燃料噴霧の空間的不均一性が着火性におよぼす影響*

寺島幸士^{*1}, 野口 泰^{*2}
廣光永兆^{*3}, 徳岡直静^{*4}The Effect of Spatial Inhomogeneity of Fuel Droplet
on Spray Ignition PhenomenonKoji TERASHIMA^{*5}, Yasushi NOGUCHI
Nagayoshi HIROMITSU and Naochika TOKUOKA^{*5} Graduate School of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

In this paper, we tried to make clear the effects of spray characteristics, especially spatial inhomogeneity of fuel droplets, on ignition probability of fuel spray. A mono-dispersed methanol spray was ignited by a discharge spark ignition system, and a large number of ignition tests were carried out. As a result, ignitability of fuel spray is affected not only by the instantaneous spray concentration just before ignited, but also by other probabilistic factors based on an inhomogeneity in spray. The ignition process can be classified into two processes, i.e. flame generation and flame propagation. The flame propagation process becomes major control factor of the result, as the discharged energy is sufficiently large. Further, the propagation process is strongly affected by inhomogeneity. Therefore, inhomogeneity of spray was expressed quantitatively by the inhomogeneity index and the relation between inhomogeneity of spray and ignitability was discussed. Results suggest that there is the optimum intensity and the scale of inhomogeneity for ignition. In this research condition, the characteristic scale of inhomogeneity was around 15 mm for successful ignition and the both of the characteristic scale and its intensity of successful case were smaller (or less) than those of failed one.

Key Words: Liquid Fuel, Ignition, Atomization, Flame, Inhomogeneity, Inhomogeneity Evaluation

1. 緒言

燃料噴霧の着火現象は確率的であり、時間平均的には同一な条件の燃料噴霧においても、火炎が発生したり(着火)、しなかったり(不着火)、また火炎が発生してもすぐに消滅してしまうといった、さまざまな結果が起きる。これは、時間平均的に一定な燃料噴霧においても、点火の瞬間では、噴霧の分散状態(不均一さ)が各点火試験ごとに異なることに起因する。このため、噴霧着火現象に関する研究は、希薄着火限界や、最小点火エネルギーなどといった、燃料噴霧のもつ平均的な特性にのみ着目した研究⁽¹⁾⁽³⁾が多い。このような研究は、工学的に有用な、噴霧着火現象を表す各種特性値を求めることは可能であるが、噴霧着火現象の根本である、どのように噴霧が着火にいたるのかという点を明らかにすることはできない。また一方で、このよ

うな確率的な要因を除き、詳細な現象解明を目的として、噴霧中の個々の液滴に着目した単一液滴を用いた着火および燃焼実験⁽⁴⁾や、液滴列を用いて火炎伝ば機構を明らかにする研究⁽⁵⁾が行われている。これらの研究は噴霧の持つさまざまな不確定要素を排除することが可能なため、詳細かつ有効な研究成果が得られている。しかし、噴霧中の粒子は互いに影響しあい、群として蒸発、燃焼し、周囲へ火炎が伝ばする特性をもつため、このような研究から得られた知識を直接、噴霧の着火現象に応用することは難しい。また今日では、噴霧着火現象の数値計算も行われるようになっているが、燃料噴霧の空間的な分散性を計算空間に再現し、解析するためには、膨大な計算資源が必要なため、液滴が相互に干渉しないなどの仮定を用いる⁽⁶⁾か、噴霧のもつ不均一さを無視し規則的に配置して⁽⁶⁾液滴の取扱いを簡素化したものや、液滴の数を極端に減らし、数滴程度で計算を行っているもの⁽⁷⁾がほとんどである。

そこで本研究では、噴霧着火現象に関する研究において問題となる、燃料噴霧の空間的な不均一性に着目し、不均一性が、燃料噴霧の着火性にどのような影響をおよぼし、結果的に、噴霧粒子が均一に存在した場合と比較してどのように異なるのか明らかにすることを

* 原稿受付 2001年11月29日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} トヨタ自動車(株)(〒410-1193 裾野市御宿1200)。^{*3} 正員、石川島播磨重工業(株)(〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229)。^{*4} 正員、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: koji_terashima@1996.jukuin.keio.ac.jp

Fig.1 Experimental apparatus

目的とした。噴霧粒子の不均一性が着火性に与える影響を明らかにすることは、噴霧着火の過程で個々の噴霧粒子に起きるさまざまな現象について、液滴の着火に関する多くの知見を応用するために必要である。点火のたびに变化する噴霧粒子群の空間的な配置と、その際の着火性の関係を得るために、多数回の点火試験を行い、各点火試験の着火の可否とともに、点火の瞬間の噴霧構造を瞬間撮影により測定した。燃料にはメタノールを用い、空間的な不均一性以外の要因を除くために、噴霧粒子径が均一な単分散噴霧を用いて着火実験を行った。これらの結果より、着火性に強く影響する燃料噴霧の領域を求め、その上で、不均一性と着火性の関係を求めた。

