

無重力状態下でのO/W形エマルジョン燃料滴
の燃焼に関する実験的研究

木村, 治世 / YAMAGUCHI, Shuji / KIMURA, Haruyo / OKAJIMA,
Satoshi / 山口, 修次 / 岡島, 敏

(出版者 / Publisher)

社団法人日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

日本機械学会論文集. B編

(号 / Number)

455

(開始ページ / Start Page)

1769

(終了ページ / End Page)

1775

(発行年 / Year)

1984-07-25

日本機械学会論文集(B編)
50巻455号(昭59-7)

無重力状態下でのO/W形エマルジョン燃料滴の 燃焼に関する実験的研究*

岡島 敏**, 木村 治世***, 山口 修次**
Satoshi OKAJIMA, Haruyo KIMURA, Shuji YAMAGUCHI

Key Words : Droplet Combustion, Zero Gravity, Emulsified Fuel Droplet, Micro-Explosion, Spherical Combustion, Burning Rate Constant

1. 緒 言

最近、特に有限の地球、有限の資源という概念が固定化されつつあるなかで、エネルギーの節約とか燃料の経済性が重視されるようになり、さらに燃料燃焼の安全性や低公害性が問われている。その中で燃料の有効利用に関する一つの手段として、石油系燃料のエマルジョン化が注目されるようになってきている。エマルジョン燃料では、その噴霧滴の燃焼過程において、水蒸気の吹出し(Puffing)、マイクロ爆発(Micro-explosion)とか分裂(Disruption)と呼ばれる二次微粒化現象が生じ、それが燃料と空気との混合状態を促進するため、すすや未燃炭化水素の発生を抑制して、さらに燃焼効率を向上させると考えられており、すでにボイラやディーゼル機関など、燃料直噴形の燃焼器で実用化の域にも達してきている。しかし、二次微粒化現象を含むその燃焼過程は、純粋燃料の単一液滴のそれと比較して、きわめて複雑であり、その基本的性質を正確に把握することは著しく困難である。また、現在応用の主流である油中水滴(W/O)形エマルジョン燃料についても、燃焼性の見地から、水中油滴(O/W)形エマルジョン燃料と比較して、その相違あるいは得失もいまだに明確になっていないようである⁽¹⁾。

実際の燃料噴霧の燃焼において、その噴霧を構成している燃料液滴の直径は、燃料の種類とか霧化の方法によって異なるけれども、一般には数十から数百 μm 程度であり、それらの液滴個々の燃焼過程を微視的に観察すれば、それらに及ぼす自然対流の影響はほとんど無視できることが知られている。そこで噴霧火炎を

構成しているような微小液滴について、その最も基本的な性質を実験技術上の問題から直径1mm程度の比較的大きな液滴で解明するためには自然対流の影響を受けない無重力状態下でそれらの燃焼を観察することが必要である⁽²⁾⁽³⁾。

これらの観点にたつて、まず最初に著者らはO/W形エマルジョン燃料滴の燃焼に関する基本的性質を把握するために、自由落下する燃焼容器中の無重力状態のもとで、 $C_7\sim C_{16}$ の一連のパラフィン族炭化水素燃料を用いて、その球状燃焼を実現し、35mm連続拡大写真によって燃焼挙動を詳細に観測して、二次微粒化機構、液滴直径の時間的変化、あるいは見掛けの燃焼速度定数などを調べ、さらにそれらの現象をよりよく理解するために標準重力状態下で得られた結果と比較、検討も行った。

2. 実験装置および方法

無重力状態のもとでエマルジョン燃料滴の燃焼挙動を観察するために、本研究では自由落下法が用いられる。図1に落下塔の概略を示す。この塔の高さは5m、横断面は800mm \times 1000mmの長方形で、その上部には、ポリプロピレンリボンによってつり下げられた落下装置本体および抵抗遮断箱を落下させるための切断機が装備されており、下端にはそれらの落下の際の衝撃を吸収するために、高さ0.5mのクッションが配してある。この塔で約0.9sの無重力状態が達成できる。

落下装置本体(図2)は360mm \times 500mm \times 340mmの直方体の鋼製箱で、その中には、燃焼室、点火装置、シュリーレン光学系、35mmカメラユニット、およびフィルム巻き取り用小形誘導電動機などが搭載されており、その装備重量は約40kgである。また、落下装置本体は、落下中に受ける空気抵抗による落下加速度

* 昭和58年6月19日 北陸信越支部北陸地方講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和58年2月23日。

** 正員、法政大学工学部(〒184 小金井市梶野町3-7-2)。

*** 学生員、法政大学工学部。

の減少を防ぐために、抵抗遮断箱の中に入れて落下させられる⁽³⁾。

燃焼室(図3)は110 mm×120 mm×130 mmのアルミニウム製の箱で、その中には、凹面鏡(曲率半径125 mm)がその中心を光軸に合わせて設置されており、鏡面前方30 mmの所に、液滴懸垂用石英糸(直径0.2 mm, 長さ35 mm)が鉛直に、かつ先端がほぼ光軸と一致するように固定されている。エマルジョン燃料滴は、通常、火花での着火は難しいので、その点火は液滴直下に設置された直径約0.2 mm, 長さ4 mmのタングステンフィラメントに無重力状態が開始される

