

伝播火炎による液体燃料粒子群の着火に及ぼす粒子直径 および配位数の影響

— 2001.5.9 受理 —

金沢大学*¹ 榎本 啓士
大阪府立大学*² 橘 裕司, 坂田 直美
大阪府立大学*³ 瀬川 大資, 角田 敏一

1. 緒言

内燃機関の燃焼室内に噴霧された液体燃料粒子のうち、粒子径の小さなものは蒸発して可燃性の気相を形成する。また粒子径の大きなものは蒸発せずに燃料粒子群を形成する。可燃性の気相の一部が着火すると、気相中を進行する伝播火炎が発生する。燃料粒子群は、この伝播火炎の通過によって着火する。その際、燃料粒子間で相互干渉が起こっていて、燃料粒子群の着火は相互干渉の影響を大きく受けるものと考えられる。したがって機関の効率を向上させるためには、この現象の解明が重要となってくる。

この現象を解明するために、噴霧器を用いて燃料粒子群を再現するという方法で研究が行われている。一般に、燃料粒子は燃焼室内を浮遊しているため、特定の粒子に着目して相互干渉の様子を調べることは困難である。そこで、燃料粒子を懸垂するという方法で研究が行われている。しかしながら、多数の燃料粒子を扱った研究はあまり行われていないため、特定の粒子が周囲から受ける相互干渉の様子は十分に解明されているとは言い難い。これは燃料噴霧中に含まれる燃料粒子直径のばらつきの規格化や、相対的位置関係の規格化が困難であることも一因と考えられる。そこで本研究では、この燃料噴霧を規格化する試みとして配位概念を導入する。実験変数として用いられる配位数は、注目している粒子を等しい距離で取り囲む粒子の

数と定義する。また考察を簡単にするために、粒子直径は均一とした。

高温雰囲気中における燃料液滴の自発着火については多くの研究例があり^{1)~6)}、火炎伝播方向に対して並行、すなわち伝播火炎平面に対して垂直に燃料粒子を配置した場合の着火遅れに関する研究^{7)~9)}もなされている。本研究では火炎伝播方向に対して垂直に燃料粒子を配置した。このとき燃料粒子の着火に及ぼす相互干渉効果を調べた。可燃性混合気を充填した燃焼容器内に多数の燃料粒子を懸垂させることにより、内燃機関の燃焼室内に存在する燃料粒子群を再現した。燃焼容器内の可燃性混合気中の一部が着火すると伝播火炎が発生し、この伝播火炎の通過によって燃料粒子群が着火する。

干渉効果を調べる指数として、粒子直径、粒子間隔および配位数を用いた。複数の燃料粒子に囲まれた粒子を中心粒子とし、この中心粒子の着火遅れを計測し、相互干渉効果を考察した。着火遅れは、伝播火炎が粒子に到達してから粒子の火炎発光が計測されるまでの時間とした。伝播火炎の到達時間は保持線の発光した時間、粒子の火炎発光は自発光を計測した。Fig. 1に本研究で得られた火炎像を示す。横軸に粒子間隔、縦軸に粒子直径をとった。配位数は3とする。

2. 実験装置および方法

Fig. 2に、本研究で用いた実験装置の概略および燃焼容器の詳細を示す。装置は可燃性混合気を作成および保存するための混合容器、可燃性混合気および燃料粒子群を燃焼させるための燃焼容器、観察用の光学系および制御用のパーソナルコンピュータからなる。

