

# 高温雰囲気中における混合燃料の単一液滴の燃焼

羽鳥 和夫\*

Combustion of Single Droplet of Blended

Fuels in High-temperature Ambient

by

Kazuo HATORI

## Abstract

Marine fuel oil is a mixture of cutter stock oil and base oil. The combustion processes of suspended single droplets of blended fuels were experimentally observed in air at high ambient temperature with regard to the effects of the fuel mixture ratio, initial droplet diameter, and ambient air temperature on the ignition delay and burning time. Stationary fuel droplets suspended on a fine quartz fiber were put into a furnace which moves on horizontal rails.

For the droplets of the cutter stock oil, the ignition delay is roughly constant while the initial droplet diameter changes. On the other hand, for the droplets of the base oil, the delay increases in proportion to the initial diameter. For the droplets of both fuels, the burning time increases in proportion to the square of the diameter.

The droplets of the mixture at low cutter concentration are ignited by the vapor of the base oil at low ambient temperature. In this case, the ignition delay increases with the increase in cutter concentration, while the burning time decreases. On the contrary, when the droplet is ignited by the cutter, the ignition delay decreases with the increase in cutter concentration. The burning time increases with the increase of cutter concentration up to 30% and is roughly constant for concentrations above 30%. For all these droplets, the ignition delay decreased with the increase of ambient temperature.

---

\* 機関動力部

原稿受付 平成9年4月10日

審査済 平成10年1月14日

## 目次

1. まえがき	2
2. 実験装置	2
3. 使用燃料油および実験方法	4
4. 実験結果および考察	5
4.1 液滴直径の変化	5
4.2 着火遅れ	6
4.2.1 初期直径の影響	6
4.2.2 混合割合の影響	7
4.2.3 雰囲気温度の影響	8
4.2.4 高温流動空気中の着火遅れ	8
4.3 燃焼時間	9
4.3.1 初期直径の影響	9
4.3.2 混合割合の影響	9
4.3.3 燃焼中の液滴直径の影響	10
4.3.4 燃焼過程の写真	10
5. まとめ	12
参考文献	12

### 1. まえがき

船用燃料油は、石油精製過程の残さ油である基材に粘度を調整するためのカッター材（軽質留分）を調合して製造される。基材は、近年、減圧蒸留等を行う二次精製設備の発達により、極度に高密度、高粘度化している。このような低質化した燃料油を使用することにより、船用ディーゼル機関の燃焼室内の燃焼状態が変化し、過給機の汚れの増大や排気弁の損傷等が発生している。また熱回収のために設けられる排ガスエコマイザーも付着物が増大し、この対応にも多大の労力を要している。

これらの問題を燃焼の面から解決するためには、船用燃料油の燃焼過程を解明することが重要である。ディーゼル機関における燃焼過程を研究する手法として、単一液滴を燃焼させる方法が提案され、単一組成燃料あるいは船用燃料油を用いた単一液滴の燃焼に関する研究が行われてきた<sup>1)~9)</sup>。これらの研究結果は次のようにまとめられる。

高温空气中にさらされた単一組成燃料あるいは軽質燃料の単一液滴は、その蒸発期間と燃焼期間において液滴直径 $D$ の二乗値が時間に対して直線的に減少する傾向を示す。その直線の傾きである蒸発速度係数、燃焼速度係数によって液滴の寿命が予測可能となり、係数は初期直径に無関係である。特に蒸発速度係数は燃料油の性質や雰囲気温度の影響が大きい。重質油にあっては、液滴の中で熱分解が行われ、低位の炭化水素は沸騰して液滴の中から吹き出し、高位の炭化水素は網目状の組織を構成したセノスフェアの状態になるため、 $D$ 二乗値は不規則である。また、軽質のディーゼル油であってもより高い雰囲気温度では低沸点成分の沸騰により $D$ 二乗値は変動する。

(2)

単一液滴の着火機構については、液滴の周囲に蒸発した燃料蒸気と空気との適当な混合気の一部から着火が始まるか、あるいは蒸発した燃料蒸気が下降気流となって下方に流れながら周囲の空気と拡散混合し、混合気の濃度が可燃範囲にあり、着火温度以上になった適当な時点で着火するとされている。

液滴が高温雰囲気に入れられてから着火するまでの時間すなわち着火遅れは、雰囲気温度が低いほど大きくなる。雰囲気温度が低いと、ある初期直径以下では液滴が蒸発しつくして着火しなくなり、この最低着火温度は初期直径が大きいくほど低くなる。また、着火遅れは、圧力の $-n$ 乗に比例するので、雰囲気圧力が高い方が小さくなる。

以上単一液滴の燃焼に関して多くのことが明らかにされてきたが、混合燃料液滴の初期直径が着火遅れに及ぼす影響に関しては、あまり研究されていない。唯一、武井ら<sup>10)~12)</sup>により沸点の異なる二種類の単一組成燃料による混合燃料について、液滴の着火実験が行われている。この研究により、高沸点燃料の単一液滴の着火遅れは初期直径の増加とともに増大し、低沸点燃料の着火遅れは初期直径によらずほぼ一定かあるいは雰囲気温度が低い場合は初期直径が増加するにつれて着火遅れが減少することを示し、二成分混合燃料液滴の着火遅れには着火遅れが最大となる初期直径を有することを示した。この初期直径は、低沸点成分が多いほど、雰囲気温度が高いほど小さくなる。また、この初期直径より小さい液滴は高沸点成分、大きい液滴は低沸点成分で着火する。これらの結果は燃料の蒸発性と気相における燃料蒸気の反応性が着火遅れに影響を及ぼすことを示している。

船用燃料油は高沸点成分の多い基材と低沸点成分の多いカッター材の混合燃料油であり、船用燃料油の単一液滴燃焼を混合燃料油としての観点から研究することは興味深い問題である。本研究はこの観点から船用燃料油の単一液滴の着火遅れと燃焼時間の理解を深めようとするものである。そのため、本研究では基材とカッター材の混合燃料を用い、従来より広い温度範囲の高温雰囲気中において液滴を自己着火させることにより、初期直径、雰囲気温度および混合割合等が液滴の着火遅れと燃焼時間に及ぼす影響を調べた。実験は主として大気圧下の高温静止空気中で行った。また、高温静止空気中でも燃料蒸気の対流の影響が避けられないので、強制的にある程度の流動がある高温空気中においても着火遅れの実験を行った。

