner, S.S., Proc. Combust Inst. 8: 1068-1073 (1962).
- Brzustowski, T.A., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., Proc. Combust Inst. 18 265-273 (1981).
- Okajima, S., Kimoto, T., Abe, K. and Yamaguchi, S., *JSME Trans. B* (in Japanese), 47: 2058-65 (2002).
- Kato, S., Mizuno, H., Kobayashi, H., and Niioka, T., *JSME Int. J., Series B*, 41: 322-330 (1998).
- Kobayashi, H., Park, J. and Niioka, T., *Proc. Combust Inst.* 29 2603-2610 (2002).
- Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M. Wakashima, Y., and Yoda, S., *Combust. Flame*, 141: 241-252 (2005).
- Oyagi, H., Moriue, O., Mikami, M., Kojima, N. and Kikuchi, M., *JSME Trans. B* (in Japanese), 71: 2769-22775 (2006).

- Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Wakashima, Y., Kikuchi, M.and Yoda, S., *Combust. Flame*, 146: 391-406 (2006).
- 9. Umemura, A., *JSME Trans. B* (in Japanese), 68: 2422-2428 (2002).
- Umemura, A., JSME Trans. B (in Japanese), 68: 2429-2436 (2002).
- Kikuchi, M., Arai, T., Yoda, S., Tsukamoto, T., Umemura, A., Uchida, M., Kakei, M and Niioka, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2611-2619 (2002).
- Kikuchi, M., Wakashima, Y., Yoda, S. and Mikami, M., Proc. Combust Inst. 30: 2001-2009 (2004).

- 13. Umemura, A. and Takamori, S, *Combust. Flame* 141: 336-349 (2005).
- 14. Stauffer, D. and Amnon, A., *Introduction to Percolation Theory*, Revised Second Edition, 1994.
- Konishi, K., Kono, M. and Iinuma, K., *JSME Trans. B* (in Japanese), 51: 2218-2224 (1985).
- Mikami, M., Kato, H., Sato, J. and Kono, M., Proc. Combust. Inst. 25: 431-438 (1994).