と同時に電流を通じて、それを加熱、融解することによって行われる。電流を通じてから点火までの時間は約20 msである。

光学系(図4)は、凹面鏡、半透明鏡、超高圧水銀燈、ナイフエッジ、および35 mmカメラユニットなどから構成されており、かつ二重像が出現しないように配置に工夫が施されている。また、ナイフエッジ直後に回転速度50~100 rpsまで制御できる円板形チョッパーが設けられており、写真のこま撮りを可能にし、液滴の挙動を正確に把握できるようになっている⁽⁴⁾。

図5はこの装置の全制御系を示す。実験に際して、まず落下装置本体および抵抗遮断箱は、それぞれ切断機を介したポリプロピレンリボンによって落下塔上端からつり下げられる。つぎに液滴を石英糸に懸垂してから、フィルム巻取り用誘導電動機を作動させ、回転数が一定になった時、切断機によってポリプロピレン

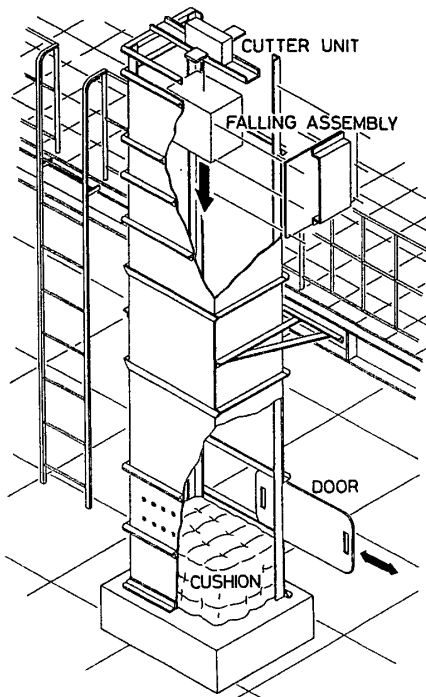


図1 落下塔

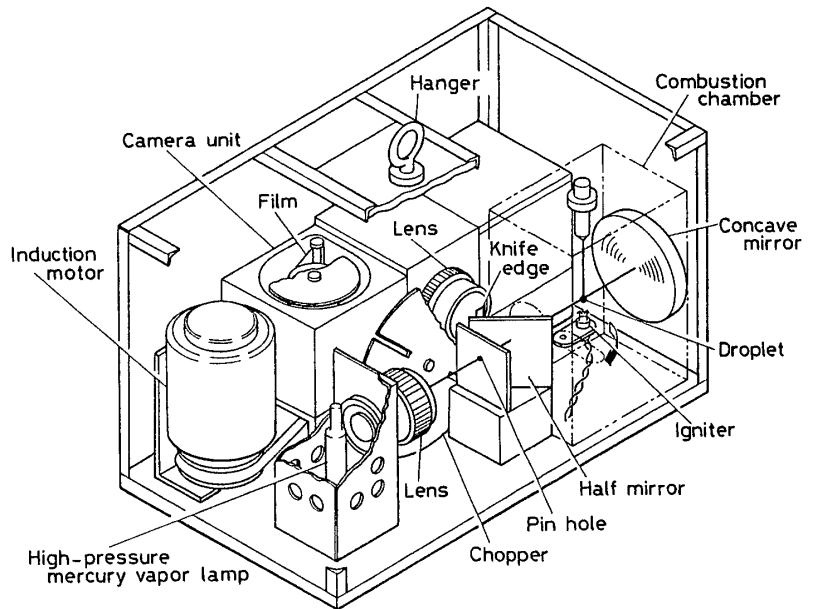


図2 落下装置本体

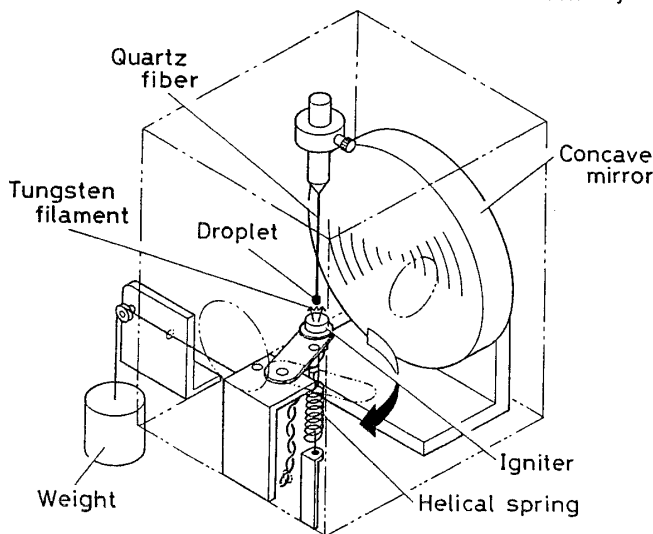


図3 燃焼室

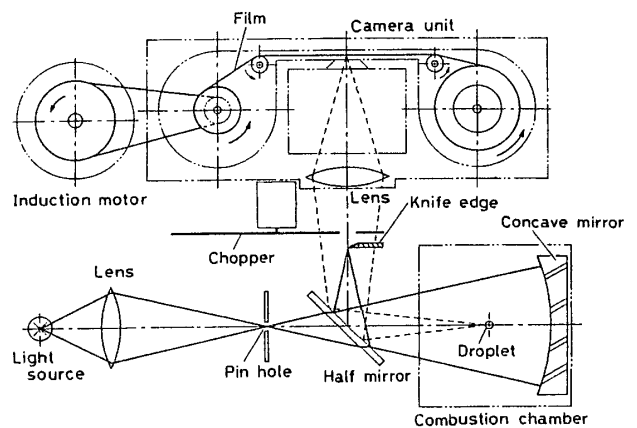


図4 光学系

リボンを切断する。それと同時に落下装置本体は落下を始め、スライドコネクタの接点が離れて遅延回路が作動し、点火装置に通電が開始されて燃料液滴への点火が完了する。また、フィルムのコマ間隔はチョップの回転数で調整され、その周期はフォトランジスタで感知した信号を増幅器を通して周波数計数器で計測される。

本実験に用いられるエマルジョン燃料の燃料成分は、*n*-ヘプタン (C_7H_{16})、イソオクタン (C_8H_{18})、*n*-ウンデカン ($C_{11}H_{24}$)、*n*-トリデカン ($C_{13}H_{28}$)、*n*-ペンタデカン ($C_{15}H_{32}$) および *n*-ヘキサデカン ($C_{16}H_{34}$) の 6 種類で、エマルジョンは燃料 90 wt %、水 9.7 wt %、および界面活性剤 0.3 wt % からなる O/W 形である。界面活性剤には、ジェタノールアミン脂肪酸アミドとジェタノールアミンの 1:1 混合物(商品名ダイヤノール 300, D-300) が用いられる⁽⁵⁾。