2. 実験および解析方法

2.1 実験装置および方法 本研究は、火花放電による強制着火を対象とした。また燃料噴霧粒子群の空間的な不均一性による現象のみを研究の対象とし、噴霧粒子径の不均一さの影響を除くため、単分散噴霧⁽⁸⁾を用いた。実験装置の概略を図1に、実験条件を表1に示す。混合管は下端を開放とし、レーザー測定用に全長を可変とした。下部には測定装置の設置場所をかねた観測窓を四面に設置した。また点火電極は混合管下端より挿入した。単分散噴霧および均一燃料蒸気の混合気は、装置内を落下していくに従い拡散しつつ放電電極周囲へと導かれる。混合気速度および燃料蒸気濃度を一定にするため、燃料蒸気混合気の一部を管内に直接導入した。位相ドップラ式粒子解析器(PDPA AEROMETRICS)を用い、混合管全長を50mm短くして、放電電極先端の水平断面における燃料噴霧の粒度分布および半径方向濃度分布を測定した。また混合管内に吸引プローブを設置し、気液同時吸引法⁽⁹⁾により噴霧混合気中の時間平均的な燃料蒸気濃度を測定した。火花放電の開始直前(約1μs)に、放電と同期してシ

ート状のパルスレーザー光を照射し、撮影した燃料噴霧画像より、瞬間燃料噴霧濃度を求めた。このようにして得た燃料噴霧濃度を点火の瞬間の燃料噴霧濃度と呼ぶ。本研究では、放電電極の先端の水平断面において放電電極を中心に、直径約30mmの範囲内の各点における燃料噴霧の時間平均的な燃料濃度の変動を±10%以内に調整した。燃料噴霧混合気の時間平均的な特性を一定に保ち、点火試験を繰り返し行った。

2.2 発生した火炎の分類 本研究では、下記のように判定基準を設け、火炎を分類した。判定は目視により行ったが、同時にCCDと反対側の観測窓に設置した16チャンネルのイオンプローブによる火炎検出を行うことで、目視判定の不確かさをおぎなった。

- (1)火炎が発生し、伝ばし火炎直径が50mmを越えた場合。
- (2)火炎が発生し、伝ばし火炎直径が30mmを越えた場合。
- (3)火炎が発生し、伝ばしたが、直径が30mmまで達しなかった場合。
- (4)火炎が発生したが伝ばせず、放電終了と共に消炎する場合。
- (5)火炎の発生が認められない場合。

本研究では、火花放電によって火炎を形成する行為

Table.1 Experimental conditions

ITEM	VALUE
Fuel	Methanol
Droplet Diameter	100 μm
Diameter Distribution	80wt% within ±10% of D_{mode}
Spray Velocity	0.38 m/s
Gaseous Velocity	0.16 m/s
Time-averaged Fuel Spray Concentration	0.0067 kg/m ³
Mean Vaporized Fuel Concentration	0.024 kg/m ³
Igniter	High-Frequency Discharged Spark System (25KHz 50ms 0.8J)
Ignition Point	Center of Fuel Spray
Ignition Trial	1000 times
Laser Sheet	Vertical plane, Thickness: 3.5mm
Image Area	63mm×55mm

Fig.2 Evaluation of correlation between ignition probability and fuel spray characteristics

を点火と、またその結果、火炎が発生しあらかじめ設定した着火判定基準を満たした場合を着火と定義した。

2.3. 燃料噴霧特性と着火性の関係 燃料噴霧の不均一性の影響を明らかにするために、不均一性を評価する適切な解析領域を定める必要がある。燃料噴霧中のある領域が着火性に影響をおよぼす場合、その領域の燃料噴霧濃度により着火性は変化し領域内の噴霧による影響が強いほど、着火率は点火の瞬間の燃料噴霧濃度変化に対して急激となる。そこで、燃料噴霧濃度を求める領域の大きさを変化させて、その領域内の、瞬間燃料噴霧濃度と着火性の関係を求めた。図2に示すように着火率と、瞬間燃料噴霧濃度の関係を累積正規分布曲線で近似し、その標準偏差を用いて影響の強さを表した。標準偏差が大きいく程、点火の瞬間の燃料噴霧濃度に対して着火率は緩やかに変化するため、その領域が着火性におよぼす影響は小さいといえる。

