

無重力状態下でのエマルジョン燃料滴の燃焼

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

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

19

(開始ページ / Start Page)

25

(終了ページ / End Page)

33

(発行年 / Year)

1983-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004098>

無重力状態下でのエマルジョン燃料滴の燃焼

木村 治世*・山口 修次**・岡 島 敏**

Combustion of Emulsified Fuel Droplets Under Zero-Gravity Condition

Haruyo KIMURA, Shuji YAMAGUCHI and Satoshi OKAJIMA

Abstract

The authors conducted experiment to study the fundamental features of the combustion of oil-in-water (O/W) type hydrocarbon fuel emulsion droplets with a series of n-paraffin (C_7 - C_{16}) under a zero-gravity condition, which was realized in a freely falling chamber, and especially, the combustion behavior such as secondary micro-atomization, was observed by taking schlieren or shadow photographs with 35-mm movie camera installed on the falling assembly.

Under a zero-gravity condition in air the violent micro-atomization does not be observed during the combustion process for all the fuels investigated. This fact indicates that the secondary micro-atomization is influenced by an internal convection in emulsion droplets. The apparent burning rate continues to increase with increasing in carbon number of hydrocarbons, that is, with increasing in boiling point of hydrocarbons, and at the boiling point more than 250°C it seems to become markedly large.

§1. 緒 言

エネルギー節約とか燃料経済性が重視されるようになり、更に、安全性や低公害性が問われるなか、石油を有効に利用する一手段として、燃料のエマルジョン化が注目されるようになった。エマルジョン燃料では、その噴霧滴の燃焼過程において、水蒸気の吹き出し (Puffing)、マイクロ爆発 (Micro-explosion) とか分裂 (Disruption) と呼ばれる2次微粒化現象が生じ、それが燃料と空気の混合状態を良くするため、煙や未燃炭化水素の発生を抑制して、更に燃焼効率を向上させると考えられており、すでにボイラーやディーゼル機関など、燃料直噴型の燃焼器で実用化の域にも達してきている。しかし、2次微粒化現象を含むその燃焼過程は、純粋燃料滴のそれと比較して、極めて複雑であり、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

* 大学院機械工学専攻

** 機械工学科

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明確になっていないようである¹⁻²⁾。

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、燃料の種類や霧化の方法によって異なるが、一般には数十から数百 μm 程度であり、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。

そこで本研究では、噴霧液滴の最も基本的な性質は、その個々の液滴の球状燃焼によって解明されるという観点から、噴霧を構成しているような微小液滴について、それらの基本的な挙動を実験室スケールの比較的大きな液滴で観察するために、自然対流の影響を受けない、自由落下する燃焼容器内の無重力状態のもとで、 $\text{C}_7 \sim \text{C}_{16}$ の一連のパラフィン族炭化水素燃料の O/W 形単一エマルジョン滴を用いて、その球状燃焼を実現し、連続拡大写真によって燃焼挙動を詳細に観測して、2次微粒化機構、液滴直径の時間的变化、あるいは見掛けの燃焼速度定数などを調べた。更に、それらの現象をより良く理解するよう標準重力状態で得られた結果との比較、検討をも行った。