図 6 に試料エマルジョンの顕微鏡写真を示す。内相は燃料成分、外相は水である。各エマルジョン燃料は、ホモジナイザによって、内相の最大粒径が 15 μm 程度になるように調整されてから実験に使用される。またそれは、常温、大気圧下の密閉容器内で 3~6 箇月間分離せず、安定状態を保つ。

3. 実験結果および考察

本実験は、室温、大気圧のもとで行われ、液滴初期直径 D_0 は 0.8~1.3 mm である。図 7 は、標準重力状態で燃焼しているエマルジョン燃料滴のシュリーレン写真であり、図 8 および図 9 には、それぞれ自由落下する燃焼容器中の無重力状態で燃焼しているエマ

ルジョン燃料滴のシュリーレン写真、および影写真である。本実験に使用されたエマルジョン燃料のうち、正ヘプタンやイソオクタン程度の炭素数の燃料エマルジョンにおいては、標準重力状態下および無重力状態下ともに、二次微粒化現象は観察されず、正ウンデカン程度の炭素数の燃料エマルジョンにおいてはじめて二次微粒化現象が観察される。

標準重力状態下では、図 7 で観察されるように、燃焼末期において液滴の分裂が生じ、母液滴は一瞬にして多数の子滴に分かれる。この子滴は、直径約 50~100 μm に分布しており、それらは燃焼しながら飛散し、火炎構造に影響を及ぼし、高温ガス層を急速に成長させる。また、燃料成分の炭素数が増加するにつれて、燃焼末期においてより激しい微粒化現象が観察される。一方、無重力状態下では標準重力状態下で出現するような激しい分裂は観察されず、図 8 および図 9 で観察されるように弱い微粒化現象 (Puffing) のみが、点火からある時間後に発生し、それは液滴の消滅に至るまで連続して出現する。しかし、この場合、母液滴が瞬時に消失することは認められない。この弱い微粒化現象は、直径約 10~40 μm の子滴が母液滴より多数放出されるもので、母液滴はこの微粒化期間中大きく形を変形させ、かつ振動しながら燃焼している。また、無重力状態下では浮力の影響を受けないので、燃焼によって生成されたすすは液滴のまわりにたい積し、図 8 に示すようなリング状の層を形成する⁽⁶⁾。しかし、このすすによる層の形成は、液滴燃焼の中期以降に観察され、燃料の炭素数の増加に伴い二次微粒化開始時期が早くなると、この層の出現は観察されない。

