

三成分燃料液滴の燃焼挙動に関する研究

池田光優^{*1} 今村 剛^{*2} 井上梨絵^{*3}

A Study on Combustion Characteristics for Ternary Fuel Droplets

Mitsumasa IKEDA ^{*1}, Tsuyoshi IMAMURA ^{*2} and Rie INOUE ^{*3}

Abstract

The microexplosion in the liquid fuel mixture has a possibility of the secondary atomization. The microexplosion occurs following the homogeneous bubble nucleation and expansion inside the droplet. The microexplosion has stochastic characteristics. The objective of this research was to investigate the microexplosion occurrence in combustion of ternary fuel droplets. In these experiments, *n*-hexane, *n*-decane, *n*-hexadecane were used. For 0.6-0.9 of the initial hexane mole fraction, the combustion droplets for the ternary fuel had high occurrence probability of the microexplosion. The microexplosion occurrence probability for using ternary fuel is higher than one that for using binary fuel.

Key Words : Ternary Fuel Droplets, Combustion Characteristics, Microexplosion Occurrence

1. はじめに

噴霧燃焼は微細化された燃料液滴の蒸発によって行われることから、燃焼場全体の当量比が1を大きく下回る領域でも燃焼を行うことができるため高効率な燃焼である⁽¹⁾。このため実用機関である内燃機関やガスタービン機関、ボイラなどは噴霧燃焼が多く用いられている。しかし近年の環境問題の観点から噴霧燃焼の燃焼改善が急務となっている。著者らは以前ディーゼルエンジンの主燃料である軽油に副燃料を液体の状態に混入した燃料を噴射し、実機レベルでの燃焼改善の効果を報告している⁽²⁾。この研究は内燃機関の排気ガス低減についての調査が主であり、エンジン内の噴霧燃焼についての詳細な調査は行っていない。噴霧燃焼の燃焼機構は、微小液滴群の燃焼であることから非常に複雑なものである。そこでまず、単一液滴について燃焼挙動を調査することが有効となる。また沸点の大きく異なる燃料を混合させた燃料を用いた場合、液滴燃焼は単一成分燃料液滴の場合とは異なり、図1に示すような微小爆発という現象が発生する。この微小爆発は燃焼中に液滴が破裂し、燃焼液滴が広範囲に分布する現象である。

この現象は液滴の二次微粒化に役立ち、前述した排気特性の改善要因の一つになっていることが予想される。しかし、

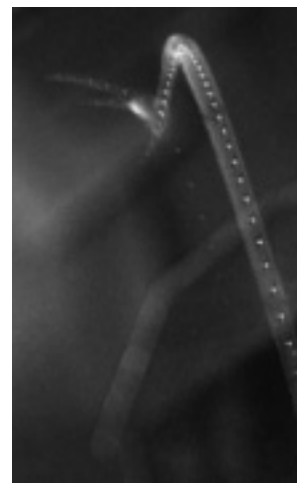


Fig.1 Microexplosion

^{*1} 機械電気工学科

^{*2} 日新製鋼株式会社

^{*3} マツダ株式会社

この微小爆発の発生特性は確率的なものであり、燃料液滴の成分、それらの混合割合などに大きく依存していることが分かっている⁽⁴⁾⁽⁷⁾。このことから微小爆発の発生機構は非常に複雑なものであり、現在多くの研究が行われている⁽¹⁾⁽⁶⁾。特に三上らは、均質核生成理論に基づいた微小爆発の確率的発生モデルを提示し、微小爆発の発生確率の予測式を導いた⁽⁴⁾。しかしながら、本来軽油などの実用燃料は多成分燃料であるので、軽油にLPG等の副燃料を混入させた場合を二成分燃料と仮定するには多くの仮定を用いる必要がある。そこで軽油を二成分からなる多成分燃料と仮定して、その燃料に高揮発成分燃料を混合させた場合を考えると、副燃料混入軽油は三成分燃料としてモデル化できる。そこで本研究では、三成分燃料液滴の燃焼について調査を行うことを目的とした。

2. 実験装置および実験方法

本研究では、多成分燃料液滴の燃焼の時間変化、および微小爆発の発生傾向を調査するために懸垂線を用いた実験と用いない実験を行った。図 2(a)に懸垂線を用いた場合、図 2(b)に懸垂線を用いない場合の実験装置の概略図をそれぞれ示す。