Fig. 2 (b)に示される燃焼容器は、胴体部、アルミニ

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

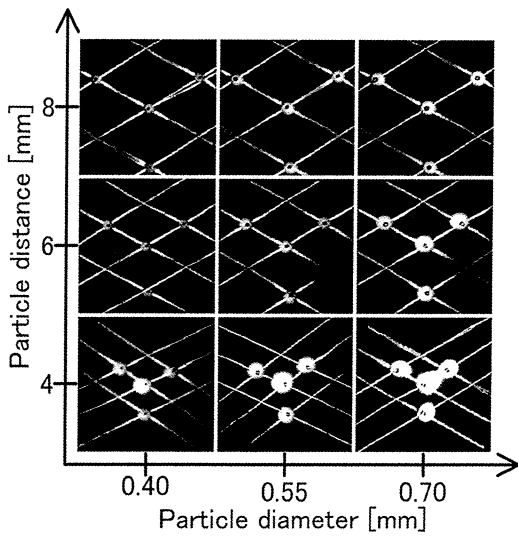


Fig. 1 Typical flame shapes

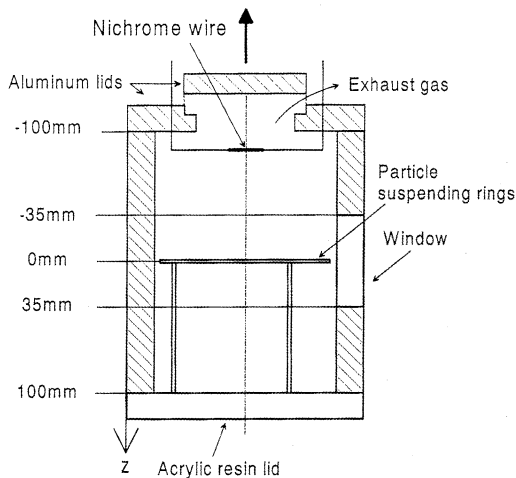
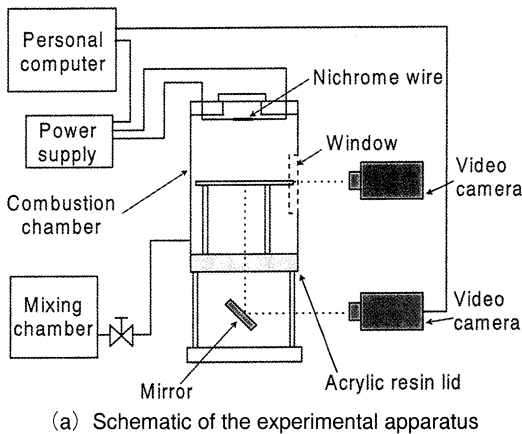


Fig. 2

ウム製蓋部およびアクリル製蓋部からなる。胴体部は外径 180mm, 内径 140mm, 高さ 200mm のステンレス鋼製の円筒である。この円筒の中心軸を z 軸とし、燃料粒子の保持されている燃料粒子保持輪上端面の位置を $z = 0\text{mm}$ とする。側面には $z = 0$ を中心に直径 70mm の観察用円形窓がある。アルミニウム製蓋部は $z = -100\text{mm}$ にあり、混合気着火用のニクロム線 (線径 0.8mm, 露出長 3.5mm) が取り付けられている。アルミニウム製蓋部中央には直径 94mm の円孔が開いており、混合気着火前にはアルミニウム製円板で蓋がされている。混合気着火後には、内部圧力の上昇に伴いアルミニウム製円板が浮き上がり、円孔から既燃気体が排出される。これにより、燃焼容器内圧力は大気圧に保たれる。アクリル製蓋部は $z = 100\text{mm}$ にあり、燃料粒子保持輪を支持するために長さ 95mm の支柱が取り付けられている。燃焼容器内部は艶消し黒色の耐熱塗料で塗装され、火炎光の反射を防止している。

一般に、噴霧火炎が形成される雰囲気圧力は一定である。そこで伝播火炎の通過前後で雰囲気圧力がどの程度変化するか調べるために、 $z = 80\text{mm}$ および -80mm に電子圧力センサーをつけて圧力計測を行った。Fig. 3 に各点での圧力変化の時間履歴を示す。混合気に着火した時刻を零とした。この図から、伝播火炎の通過前後では圧力はほぼ大気圧と等しく、時間的にはほぼ一定であり、アルミニウム製蓋による内部圧力調整が十分機能していることがわかる。