燃料液滴は懸垂糸に支持されているので、時刻 t に

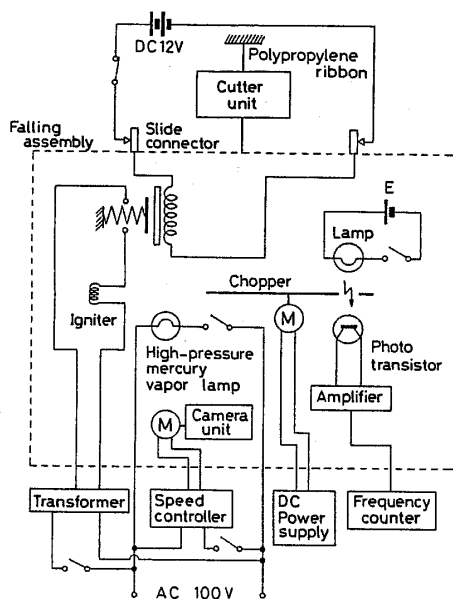


図 5 制御系

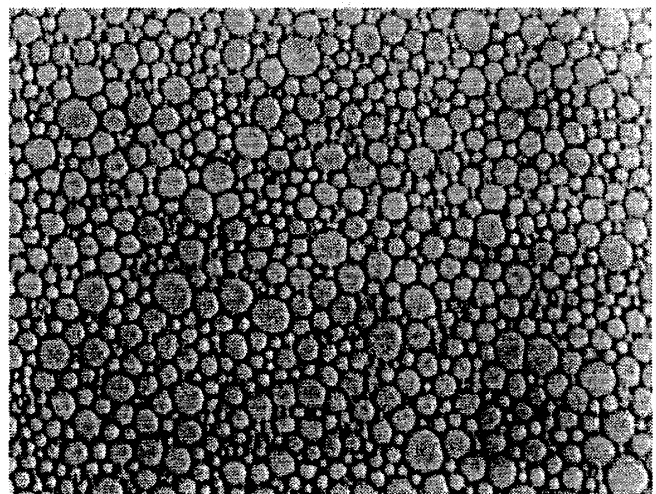


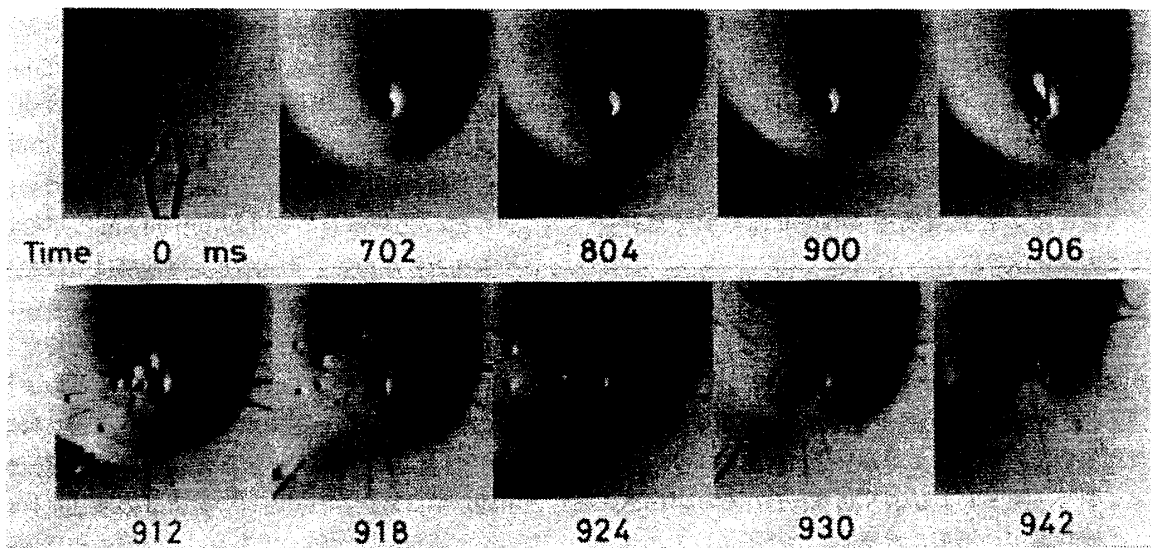
図 6 O/W エマルジョン燃料の顕微鏡写真 (正ヘキサデカン 90.0 wt %, 水 9.7 wt %, D-300.0.3 wt %)

おける液滴直径 D には、自由液滴のそれに最も近い値を示す 45° 直径が採用される⁽²⁾。図 10 および図 11 は、それぞれ標準重力状態下および無重力状態下での正ウンデカン、正トリデカン、正ペンタデカン、および正ヘキサデカンの各エマルジョン滴の燃焼における D^2-t (D : 液滴直径, t : 時間) の関係を示したものである。これらの図から、標準重力状態下では、炭素数の大きい燃料のエマルジョンほどマイクロ爆発が生じる時期が早く、比較的炭素数の小さい燃料よりもその燃焼時間は短くなることがわかる。一方、無重力状態下では、燃焼初期において各燃料とも類似した履歴をたどるが、Puffing 開始以後は急激に燃焼速度は増大し、母液滴は短時間で消滅する。

