

液体燃料粒子群の自発着火に及ぼす粒子間隔の影響

— 2001.3.26 受理 —

金沢大学*¹ 榎本 啓士
 大阪府立大学大学院*² 長田 仁, 紺屋 智之, 瀬川 大資
 大阪府立大学工学部*³ 角田 敏一

1. 緒言

噴霧燃焼現象の解明は、実用的および学問的な観点から非常に有意義である。噴霧燃焼機構は、その最小構成要素である単一液滴の燃焼現象が基本現象であり、その実験的¹⁾、解析的研究が行われ多くの知見が得られてきた。しかしながら、実際の噴霧燃焼においては、燃料液滴は個々に独立して燃焼するのではなく、相互に干渉しながら燃焼している^{2) 3)}。従って、この相互干渉について調べることは、噴霧燃焼現象の解明の一助になると考えられる。

燃料液滴燃焼に及ぼす相互干渉の影響は、燃料液滴の粒径分布、液滴の幾何的配置や燃料性状等様々な要因によっておこる。また、相互干渉によって引き起こされる効果についても、様々なものが存在する。これらのことをふまえると、相互干渉効果について調べるためには、何らかの極限モデルを用い、その条件が限定された現象について、詳細に検討していく必要があると考えられる。そこで、次のような条件を満たす、極限モデルを対象とした燃焼実験を実施した。

- ・同一液滴群内では全液滴の液滴直径が等しい。
- ・液滴相互の位置関係が固定されている。

この極限モデルを実現するため、極細線懸垂法を開発した。これは、従来の実験方法では困難であった、3次元的に配置された大規模な燃料液滴群を模擬した燃焼実験を可能とする実験方法である。燃焼現象に伴

って発生する高温雰囲気と、加工時に生じる機械的応力に耐えうる、SiC 繊維を素材として利用する^{4) 5)}。この繊維からなる保持線を2本用意し、その交点に燃料液滴を保持する。この方法によって、噴霧燃焼における燃料液滴間の相互干渉に及ぼす多数の要因の中で、特に燃料液滴の幾何的配置、液滴直径、液滴間隔および液滴群全体の液滴数といった条件が、燃焼形態および着火遅れに及ぼす影響について調査することが可能となる。

本報では、まず、この極細線懸垂法を利用して模擬された単一燃料液滴の燃焼現象を計測し、極細線懸垂法の有効性を検証する。次に、大規模燃料液滴群を模擬した燃焼実験を実施するための準備段階として、この実験手法を用いた、小規模な燃料液滴群の着火および燃焼形態について考察を行った。液滴間隔を実験変数とした。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は主として次の4つの部分からなる。

- ・高温雰囲気を実現する燃焼試験部
- ・液滴群の保持と試験部への供給とを行う燃料供給部
- ・観察用光学系
- ・制御記録部

燃焼部は、内径127mm、高さ210mmの電気炉、シャッターおよび2本のK型熱電対(シース径2.3mm)からなる。熱電対による温度測定の分解能は1Kである。

燃料供給部は、外径120mm、内径114mm、高さ1

* 1 工学部機能機械工学科
 石川県金沢市小立野2-40-20
 * 2 工学研究科
 大阪府堺市学園町1-1
 * 3 エネルギー機械工学科
 大阪府堺市学園町1-1

から 5 mm のアルミニウム製の燃料保持輪とその上面に格子状に張った細線、その燃料保持輪および鏡を保持する台からなる。燃料を保持する細線は耐熱性の繊維である SiC 繊維を 2 本束ねたものを利用した。SiC 繊維の直径は 14 μm である。この保持線は液滴に供給される熱量に影響を及ぼすと考えることができる。そこで、この影響を考察するために、液滴直径を一定とし、保持線を構成する SiC 繊維の本数を変化させて、保持線の太さが着火遅れに及ぼす影響を計測した。用いた SiC 繊維の本数は 1 本、2 本、3 本および 4 本であった。その結果、いずれの場合もほぼ同じ着火遅れを示したので、本研究で用いられた範囲では、着火遅れに及ぼす保持線の影響は無視しうるとした。

燃料は常温では固体である n エイコサンを利用した⁶⁾。実験時、燃料保持輪は高速で試験部に移動、停止する。常温で液体である燃料を使用すると、試験部で停止する際の衝撃で、保持輪上の細線の交点から燃料液滴が落下してしまう。この落下を防止するため、燃料として n エイコサンを利用した。このとき、常温で固体であるため、溶融して液体となるまでの時間が重要である。そこで、CCD カメラを利用して試験位置に到達したときの液滴表面を拡大撮影して、その状態を確認した。その結果、光の反射の様子から、明らかに到達時には表面は液体になっていることがわかった。よって、本研究における時刻 0 では、液滴群はほぼ液体状態となっているとした。

Fig. 2 に燃焼試験部の詳細を示す。ただし、z 方向は電気炉下端を 0、また、x, y, r 方向は電気炉中心を 0 とする。2 本の熱電対は $z=80\text{mm}$, $r=63.5\text{mm}$ の位置に z 軸に対して対称に配置されている。計測点は電気炉内壁面である。実験準備段階において燃料保持輪は、燃料液滴を、細線の交点で保持した状態で $z=-50\text{mm}$ の位置で保持される。そして、実験開始の信号が入力されると、約 0.25 秒で $z=100\text{mm}$ の試験部に挿入される。