燃料粒子保持輪は、外径 120mm, 内径 114mm, 高さ 5mm のアルミニウム製のリングに一定間隔で網目状に細線を張ったものであり、その交点に燃料粒子を

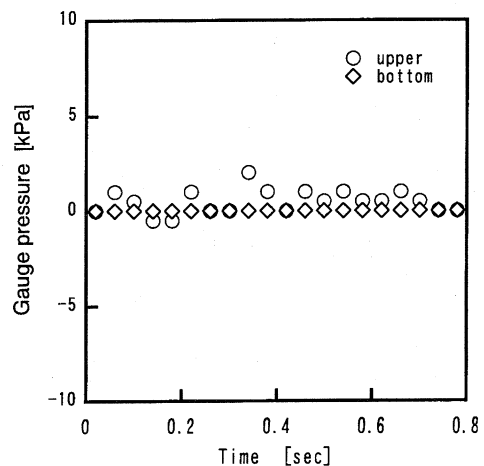


Fig. 3 Time histories of the gauge pressure

懸垂させる。細線は SiC 繊維^{10) 11)} (商品名ハイニカロン, 日本カーボン株式会社製) である。ハイニカロンの性質を Table. 1 に示す。また燃料粒子群の配置方法を Fig. 4 に示す。燃料粒子の配置には配位の概念を用いた。配位とは, どの粒子に着目してみてもその粒子と周囲の粒子との位置関係が同様になるように粒子を配置することである。そして燃料粒子保持輪の中心に配置された粒子を中心粒子, 中心粒子以外の粒子を配位子と呼び, 中心粒子から最短距離にある配位子の数を配位数とする。細線の交差する角度や間隔を変えることにより, 配位数や粒子間隔を変えることができる。本研究では 2次元平面上での配位を考えた。

本来, 噴霧燃焼がおこっている空間には懸垂線はない。そこで, 懸垂線が存在することによって, 実験結

Table 1 Property of Hi-Nicalon

Diameter	14 μm
Melting point	3,103K
Specific heat	0.67kJ / kg / K at 298K 1.17kJ / kg / K at 773K
Heat conductivity	7.77W / m / K at 298K 10.1W / m / K at 773K
Density	$2.74 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3$

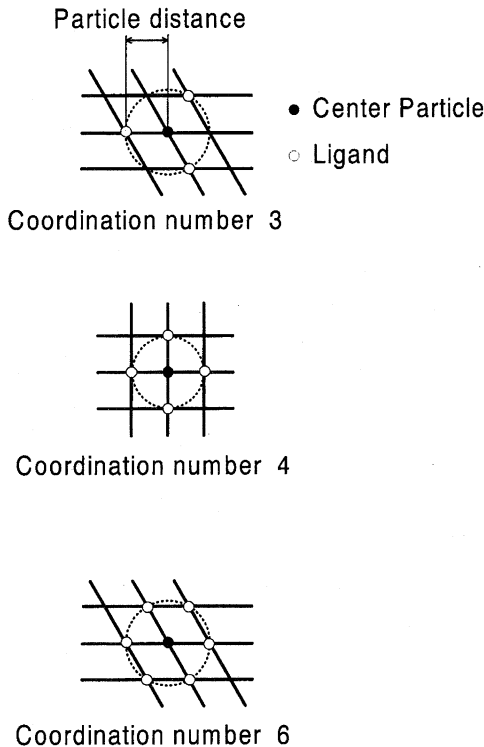


Fig. 4 Schematics of fuel particles arrays

果にどのような影響が及ぶかを検証する。懸垂線を持つ影響は, 熱的影響および物質移動的影響に分けられる。後者の物質移動的影響は, 燃料蒸気や酸化剤, 燃焼生成物が移動する時に何らかの影響を与えるものと定義される。このとき, 液滴や液滴周囲に生成されている火炎の大きさに対する懸垂線の表面積および体積がどの程度の大きさになるか, が影響の指標と考えることができる。SiC 懸垂線の断面積 d_s は, 2本を束ねて1本の懸垂線として利用したので, 体積が同じ円柱を仮定すると, 直径は 20 μm とおくことができる。粒子直径が 1.0mm とする場合, 液滴表面での懸垂線断面積は, 4ヶ所で接していることを考慮して, $12.4 \times 10^{-10} \text{m}^2$ であり, 液滴表面積 $3.1 \times 10^{-6} \text{m}^2$ の 0.04% 程度なので無視しうる。火炎に対する体積の影響も同様に無視しうる。

一方, 熱的影響はさらに二つに分けることができる。ひとつは周囲気体 (多くの場合は空気) との熱伝導率の相違によって生じる, 過多の熱量供給源としての影響である。もうひとつは周囲気体から液滴への熱流束が大きい場合, 懸垂線が熱量吸収源となって液滴を冷やす影響である。本実験では, 燃料粒子群は一様に伝播火炎にさらされる。よって, 後者の影響は小さいので, 前者の影響, すなわち過多の熱量供給源としての影響について考察する。

伝播火炎が到達する前の温度 T_0 を 300K, 伝播火炎の温度 T_f を 1,200K と仮定する。周囲の流れはなく, 気体の物性値は窒素のそれとし, 熱伝導率 λ_e は 71.3mW/m/K (at 1,200K) とする。なお, 懸垂線の比熱 C_s は 1.17kJ/kg/K , 密度 ρ_s は $2.74 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ とする。