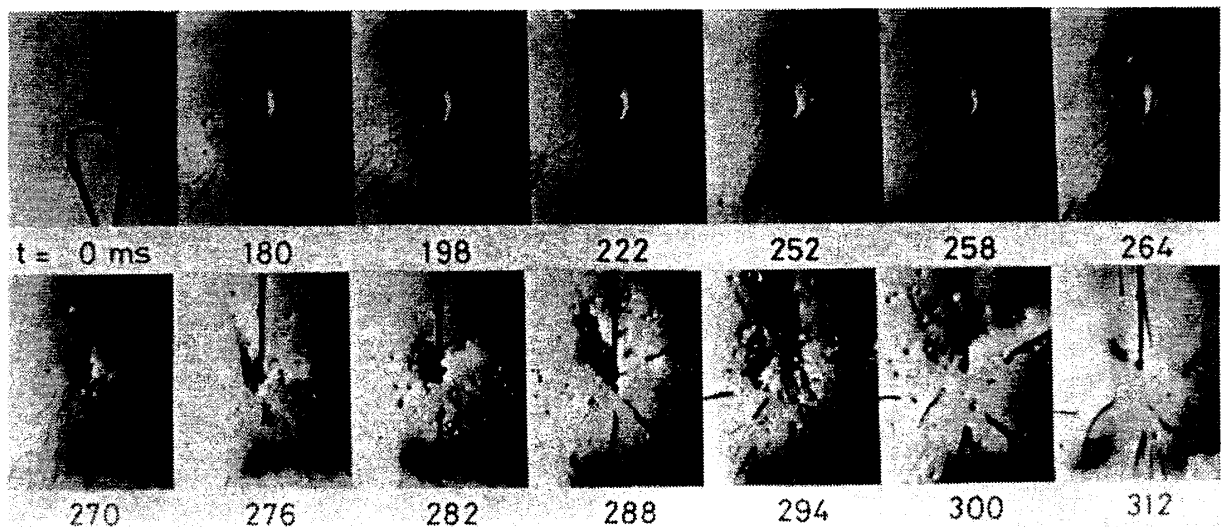
標準重力状態下において、燃焼末期に生じるマイクロ

爆発は燃焼と同時に母液滴内部にも対流が発生するため、液滴内部に細かく分散している微粒水滴が凝集して、比較的大きな水滴を形成し、それが沸点の高い燃料成分よりも早く沸騰状態になるためと考えられる。

しかし、無重力状態下では対流の発生はないので、液滴の表面付近でそれに含まれる微粒水滴が次々と沸騰状態になると考えられ、二次微粒化強さは微粒水滴個々もつ核沸騰エネルギーが凝集する標準重力状態下よりも小さくなり、Puffing 程度の弱い微粒化になると推定される。また、正ヘキサデカンエマルジョン滴は標準重力状態下においてかなり早い時期から図 7 (b) で観察されるような Puffing が発生している。これは、燃料成分の炭素数の増大に伴って粘性も大きくなるため、液滴内部の対流が防げられ、無重力状態下