Fig. 3 に電気炉内の温度分布を示す。縦軸は温度、横軸は Fig. 2 において示した z 軸方向距離である。この温度はシース径 2.3mm の K 型熱電対を利用して計測されている。よって、この熱電対の出力をコンピュータによって処理し、放射の影響を考慮した。このとき、対流の影響は無視してヌッセルト数を 2 とし、物性値は 1,000K における空気のそれを利用した。Fig. 3 から実験に使用した部分において雰囲気温度はほぼ一様であり、1,000K であるとした。

観察用光学系は、鏡、高速度ビデオカメラからなり、電気炉下方もしくは斜め下方からの映像を、鏡を介して高速度ビデオカメラを用いて 500fps で撮影した。

制御記録部は、熱電対出力および位置検出用フォトインタラプタ出力を記録する。また、熱電対の出力を参照し電気炉の加熱の制御を行い、試験部内の雰囲気温度を一定に保った。各実験間の雰囲気温度の差は 5K 程度であった。

2.2 実験方法

2.2.1 2次元液滴群の配置

Fig. 4 に 2 次元の燃料液滴群における燃料液滴の配置を示す。(a) は燃料液滴の配置の概念図、(b) は高速度ビデオカメラにより撮影された液滴群の火炎像である。燃料液滴群の中心に位置する液滴を中心液滴とし、隣接する液滴の中心間距離を液滴間隔 l とする。2 次元液滴群を用いた実験では、液滴数 4、液滴間隔 $l=2$ から 9 mm、液滴直径 0.90mm の条件で実験を実施した。ただし、直径が 0.85mm から 0.95mm の範囲にある液滴の液滴直径を 0.90mm であるとした。また、燃焼形態を観察するため、液滴直径 0.50mm および 0.70mm の火炎像の撮影を行った。しかしながら、着火遅れを考察するのに十分な実験回数を重ねることができなかったため、燃焼形態の観察のみを行った。

2.2.2 3次元液滴群の配置

Fig. 5 に 3 次元燃料液滴群における燃料液滴の配置を示す。(a) は燃料保持輪の上面図、(b) は燃料保持輪の側面図、(c) は燃料液滴の配置の概念図、(d) は高速度ビデオカメラにより撮影された液滴群の火炎像である。Fig. 5 (a) および (b) からわかるように、燃料保持輪を 3 個重ね合わせることでより 3 次元液滴群の模擬を行った。燃料保持輪上の細線間隔および燃料保持輪の z 方向長さを変更することにより 3 次元液滴群における各液滴の相対位置を任意に制御することが可能となる。燃料液滴は体心立方格子の形状に配置され、燃料液滴群の中心に位置する液滴を中心液滴とした。体心立方格子の 1 辺の長さを液滴間隔 l とした。よって保持輪の間隔は液滴間隔の半分になる。液滴数 9、液滴間隔 $l=2$ から 20mm、液滴直径 0.90mm の条件で実験を実施した。Fig. 5 (c) から分かるように、実験時に観測する際には x 軸に対して 4deg、z 軸に対して 12deg 傾けて撮影している。このことにより、Fig. 5 (d) のような火炎像を得ることができ、9 個の液滴全てについて、その着火遅れの計測が可能とな