2.4 不均一性の評価 本研究では Czajski⁽¹⁰⁾らが定義した不均一指数を用い、燃料噴霧の空間的不均一性を定量的に評価した。不均一指数 H は、分散相の空間的な分散の度合いを示し、解析の対象となる領域を等しく分割した場合の、各分割領域(セル)内の粒子数より、以下のように求められる。

$$H = \frac{h-1}{\sigma_h} \quad (1)$$

$$h = \mu / \mu_{\text{random}} \quad (2)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^{\kappa} \left(n_i - \frac{N}{\kappa} \right)^2 \quad (3)$$

$$\mu_{\text{random}} = N(\kappa - 1) / \kappa \quad (4)$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{2(N-1)}{N(\kappa-1)}} \quad (5)$$

- H : Inhomogeneity index
 h : Degree of inhomogeneity
 σ_h : Standard deviation of h
 μ : Variance of droplets number in each cell
 μ_{random} : μ of when droplets distribute at random
 N : Number of total droplets
 n_i : Number of droplets within i_{th} cell
 κ : Number of cells

Fig.3 Expression of inhomogeneity

不均一指数は、分散相がランダムに存在する場合を基準とするため、粒子が解析領域内に、確率的に一樣(ランダム)に分布している場合は、不均一指数は0となり、また粒子が不均一に存在する場合は0より大きく、反対に比較的均一に存在する場合は小さくなる(図3参照)。また、セルの大きさを変えることで評価するむらのスケールが変化する。評価スケールが噴霧粒子群のスケールと一致すると、不均一指数は最大値をとる。本研究では評価スケールをスケールファクタ k で表した。また本研究では撮影領域を最大 128×128 のセルに分割したためスケールファクタは、

$$k = 128 / \sqrt{\kappa} \quad (6)$$

となる。スケールファクタはセルの一边の長さに比例した値で、本実験では $k=1$ の場合、セルの大きさは一辺約 0.46mm であった。

3. 実験結果および考察

3.1 瞬間の燃料噴霧濃度による着火性の変化

点火の瞬間における撮影領域内の燃料噴霧濃度の発生頻度と、各濃度での着火率を図4に示す。図中の各記号は、それぞれ前述の判定基準1, 2および3を用いて求めた着火率である。本研究のように、時間平均

Fig.4 Frequency of instantaneous concentration and ignition probability at each concentration

的には燃料噴霧濃度が希薄な条件においても、瞬間的には噴霧濃度が高い場合もあり、そのような場合は、燃料噴霧は着火にいたりやすい。また瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合でも、着火性は確率的である。着火判定基準を変えて着火率を求めると、着火の判定基準とする、火炎の到達範囲が広いほど、同一の瞬間燃料噴霧濃度における着火率は低くなる。これは、燃料噴霧の不均一性によって火炎の伝ば経路が確率的に形成されることから、着火判定基準の拡大により、着火にいたるまでに必要な火炎の伝ば距離が増加するため、結果的に着火判定基準にいたらず消炎する確率が増加するためと考えられる。つまり燃料噴霧の着火性は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度だけで決まるものではなく、点火の瞬間における噴霧粒子の幾何的配置など、他の確率的な要因に影響を受けるといえる。

3・2 燃料噴霧特性と着火性の相関 解析領域の大きさを一定($4.5^2 \times 10^{-6} \text{m}^2$)とし、その位置を図5のように上下および左右方向に配置し、燃料噴霧濃度と着火性の関係を求めた。図7にその結果を示す。横軸は解析領域の放電電極からの距離を表し、縦軸は点火の瞬間の燃料噴霧濃度変化による着火率の変化を累積正規分布で近似した際の標準偏差を表す。解析領域が放電電極より遠くなると、標準偏差は連続的に増加する。

Fig.5 Location of analyzed area
(Effect of analyzed area position)

Analysis Area	W[m]	H[m]	Area [m ²]
A	0.0046	0.014	64.4×10^{-6}
B	0.019	0.024	456×10^{-6}
C	0.034	0.034	1156×10^{-6}
D	0.049	0.045	2205×10^{-6}
E	0.063	0.055	3465×10^{-6}

Fig.6 Location of analyzed area
(Appropriate size for analyzed area)