(a) 標準重力状態下で燃焼している正ウンデカンエマルジョン滴のシュリーレン写真



(b) 標準重力状態下で燃焼している正ヘキサデカンエマルジョン滴のシュリーレン写真

図 7

と同様な Puffing 現象が生じるものと考えられる。しかし、液滴内温度が上昇するにつれて粘性は小さくなるため燃焼末期にはマイクロ爆発が生じる。

図 12 は、見掛けの燃焼速度定数 k' を試料エマルジョンの燃料成分の沸点に対してプロットしたものである。ここに示される見掛けの燃焼速度定数とは、二次

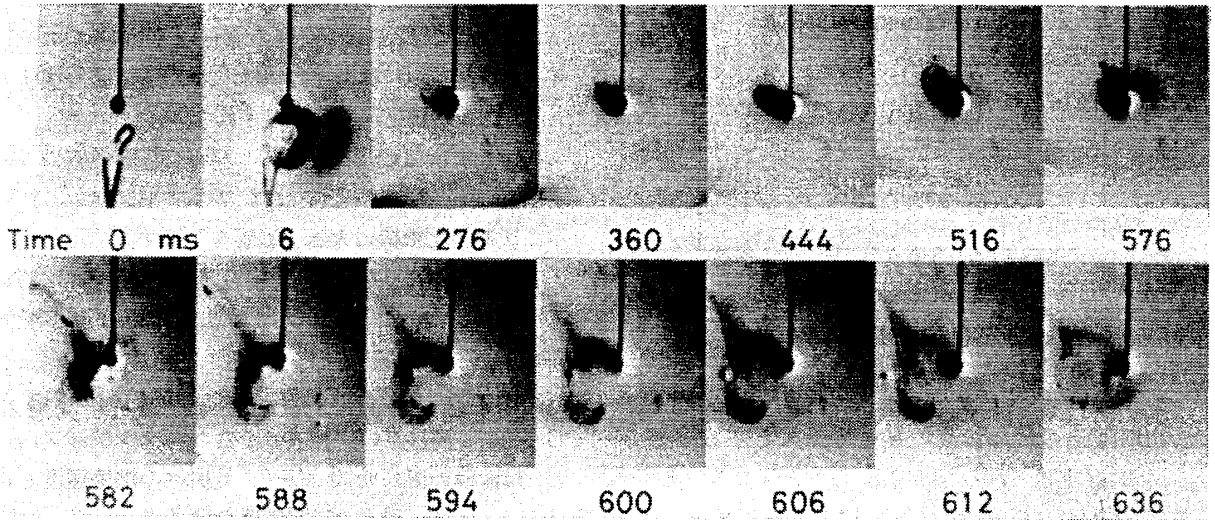


図 8 無重力状態下で燃焼している正ウンデカンエマルジョン滴のシュリーレン写真

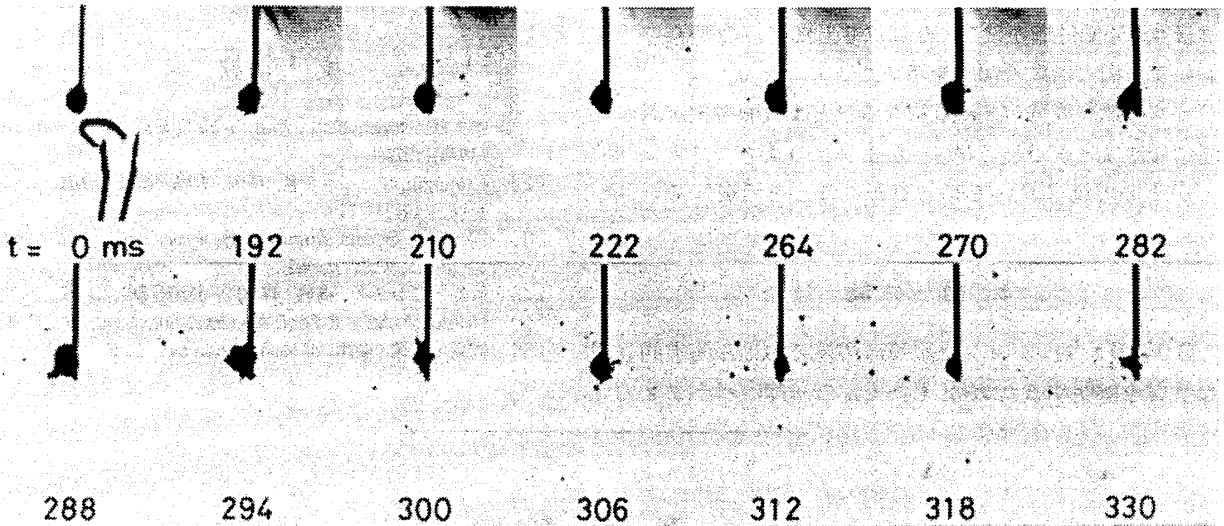


図 9 無重力状態下で燃焼している正ヘキサデカンエマルジョン滴の影写真

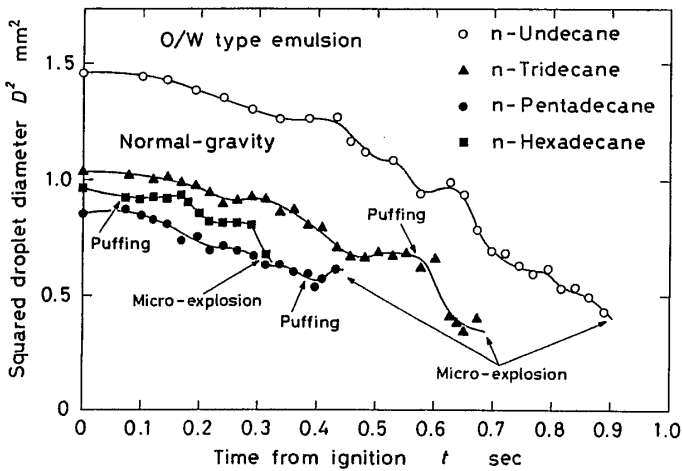


図 10 標準重力状態下での O/W エマルジョン滴の燃焼履歴

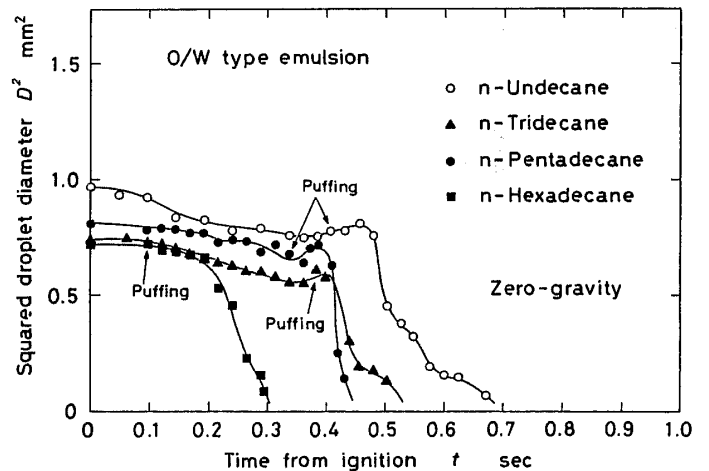


図 11 無重力状態下での O/W エマルジョン滴の燃焼履歴

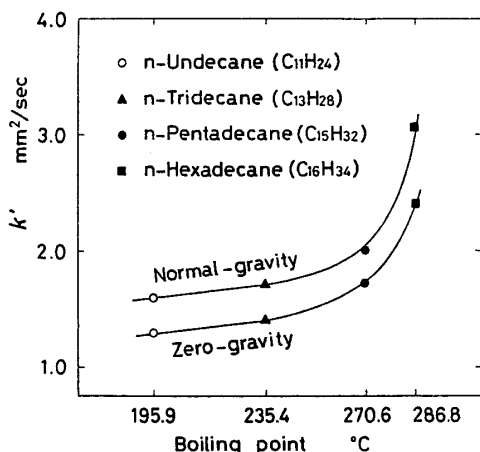


図 12 見掛けの燃焼速度

微粒化現象を生じるエマルジョン燃料滴に対し、その液滴初期直径 D_0 、母液滴の寿命時間 t_b とするとき、 $D_0^2/t_b = k'$ と定義されるものである。この図から、沸点の高い、すなわち炭素数の大きい燃料成分を含むエマルジョン滴ほど見掛けの燃焼速度は大きくなり、それは沸点 250°C 付近を境に、それよりも高沸点の燃料において急激に増大の傾向を示す。このことは、エマルジョンの燃料成分が高沸点になるほど二次微粒化が活発になることを示しており、重油などのエマルジョン化がその燃焼において有効であることを示唆している。

4. 結 論

O/W 形エマルジョン燃料滴の燃焼における基本的な性質を解明するために、 $C_7 \sim C_{16}$ の一連のパラフィ

ン族炭化水素エマルジョンを用いて、無重力状態下および標準状態下でその液滴の燃焼挙動、とくに二次微粒化現象を観察し、いくつかの点を明らかにした。得られた主な結論はつぎのとおりである。