§ 2. 実験装置及び方法

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、本実験では自由落下

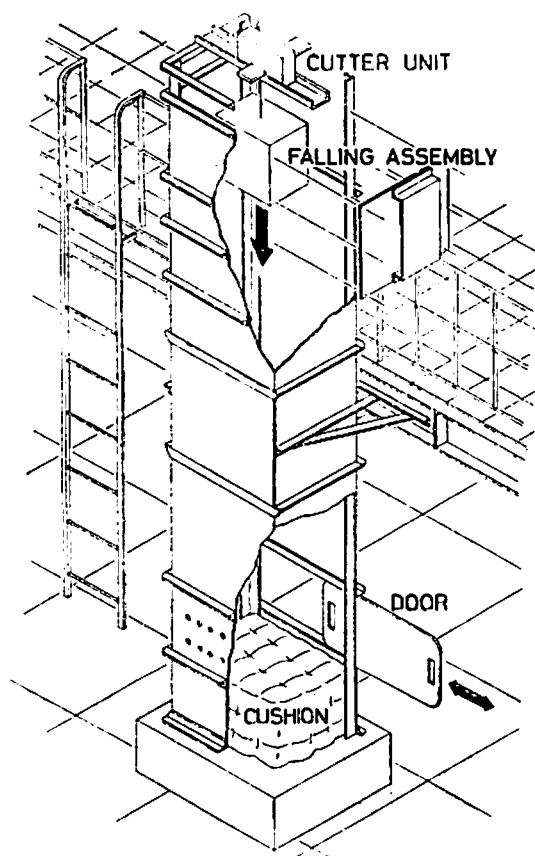


Fig. 1 Falling tower.

法が用いられる。Fig. 1は、本実験に用いられた落下塔の概略である。この塔の高さは5 m、横断面は $800 \times 1,000 \text{ mm}$ 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しゃ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0.5 mのクッションが配してある³⁾。この塔で約0.9秒間の無重力状態が達成される。

落下装置本体 (Fig. 2) は $360 \times 500 \times 340 \text{ mm}$ 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、35 mmカメラユニット、及びフィルム巻取り用小型誘導電動機等が搭載されており、その装備重量は約40 kg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の減少を防ぐために、抵抗しゃ断箱の中に入れて落下させられる⁴⁾。

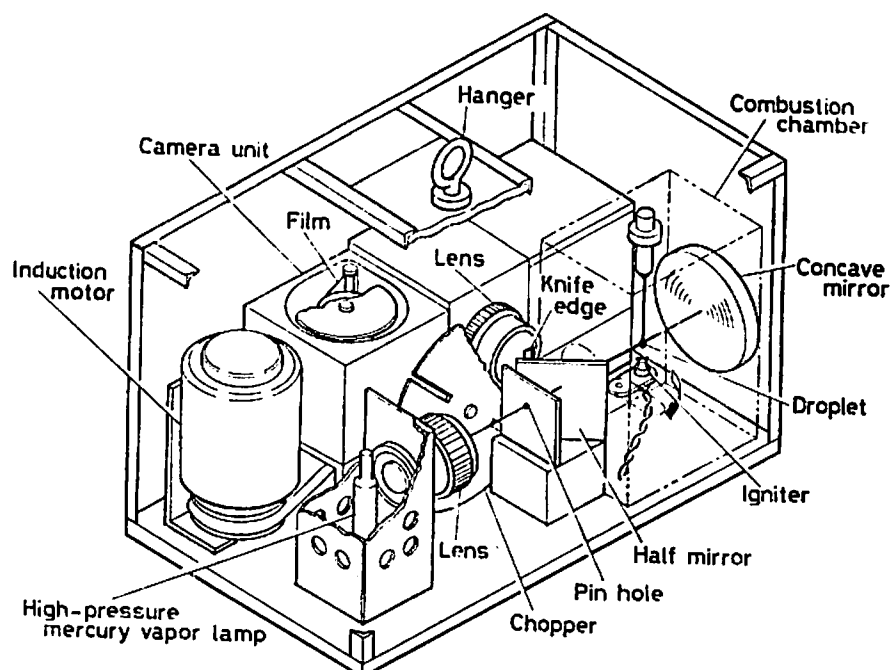


Fig. 2 Falling assembly.

燃焼室 (Fig. 3) は $110 \times 120 \times 130 \text{ mm}$ 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、火花では着火しにくいので、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、無重量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。

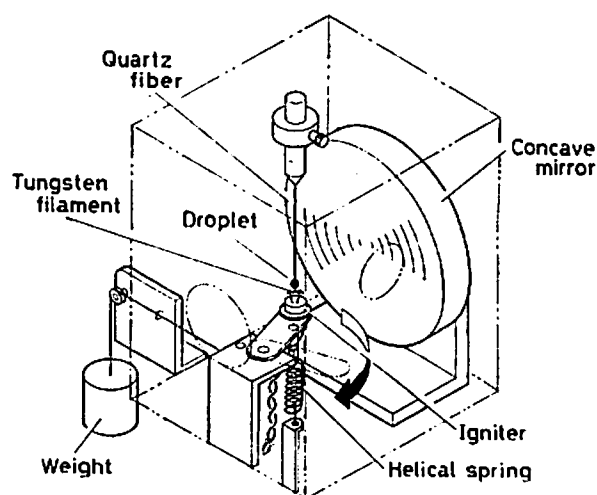


Fig. 3 Combustion chamber.