懸垂線を用いた実験では、図 2(a)において、液滴は懸垂線に保持された後、電気加熱された電熱線によって点火される。CCD カメラ 1 で液滴の燃焼挙動を撮影し、火炎長さの時間変化を記録した。また CCD カメラ 2 で液滴を接写し、液滴直径の時間変化も同時に記録した。

懸垂線を用いない実験では、図 2(b)において、燃料供給装置から供給された燃料は、液滴放出装置の内径 0.2mm のステンレス管から打ち出され自由液滴となる。打ち上げられた液滴は、電気加熱された熱線によって加熱され、燃焼液滴となって放出される。このとき、ストロボスコープを用いて 300Hz

の光を照射し、燃焼挙動とともに 1/300sec 毎の液滴像を CCD カメラ 1 で記録した。記録された画像における液滴の数を数えることで液滴の時間的な燃焼挙動を観察した。また、熱線を通じた直後の液滴に側方から光を照射し、それをシャッターを開放した CCD カメラ 2 によって撮影し、初期液滴直径を測定した。

本実験では液滴を打ち上げ、その液滴の燃焼挙動を CCD カメラ 1 を用いて記録し、その画像データから微小爆発の発生確率などを求めている。したがって、打ち上げられた液滴は、その点火から燃焼終了または微小爆発の発生までの全行程において CCD カメラの視野範囲内に存在しなければならない。実際の実験において、CCD カメラの視野範囲外へ飛び出す液滴が多数確認された。また、視野範囲内で微小爆発した液滴においても、仮に微小爆発を起こさずに燃焼が継続された場合、視野範囲内で燃え尽きない可能性がある。さらに実験毎で撮影条件が異なる。そのため、撮影条件を同等にする必要がある。そこで、CCD カメラの視野範囲に対する実験データとして扱うことが出来る液滴の初期液滴直径と打ち上げ初速度の関係から実験データに成り得る範囲を定めた。図 3 に液滴の初期直径と打ち上げ初速度の関係を示す。この図において燃焼時間が初期液滴直径の二乗に比例することから、燃焼時間と打ち上げ初速度の関係から上限、下限値の曲線部を決定した。また CCD カメラの視野範囲の高さ方向の距離から上限値の直線部分を決定した。図中の実線は初速度の上限値を、破線は下限値をそれぞれ表している。実験後初期液滴直径と打ち上げ初速度を測定、図 3 にプロットし、図中の範囲外の実験データは削除し解析を行った。

本研究では燃料として、*n*-アルカンから成る混和性燃料である *n*-hexane (ヘキサン)、*n*-decane (デカン)、*n*-hexadecane (ヘキサデカン) を使用した。各燃料はそれぞれ特級試薬を