(1) 炭素数 C_7, C_8 程度の炭化水素燃料エマルジョンにおいては、標準重力状態下および無重力状態下とも、二次微粒化現象は観察されない。

(2) 二次微粒化を生じるエマルジョン燃料については、対流の存在の有無、およびエマルジョンの粘度が二次微粒化機構に大きく影響を及ぼす。

(3) 無重力状態下では、標準重力状態下に比較して弱い微粒化が長期間連続して生じ、放出される子滴の粒径も小さい。

(4) 燃料成分の炭素数が増加するにつれて、すなわち、より高沸点の燃料成分を含むエマルジョン滴ほど、母液滴の寿命時間は短く、見掛けの燃焼速度定数は大きくなり、沸点 250°C 付近を境にそれ以上の沸点において、見掛けの燃焼速度は急激な増加を示す。

文 献

- (1) 例えば, Dryer, F. L., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1976), 279.
- (2) Kumagai, S., ほか 2 名, *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, (1971), 779.
- (3) Okajima, S. and Kumagai, S., *Proc. 15th Symp. (Int.) Combust.*, (1974), 401.
- (4) 岡島・ほか 3 名, 機論, 47-422, B (昭 56), 2058.
- (5) Iwama, A., ほか 3 名, *J. Jpn. Fuel Soc.*, 58 (1979), 1041.
- (6) 岡島・永尾, 機論, 45-398, B (昭 54), 1538.

討 論

〔質問〕 河野通方・小西克享

(東京大学工学部)

母液滴の二次微粒化、特にマイクロ爆発が標準重力状態下で観察され、無重力状態下では観察されない理由として、液滴内部に発生する対流による分散微粒水滴の凝集を挙げているが、対流の有無により液滴内部の熱伝達が異なり、標準重力状態下のほうが液滴内温度上昇が著しいので、それがマイクロ爆発を引き起こす原因と考えられないか。

〔回答〕 エマルジョン燃料滴の二次微粒化の起こる原因は、水と燃料との間の沸点差による核沸騰であると考えられており、この二次微粒化の強さを決める要因は、上述の沸点差だけでなく、燃焼過程中の微小水滴の凝縮・会合も大きい影響力をもっていると考え