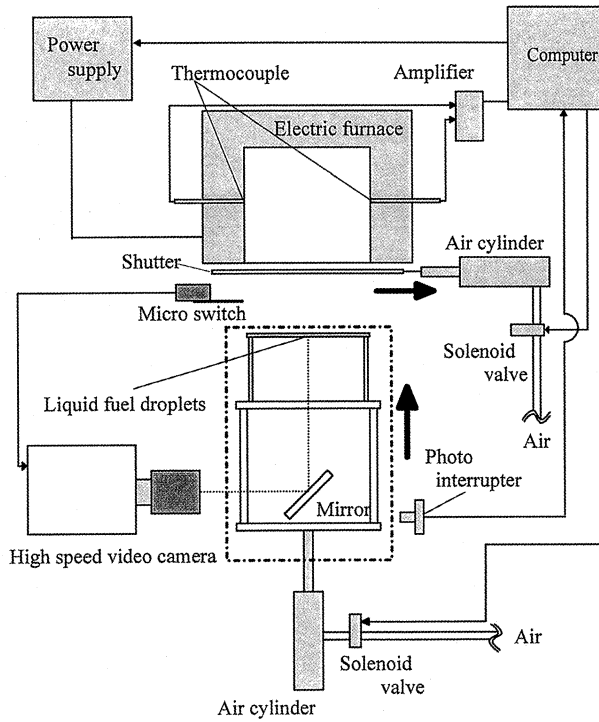


Fig.1 Experimental apparatus

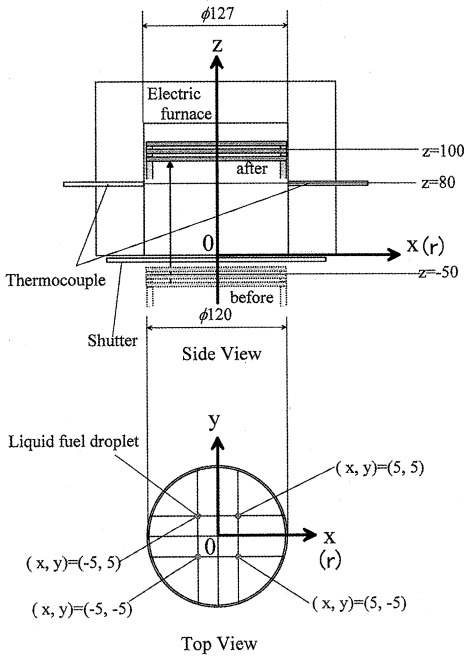


Fig. 2 Details of test section

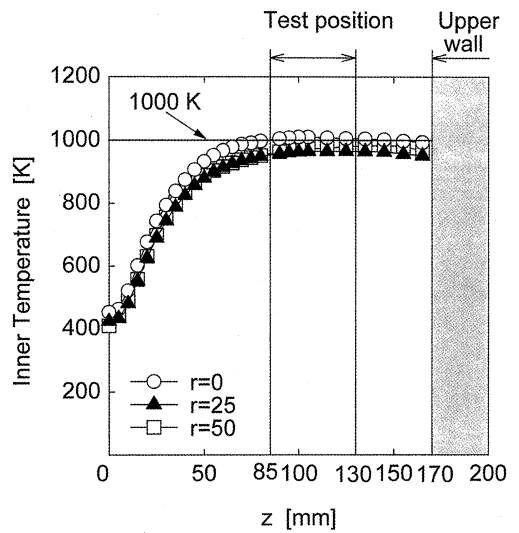


Fig. 3 Distributions of temperature in the electric furnace

る。

2.2.3 実験手順

実験は以下の手順で行った。燃料保持輪に細線を張り、その交点に n エイコサンの液滴を保持させる。燃料液滴が所定の大きさの範囲内であることを確認する。 $z = -50\text{mm}$ の位置に燃料保持輪を設置する。試験部内温度が $1,000\text{K}$ であることを熱電対の出力により確認し、実験開始信号を入力する。信号が入力されるとシャッターが開放され、その 0.5 秒後に燃料供給部が上昇を開始し、模擬燃料液滴群が試験部に到達する。上昇開始から試験部到達までに要する時間は 0.25 秒であった。試験部への到達はマイクロスイッチにより確認する。到達時を時刻 0 秒として、高速度ビデオカメラによる撮影を開始する。時刻 0 秒から着目する液滴からの発光が観察されるまでの時間を着火遅れと定義した。撮影用レンズに Nikkor 28mm, 50mm, 105mm を使用し、 $f/5.6$ の条件で撮影を行った。また、異なったレンズを使用した場合においても、その他の条件が同じ場合には着火遅れは同じになることを確認した。

3. 結果と考察

3.1 実験方法の検証

本研究で用いた、新たな実験方法である極細線懸垂法の検証を行う。検証方法として、単一燃料液滴の着火遅れを簡単な数値シミュレーションの結果と比較し、液滴直径と着火遅れの定性的傾向の相異を指標とした。

数値シミュレーションに用いられた計算条件を以下

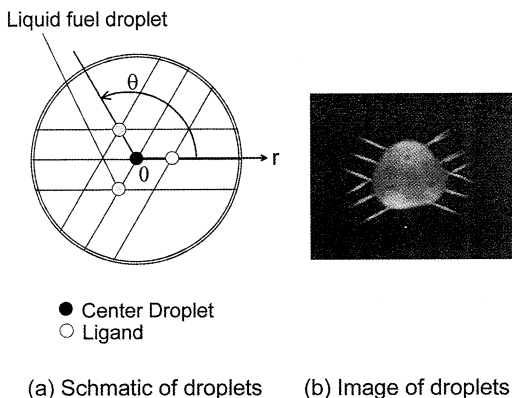


Fig. 4 Geometric configuration of liquid fuel droplets arrayed in two dimension

に示す。

- 雰囲気温度は $1,000\text{K}$ の空気である。
- 燃料液滴は時刻 0 で液体である。
- 圧力一定 (0.1MPa) とする。
- 各化学種の熱物性値は理論的に求めた^{8)~10)}。
- エネルギー輸送におけるふく射の効果は無視する。
- 着火までの蒸発量が小さいので、液滴直径は一定とする。
- 自然対流の影響を無視し、半径方向一次元の球対象座標を用いる。
- 燃料液滴表面での燃料蒸気圧は Antoine の式から求めた¹¹⁾。

化学反応項に関して、エイコサンのような高級炭化水素燃料に関する詳細な反応モデルは十分なものがないので、以下のように簡略化した。

- 単段反応とする (活性化エネルギーは 380kJ/mol)。

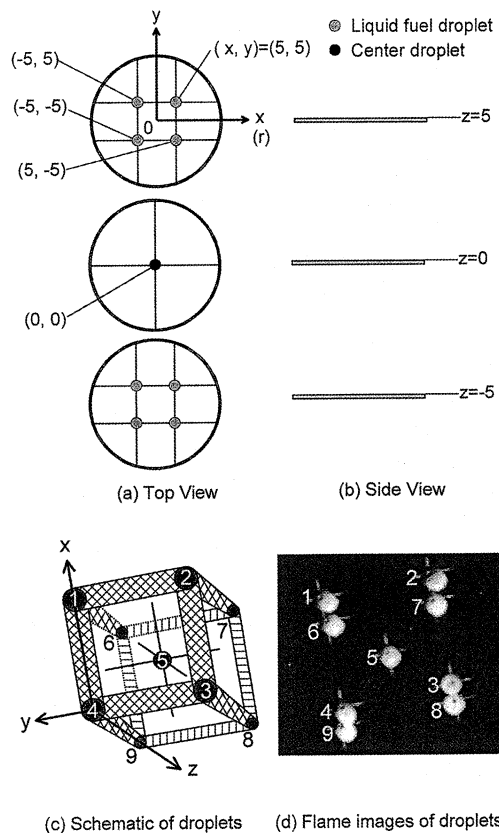


Fig. 5 Geometric configuration of liquid fuel droplets arrayed in three dimension