### 2. 実験装置

高温静止空気中の実験装置の概略を図1に示す。

液滴は直径0.3mmの石英棒の先端に固定し、高温炉をレール上で移動することにより高温雰囲気中に入れる。炉の移動による懸垂棒の振動を防ぐため、炉と懸垂棒は

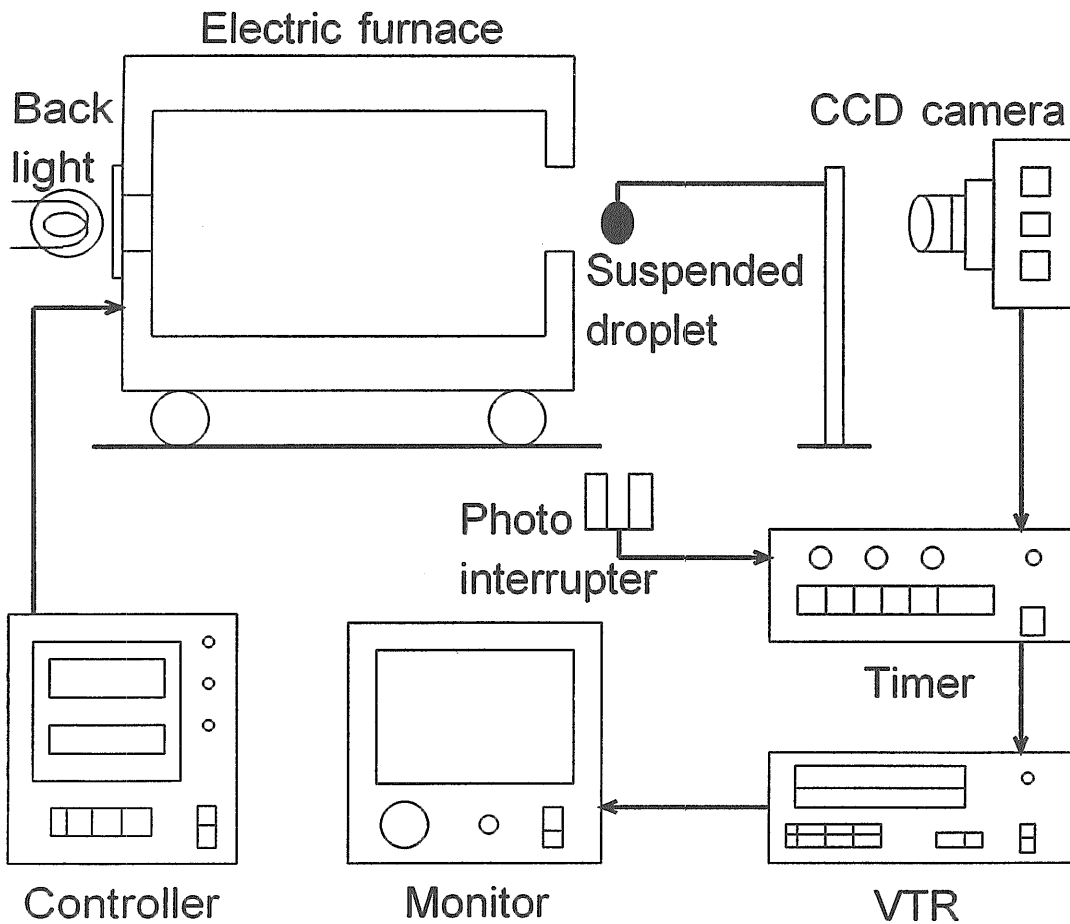


図1 実験装置の概略(静止空气中)

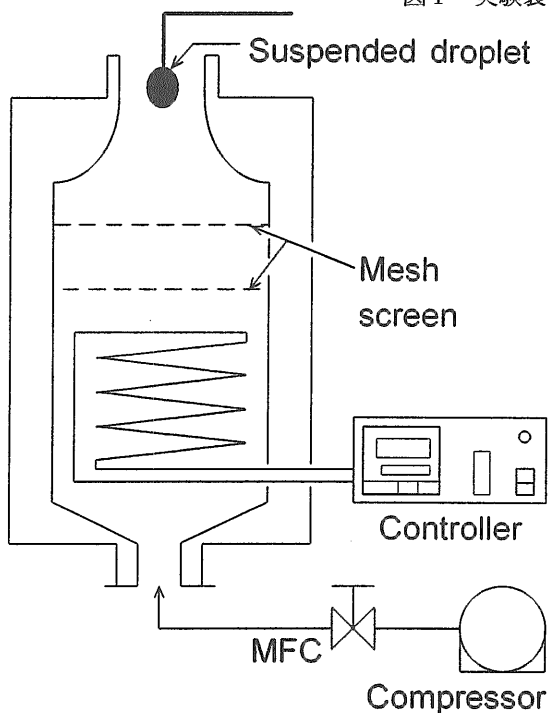


図2 実験装置の概要(流動空气中)  
それぞれ別の架台上に設置した。

燃焼室は、加熱用発熱体からの放射が液滴の燃焼に直接影響するのを避けるため、内径80mm、長さ200mmのセラミックス製炉心管を電気炉内に納めたものである。懸垂液滴の導入口は燃焼室内の温度を均一に保つため液滴が通過するために必要な最小限の大きさとした。炉内温度は、炉の中心位置から20mm離れた位置に設けた熱電対で測定し、この温度が一定になるように電力を制御した。

燃焼室内における液滴の状況は、炉の後方に設けた石英ガラス製の窓を通して液滴を照明し、液滴の影と火炎の挙動を炉の前方のCCDカメラで撮影し、モニターで観察するとともにVTRで録画した。CCDカメラのシャッター速度は1/200秒、VTRは毎秒60フレームで撮影した。石英ガラス製窓は空気の流れを防ぐため隙間を密閉した。