光学系 (Fig. 4) は、凹面鏡、半透明鏡、超高圧水銀燈、ナイフエッジ、及び 35 mm カメラユニット等から構成されており、落下装置本体の限られた空間内で、鮮明なシュリーレン写真及び影写真撮影が可能ないように、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 $50 \sim 100 \text{ rps}$ まで制御できる円板型チョッパーが設けられており、写真のコマ撮りを可能にし、液滴の挙動を正確に把握できるようになっている。

Fig. 5はこの装置の全制御系を示す。実験に際して、まず落下装置本体及び抵抗しゃ断箱は、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

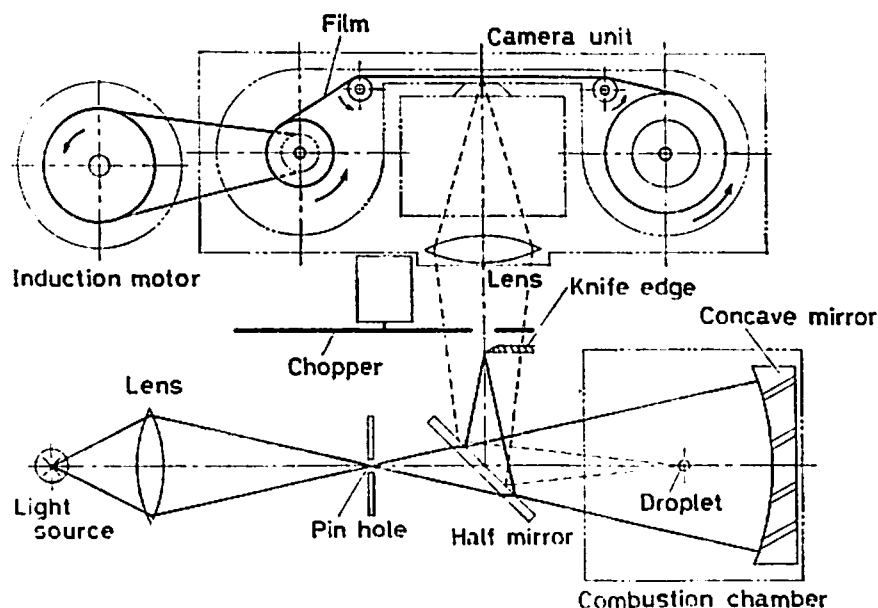


Fig. 4 Schematic arrangement of optical system.

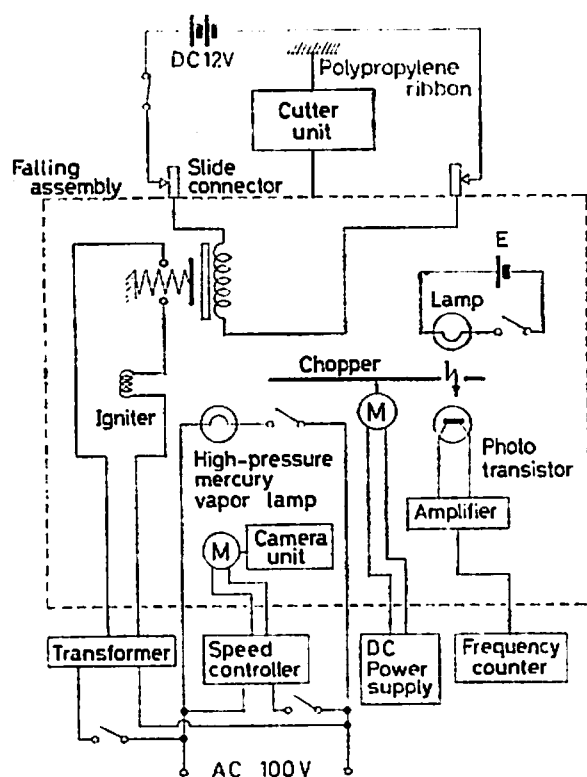


Fig. 5 Diagram of control system.