すなわち、解析領域中の燃料噴霧特性との相関が低下する。これは解析領域が放電電極から離れるほど火炎が解析領域に達するまでの伝ば過程の影響が強くなるため、燃料噴霧の不均一性によって不確定に形成される火炎伝ば経路における噴霧特性が重要であることを示す。上下方向では、水平方向に比べ着火性との相関はあまり低下しない。標準偏差の変化は、解析領域が燃料噴霧に与える影響と共に、解析領域の位置による燃料噴霧濃度の相関性によっても影響を受け、相関性が高い場合は火炎の伝ば経路が形成されやすい。本実験条件においては、水平方向に比べ上下方向の燃料噴霧濃度の相関性が高くなる傾向にあるが、この差は図7に示されたほど顕著ではなく、発生した熱が浮力により上方に広がり、火炎の伝ば経路が比較的容易に形成される事が影響していると考えられる。

次に、図6のように、放電によって直接エネルギーを供給されると考えられる放電体積を中心に、放電体積と撮影領域を基準に解析領域を設定し、解析領域の広さによる燃料噴霧特性と着火性の関係を求めた。図中のAの領域は放電体積を示し、領域Eは撮影領域を示す。また図8にその結果を示す。図中の各記号は、着火判定基準を変えた場合である。解析領域が広いほど標準偏差が低下し、解析領域がある面積を超えると

Fig.7 Transition of standard deviation of ignition probability curves by position of analyzed area

Fig.8 Transition of standard deviation of ignition probability curves by analyzed area

標準偏差はほぼ一定となる。これは初期の火炎発生よりも、その後の火炎伝ばの過程が強く影響するためと考えられる。本研究では放電火花により燃料噴霧を点火しており、放電体積内は、放電エネルギーが十分に供給されるため、放電体積近傍の燃料噴霧特性の影響が低くなると考えられる。標準偏差が一定値となる解析領域の大きさは、本実験においては放電電極周囲の $0.6 \times 10^{-3} \text{m}^2$ から $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 程度(25mm-30mm 四方)であったことより、燃料噴霧特性と着火性の関係を得る場合は少なくともこれ以上の解析領域をとる必要があるといえる。また着火判定基準を変えた場合も標準偏差が多少増加するが傾向は同じであったため、本研究では判定基準 3 を超えた場合、すなわち、火炎直径が 30mm 程度以上になった場合を着火成功とした。

3.3 燃料噴霧濃度の不均一性の影響 スケールファクタによる不均一指数の変化を図 9 に、また不均一指数を点火の瞬間の燃料噴霧濃度により分類したものを図 10 に示す。着火判定は前述のように判定基準 3 を用いたが、判定基準を 1(火炎直径が 50mm を超えた)としても、傾向に変化が無いことを確認した。不均一指数は最大で解析領域の半分のスケールについてまで評価可能なため、解析領域を十分広く取る必要があることから、前述の領域 E(撮影領域全体)を解析の対象とした。横軸はスケールファクタで、縦軸は不均一指数である。スケールファクタが大きくなるほど、大きなスケールのむらの強度を示す。また、最も特徴的なむらのスケールにスケールファクタが一致した場合、不均一指数が最大値を示すと考えられることから、着火および不着火の場合に、不均一指数が最大値を示すスケールの確率分布を図 11 に示す。着火した場合は、スケールファクタ 32 程度(15mm 程度)で不均一指数が最大値を示す確率が最大となる。一方、不着火の場合はスケールファクタ 64 前後で最大値をとると予想されるが、本実験の撮影領域が十分でないこともあり、最大値の測定にはいたっていない。この傾向は、図 10 にも示されるとおり、瞬間燃料噴霧濃度によらず観察されたことより、本実験では着火した場合の特徴スケールは、不着火の場合に比べ小さいといえる。しかし、特徴スケールが非常に小さくなるような配置を考えた場合、噴霧粒子は多数の小さなクラスターや単滴で孤立した粒子として存在するため、局所的な過濃領域と共に希薄な領域が広く形成される。燃料噴霧は平均燃料噴霧濃度よりも濃い領域が存在し、そのような部分を選択的に火炎が伝ばする⁽¹¹⁾とすれば、広い希薄領域の形成は、本研究のような希薄な燃料噴霧においては、火炎の伝ば性を低下させ、瞬間燃料噴霧濃度

Fig.9 Difference of inhomogeneity by result of ignition

Fig.10 Variation of inhomogeneity by instantaneous liquid fuel concentration

Fig.11 Difference of characteristics scale of spray by result of ignition

Fig.12 Transition of inhomogeneity by instantaneous liquid fuel concentration

が等しい場合は、着火性は低下すると考えられる。この点を考慮すると、本実験の結果は着火に最適なむらのスケールが存在することを示唆している。本実験においては、着火に成功した点火試験における燃料噴霧の平均的なむらのスケールはおよそ 15mm 程度で一定となったが、その値を定量的に示すにはさらに実験を繰り返す必要がある。