第一に, 単位長さの SiC 懸垂線が伝播火炎温度と同じ温度になるのに要する時間を考察する。最初に周囲気体から移動する熱量を計算する。ただし, 対流の影響を無視し, ヌッセルト数 Nu を 2 とする。

$$Nu \times \frac{\lambda_e}{d_s} \times (T_f - T_0) \times \pi d_s \quad (1)$$

よって, 加熱に要する時間は以下の式であらわされる。

$$\pi \left(\frac{d_s}{2} \right)^2 \times \rho_s \times C_s \times (T_f - T_0) \quad (2)$$

$$Nu \times \frac{\lambda_e}{d_s} \times (T_f - T_0) \times \pi d_s$$

この式から, SiC 懸垂線は約 2.2ms で伝播火炎温度に達することがわかる。つまり, 着火遅れに対して, 無視しうる時間で周囲と同じ温度になると考えること

ができる。

次に、SiC 懸垂線から燃料粒子に移動する熱量が、懸垂線がない場合に粒子に移動する熱量と比較してどの程度であるかを考察する。粒子直径 d_{drop} が 1.0mm とする。粒子が周囲空気にさらされている面から、粒子に移動する熱量は以下の式であらわされる。ただし、対流の影響を無視し、ヌッセルト数 Nu を 2 とする。

$$Nu \times \frac{\lambda_e}{d_{drop}} \times (T_f - T_0) \times 4\pi \left(\frac{d_{drop}}{2}\right)^2 \quad (3)$$

一方、懸垂線から粒子へ移動する熱量を考える。先の考察の通り、懸垂線は非常に短い時間で雰囲気温度と同じ温度になる。そこで、懸垂線と燃料粒子が接している部分の温度を T_0 とし、懸垂線を通して移動してくる熱量を考える。この熱流束を考える場合、温度勾配を仮定する必要がある。過去の熱電対を利用した火炎温度計測に関する研究¹²⁾では、素線直径の 100 倍の長さの熱電対を用いると影響がないと考えられている。そこで、火炎にさらされている時間が短いことも考慮して、ここでは、懸垂線の温度が伝播火炎温度 T_f と同じになる位置は懸垂線直径の 50 倍とする。このとき、懸垂線から移動してくる熱量は、懸垂線の熱伝導率 λ_s を 10.1W/m/K として以下のようにあらわすことができる。

$$\lambda_s \times \frac{T_f - T_0}{50d_s} \times 4\pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \quad (4)$$

このとき、懸垂線は 2 本あることに注意する。つまり、接している断面積は懸垂線断面積の 4 倍になる。(3)式に対する(4)式の割合は 3% 程度である。よって、懸垂線から燃料粒子にもたらされる熱量は、周囲空気からもたらされるそれよりも十分小さく、無視しうるとした。

実験は以下の手順で行った。実験前に所定の当量比の可燃性混合気を作成しておく。そして燃料粒子保持輪にマイクロシリンジを用いて燃料粒子を懸垂させ、読みとり顕微鏡で粒子直径を測定する。次にその燃料粒子保持輪を支柱に取り付け、燃料粒子の保持されている燃料粒子保持輪上端面が $z = 0\text{mm}$ の位置になるよう燃焼容器内に固定する。真空ポンプで燃焼容器内を約 300Pa まで排気した後、可燃性混合気を大気圧まで充填する。このとき、燃料粒子群は低圧雰囲気さらされるため、蒸発によりその直径が変化する。この排気時間を一定とした場合の排気前後の粒子直径を Fig. 5 に示す。