液滴が炉の内壁を通過する瞬間はフォトインタラプタにより検出し、その信号によりタイマーを作動させ、1/100秒の単位で液滴と同一のVTR画面に時刻を録画する。

高温流動空气中の実験装置の概略を図2に示す。

燃焼室は内径50mm、長さ70mmで実験装置の上部に

あり、高温空気は燃焼室下部から上向きに流れる。空気はマスフローコントローラーで流量一定に制御し、ヒーターで加熱されたのちメッシュスクリーンで整流して燃焼室に供給する。燃焼室内の流速分布はほぼ一様で、流速は0.6m/sとした。雰囲気温度は燃焼室中心から上流側に20mm離れた位置で測定した。

燃焼室には液滴を撮影するための小穴と液滴が通過するためのスリットが設けてある。懸垂棒は回転軸に固定しており、液滴は軸を回転することにより高温空気流中に入れる。液滴の挙動は静止空気中と同様の方法で観察した。

### 3. 使用燃料油および実験方法

今回使用した基材とカッター材の主な性状を表1に示す。また、熱天秤によるカッター材の重量変化を図3に基材のそれを図4に示す。両図に示すように、重量が1/2に減少する温度は、カッター材が約470K、基材が

約730Kである。これら熱天秤の結果は直接沸点の異なる燃料成分の重量割合を示すものではないが、基材はカッター材に比べて含有成分の沸点範囲が広く、沸点の高い成分に富むことを示す。基材にカッター材を20%混合した燃料は現在用いられている船用燃料油に相当する。

混合燃料は恒温水槽で313Kに保温しておき、十分に攪拌した後マイクロシリンジにとる。つぎに、マイクロシリンジから一定量の液滴を懸垂棒の先端につける。液滴の量は、マイクロシリンジの送り量を調節することに

より、液滴直径で±0.05mm程度の定量が可能である。

液滴の温度がほぼ室温になってから炉を移動し、液滴を加熱し燃焼させる。着火遅れは、液滴が炉の内壁を通過してから着火するまでの時間で、着火の瞬間は録画した画像上において液滴周囲に揮炎が発生した時刻を用いた。燃焼時間は着火から燃焼終了までの時間とした。

液滴直径Dは、液滴を回転楕円体と仮定し、液滴の短径Dh、長径Dvから体積を求め、これを体積が等価な球に換算して求めた。すなわち $D = (Dh^2 \cdot Dv)^{1/3}$ として求めた。DhとDvは録画した画像から画像解析装置を用いて測定した。

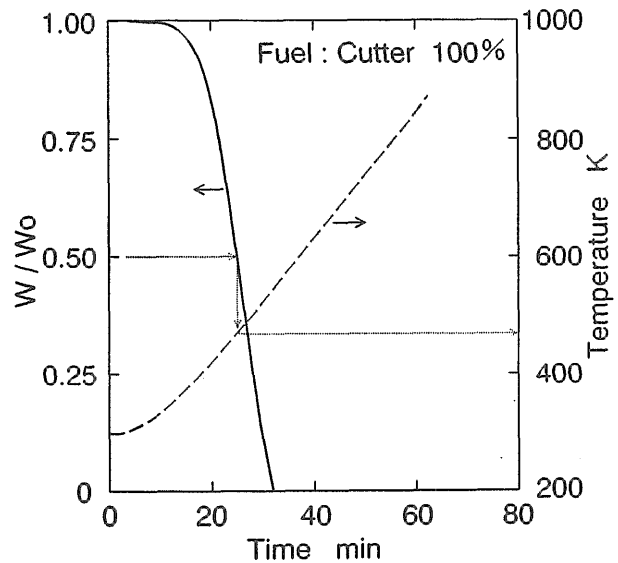


図3 熱天秤による重量変化

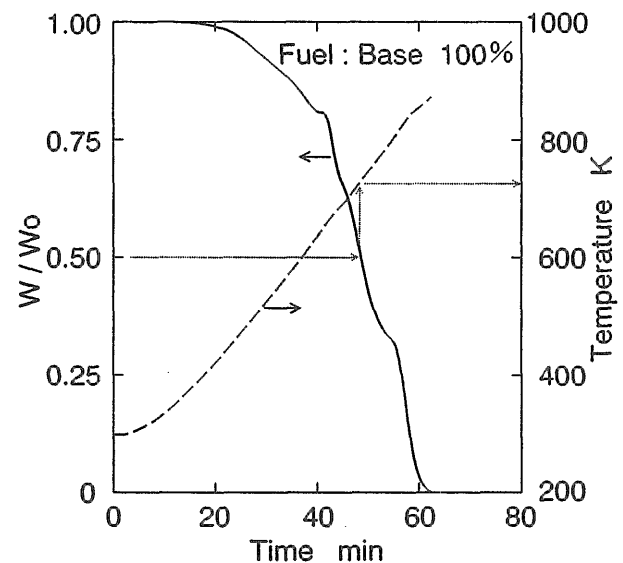


図4 熱天秤による重量変化

表1 基材とカッター材の主な性状

	基 材	カッター材
密度 (kg/m <sup>3</sup> 288K) [密度 (g/cm <sup>3</sup> 15 °C)]	996.8 [0.9968]	900.9 [0.9009]
動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s 323K) [動粘度 (cSt 50 °C)]	3.171 × 10 <sup>4</sup> [3171]	2.372 × 10 <sup>4</sup> [2.372]
引火点 (K) [引火点 (°C)]	409 [136]	362 [89]
流動点 (K) [流動点 (°C)]	283 [10]	263 [-10]
総発熱量 (Mj/kg) [総発熱量 (cal/g)]	43.2 [10320]	44.2 [10560]
残留炭素 (wt %)	19.0	0.04