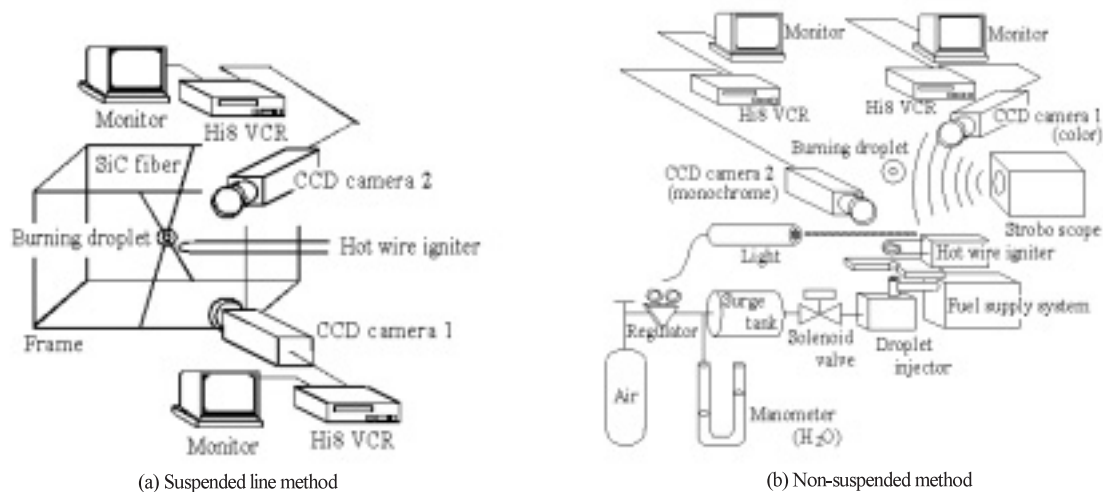


Fig.2 Experimental setup

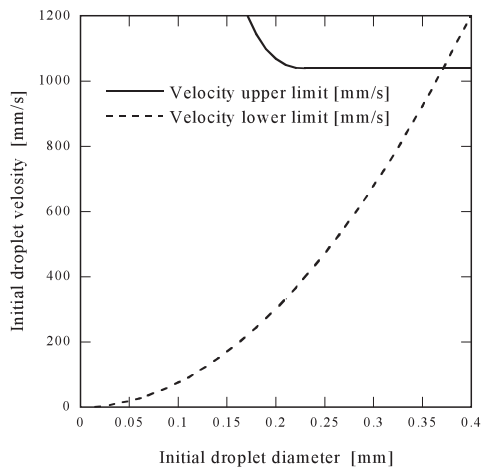


Fig.3 Data range

Table 1 Fuel specifications

Fuel	Molecular weight (g/mole)	Specific gravity (-)	Boiling point (K)	Superheat limit (K)
<i>n</i> -hexane	86.178	0.660	341.33	457
<i>n</i> -decane	142.286	0.730	447.00	555
<i>n</i> -hexadecane	226.448	0.770	560.00	659

使用した。使用燃料の物性値を表 1 に示す。他成分燃料を使用した場合、微小爆発の発生の基となる気泡核の生成には、高揮発成分であるヘキサンが関係すると考えられている⁽¹⁾⁽⁴⁾。そこで両実験ともデカンとヘキサデカンの割合を同一とし、ヘキサンの体積割合を変化させた。その体積比は、ヘキサン/デカン/ヘキサデカン=0.4/0.3/0.3 (ヘキサンモル分率 $x=0.545$)、0.6/0.2/0.2 ($x=0.729$)、0.8/0.1/0.1 ($x=0.878$)、0.84/0.08/0.08 ($x=0.904$)、0.9/0.05/0.05 ($x=0.942$) とした。これらの燃料中に既存気泡、容存気体または堅い微粒子が混入している場合、それらは微小爆発の発生に影響を及ぼすと考えられる。そこで、各燃料に以下の処理を行った。まず、各単一成分燃料に沸騰処理を行い、既存気泡と容存気体を除去した。その後、気泡が発生しないように細心の注意を払って静かに混合し、濾過処理を行って実験を行った。

また、懸垂線を用いた方法、懸垂線を用いない方法の両実験において通常重力場、周囲気体は常温、常圧 (101.3 ± 10kPa, 293 ± 3K) の空気の下で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 三成分燃料液滴の火炎長さの時間変化

多成分燃料液滴において、燃焼の特徴の一つに火炎長さが増加する段階燃焼がある。そこで懸垂線を用いた方法から火炎長さの時間変化について調査を行った。図 4 に得られた結果を示す。横軸は正規化時間 t/d_0^2 、縦軸は火炎長さ D/d_0 であ

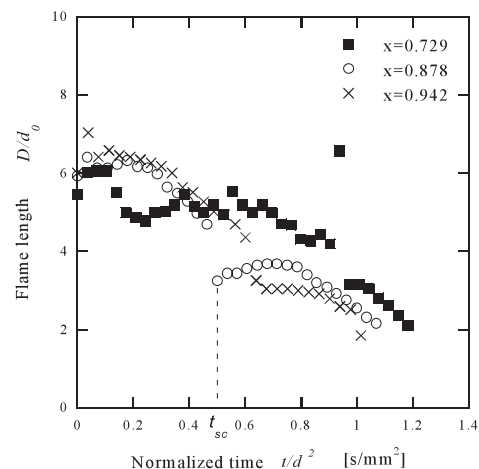


Fig.4 Flame length vs. Normalized time t/d_0^2

る。図中のプロットは、■が $x=0.729$ 、○が $x=0.878$ 、×が $x=0.942$ である。このグラフから三成分燃料の場合においても二成分燃料の場合と同じように段階燃焼が観察されることが分かる。ここで、火炎長さの減少傾向が変化する点を t_{sc} とすると、燃料の混合割合の違いによって t_{sc} が異なっている。これは、燃焼中に優先的に蒸発・燃焼する高揮発成分燃料であるヘキサンの混合割合が高い場合の方が、低揮発成分燃料であるデカン、ヘキサデカンが蒸発・燃焼するまでの時間が長くなるためである。