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後、切断機によってポリプロピレンリボンを切断する。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パーの回転数で調整され、その周期は、フォトランジスターで感知した信号を、増幅器を介して、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*-Heptane (C_7H_{16}), *iso*-Octane (C_8H_{18}), *n*-Undecane ($C_{11}H_{24}$), *n*-Tridecane ($C_{13}H_{28}$), *n*-Pentadecane ($C_{15}H_{32}$), 及び *n*-Hexadecane ($C_{16}H_{34}$) の 6 種類で、エマルジ

ンは、燃料 90 wt%, 水 9.7 wt%, および界面活性剤 (Surface Active Agent) 0.3 wt% からなる O/W 形である。界面活性剤には、ジエタノールアミン脂肪酸アマイドとジエタノールアミンの 1:1 混合物 (商品名ダイヤノール 300, D-300) が用いられる²⁾。Fig. 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

ザー (HEIDON, TYPE-1200G) によって、内相の最大粒径が $15\ \mu\text{m}$ 程度になるように調製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ヶ月間分離せず、安定状態を保つ。

§3. 実験結果及び考察

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 $0.8\sim 1.3\text{ mm}$ である。Fig. 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、Fig. 8及びFig. 9には、それぞれ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、及び影写真を示す。正ヘプタン (C_7H_{16}) やイソオクタン (C_8H_{18}) 程度の炭素数の燃料エマルジョンについては、標準重力状態下及び無重力状態下ともに、

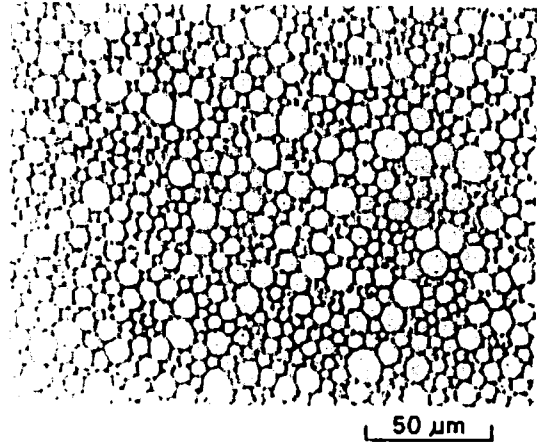


Fig. 6 Typical microscope photograph of O/W emulsified hydrocarbon fuel.