#### 4 実験結果および考察

##### 4.1 液滴直径の変化

液滴燃料を高温静止空気中において自己着火させる場合に現れる液滴直径の変化と着火時期を観察した。その代表的な例をカッター材の混合割合別に図5から図7に示す。

図の縦軸はD二乗値で示し、I<sub>g</sub> は着火時期を示す。雰囲気温度は873K、973K、1073Kの三つの場合を示し、各液滴の初期直径はほぼ1.2mmのものを示す。

図5はカッター材100%の液滴直径の変化を示す。高温空気中に入った液滴は温度が上昇することにより長径

D<sub>v</sub>が減少し、短径D<sub>h</sub>が増加するため、液滴直径Dが僅かに増加する。雰囲気温度873Kの場合、液滴直径は約1秒付近で蒸発がさかんになるためなめらかに減少し、約3秒で着火し、以後直径の減少速度が大きくなる。蒸発期間と燃焼期間でD二乗法則が成立している。残さ物はほとんどない。雰囲気温度が973Kに上昇すると蒸発期間が短くなり、着火遅れが小さくなる。燃焼期間ではD二乗法則が成り立ち、その燃焼速度は873Kとほぼ等しい。雰囲気温度が1073Kに上昇すると着火遅れはさらに小さくなる。しかし、燃焼期間中に比較的沸点の低い成分が沸騰するため液滴直径が変動する。液滴直径の変化をD二乗法則に従うものとして直線で近似すると、燃

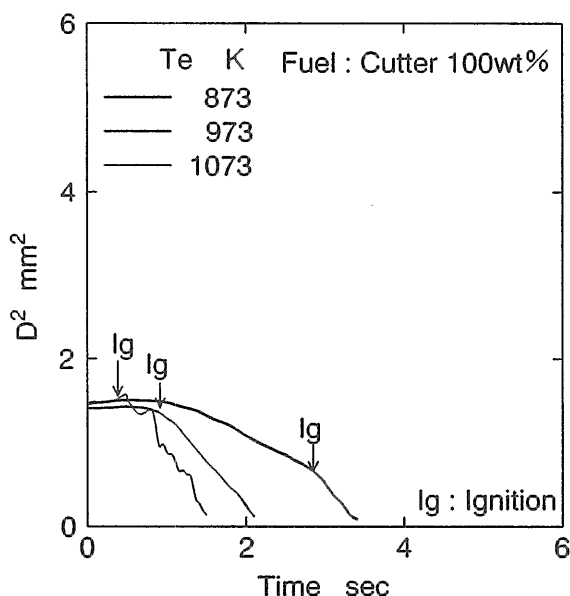


図5 液滴直径の変化

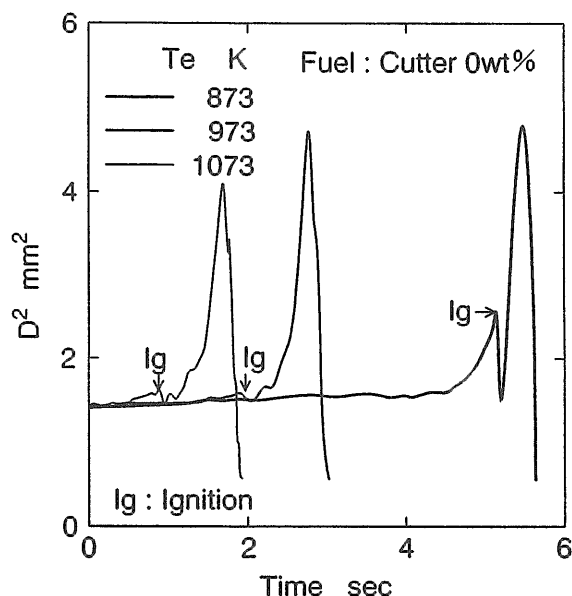


図6 液滴直径の変化

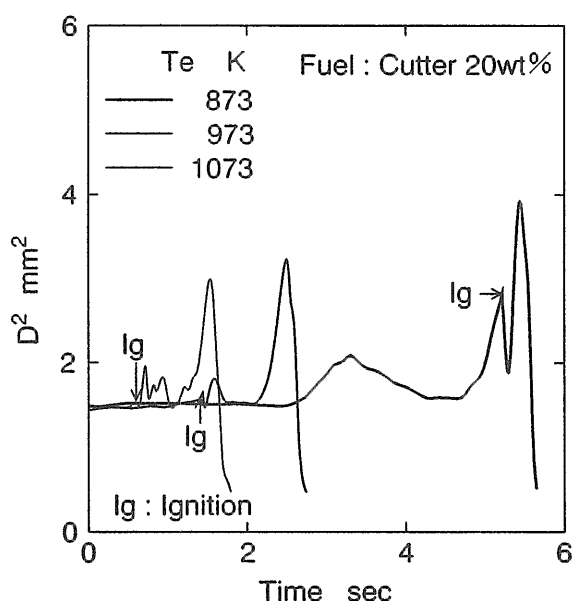


図7 液滴直径の変化

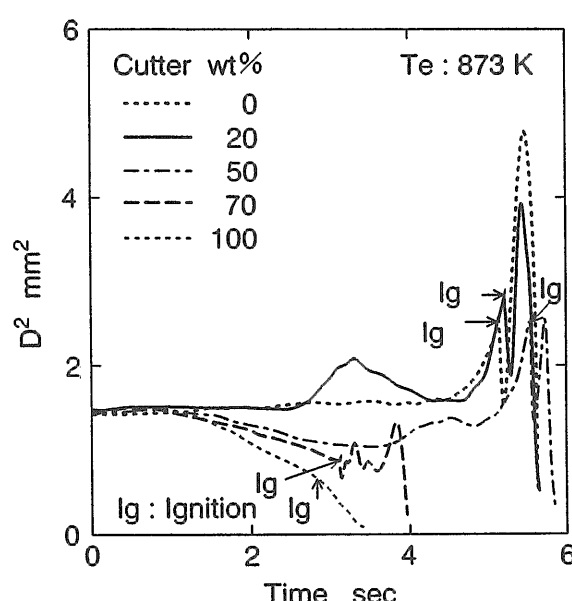


図8 液滴直径の変化

焼割合は他の雰囲気温度に比べて大きい。

図6はカッター材0%すなわち基材の液滴直径の変化を示す。雰囲気温度873Kの場合、液滴直径は約4秒付近まで一定値を示す。その後液滴直径の増加過程において着火し、急激に膨張した後に燃焼を終え、残さ物が残る。雰囲気温度が上昇するにつれて着火遅れは小さくなるが、着火後の液滴直径の変化は873Kとほぼ同様の傾向を示す。基材の場合D二乗法則は成立しない。