縦軸に排気後の粒子直径、横軸に排気前の粒子直径をとった。排気時間は 90 秒とした。この関係を利用

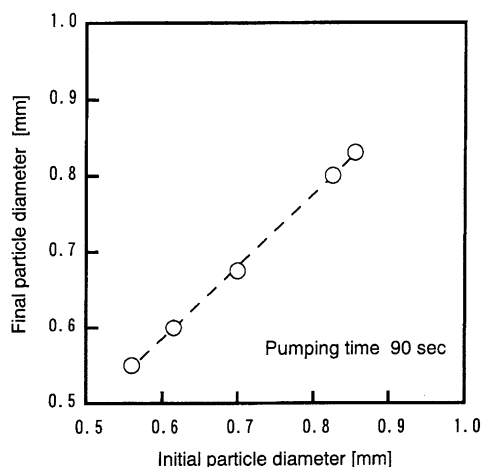


Fig. 5 Initial particle diameter vs. particle diameter after pumping

して、火炎伝播形成前の燃料粒子直径を制御した。燃料粒子直径のばらつきは 3% から 5% であった。可燃性混合気充填後、この可燃性混合気の流動が静まるのを待ちスタート信号を入力する。この信号により、着火用のニクロム線が一定時間加熱され、可燃性混合気が着火し、燃焼容器内を上方から下方へ向かって進行する伝播火炎が発生する。その際、既燃領域には伝播火炎の進行方向とは逆方向の火炎後方流が存在する。したがって燃料粒子群は、伝播火炎通過後、この火炎後方流にさらされている状態で着火する。伝播火炎の様子は、燃焼容器側面の観察用円形窓から 8mm ビデオカメラを用いて撮影される。また燃料粒子群が着火の様子は、アクリル製蓋部から鏡を介して高速度ビデオカメラを用いて撮影される。高速度ビデオカメラの撮影速度は毎秒 500 コマである。

本研究では、自発光のみを計測対象としたので、ある程度強い自発光が得られる必要があった。そこでちょうどよい強度の自発光火炎を形成するプロパンを予混合気燃料として選んだ。また形成される伝播火炎はできるだけ平面に近いものが必要であった。伝播火炎の形状は火炎を形成する混合気、その雰囲気および燃焼容器の形状に依存すると考えることができる。本研究で用いた燃焼容器の場合、最も平面に近い伝播火炎を形成したのは当量比が 0.7 の場合であった。

以上の理由から、用いた可燃性混合気はプロパン-空気混合気で、当量比は 0.7 であった。この予混合気は完全燃焼すると考えられるので、伝播火炎通過後の既燃領域の酸素濃度は 6.1% である。この当量比は、いわゆる予蒸発・予混合型燃焼器に見られる。予蒸

発・予混合型燃焼器では、噴霧器によって生成された噴霧のうち、粒子直径の小さいものは火炎形成部に到達する前に完全に蒸発し、雰囲気空気と混合気を形成する。すると、火炎はまずこの予混合気中を伝播し、この伝播火炎によって未蒸発の燃料粒子が着火する。

Fig. 6 に本実験で得られた典型的伝播火炎を示す。また Fig. 7 に側面観察窓から計測した火炎伝播速度 V_{fl} [m/s] を示す。縦軸に火炎伝播速度、横軸に計測位置をとった。この図から、伝播速度はほぼ一定であり、約 0.3m/s であることがわかる。この伝播速度は、等量比の影響を加味しても、過去に得られている様々な実験結果と大きな相違がなかった。また Fig. 6 に示される伝播火炎の曲率半径は約 110mm であった。粒子間隔が 10mm の場合、中心粒子に火炎が到達してから配位に到達するまでの時間は約 1.5ms である。単一粒子の場合、その着火遅れは 20ms 以上であった

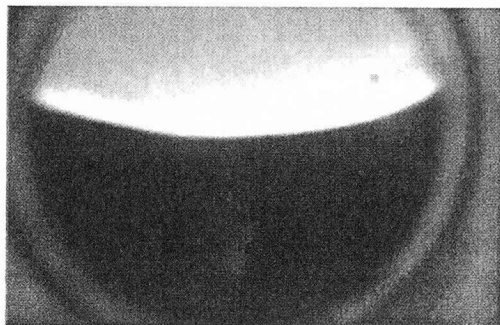


Fig. 6 Typical propagating flame shape

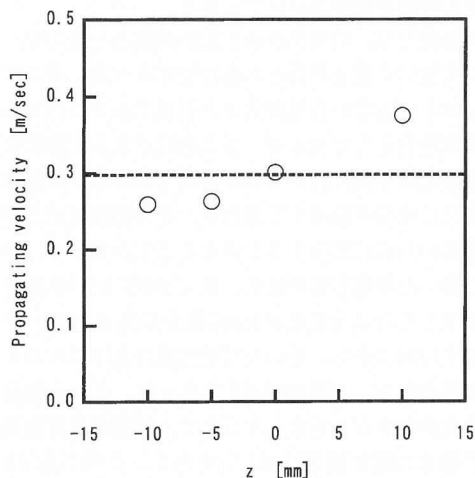


Fig. 7 Propagating velocity of the flame

ので無視しようとした。

液体燃料には、過去に多くの研究例がある n -ヘキサデカンを用いた。実験変数として粒子間隔、粒子直径および配位数を用いた。測定対象は中心粒子の着火遅れとした。なお着火遅れは、伝播火炎が燃料粒子に到達し、燃料粒子の火炎の自発光が計測されるまでの時間と定義した。保持用細線の発光時間と伝播火炎の到達時間がほぼ等しいことから、燃料粒子に伝播火炎が到達した時刻は、燃料粒子を保持している細線が発光した時間とした。また燃料粒子が着火した時刻は、燃料粒子の着火により燃料粒子の周囲から発光が認められた時刻とした。