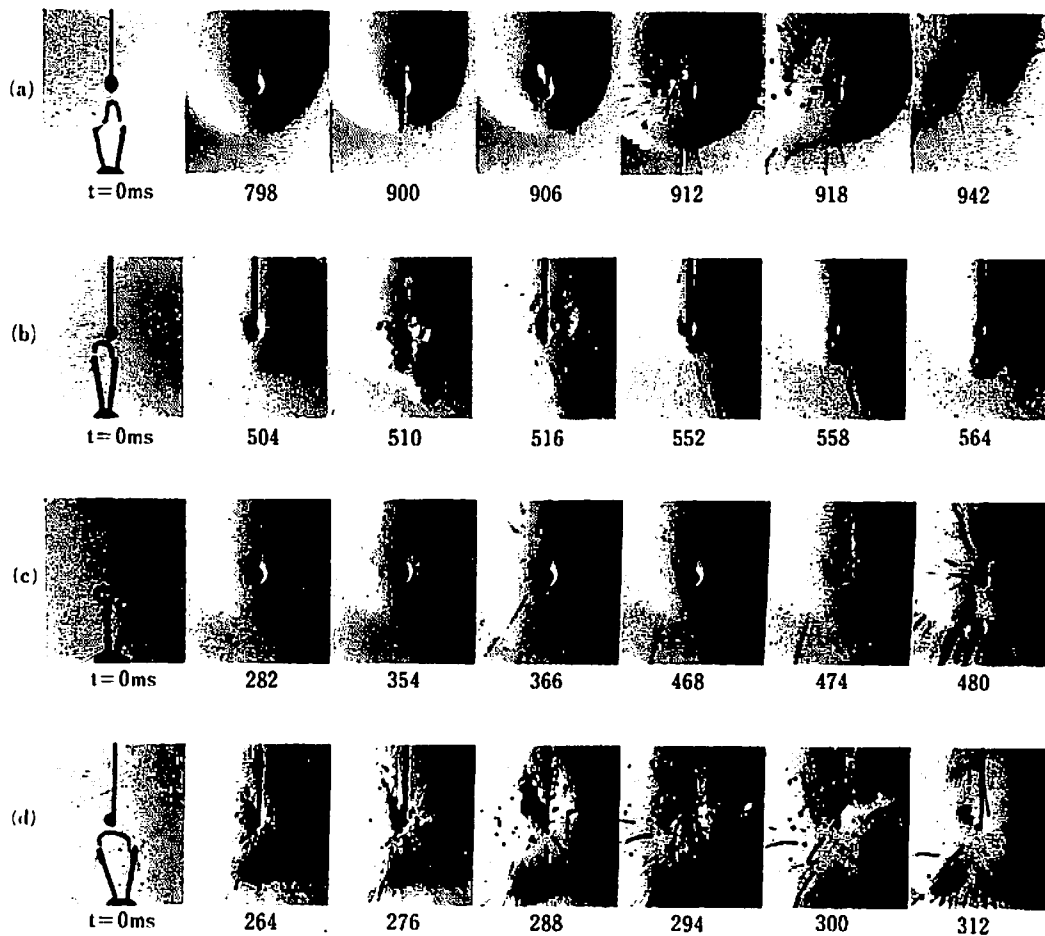


Fig. 7 Schlieren photographs of emulsified fuel burning droplets under normal-gravity condition.

(a) O/W n-undecane, (b) O/W n-tridecane,
(c) O/W n-pentadecane, (d) O/W n-hexadecane.

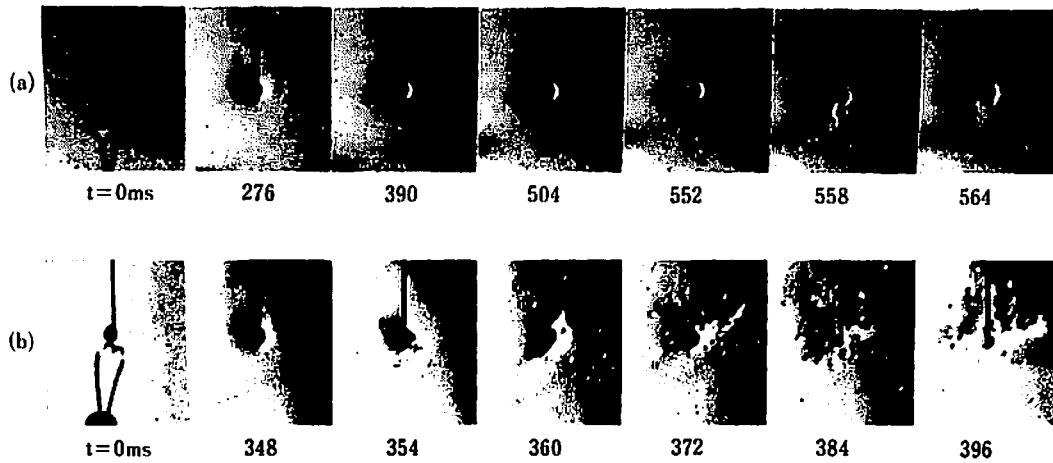


Fig. 8 Schlieren photographs of emulsified fuel burning droplets under zero-gravity condition.
(a) O/W n-undecane, (b) O/W n-pentadecane.