- 考慮する化学種は燃料(エイコサン), 酸素, 窒素, 水, 二酸化炭素とする。
- 化学反応項における前指数定数は三次元空間における二体衝突の理論から算出する。

これらの条件から, 支配方程式は以下になる。これらの支配方程式を陽的に解いた。なお, 液相でのエネルギー保存を考察する際, 熱伝達によって気相から流入する熱流束は, 蒸発潜熱および液滴の温度上昇によって平衡になっているとした。

(1) 質量保存

$$\text{気相} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = 0$$

(2) 化学種保存

$$\text{気相} \quad \frac{\partial (\rho X)_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 (\rho X)_i (v + V_i)] = \nu_i r_c$$

(3) エネルギー保存

$$\text{気相} \quad \rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \nu_f Q r_c$$

$$\text{液相} \quad \rho \frac{\partial h_l}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h_l}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_l \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

ρ は密度[mol/m³], r は半径[m], v は速度[m/s], X は化学種のモル分率[-], V は化学種の拡散速度[m/s], ν は量論係数[-], r_c は反応速度[mol/m³/s], h はエンタルピー-[J/mol], T は温度[K], λ は熱伝導率[W/m/K], Q は単位発熱量[J/mol]である。

境界条件は以下の通りである。

$$\text{液相中心} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \text{表面} \quad T_l^e = T_w^e$$

$$\text{気相表面} \quad T_g^e = T_w^e, \quad X_i^e = f(T_w^e), \quad v_g^e = f(T_w^e)$$

$$\text{無限遠} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial X_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial r} = 0$$

T_l^e は液相の境界面近傍のセル温度[K], T_w^e は液相と気相の境界面温度[K], T_g^e は気相の境界面近傍のセル温度[K], v_g^e は気相の境界面近傍セル内の対流速度[m/s], X_i^e は気相の境界面近傍セル内の化学種 i のモル分率[-]である。また関数 $f(\cdot)$ は, Antoine の式から導かれており, カッコ内の変数 (この場合は境界での温度) のみで記述されることを表す。

点火した時刻は, 時間に対して, 反応速度の極大値が現れた瞬間と定義した。

Fig. 6 に, 初期液滴直径と着火遅れの関係を示す。

実線は計算結果である。この図から, 実験結果, 計算結果いずれの場合でも, 液滴直径が大きくなると着火遅れが大きくなる傾向がわかる。これらは過去の研究で得られている結果と同様である。以上のことから, この実験方法によって燃料液滴の燃焼に関する定性的な評価を行うことが可能であると考えられる。しかしながら, 計算条件にも示されているように, この数値シミュレーションには多くの仮定が含まれており, 定量的評価は困難である。特に, 化学反応項の記述はさらに発展させ, 多段反応モデルを用いる必要がある。また自然対流の影響も無視し得ないので, 自然対流の影響がない実験条件の実現が望まれる。

3.2 燃焼形態

この実験方法を用いて得られた燃焼形態および着火遅れに及ぼす液滴間隔の影響について論じる。

Fig. 7, 8 および Fig. 9 に, 本研究で得られた典型的な火炎像を示す。

Fig. 7 は, 単一液滴の, 着火後 12msec における火炎像である。液滴直径が大きいほど, 火炎直径も大きい。

Fig. 8 は, 2次元の燃料液滴群の, 着火後 12msec における火炎像である。横軸は液滴間隔, 縦軸は液滴直径である。単一液滴の場合と同様に, 液滴直径の増加とともに火炎直径が増大していることがわかる。液滴間隔が狭い場合には, 個々の液滴の火炎が周辺の液滴の火炎と一体となって燃焼している。すなわち, 各

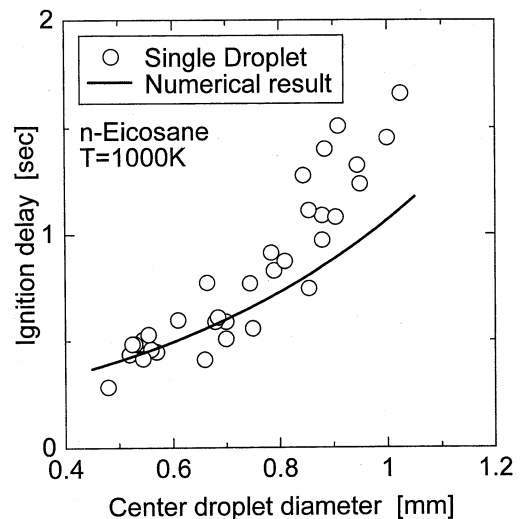


Fig 6 Ignition delay versus initial droplets diameter. Single droplet case

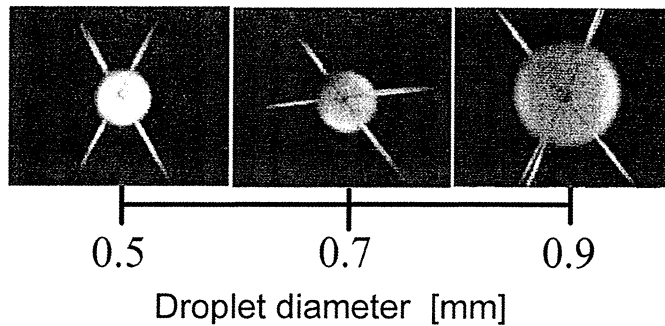


Fig. 7 Typical results of flame shape of single droplet at 12msec. after ignition