また三成分燃料の場合においては、蒸発がヘキサンからデカンに代わる時とデカンからヘキサデカンに代わる時にそれぞれ段階燃焼が起こるため、 t_{sc} が 2 回の段階燃焼が観察されると予想される。しかし、今回実験したすべての混入割合で t_{sc} は 1 度しか観察されなかった。これは、ヘキサンとヘキサデカンの沸点差よりデカンとヘキサデカンの沸点差が小さいために、ヘキサデカンが蒸発する前の液滴温度上昇期間が短くなったためであると考えられる。

3.2 三成分燃料液滴における微小爆発の発生

次に、三成分燃料液滴の燃焼における微小爆発について調査を行った。微小爆発について調査を行う場合、懸垂線を用いると微小爆発の発生要因である気泡核の生成が懸垂線によるものなのかどうか判断できない。そこで以降においては、実験は懸垂線を用いない方法で行った。その結果、三成分燃料を用いた場合でも図 1 に示したような微小爆発が観察された。そこでまず、初期液滴直径 d_0 が微小爆発発生確率 P_{ME} に及ぼす影響について調査を行った。図 5 に三成分燃料における各混合割合での初期液滴直径に対する P_{ME} を示す。図中のプロットは、△が $x=0.545$ 、○が $x=0.729$ 、◇が $x=0.878$ 、▽が $x=0.942$ である。またプロット点には、 P_{ME} に不確かさが存在することから、平均誤差による誤差棒を付記した。この図か

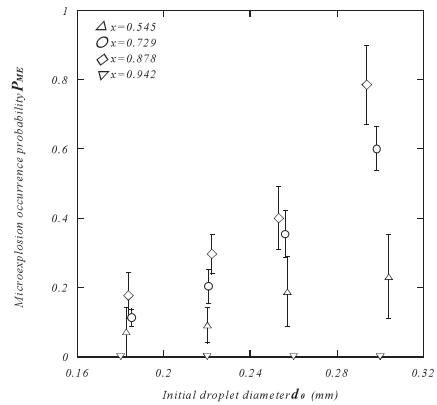


Fig.5 Microexplosion occurrence probability P_{ME} vs. Initial droplet diameter d_0

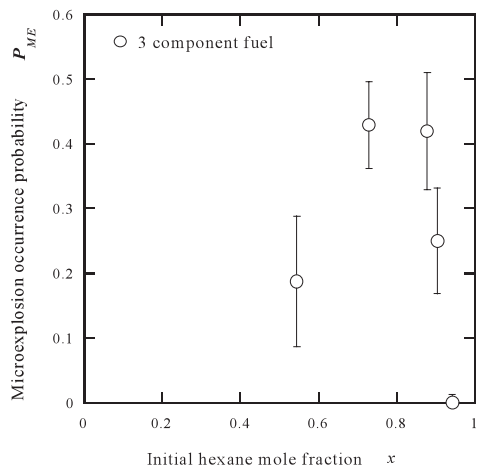


Fig.6 P_{ME} vs. Initial hexane mole fraction x

いずれの体積割合においても d_0 の増加に伴い、 P_{ME} が高くなることから、これは d_0 の増加に伴い、液滴容積が増加することから、微小爆発の発生原因である気泡核が生成されやすくなるためである。しかしながら今回の実験では、三成分燃料を用いた場合、 d_0 が 0.28-0.32mm の範囲では液滴のサンプル数が少なく結果の信頼性が若干欠けている。そこで以後は、液滴サンプル数の多い d_0 が 0.24-0.28mm の範囲について論じる。