不均一指数の燃料噴霧濃度による変化を図 12 に示す。不着火の場合の最大値は測定範囲を超えていると予想されるため、スケールファクタが 32 の場合の不均一指数について比較した。燃料噴霧濃度の高い領域でグラフにばらつきがあるのは、瞬間の燃料噴霧濃度が高くなる確率が低いためである。着火／不着火にかかわらず、不均一指数は燃料噴霧濃度の増加とともに増加し、瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合を比較すると、不着火の場合のほうが着火の場合に比べて不均一指数が大きい傾向にある。点火試験の全平均を示した図 9 においては、不均一指数は、着火した場合のほうが不着火の場合より大きい、これは燃料噴霧の濃度が高いほど着火する確率は高く、また前述のとおり本実験で用いた燃料噴霧の特性として不均一性も強くなる傾向があるためである。本研究のような希薄な燃料噴霧においては、不均一性が強いと、局所的な濃領域と共に希薄な領域が広く形成されるため火炎の伝ば性が低下し、瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合は不着火の場合の不均一指数が大きくなると考えられる。また反対に不均一指数が小さくなるような、むらの弱い粒子配置をしていた場合は、近接粒子間距離の増大による着火性の低下が起きると考えられることより、噴霧のむらの強さにも最適値が存在すると考えられる。

4. 結 言

希薄着火限界付近の燃料噴霧の火花点火による着火現象について、燃料噴霧の着火性におよぼす不均一性の影響に着目し、着火試験を行った。燃料噴霧の着火性は、点火の瞬間の燃料噴霧濃度だけで決まるものではなく、燃料噴霧の不均一性などに起因した、他の確率的な要因によって影響を受ける。また放電による初期の火炎発生よりも、その後の火炎伝ばの過程が着火の可否に強く影響することが明らかになった。また点火の瞬間の燃料噴霧粒子の空間分布を瞬間撮影により測定し、不均一指数を用いて表現した結果、着火に最適なむらのスケールおよび強度の存在が示唆された。本実験においては、着火に成功した点火試験における

燃料噴霧の平均的なむらのスケールはおよそ 15mm 程度で一定となった。また瞬間燃料噴霧濃度が等しい場合を比較すると、不着火の場合のほうが着火の場合に比べて不均一指数が大きい傾向にあった。

文 献

- (1) RAO, K.V.L. and LEFEBVRE, A.H., Minimum Ignition Energies in Flowing Kerosene-Air Mixtures, *COMBUSTION and FLAME*, 27(1976), 1-20
- (2) BALLAL, D.R. and LEFEBVRE, A.H., Ignition and Flame Quenching of Flowing Heterogeneous Fuel-Air Mixtures, *COMBUSTION and FLAME*, 35(1979), 155-168
- (3) DANIS, A.M., NAMER, I. and CERNANSKY, N.P., Droplet Size and Equivalence Ratio Effects on Spark Ignition of Monodisperse N-Heptane and Methanol Sprays, *COMBUSTION and FLAME*, 74(1988), 285-294
- (4) 小林 清, 液滴の蒸発および燃焼に関する研究(第 3 報 燃焼), 本機械学会論文集(第 2 部), 20-100(1954), 837-843
- (5) ROTH, N., KARL, A., ANDERS, K. and FROHN, A., Flame Propagation in Planar Droplet Arrays and Interaction Phenomena Between Neighboring Droplet Streams, *26th symposium (International) on combustion*, 1996, 1697-1703
- (6) AGGARWAL, S.K. and SIRIGNANO, W.A., Ignition of Fuel Sprays: Deterministic Calculations for Idealized Droplet Arrays. *20th Symposium (International) on combustion*, 1984, 1773-1780
- (7) DWYER, H.A., STAPP, P. and MALY, R., Unsteady Vaporization and Ignition of A Three-Dimensional Droplet Array, *COMBUSTION and FLAME*, 121(2000), 181-194
- (8) BERGLUND, R.N. and LIU, B.Y., Generation on Monodisperse Aerosol Standards, *Environmental Science and Technology*, 7-2(1973), 147-153
- (9) Hiromitsu, N., Evaporation of spray, *The First Symposium on Atomization(JAPANESE)*, 1992, 213-216
- (10) Czainski, A., Quantitative Characterization of Inhomogeneity in Thin Metallic Films Using Grancarek's Method, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27(1994), 616-622
- (11) 赤松 史光, 中部 主敬, 水谷 幸夫, 香月 正司, 田端 敏克, 油滴群中を伝ばする火花点火球形火炎の構造観察(第 2 報), 日本機械学会論文集(B 編), 61-582 (1995), 394-400