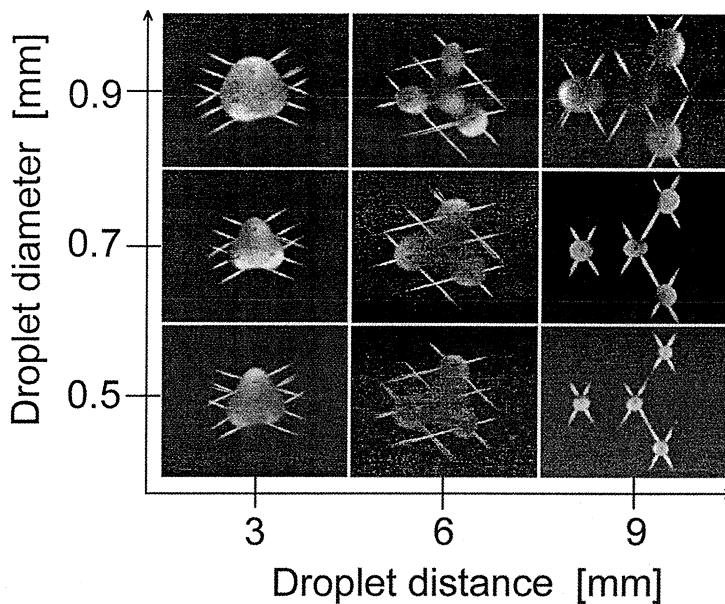


Fig. 8 Typical results of flame shape of liquid fuel droplets arrayed in two dimension at 12msec. after ignition

液滴は互いに干渉しながら燃焼していることがわかる。また、液滴間隔が広い場合には燃料液滴は個々に独立して燃焼していることがわかる。このことより、液滴間隔が広くなれば、燃料液滴間の干渉の影響は小さくなっていることがわかる。

Fig. 9 に、3次元の燃料液滴群の、着火後 12msec. における火炎像を示す。3次元の液滴群の燃焼について、Chiu らの群燃焼理論⁷⁾の適用を試みる。群燃焼理論においては群燃焼数 G の値により燃焼形態が次の 4 つの形態に分類される。

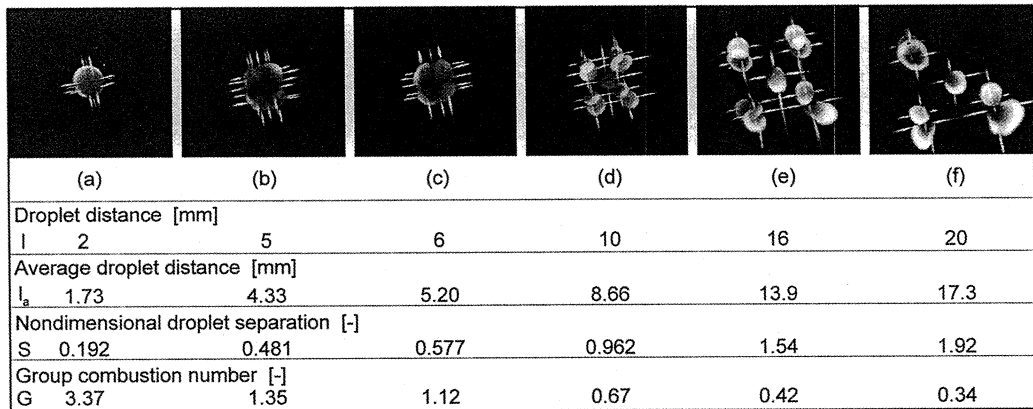
- ・ 外殻燃焼
- ・ 外部群燃焼
- ・ 内部群燃焼

・ 単滴燃焼

外殻燃焼および外部群燃焼は、液滴群が一体となって燃焼する燃焼形態と定義される。さらに、外殻燃焼では、液滴群の中心部分の液滴は蒸発せず、外部群燃焼では中心部分の液滴も蒸発する。内部群燃焼は、液滴群の中心部分では外部群燃焼がおり、辺縁部分では各液滴が単独で燃焼する燃焼形態である。単滴燃焼は、液滴群内の全液滴が単独に燃焼する燃焼形態である。

本研究において得られた火炎像より、各々の燃焼状態が Chiu らの示す 4 つの形態のどれに相当するか検討する。この時、次の 2 点が問題になる。

- ・ 液滴数が 9 個と少ないため内部群燃焼の形態は取



External sheath combustion $G > 10^2$ External group combustion $G > 1$ to 10^{-1} Internal group combustion $1 > G > 10^{-2}$ Single droplet combustion $10^{-2} > G$

Fig. 9 Typical results of flame shape of liquid fuel droplets arrayed in three dimension at 12msec. after ignition

り得ない。

・画像データとして火炎の直接写真のみの取得を行ったため、外殻燃焼と外部群燃焼との区別ができない。

しかしながら、燃料液滴の配置が3次元的であるため群燃焼数 G を指標とした燃焼形態の分類が可能と考え、群燃焼理論の適用を試みた。より正確かつ詳細な情報を得るために、今後液滴数を大幅に増やした実験を実施する必要がある。また、Chiu らは定常な液滴群燃焼に対して考察を行っている。本実験においては、得られた燃焼形態が時間によって大きくは変化しなかったため、着火後 12msec の燃焼形態にこの定常の状態を代表させて考察した。