次に図 6 に三成分燃料を用いた場合の初期ヘキサンモル分率 x に対する P_{ME} を示す。この図において三成分燃料を用いた場合、 x が 0.6-0.9 の範囲で微小爆発の発生確率が高い値を示している。また、微小爆発の発生確率は x が 0.6-0.8 付近の場合に最大値をとっている。これらの傾向は、二成分燃料を用いた場合と類似しており、得られた結果を二成分燃料液滴を用いた場合を参考にして考察する。

二成分燃料液滴の P_{ME} がある初期組成で最大値をとることは以下のように説明される。三上らによれば⁴⁾、 P_{ME} は過熱液

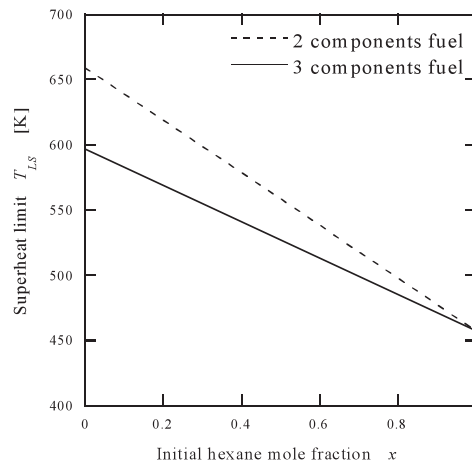


Fig.7 Superheat limit T_{LS} vs. x

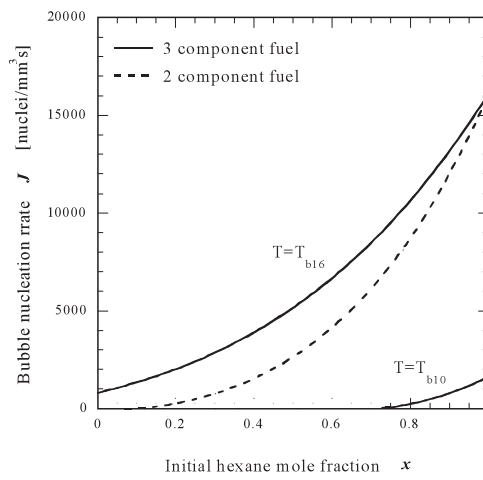


Fig.8 Bubble nucleation rate J vs. x

相の存在時間 t_v と気泡核生成時間 t_n との比 Γ によって決まり、

$$P_{ME} = 1 - \exp(-\Gamma) \quad (1)$$

で表されるとしている。この無次元数 Γ は気泡核生成率 J に比例し、過熱開始時の液滴直径 d_T (または過熱時の平均直径) の 5 乗に比例する量である。三上らは、過熱限界温度 T_{LS} と液滴温度 T_d の逆数の差が大きくなると J が高くなると報告している⁴⁾。そこで図 7、図 8 に初期ヘキサンモル分率に対する T_{LS} と J をそれぞれ示す。図 7 において $x=0$ の時のそれぞれの値は、二成分燃料を用いた場合はヘキサデカンの過熱限界温度を、三成分燃料を用いた場合はデカンおよびヘキサデカンの過熱限界温度の平均値としている。図 7、図 8 に示されるように、ヘキサンの混合割合が高くなると T_{LS} が低下しており、 J が高くなっている。一方、 d_T は初期ヘキサン濃度が高いほど小さくなると考えられる。これらの影響により、 P_{ME} はある x で最大値をとると考えられる。図 6 において三成分燃料を用いた場合においても P_{ME} に最大値が現れたのは、二成分燃料を用いた場合と同様の理由によるものと考えられる。

3.3 微小爆発の発生の時間的傾向

微小爆発の発生の傾向はその発生時間にも依存している。発生時間が長い混合割合の液滴の場合、微小爆発が発生する前に吹き消えなどによって燃焼が終了する場合があるからである。そこで微小爆発の発生時間について調査を行った。図9に微小爆発の発生時間 t_e を d_0 の2乗で割った正規化時間に対する P_{ME} を示す。図中のプロットは●が $x=0.878$ の場合を、■が $x=0.729$ の場合を、▲が $x=0.545$ の場合をそれぞれ示している。この図から燃料の混合割合によって微小爆発の発生する時間帯が異なることがわかる。