図7はカッター材20%の液滴直径の変化を示す。雰囲気温度873Kの場合、着火時期と燃焼末期の様子はカッター材0%のものと同様であるが、着火の前に一度膨張する現象が加わる。雰囲気温度973K以上の場合、カッター材0%のものと同様の傾向を示すが、着火遅れは小さくなり、着火直後に小さな液滴直径の変化が加わり、燃焼末期の急激な直径増加の大きさが小さくなる。

これまで見てきた着火までに示される液滴直径の変化の中で、雰囲気温度873Kのものは燃料の混合割合によって着火までの様子がかかなり異なるので、これを図8に比較して示す。カッター材50%以上では、液滴表面付近から主に低沸点成分であるカッター材が蒸発し、液滴直径は時間とともに減少する。液滴直径の減少割合はカッター材の混合割合が多いほど大きい。さらにカッター材70%以上の場合には液滴直径が減少する過程で着火し、70%のものは基材の燃焼末期の急激な膨張の一端を示す。カッター材50%以下の燃料では、カッター材の蒸発が進むと、液滴表面付近は高沸点成分の濃度が増加するために温度が上昇する。このため、液滴内部のカッター材が沸騰し、液滴表面を押し広げるにより液滴直径が増加する。この現象はカッター材20%の燃料において顕著に現れている。さらにこの現象に続いて基材中の低沸点成分が沸

騰することにより液滴直径が再度増加する状態で着火する。

## 4.2 着火遅れ

### 4.2.1 初期直径の影響

高温静止空気中において液滴の初期直径を変化させて自己着火させた時の着火遅れの変化をカッター材の混合割合別に図9から図11に示す。なお、雰囲気温度は873K、973K、1073Kの3つのケースについて示す。

図9はカッター材100%の結果を示す。着火遅れは全ての雰囲気温度において初期直径によらずほぼ一定値を示し、雰囲気温度の上昇とともに小さくなる。雰囲気温度873Kの場合、初期直径が約1.2mm以上で着火し、それ以下の液滴は着火に至らずに消滅する。雰囲気温度973Kでは、より初期直径の小さい液滴でも着火が可能となる。

図10は、カッター材が0%、つまり基材100%の燃料の結果を示す。着火遅れは初期直径に比例して増加し、その増加割合は雰囲気温度873Kで大きく973K以上ではあまり大きくない。雰囲気温度873Kの場合、初期直径が約1.0mm以上で着火が可能である。着火遅れは雰囲気温度の上昇とともに小さくなるが、カッター材100%のものと比較すると全ての温度において大きい。

図11はカッター材20%の結果を示す。雰囲気温度873Kの場合、初期直径が約1.0mm以上で着火可能であり、着火遅れは初期直径に比例して増加し、約1.4mm付近を境界としてステップ状に小さくなり、以後はほぼ一定値を示す。雰囲気温度973Kと1073Kの場合、着火遅れは初期直径とともに僅かに増加し、その値はカッター材100%より大きく、カッター材0%より小さい。