Chiu らの結果より、群燃焼数 G は次の式を用いて求めることができる。

$$G = 3(1 + 0.276R_p^{1/2}S_c^{1/2})L_w N^{2/3} \left(\frac{n}{d_i}\right) \quad (1)$$

各記号の意味は以下の通りである。

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| G | The group combustion number | [-] |
| R_p | Reynolds number of a particle | [-] |
| S_c | Schmidt number | [-] |
| L_w | Lewis number | [-] |
| N | Total number of particles | [-] |
| d_i | Interparticle separation | [m] |
| n | Radius of liquid particle | [m] |

計算にあたり、次のような仮定を設けた。

・静止した雰囲気中における燃焼と仮定し、 $R_p = 0$ とする。

・ $L_w = 1$ と仮定する。

実際の燃焼場においては上記の2つの仮定は、自然対流の影響等もあり厳密には満たされていない。しかし、本報告では、群燃焼数と燃焼形態との定性的な関係を調べることを目的としており、計算を簡略化するため上記の仮定を行った。また、 d_i については平均液滴間隔 l_a を用いて $d_i = l_a$ として計算を実施した。ここで、平均液滴間隔 l_a とは中心液滴から体心立方格子の頂点までの長さである。よって $l_a = \sqrt{3}/2 \cdot l$ となる。

Fig. 9 に、Chiu らの式を基に算出した無次元液滴間隔 S および群燃焼数 G をあわせて示した。はじめに、実験により得られた燃焼形態に着目する。Fig. 9 より、(a) は9つの液滴が一体となって球状の火炎を形成しながら燃焼し、(b) および (c) についても液滴群中の液滴は個々に独立して燃焼しているのではなく液滴群全体を包むような火炎が形成されている。また、(d)、(e)、(f) については、液滴群中の燃料液滴が個々に独立した火炎を形成している。このことから、(a)、(b)、(c) は外殻燃焼もしくは外部群燃焼となっていると考えられ、(d)、(e)、(f) は単滴燃焼になっていると考えられる。さらに、(c) と (d) の間で燃焼形態が変化していることが分かる。

次に、実験で得られたそれぞれの火炎について、群燃焼数を示し、その群燃焼数を基にして Chiu らの結果より予測される燃焼形態と本研究で得られた火炎像から推察される燃焼形態とを比較する。

(a) から (f) の各火炎の群燃焼数は各々以下のとおりである。

(a)3.37, (b)1.35, (c)1.12, (d)0.67 (e)0.42, (f)0.34

ここで、Chiu らの結果では、燃焼形態が内部群燃焼から外部群燃焼へと遷移する群燃焼数は 1.0 から 0.1 であり、この値は燃料性状や雰囲気条件等によって変化するとされている。実験で得られた燃焼形態は (c)と (d)の間で変化しているの、その遷移値は 1.0 程度であると考えられる。このことより、Chiu らの示す内部群燃焼から外部群燃焼へと遷移する群燃焼数と、本実験で得られた燃焼形態が遷移する群燃焼数が概ね一致していることが分かる。

遷移値を 1.0 として、燃焼形態について検討する。この遷移値は内部群燃焼から外部群燃焼への遷移値であるため、群燃焼数が 1.0 より大きければ外部群燃焼となりそれよりも小さければ内部群燃焼となるべきである。実験結果より、1.0 以上の場合、すなわち (a), (b), (c) の場合、その燃焼形態は外殻燃焼もしくは外部群燃焼のどちらかとなっている。実験手法の問題によりどちらの燃焼形態をとっているか確定はできないが、外部群燃焼となっているとすると Chiu らの結果と一致する。外殻燃焼と外部群燃焼とを分類ができる実験手法を確立しより詳細な検討を行う必要がある。また、1.0 以下の場合、すなわち (d), (e), (f) の場合、その燃焼形態は単滴燃焼となっている。今回実験を行った液滴数では内部群燃焼の形態はとり得ないため、液滴数を増やして実験を行うことにより、(d), (e), (f) と同様な群燃焼数で内部群燃焼を観察できる可能性がある。

以上のように、小規模ではあるが液滴の配置が 3 次元であるため、群燃焼数 G を指標とした燃焼形態の分類を目指し、群燃焼理論の適用を試みた。その結果、Chiu らの提唱する内部群燃焼から外部群燃焼への遷移値と実験により得られた燃焼形態の遷移値が概ね一致することが分かった。また、実験手法の改良および液滴群の規模拡大を実施することにより、Chiu らの提唱する 4 つの燃焼形態が観察される可能性が示唆された。

3.3 着火遅れ

3.3.1 2次元液滴群の着火遅れ

Fig. 10 に、2次元液滴群における中心液滴の着火遅れと液滴間隔の関係を示す。3.2節で示したように、2次元液滴群の燃焼形態には、個々の液滴の火炎が、周辺の液滴の火炎と一体となって燃焼する形態と、燃料液滴が個々に独立して燃焼する形態とがある。液滴