このとき、周辺粒子の着火遅れとの関係が問題になる。本研究の条件では、周辺粒子と中心粒子の着火遅れの差はほとんどなく、また周辺粒子の火炎が伝播して中心粒子に着火する可能性も考えられるが、同様に周辺粒子の火炎が伝播して着火したと考えるには着火遅れの差が小さすぎるので、この影響はないとした。この着火遅れの定義では、光学系の設定により計測できる発光像が変化することが考えられる。しかしながら、本研究で着火遅れを計測した範囲では、いずれの設定においてもほぼ同様の結果を得たので、問題ないとした。

3. 結果と考察

相互干渉の影響を明確にあらわすために以下のような無次元数を導入する。

$$\text{無次元着火遅れ } \hat{t}_{delay}^n = \frac{t_{delay}^n}{t_{delay}^n(\text{single particle})} \quad (5)$$

$$\text{無次元粒子間隔 } \hat{l}^n = \frac{l^n}{d^n} \quad (6)$$

ただし t_{delay}^n [s], $t_{delay}^n(\text{single particle})$ [s] は各々配位数 n の場合の、中心粒子の着火遅れおよび単一粒子の着火遅れとする。単一粒子の着火遅れと粒子直系の関係を Fig. 8 に示す。また l^n [mm], d^n [mm] は各々粒子間隔および粒子直径とする。

3.1 配位数の影響

Fig. 9 に無次元着火遅れの無次元粒子間隔依存性を示す。粒子直径は 0.70mm とした。Fig. 9 (a) は配位数 3, Fig. 9 (b) は配位数 4, Fig. 9 (c) は配位数 6 とする。配位数 3 の場合、無次元着火遅れは無次元粒子間隔が小さくなるにしたがって単調に小さくなっている。一方、配位数 4 および 6 の場合、ある無次元粒子間隔で極小値をとっていることがわかる。また配位

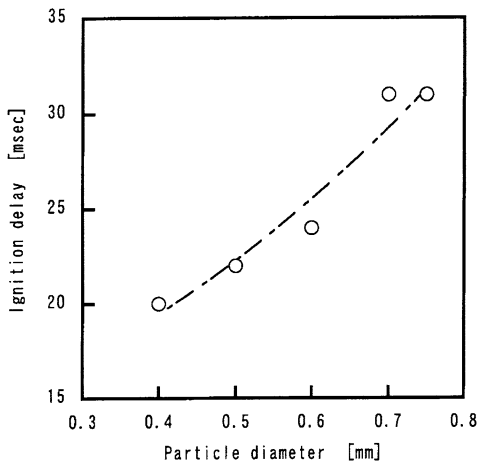


Fig. 8 Ignition delay vs. particle diameter (Single particle case)

数が4の場合よりも配位数が6の場合のほうが極小値の無次元着火遅れが小さいことがわかる。

本研究で実現された伝播火炎の伝播速度は約0.3m/sであった。このとき、伝播火炎通過後の雰囲気の流れ速 v^b [m/s] は容器内の圧力が一定であることから、質量保存式を利用して以下のようにして求められる。