ここで P_{ME} の高い $x=0.729, 0.878$ の場合について比較、検討を行う。まず図9から時間経過に対する微小爆発の発生頻度を求めた。その結果を図10に示す。この図において x が0.729と0.878の場合を比較すると、 $x=0.729$ の場合は早い時間帯、 $x=0.878$ の場合は遅い時間帯に微小爆発が発生している。これは以下のように説明できる。微小爆発の発生には先述した段階燃焼が深く関係していると考えられる。微小爆発は、燃焼が進行し、ヘキサンの蒸発量が低下し、火炎長さの減少傾向が変化した後に発生しやすい。これは、燃焼後期においてデカン、ヘキサデカンが蒸発している時間帯に液滴内部に残留しているヘキサンが過熱され、液滴内部で気泡核となり発生する機構を有しているためである。先述したように図4からヘキサンの量が増加するのに従い、火炎直径が減少する時間が遅くなっていることから分かる。このため、ヘキサンの量が増加するのに従い、微小爆発発生時間は遅れることになる。したがって、 $x=0.878$ の場合の方が、遅い時間帯に微小爆発が発生したと考えられる。

3.4 二成分燃料液滴と三成分燃料液滴との比較

3.1-3.3で述べたことから、三成分燃料を用いた場合においても、微小爆発は基本的には二成分燃料を用いた場合と同様の機構によって発生すると言える。しかし今回用いた三成分燃料は、二成分燃料におけるヘキサデカンの半分の量をデカンで置き換えたものである。デカンは、ヘキサンとヘキサデカンの中間の揮発性を有する燃料である。このため微小爆発がもっとも発生しやすいと考えられるヘキサデカンが蒸発している液滴過熱時間、および過熱時の液滴直径は二成分燃料を用いた場合の方が長く、大きいと考えられる。したがって、 P_{ME} は二成分燃料を用いた場合の方が高いと予想される。

そこで、二成分燃料を用いた場合と三成分燃料を用いた場合において P_{ME} を比較してみた。得られた結果を図11に示す。この図は三成分燃料を用いた場合は図7と同じ値を、二成分燃料を用いた場合は三上らの結果において $h(1-P_{ME})$ が d_0 の5乗に比例すると仮定して $d_0=0.26\text{mm}$ における P_{ME} に補正した値をそれぞれ用いている。なお、プロットの▼は前田らの