間隔が 5 mm 程度の場合を境にして燃焼形態が遷移する。すなわち、液滴間隔が 5 mm 以上の場合、燃料液滴が個々に独立して燃焼し、5 mm 未満の場合には、個々の液滴の火炎が周辺の液滴の火炎と一体となって燃焼する。そこで、Fig. 10 では液滴間隔が 5 mm 以上の結果を結び、関連がある結果とした。本実験では、基本的に中心液滴に着目して着火遅れについて検討する。しかしながら、個々の液滴の火炎が周辺液滴の火炎と一体となって燃焼する場合、現時点では中心液滴の着火を確認することができない。今後、火炎内での OH ラジカル等の中間生成物の観察や、中心液滴の蒸発状態を観察する等の手法を用いて、中心液滴の着火を定義し、そこに着目した研究を行う必要があると考えられる。そこで、液滴群が一体となった火炎を形成する場合には、その一体となった火炎からの発光が認められるまでの時間を着火遅れについて検討するための指標とした。

まず、液滴が個々に独立して燃焼する場合から考える。中心液滴の着火遅れを指標として液滴群の着火遅れについて考察することは、液滴群中において最も干渉効果の影響を受けやすい液滴に着目していると考えられることができる。すると、この干渉効果は中心液滴と周辺液滴の間の領域に生じる効果と考えることができる。Fig. 10 より、液滴間隔が小さくなると、着火遅れは短くなる。すなわち、干渉効果が大きくなるにつれて、着火遅れは短くなっている。この原因として、次に挙げる二つの干渉効果が考えられる。

(a) 燃料濃度効果

この効果は、複数の液滴に囲まれた領域において、液滴間隔が狭くなると、単一液滴の場合と比較して、燃料濃度の高い混合気形成がより容易になるため、着火しやすくなる効果と考えることができる。液滴が個々に独立して燃焼する場合の中心液滴の着火遅れが、液滴間隔が小さくなるにつれて短くなるのは、この効果の影響が支配的であることが原因と考えられる。

(b) 雰囲気温度効果

この効果は、複数の液滴に囲まれた領域において、液滴間隔が狭くなると、燃料の蒸発に要するエネルギーを供給するため、雰囲気温度が低下し、着火が起こりにくくなる効果と考えることができる。一体となった火炎を形成する場合の着火遅れが、液滴間隔が小さくなるにつれて長くなる場合、この効果の影響が支配

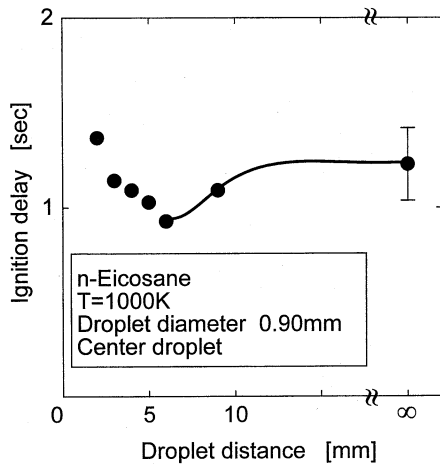


Fig. 10 Ignition delay of the center droplets of liquid fuel droplets arrayed in two dimension versus the droplet distance

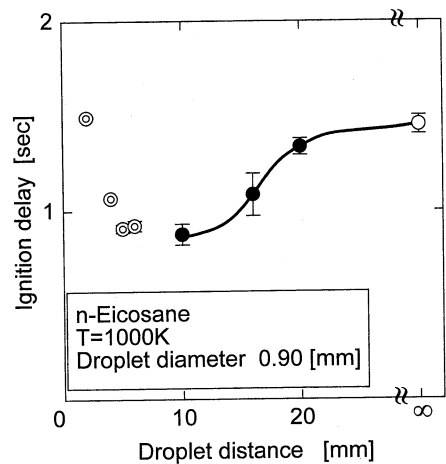


Fig. 11 Ignition delay of the center droplets of liquid fuel droplets arrayed in three dimension versus the droplet distance

的であることが原因と考えられる。

(a), (b) の二つの効果の存在は、後藤ら²⁾ によって解析的にも導かれている。液滴が個々に独立して燃焼している、液滴間隔が5 mm 以上の場合、(a)燃料濃度効果が顕著に視れていると考えることができる。

一方、一体となった火炎を形成する場合、すなわち、液滴間隔が5 mm 未満の場合、着火遅れについて検討する。この場合、Fig. 10 より、液滴間隔が小さくなると、着火遅れは長くなる。すなわち、干渉の効果が大きくなるにつれて、着火遅れは長くなっている。この場合、着火点は中心液滴の周辺ではなく、周辺液滴の干渉の少ないところから着火していると考えほうが自然である。すると上記に示した二つの干渉効果のうち、(b)雰囲気気温度効果が強く現れ、中心液滴の周辺よりも、周辺液滴の外側のほうが先に着火条件が整っていると考えられる。よって、液滴群全体が一つの液滴のように振る舞い、液滴間隔が小さいほど、内部に含んでいる酸化剤の量と熱量が小さくなり、着火遅れが大きくなっていると考えることができる。

3.3.2 3次元液滴群の着火遅れ

Fig. 11 に、3次元液滴群における中心液滴の着火遅れと液滴間隔の関係を示す。図中の白丸は単一液滴での結果を意味する。3.2節で示したように、3次元液滴群の燃焼においても、2次元液滴群の燃焼と同様に、次の2つの燃焼形態が存在している。

- ・各液滴が単独で燃焼している燃焼形態 (Fig. 11 における黒丸)

- ・液滴群全体を1つの火炎が包むように燃焼している燃焼形態 (Fig. 11 における二重丸)