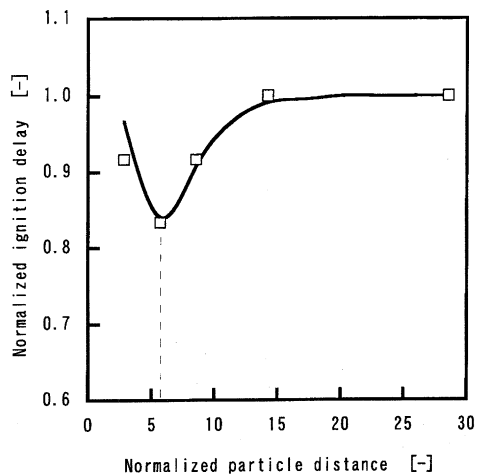
$$v^b = \frac{T^b}{T^u} v^u \quad (7)$$

ただし T^b [K] は既燃部温度、 T^u [K] は未燃部温度、 v^u [m/s] は未燃部流速とする。また燃焼に伴う

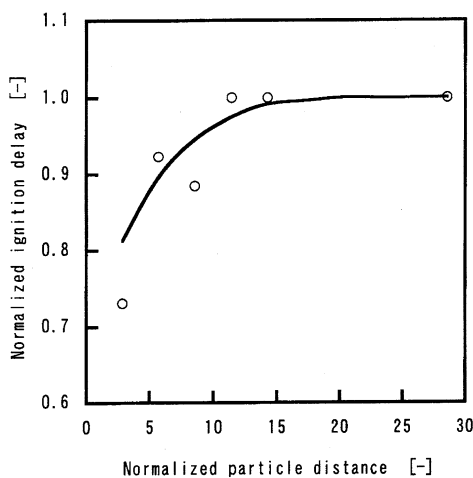
化学種組成の変化は当量比が小さいので、小さいとして無視する。

未燃部温度 300K とすると既燃部温度は 1,200K から 1,500K 程度である。未燃部は静止しているので、火炎伝播速度で代表すると既燃部流速は 1.2m/s から 1.5m/s となる。このときのレイノルズ数は、雰囲気の流れ速を窒素のそれで代表すると、本研究の場合 2 から 5 程度の値を取る。よって、既燃部での燃料粒子周りの流れはポテンシャル流と考えることができる。

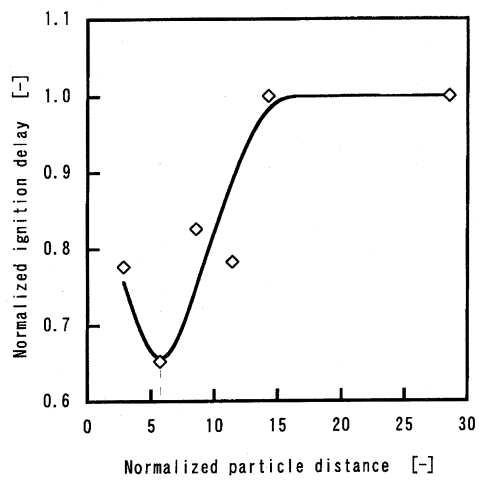
このとき、既燃部での流れには大きな乱れはないとすることができるので、燃料粒子間の燃料濃度分布および温度分布が着火遅れに大きな影響を与えていると



(b) Coordination number = 4



(a) Coordination number = 3



(c) Coordination number = 6

Fig. 9 Normalized particle distance vs. normalized ignition delay (Coordination number is varied. Particle diameter is 0.7mm.)

考えることができる。粒子雰囲気中の燃料濃度は蒸発によって形成される。この蒸発に要する熱量は主に雰囲気から熱伝達によって与えられる。そのように考えると密に燃料粒子が存在する場合、蒸発によって形成される混合気は燃料過濃状態になる。一方、この蒸発のための熱量は雰囲気から与えられる、つまり雰囲気温度の低下を意味する。

配位数が3の場合、周辺粒子と中心粒子の間に十分な空間があり、蒸発による周辺温度の低下はほとんどなく、Fig. 9 (a) のように、無次元着火遅れは無次元粒子間隔が小さくなると単調に小さくなったと考えられる。一方、配位数が4および6の場合、周辺粒子と中心粒子の間の空間は小さくなる。このとき、Fig. 9 (b) および (c) のように、同じ無次元粒子間隔では、粒子間の燃料濃度は配位数が4の場合よりも6の場合のほうが大きくなり、より着火遅れは小さくなると考えることができる。またいずれにも極小無次元着火温度がみられる。これは粒子間隔が小さくなり、粒子間の温度が下がりがすぎて、着火に要する雰囲気温度を維持することができなくなったために着火遅れが長くなったと考えられる。

3.2 粒子直径の影響

Fig. 10 に配位数6の場合に、粒子直径を変化させた場合の無次元着火遅れの無次元粒子間隔依存性を示す。破線は粒子直径0.70mm、点線は粒子直径0.55mmの場合である。この図から、極小値をとる無次元粒子間隔は粒子直径が小さいほうが大きくなることわかる。

ここで、配位数の影響の項で行ったように、粒子間に形成される燃料濃度分布および温度分布の影響を考察する。同じ無次元粒子間隔の場合、粒子直径が小さいほうが粒子間の空間は小さくなる。このため温度分布の影響が強くなり、より小さい粒子直径の場合の無次元着火遅れは、より大きな無次元粒子間隔で極小値を取ったと考えられる。