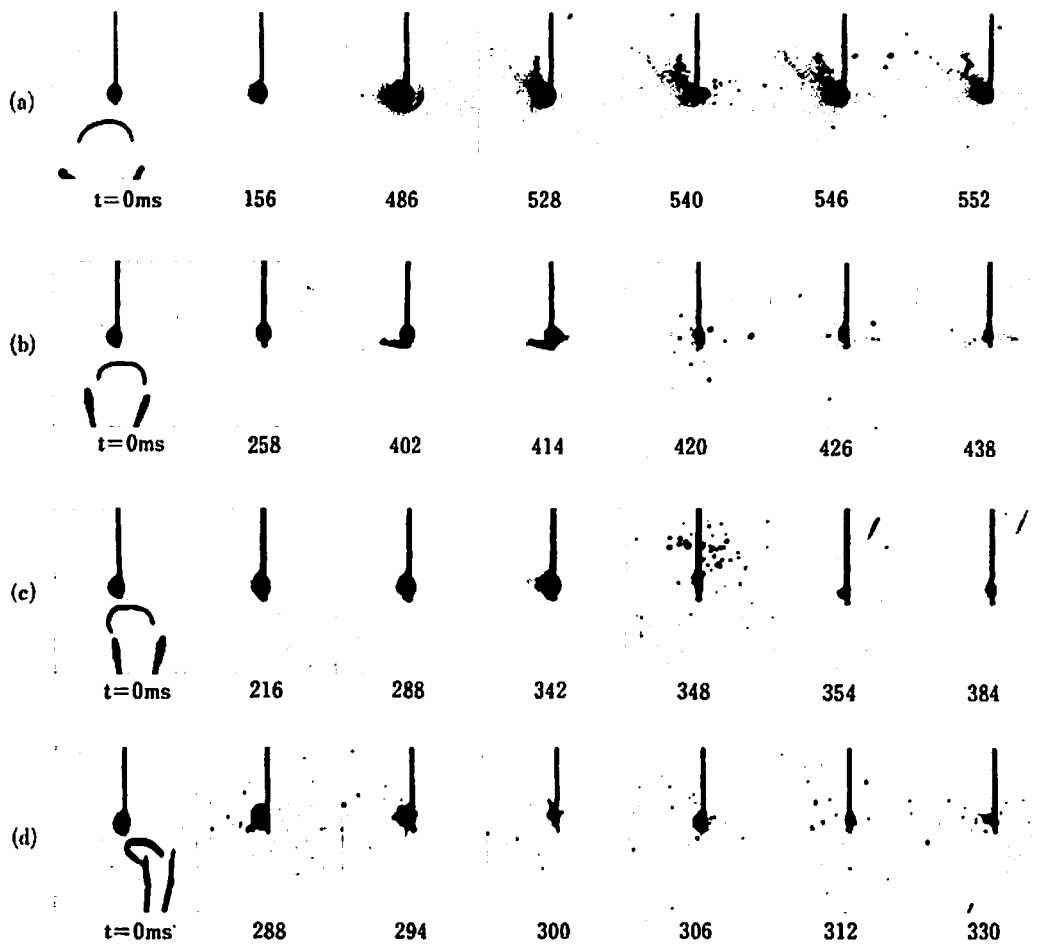
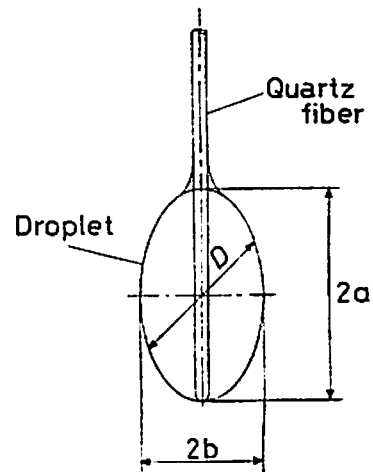


Fig. 9 Shadowgraphs of emulsified fuel burning droplets under zero-gravity condition.
(a) O/W n-undecane, (b) O/W n-tridecane,
(c) O/W n-pentadecane, (d) O/W n-hexadecane.

2次微粒化現象は観察されず、正ウンデカン ($C_{11}H_{24}$) 程度の炭素数の燃料エマルジョンにおいて、初めて2次微粒化現象が観察される。

標準重力状態下では、Fig. 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 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ に分布しており、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、Fig. 8 及び Fig. 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 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 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化させ、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、Fig. 9(a)に示されるように、煤が液滴の回りに層を形成し、この層が2次微粒化現象によって乱される様子が観察される。しかし、煤による層の形成は、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2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。



$$D(45^\circ\text{-diameter}) = 2\sqrt{2}a \cdot b / \sqrt{a^2 + b^2}$$

Fig. 10 Measurement of droplet size.