ここで、Fig. 9 より、(c)と(d)の間、すなわち、液滴間隔が5 mm と10mm の間を境にして燃焼形態が遷移する。本実験では、基本的に中心液滴に着目して着火遅れについて検討する。しかし、液滴群が一体となって燃焼する場合、現時点では中心液滴の着火を確認することができない。従って、液滴群が一体となった火炎を形成する場合には、2次元液滴群の場合と同様に、その一体となった火炎からの発光が認められるまでの時間を着火遅れとした。今後、中心液滴の着火を定義し、そこに着目した研究を行う必要があると考えられる。

以上のことより、3次元液滴群においても、中心液滴の着火遅れと、一体となった火炎の着火遅れとは、それぞれ分けて検討する必要がある。各液滴が単独で燃焼している場合は、2次元と同様、最も干渉の効果を受けやすい中心液滴を指標として液滴群の着火遅れについて考察することは妥当であると考えられる。

初めに、各液滴が単独で燃焼している場合の、中心液滴の着火遅れについて検討する。液滴間隔が10mm 以上の場合、各液滴が独立して燃焼している。Fig. 11 より、液滴間隔が10mm 以上の場合、液滴間隔が小さくなると、着火遅れは短くなる。すなわち、干渉の効果が大きくなるにつれて、着火遅れは短くなっている。この原因として、2次元の場合と同様に、干渉効果が大きくなると混合気形成がより容易になるという、(a) 燃料濃度効果が考えられる。この効果は、2

次元の場合に検討した効果であるが、定性的には、中心液滴に影響を及ぼす周囲の液滴が3次元的に配置されていたとしても、2次元的に配置されている場合と同様の効果が存在すると考えられる。

次に、一体となった火炎を形成する場合の、着火遅れについて検討する。液滴間隔が6mm以下の場合、一体となった火炎を形成している。Fig.11より、液滴間隔が6mm以下の場合、液滴間隔が小さくなると、着火遅れは長くなる。すなわち、干渉の効果が大きくなるにつれて、着火遅れは長くなっている。この原因として、2次元配置の場合と同様に、(b)雰囲気気温度効果の影響が大きくなり、中心液滴周囲での火炎の形成が困難になったと考えられる。

4. 結 言

燃料液滴群の燃焼に及ぼす相互干渉の影響について調べるため、液体燃料液滴群を高温雰囲気中において自発着火させる実験を行った。その結果以下のような結論を得た。

1. 本研究で用いた新しい実験方法により、燃料液滴群の燃焼特性を調べることが可能である。
2. Chiuらの群燃焼理論を用いて液滴群燃焼の燃焼形態を分類できることが示唆された。
3. 3次元の液滴群における中心液滴の着火遅れは、ある液滴間隔までは、液滴間隔の減少とともに短くなる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、本学工学研究科博士前期課程2年の坂田直美さん、同1年の橋裕司君にご協力

いただいた。また、実験装置を作製するにあたって、本学工学部生産技術センターの皆様にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) Faeth, G. M. et al., SAE Trans. 77, 1793-1802 (1968)
- 2) Goto, M. et al., Proc. 27th Symp. (Int.) Combust., 1959-1966 (1998)
- 3) Nagata, H. et al., Interactive Combustion of Two-dimensionally Arranged Quasi-droplet Clusters under Microgravity, Combust. Flame (投稿中)
- 4) Ikegami, M. et al., Proc. Drop Tower Days 1998 in Hokkaido, 79-81 (1998)
- 5) 矢作・ほか1名, 機論 B, 65-631, 1108-1114 (1999)
- 6) 廣田・ほか3名, 機講論 (年次大会), 99-1/IV, 383-384 (1999)
- 7) Chiu, H. H. et al., Proc. 19th Symp. (In.) Combust., 971-980 (1982)
- 8) Stull, D. R. and Prophet, H., JANAF Thermochemical Table 3rd ed., U. S. Dept. Commerce, Washington (1986)
- 9) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F., and Bird, R. B., Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley & Sons, (1964)
- 10) Manson, E. A. and Saxena, S. C., *J. Chem. Phys.* 31, 511-514 (1959)
- 11) Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling B. E., The Properties of Gases and Liquids 4th ed., McGraw-hill (1988)



Effects of Droplet Distance of Liquid Fuel Droplets on Autoignition

Hiroshi ENOMOTO *¹, Hitoshi NAGATA *², Tomoyuki KONYA *²
Daisuke SEGAWA *², and Toshikazu KADOTA *²

(* 1 Kanazawa University, Dept. of Mechanical Systems Engineering,
* 2 Osaka Prefecture University, Dept. of Mechanical Engineering)

SYNOPSIS : — The present study aims to establish a new experimental methodology (Fine Wire Sustaining method, FWS) and to obtain the fundamental data of spray combustion, the combustion of the liquid fuel droplets cloud. To simulate the fuel droplet cloud, each droplet was suspended at points of intersection of fibers. The geometrically controlled droplets arrayed in two or three dimensions imitated the liquid fuel droplet cloud. The experiments were performed to investigate the flame shape and the ignition delay of the droplet cloud in high temperature. The influences of the surrounding droplets on the flame shape and on the ignition delay of the center droplet were investigated. The droplet distance was the experimental parameters. As a result of the experiments, the combustion characteristic of the droplet cloud could be investigated by using the new experimental methodology. The flame shape of the fuel droplet cloud could be classified by using the group combustion number G . The ignition delay of the center droplets arrayed in three dimensions decreased with the droplet distance to the extent that the flames are isolated.

.....
Key Words

Combustion, Ignition, Liquid fuel, Group combustion, Geometric configuration