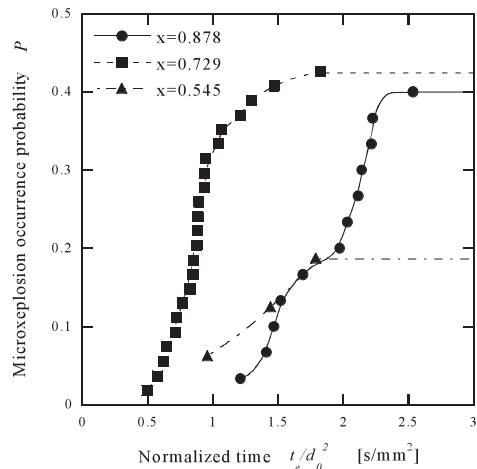


Fig. 9 Microexplosion occurrence probability P vs. Normalization time t_e/d_0^2

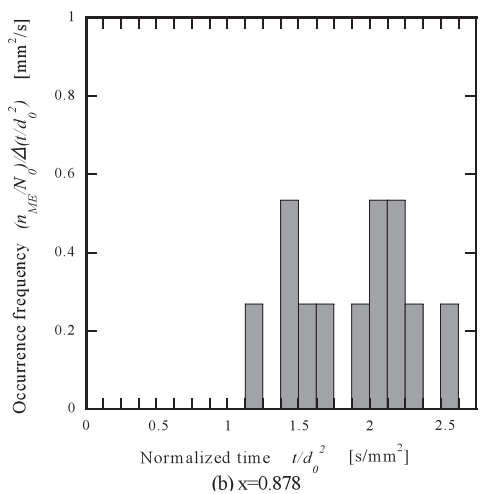
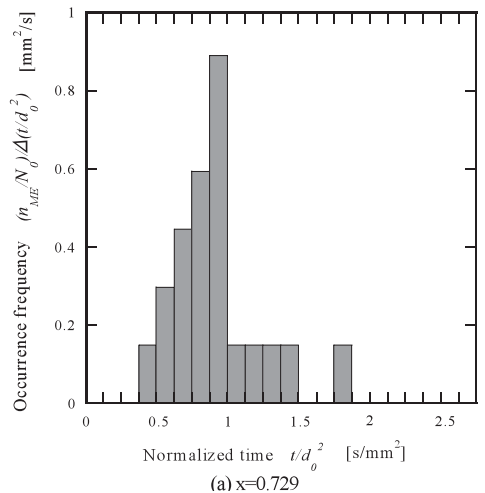
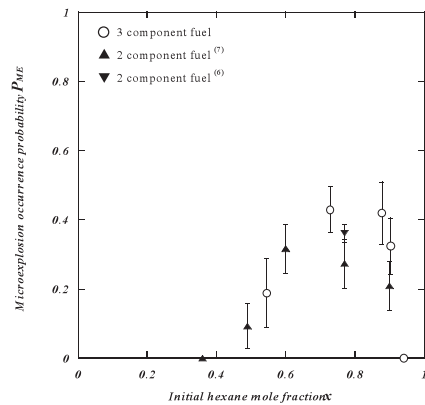


Fig. 10 Microexplosion occurrence frequency $(n_{ME}/N_0)/\Delta(t/d_0^2)$ vs. Normalized time t/d_0^2

Fig.11 P_{ME} vs. x

$d_0=0.26\text{mm}$ の実験値⁷⁾を参考値として加えている。この図から二成分燃料を用いた場合と三成分燃料を用いた場合の P_{ME} を比較すると、先述した予想に反して三成分燃料を用いた場合の方が P_{ME} が高い値を示しているのが分かる。これは、気泡核生成率 J の違いから考察できる。図 8 には三成分燃料を用いた場合の J だけでなく二成分燃料を用いた場合の J も記しているが、これより、 J は三成分燃料を用いた場合の方が高い値を示している。また、三成分燃料の場合は、ヘキサンの量が多くなると、ヘキサンとデカンの沸点の関係から、液滴温度がデカンの沸点の場合においても気泡核が生成されるようになる。これらのことから、三成分燃料を用いた場合は、二成分燃料を用いた場合より液滴の過熱時間は短くなるものの、 J 自体は高くなる。したがって、三成分燃料を用いた場合、液滴の過熱時間と気泡核生成率の影響を比較すると、気泡核生成率の影響が微小爆発に強く影響を与えたといえる。

4. まとめ

本研究では、多成分燃料による噴霧燃焼の基礎研究として三成分燃料液滴の燃焼について調査を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 三成分燃料液滴の燃焼においても、二成分燃料を用いた場合同様に段階燃焼が起こる。
- (2) 三成分燃料を用いた場合においても、微小爆発発生確率は液滴の初期直径に比例する。
- (3) 三成分燃料を用いた場合、ヘキサンの初期モル分率が 0.6-0.9 の範囲において微小爆発発生確率が高い値を示す。
- (4) 三成分燃料を用いた場合、初期ヘキサンモル分率が増加すると微小爆発の発生時間が遅れる。
- (5) 三成分燃料を用いた場合、二成分燃料を用いた場合より微小爆発発生確率が若干高い値を示す。
- (6) 三成分燃料液滴の燃焼挙動を二成分燃料を用いた場合と同様の考察から理解することができた。

参考文献

- (1) Lasheras, J. C., et al., *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 22, (1980), pp.195-209.
- (2) Nioka, T. and Sato, J., *Proc. Combust. Institute*, Vol. 21, (1986), pp.625-631.
- (3) 山崎,津江,角田,機論,58-546,B,(1992),pp.582-586.
- (4) 三上,八木,小嶋,機論,64-624,B,(1998),pp.2690-2696.
- (5) 橋本,三上,小嶋,第 36 回燃焼シンポジウム, (1998), pp.584-586.
- (6) Mikami, M., Hashimoto, H. and Kojima, N., ASPACC99, (1999), pp.323-326.
- (7) 前田,三上,小嶋,第 38 回燃焼シンポジウム, (2000), pp.195-196.
- (8) 池田,三上,小嶋,機論,B,66-649,(1998),pp.2507-2512.

(2002. 9. 5 受理)