燃料液滴は懸垂糸に支持されているので、時刻 t における液滴直径 D には、自由液滴のそれに最も近い値を示す 45° 直径 (Fig. 10) が採用される³⁾。Fig. 11 は、正ウンデカンエマルジョン滴の無重力状態下及び標準重力状態下での燃焼における液滴直径の時間に対する変化を示す。また、Fig. 12 及び Fig. 13 は、それぞれ標準重力状態下および無重力状態下での正トリデカン、正ペンタデカン、正ヘキサデカンの各エマルジョン滴の燃焼における (液滴直径 D)² -

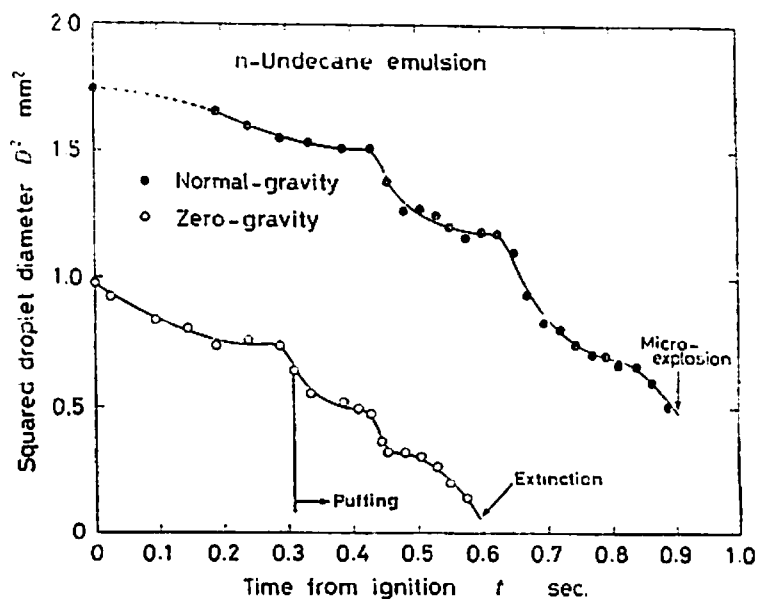


Fig. 11 Square of droplet diameter vs. time from ignition of O/W emulsified n-undecane droplets under zero- and normal-gravity condition.

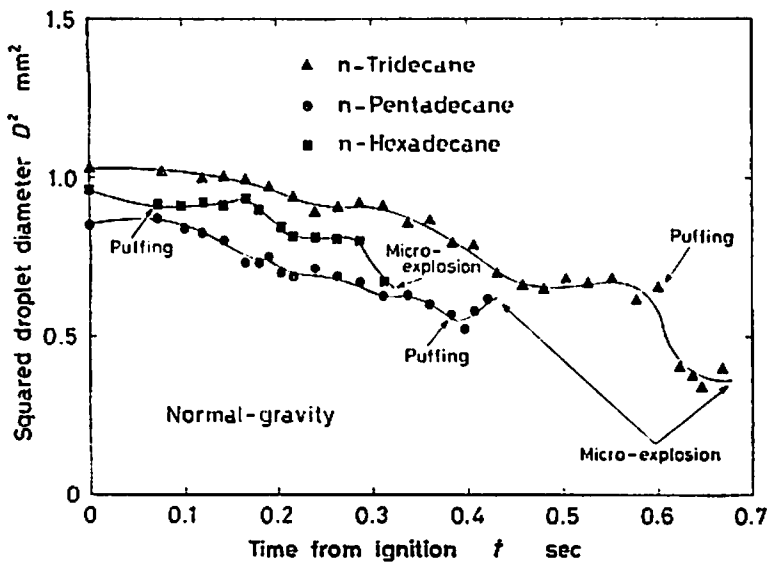


Fig. 12 Square of droplet diameter vs. time from ignition of O/W emulsified fuel droplets under normal-gravity condition.