初期直径の着火遅れに及ぼす影響については、武井

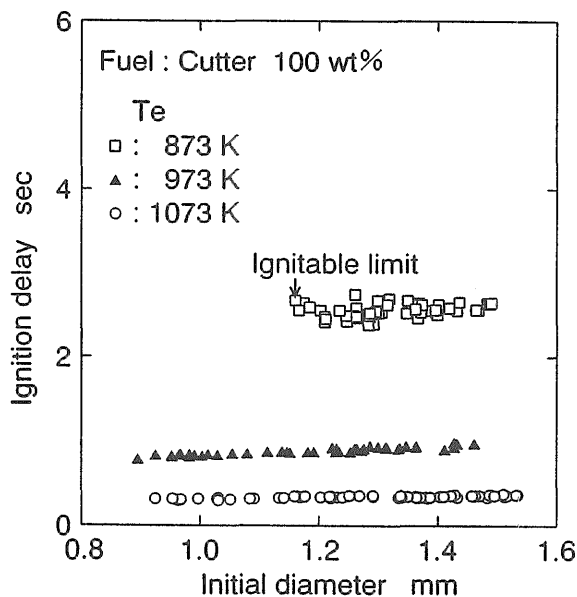


図9 初期直径と着火遅れの関係

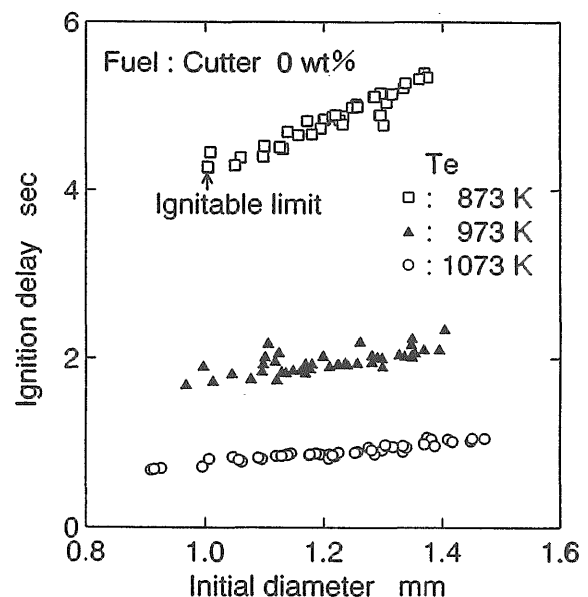


図10 初期直径と着火遅れの関係

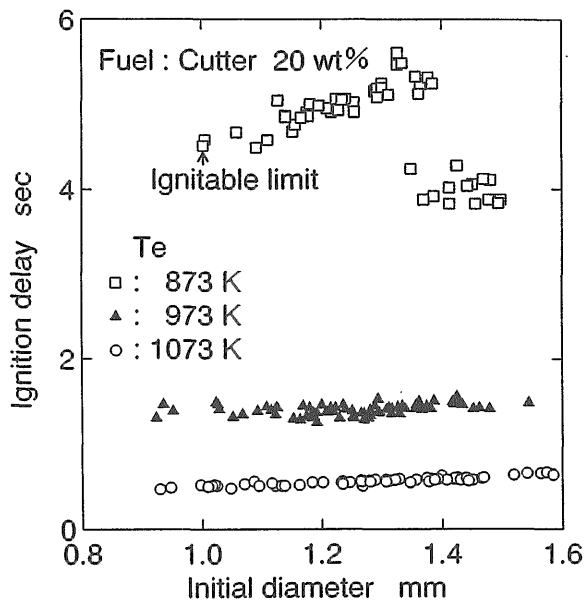


図11 初期直径と着火遅れの関係

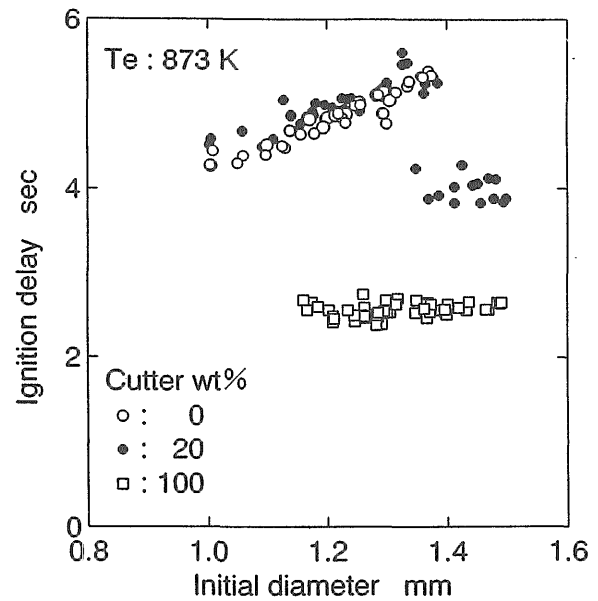


図12 初期直径と着火遅れの関係

ら<sup>10)</sup>が低沸点燃料としてn-ヘプタン (沸点371 K) を、高沸点燃料としてn-ヘキサデカン (沸点559 K) を用いて混合燃料液滴の着火実験を行い、次のように述べている。低沸点燃料の着火遅れは初期直径によって変化せず、高沸点燃料の着火遅れは初期直径に比例して大きくなる。また、混合燃料にあつては、初期直径の小さい範囲で高沸点成分の着火遅れの傾向を示し、初期直径の大きい範囲で低沸点成分の着火遅れの傾向を示すとしている。このような初期直径が着火遅れに及ぼす影響は本研究のカッター材と基材の場合においても同様である。しかし、混合燃料の着火遅れが初期直径によって2つの領域に分かれる状態は本研究では雰囲気温度873 Kの場合だけである。このことを基材 (カッター材0%) とカッター材 (100%) のものと比較して図12に示す。混合燃料の着火遅れは、初期直径が小さい側で基材のものと同様に初期直径とともに大きくなる傾向を示し、その値は基材のものに比べて僅かに大きい。初期直径の大きい側では着火遅れの値は小さくなり、カッター材100%と同様に初期直径によらず一定値を示す。他の混合割合の場合も同様の傾向を示す。

#### 4.2.2 混合割合の影響

カッター材の混合割合が着火遅れに及ぼす影響を見るために、直線近似により求めた初期直径1.2mmに相当する液滴の着火遅れの値と混合割合との関係を図13に示す。

雰囲気温度973 Kと1073 Kの場合、着火遅れはカッター材の混合割合が増加するにつれて減少するが、その減少割合は1073 Kの方が小さい。雰囲気温度873 Kの場合、基材の着火遅れを示す範囲で、着火遅れは混合割合の増

加とともにわずかに増加する。さらに、カッター材の着火遅れを示す範囲で、着火遅れはステップ状に下がり、混合割合の増加とともに穏やかに減少していく。

液滴直径の変化がD二乗法則に従う燃料の場合、その液滴直径の変化から、着火遅れはD二乗値がほぼ一定値を示す期間とD二乗値が直線的に減少する期間とに分割できる。ここで、前者を液滴表面付近がほぼ沸点と等しくなり蒸発がさかんになるまでの蒸発時間、後者を蒸発した燃料蒸気が周囲空気中の酸素と反応を開始するまでの反応時間とすると、両者は図14のように示すことが出来る。反応時間が増加すると、着火時の液滴量は減少する。