以上の考察では、噴霧燃焼を考える上で重要な指標である輻射の影響および燃料直径分布の影響の考察を行っていない。また着火現象は確率現象であり、より定量的な考察を行う上でさらに実験回数を重ねる必要がある。これらは今後の課題として非常に重要と考えるが、本研究で用いた実験方法は、これらの問題を考えるための実験データを蓄積するためにも用いることができると考えるので、今後さらに実験を重ねていく予定である。

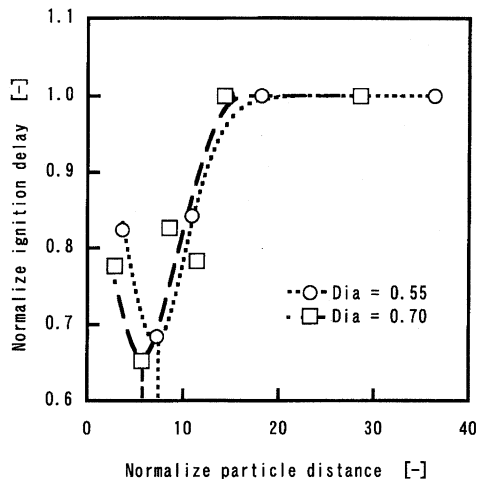


Fig. 10 Normalized particle distance vs. normalized ignition delay (Particle diameter is varied. Coordination number is 6.)

4. 結言

伝播火炎によって燃料粒子群を着火させた場合、燃料粒子間の相互干渉効果が中心粒子の着火遅れに及ぼす影響を調べる実験を行い、以下の結論を得た。

- (1)配位数が3の場合、無次元着火遅れは無次元粒子間隔が小さくなると単調に小さくなる。
- (2)配位数が4および6の場合、無次元着火遅れは無次元粒子間隔に対して極小値をとる。
- (3)配位数が4の場合よりも配位数が6の場合のほうが、無次元着火遅れの極小値が小さい。
- (4)本研究で実験された粒子直径の範囲では、無次元着火遅れが極小値をとる時の無次元粒子間隔は粒子直径が小さいほうが大きくなる。

謝辞

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) Masdin, E. G. et al., J. Inst. Fuel, 35, 251-260 (1962)
- 2) Wood, B. J. et al., AIAA J., 7, 2288-2292 (1969)
- 3) Feath, G. M. et al., SAE Transactions, 77, 1793-1802 (1968)
- 4) LeMott, S. R. et al., Combust. Flame, 16, 17-27 (1971)

- 5) Kadota, T. et al., Bull. of The Japan Soc. Mech. Engrs, 19, 437-445 (1976)
- 6) Takei, M. et al., Combust. Flame, 93, 149-156 (1993)
- 7) Segawa, D. et al., 28th Symp. (Int.) on Combust., p. 961-968 (2000)
- 8) 角田, 他, 機論, 66 (647), B, 1879-1884 (2000)
- 9) 角田, 他, 機論, 65 (631), B, 1115-1121 (1999)
- 10) Ikegami, M. et al., Drop Tower Days 1998 in Hokkaido, p 79-81 (1998)
- 11) 矢作, 他, 機論, 65 (631), B, 1108-1114 (1999)
- 12) 若井, 他, GTSJ, 7 (27), 33-38 (1979)

Effects of Particle Diameter and Number of Coordinates on Ignition of Liquid Fuel Particles Array by Propagating Laminar Flame

Hiroshi ENOMOTO *¹, Hiroshi TACHIBANA *², Naomi SAKATA *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 : — An experimental study has been performed on the ignition process of liquid fuel particles to obtain the fundamental data of spray combustion. The particles consisted of the center particle and ligands arranged in a geometric configuration. The number of ligands was defined as coordination number. The particles were set in a combustion chamber and the combustion chamber was filled with a propane-air mixture at atmospheric pressure. The propagating laminar flame was formed with the hot wire ignition and the particles were ignited by the flame. The results showed that in case of coordination number 3, the dimensionless ignition delay of the center particle decreased with a decrease in the dimensionless particle distance, and that in case of coordination number 4 and 6, the dimensionless ignition delay of the center particle had a minimum. The minimum was the smallest in case of coordination number 6. The smaller particle diameter had the larger dimensionless particle distance that showed the minimum dimensionless ignition delay.

Key Words

Ignition, Propagating laminar flame, Liquid fuel particles, Geometric configuration