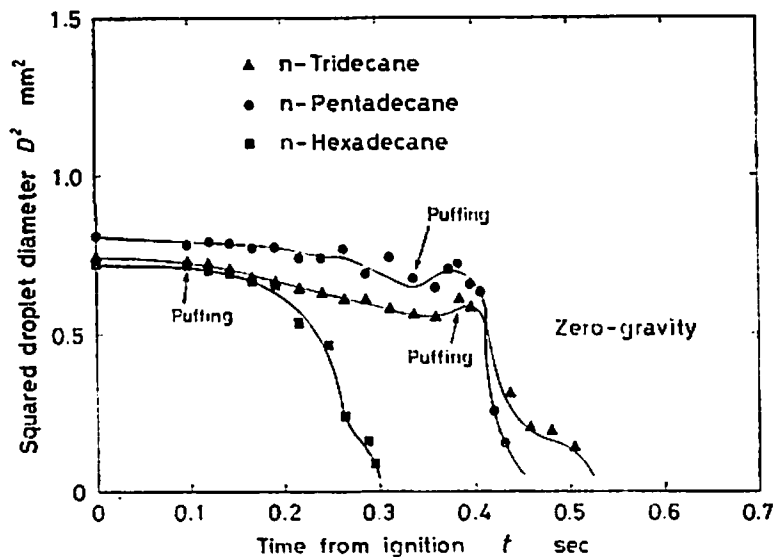


Fig. 13 Square of droplet diameter vs. time from ignition of O/W emulsified fuel droplets under zero-gravity condition.

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、2次微粒化エネルギーは、微粒水滴の凝集する標準重力状態下よりも小さくなり、Puffing 程度の弱い微粒化現象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もかなり早い時期から Fig. 7 (d)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、液滴内部の対流が妨げられ、無重力状態下と同様な 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、粘性も小さくなるため、燃焼末期にはマイクロ爆発が生じる。

Fig. 14 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、2次微粒化現象を生じるエマルジ

(時間 t) 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分かる。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が増大し、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

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、それより高沸点の燃料において急激に増大の傾向を示す。また、無重力状態下よりも標準重力状態下の方が大きくなる傾向がある。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、2次微粒化が活発になることを示しており、軽油(沸点範囲、通常 $190\sim 350^\circ\text{C}$)や重油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。

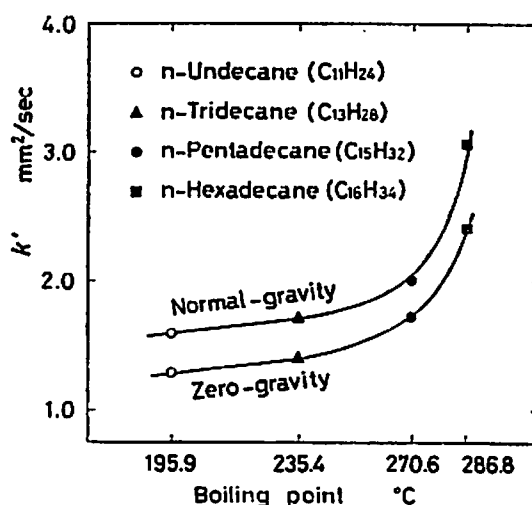


Fig. 14 Apparent burning rate constant k' vs. boiling point of hydrocarbon.

§4. 結 言

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、無重力状態下及び標準重力状態下でその液滴の燃焼挙動、特に2次微粒化現象を観察し、幾つかの点を明らかにした。得られたおもな結論は次のとおりである。

- (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、標準重力状態下及び無重力状態下とも、2次微粒化は観察されない。
- (2) 2次微粒化を生じるエマルジョン燃料については、対流の有無、及びエマルジョンの粘度の増減が2次微粒化機構に影響を及ぼす。
- (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程、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、見掛けの燃焼速度に急激な増加の傾向を見せる。

文 献

- 1) A. Iwama, H. Ishida and M. Iwata, *Journal of Japan Fuel Society*, 58, p. 432 (1979).
- 2) A. Iwama, S. Aoyagi, T. Inoue and M. Iwata, *Journal of Japan Fuel Society*, 58, p. 1041 (1979).
- 3) S. Kumagai, T. Sakai and S. Okajima, Thirteenth Symposium (International) on Combustion, p. 779, Combustion Institute, 1971.
- 4) S. Okajima and S. Kumagai, Fifteenth Symposium (International) on Combustion, p. 401, Combustion Institute, 1974.