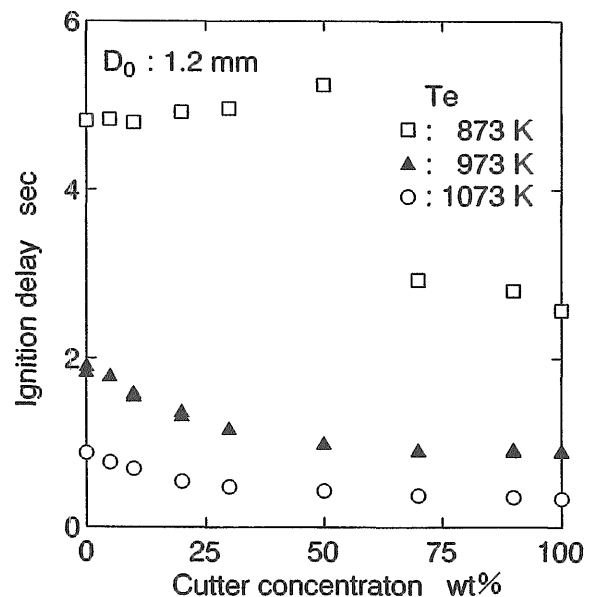


図13 混合割合と着火遅れの関係

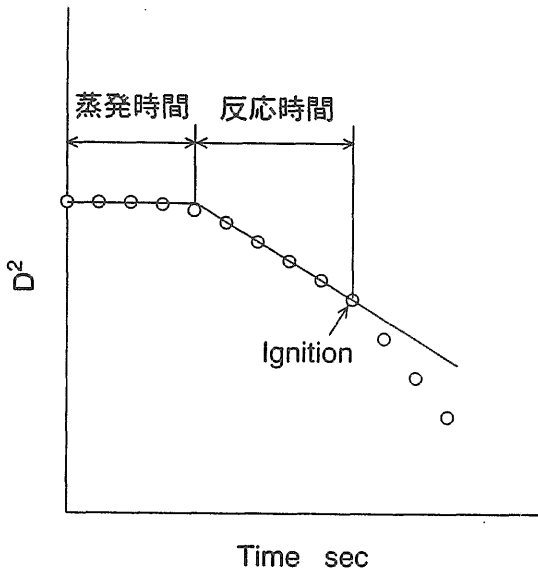


図14 着火遅れの分割

図5で示したカッター材100%の着火遅れを蒸発時間と反応時間に分割して考えると、雰囲気温度873Kの場合は着火遅れに占める反応時間の割合が大きく着火時の液滴直径が減少している。973K以上の場合は蒸発時間の割合が大きく、着火時の液滴直径はあまり変化しない。

他の混合割合で973K以上の場合、着火までの液滴直径の変化が小さく、着火遅れは蒸発時間の割合が大きいと考えられる。873Kの場合は、着火までの液滴直径の変化は複雑で蒸発時間と反応時間の関係は明瞭ではない。

以上考えたように、雰囲気温度873Kと973K以上とでは、着火遅れに及ぼす要因が異なるため、図13で示す混合割合と着火遅れの関係が異なる傾向を示すと考える。

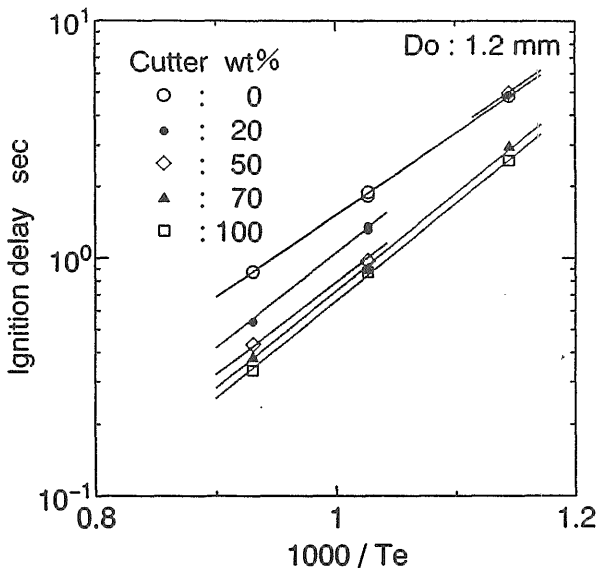


図15 雰囲気温度と着火遅れの関係

#### 4.2.3 雰囲気温度の影響

着火遅れに対する雰囲気温度の影響を示すため、初期直径1.2mmの液滴の着火遅れの対数を縦軸にとり、雰囲気温度の逆数を横軸にとってアレニウス表示した結果を図15に示す。この表示法により、雰囲気温度873Kでカッター材20%と50%の値を除くと、雰囲気温度と着火遅れの関係は直線で表すことが出来る。そして、混合燃料の着火遅れは基材とカッター材のその範囲内にある。

雰囲気温度873Kでカッター材50%以下の混合燃料の場合、着火遅れは基材のそれより大きく、液滴の着火過程が他の着火遅れの場合と異なることが理解できる。

#### 4.2.4. 高温流動空気中の着火遅れ

これまでに、雰囲気温度873Kにおいて、着火遅れが初期直径により異なる傾向を示すことを述べてきた。この結果に関し、蒸発した燃料蒸気は周囲雰囲気より密度が大きいため液滴下方に移動し、燃焼室の壁面で加熱されて着火する可能性も考えられる。本研究の結果がこのような現象を含まないことを確認するため、高温流動空気中において初期直径を変えた混合燃料の着火実験を行った。流速0.6m/s、雰囲気温度1048K、カッター材20%の結果を図16に示す。着火遅れは静止空気中で雰囲気温度873Kにおける混合燃料の場合と同様に、初期直径が約1.3mm付近を境界とし、これ以下の範囲において基材による着火遅れの傾向を示し、これ以上の範囲においてカッター材による着火遅れの傾向を示す。しかし、流動空気中の場合、蒸発した燃料蒸気が下流に吹き流されて拡散するため、反応時間が小さいことが必要となり、この現象が現れる雰囲気温度は静止空気中と比較して高い。

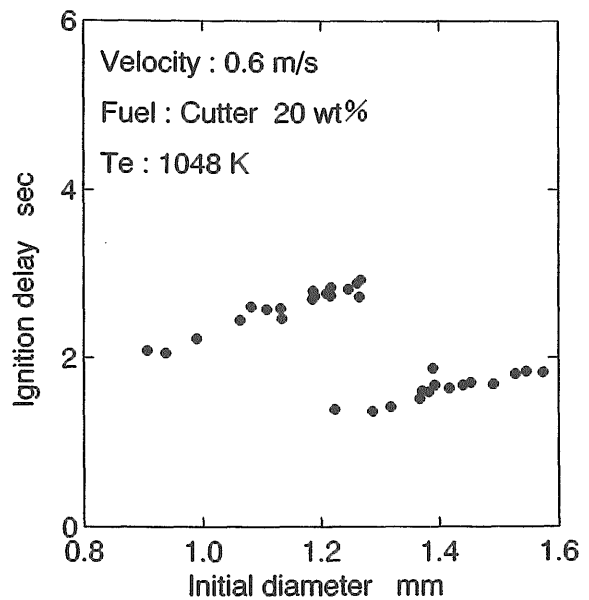


図16 高温流動空気中における初期直径と着火遅れの関係



4.3 燃焼時間

4.3.1 初期直径の影響

液滴が着火してから燃焼を終了するまでの燃焼時間と初期直径 $D_0$ の二乗値との関係を混合割合別に図17から図19に示す。

図17はカッター材100%の結果を示す。各雰囲気温度において、燃焼時間は初期直径の二乗値に比例して増加し、雰囲気温度873Kで最も短い。雰囲気温度が873Kから973Kに上昇すると燃焼時間は増加するが、雰囲気温度が973Kから1073Kに上昇すると燃焼時間は減少する。