られる。そこで、ご指摘のとおり標準重力状態下と無重力状態下とで液滴内温度上昇が異なるとしても、無重力状態下でその燃焼末期において液滴内温度がかなり上昇しているにもかかわらず、標準重力状態下で発生するような激しいマイクロ爆発は観察されない。このことから判断して、著者らは標準重力状態下で生じるマイクロ爆発は、母液滴内の分散微粒水滴が凝集して、比較的大きな水滴を形成し、それが沸点の高い燃料成分よりも早く核沸騰状態になることに起因していると考えている。

〔質問〕 斎藤武雄 (東北大学工学部)

実用的な応用上重要な O/W 形エマルジョン燃料液滴の燃焼について興味のある結果を得ておられる。今回のご研究を含むこれまでの著者らの研究に対し深く

敬意を表する。

(1) このような燃料液滴の燃焼中の滴直径の測定が困難であることは質問者も経験するところであるが、とくに Puffing が発生した後の直径はどのようにして、また、どの液滴の直径を取ったのか、測定のばらつきはどの位か。

(2) 燃料成分の炭素数が多いほど、燃焼終期における微粒化が容易のようであるが、炭素数の少ない燃料についても、例えば界面活性剤その他を添加するなどの促進法は考えられないか。

(3) 重力の有無によって滴の直径を始め、Puffing 後の燃焼速度なども、(通常の液滴の場合に比して) かなり相違するようであるが、その理由をお教え願いたい。

〔回答〕 (1) エマルジョン液滴は懸垂線に支持されているので、その形状は完全な球形ではなく、懸垂線に沿ってやや縦長の形状となる。そのために時刻 t における液滴直径 D は、自由液滴のそれに最も近い値を示す 45° -直径を用いた。しかし、ご指摘のとおり Puffing 開始以後、炭素数の多い正ヘキサデカン程度の燃料になると、燃焼期間中、その形状は若干変化し、かつ振動しながら燃焼しているので、液滴直径 D の測定誤差も大きくなり、10 回の測定結果の平均値に対して比較すれば、最大 5% 程度のばらつきが生じている。

(2) 本実験は、まず一般的な界面活性剤として SAA (D-300) を用いて、Puffing およびマイクロ爆発の現象を詳細に観察する実験技術の開発を主目的としているため、炭素数の少ない燃料 (沸点 100°C 程度のもの) について微粒化促進法に関する研究はまだ行っていない。今後の研究課題として取り組むつもりである。

(3) 本実験における液滴初期直径の範囲は $0.8\sim 1.3\text{ mm}$ で、図 10 における D_0 は $0.9\sim 1.2\text{ mm}$ 、図 11 は $0.86\sim 1.0\text{ mm}$ であり、これらはデータ整理上、多くのデータの中から選択したもので、エマルジョン燃料滴の燃焼特性をよく表しているものを掲載した。重力の有無による液滴直径の相違は存在しない。また、Puffing 開始以後は水蒸気が液滴表面から噴出

し、それがまわりの油滴をはねとばすため、通常の液滴の場合と比較して、その液滴直径の変化および燃焼速度の値は著しく異なるものとなる。

〔質問〕 廣安博之〔広島大学工学部〕

(1) 標準重力下では液滴内部に対流が生じ、液体内部に細かく分散している微粒水滴が凝集して比較的大きな水滴を形成すると貴論文では述べておられる。母液滴内部の微粒水滴という概念を取り入れて考えるためにはエマルジョンの形態に水中油滴 (O/W) 形から油中水滴 (W/O) 形への変化がまず発生しなければならないと思うが、いかがか。

(2) この論文によれば C 重油のような高粘度燃料では高い粘度のため対流がさまたげられマイクロ爆発がおきにくくなるが、一方沸点が高いため図 12 によりマイクロ爆発がおきやすくなるとも考えられる。C 重油エマルジョンの燃焼の現実はこちらに近いものか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、まず最初に O/W から W/O への転相は生じているものと考えている。たとえば、無重力状態下で Puffing によって放出される子滴の大きさは $20\ \mu\text{m}$ 位であり、これは火炎によって加熱されて O/W から W/O へ転相した後における独立水滴の大きさとあまり変わらない。一方、標準重力状態下で観察される母液滴から生じる子滴はその直径が $50\ \mu\text{m}$ 以上と大きい。これは O/W から W/O へと転相した後、あるいはその過程でエマルジョン内部における分散微粒水滴が会合して比較的大きな水滴になり、それが核沸騰状態を経て母液滴を瞬時に分裂させた結果生じるためであろうと考えている。

(2) 標準重力状態下では C_{16} 程度の高粘度の燃料になると、燃焼初期には対流がさまたげられて、図 10 からわかるように、まず Puffing が生じ、その後燃焼が進行して液滴温度が上昇すると粘度は減少するので、マイクロ爆発が生じて母液滴は瞬時に消滅する。このように C_{16} 程度の燃料でも Puffing が発生する時期は点火後間もなくであり、かつ $C_{11}\sim C_{16}$ 位では炭素数の増大とともにマイクロ爆発の発生時期が早まっているので、C 重油でもかなり早い時期にマイクロ爆発が生じるものと考えられる。