図18は基材(カッター材0%)の結果を示す。カッター材100%(図17)と同様に、燃焼時間は初期直径の二乗値に比例して増加し、雰囲気温度873Kで最も短い。雰囲気温度が937Kに上昇すると燃焼時間は増加するが、雰囲気温度が973Kから1073Kに上昇しても燃焼時間はほとんど増加しない。

図19はカッター材20%の結果を示す。雰囲気温度873Kの場合、燃焼時間は初期直径の二乗値に比例して増加するが1.8mm付近でステップ状に長時間側に变化する。これは図11で示した着火遅れの変化に対応する。雰囲気

温度が973Kに上昇すると、燃焼時間は増加するが、973Kから1073Kに上昇しても基材の場合(図18)と同様にほとんど増加しない。他の混合割合においても、燃焼時間と初期直径の関係は図19と同様の結果が得られた。

4.3.2 混合割合の影響

カッター材の混合割合が燃焼時間に及ぼす影響を見るために、直線近似により求めた初期直径1.2mmにおけるカッター材の混合割合と燃焼時間との関係を図20に示す。雰囲気温度873Kの場合、カッター材50%以下の範囲において混合割合が増すにつれて燃焼時間は減少するが、70%以上の範囲ではほぼ一定値を示す。雰囲気温度973Kと1073Kの場合、燃焼時間はほぼ等しく、カッター材30%以下の範囲において混合割合が増すにつれて増加し、30%以上ではほぼ一定値を示す。

雰囲気温度873Kの燃焼時間は着火遅れと関係する。すなわち、空気温度が低い場合、着火遅れは反応時間が支配的となり、着火遅れの増大とともに着火時の液滴量が減少するため、燃焼時間が小さくなる。このことは、カッター材50%以下の燃焼時間が混合割合の増大につれ

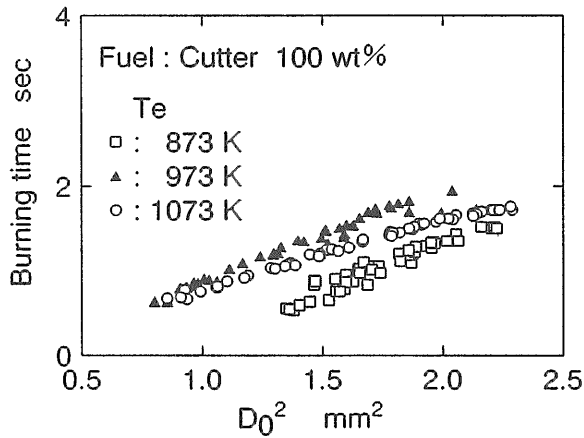


図17 初期直径の二乗値と燃焼時間の関係

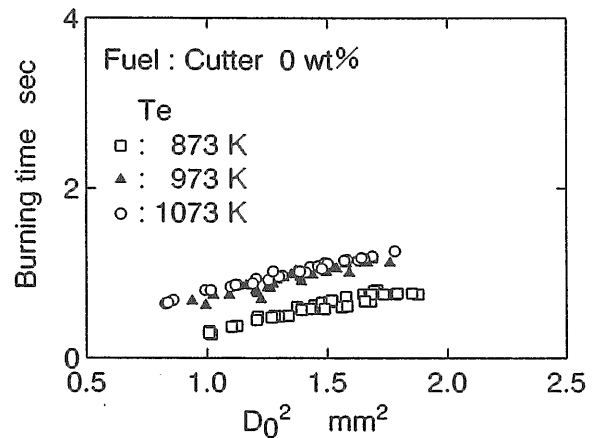


図18 初期直径の二乗値と燃焼時間の関係

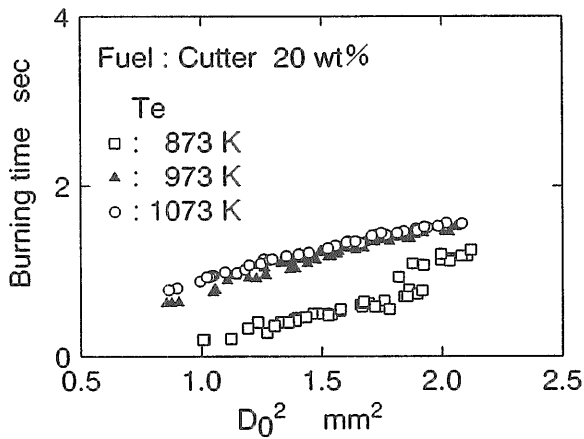


図19 初期直径の二乗値と燃焼時間の関係

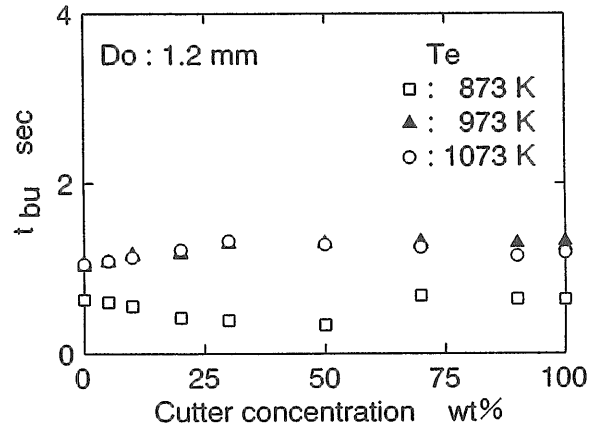


図20 混合割合と燃焼時間の関係