

エマルジョン燃料滴の燃焼

岩間 彬・斉藤猛男・青柳鐘一郎・石田博樹
木村元雄*・羽室康正**・杉山 隆***

Single Droplet Combustion of Emulsified Hydrocarbon Fuels

By

Akira Iwama, Takeo Saito, Shoichiro Aoyagi, Hiroki Ishida,
Motoo Kimura, Yasumasa Hamuro and Takashi Sugiyama

Abstract: Single droplet combustion of oil-in-water (O/W), water-in-oil (W/O) emulsified fuels and mixtures of emulsified heavier oils and coal powders (COM) has been studied in a quiescent air atmosphere, with the aid of high speed motion pictures.

Singular phenomena, microexplosion and disintegration occurring at the later stage of burning, with which better atomization and enhancement of apparent burning rate may be attained, were discussed on their mechanisms. The data of differential scanning calorimetry, differential thermal analysis and thermogravimetry for emulsified fuels suggest the temperature of microexplosion occurrence. No microexplosion was observed with emulsified n-heptane and n-octane whereas it was observed with emulsified JP-4, kerosene, gas oil and heavy fuel oil. Based on surface chemistry consideration and experimental observations, it is concluded that a critical condition for realizing microexplosion is the boiling point of hydrocarbon components exceeding that of water.

A comparison of the combustion aspects among O/W, W/O emulsion fuels and COM is made.

1. はじめに

安全と低公害を標榜して、ここ10年来活発な研究がなされてきたエマルジョン燃料（エマルジョン形ゲル化燃料とスラリー燃料も含む）[1]は、最近省エネルギーの見地から、アメリカ

* 三菱石油

** 第一工業製薬

*** 工学院大学

カでエネルギー研究開発局(ERDA)が主要研究開発テーマの一つに選んだことにも刺激され、改めて強い関心を呼んでいる。水中油滴形(Oil-in-Water)エマルジョンは留出油を用いるエンジン燃料と固定燃焼装置に、油中水滴形(Water-in-Oil)エマルジョンと石炭微粉を炭化水素燃料またはそのエマルジョンへ加えた固液分散形(Slurry)エマルジョン燃料は主として固定燃焼装置向けに、基礎研究はもとより、ベンチ試験さらに一部では実用化の域に達している。

エマルジョン燃料が省エネルギーの役割を果たす前提はO/WあるいはW/Oのいずれであっても、添加水分が奪う蒸発潜熱と顕熱をカバーするだけの水による燃焼性の向上の実現が期せられるかどうかにかかっている。スラリー燃料にあつては、2相燃料の安定性、流れと燃焼の制御上の難点の克服に、公害問題もからめて効果的な方策をとることが、確定埋蔵量の多い石炭の有効利用をはかる手段としてこの燃料が認められるかどうかの鍵である。それには、エマルジョン燃料の特性を把握して、正当な評価の上になつて、応用をはかることが必要である。O/W、W/Oのいずれの形のエマルジョン燃料滴においても、燃料に水が混合している限り、ある程度の燃焼速度の低下は免れ難い。エマルジョン燃料の欠点は未燃炭化水素の排出量が多く、それを抑えるためには燃焼室の寸法を大きくしなければならないとされていた。しかし、実際の燃焼器に適用してみると排気量が小さいミニ・エンジンに使う場合を除いて、その懸念はないことが判つた。この理由はエマルジョン燃料特有の燃焼後期に観察されるマイクロ爆発(Microexplosion)または分裂(Disruption, Disintegration)によって燃焼時間が短くなるためで、既に筆者を含めて2,3の研究者によって指摘されている[1~3]。

本報はn-ヘプタンから重油までのO/W、W/Oエマルジョンおよび石炭スラリー滴の燃焼観察と熱分析データにもとづいて、燃焼速度、マイクロ爆発と分裂現象、その他についての知見を述べる。

2. 供試エマルジョン燃料の構造

炭化水素燃料をエマルジョンにして、原材燃料より力価を増すことが期待できる水添加量は5 vol %以内、そう力価を落とさない限度は燃料の種類によるがガソリンは10 vol %、重油でも30 vol %である。また、対象燃焼器がボイラや加熱炉であるのか、あるいはエンジンであるのかによつてもこの限界は大幅に異なっている。重油たきの燃焼器で大気汚染排出物の抑制に重点をおく場合でも、水40 vol %を越えるエマルジョンは燃料としての価値は乏しい。しかし、水の含有量は0.7~40 vol %の間でO/Wエマルジョン燃料の場合は第1図に示すように内・外相の幾何学的形状、それに伴う非ニュートン流動特性は大きく変化する。油含有率は74 vol %を境にして、内相は球形から多面体となり、極端に燃料成分が高い場合にはDodecahedron(12面体)からTetrakaidecahedron(14面体)[4]に近づき(第1図(a))、燃料が比較的薄い場合には第1図(b)のようになる。(a)形エマルジョンは、見掛粘度が原材燃料の $10^4 \sim 10^5$ 倍にもなる半面、せん断応力に弱く、新鮮空気に触れると薄膜の外相が蒸発して排液(drainage)を起こすので、密閉容器に貯蔵しておかなければならない。これに対し、74 vol %以下の燃料濃度をもつ(b)形エマルジョンは空

気中に放置しても、自己乳化作用を持つ系では安定性が高く、せん断応力や急激な環境変化が与えられても排液は少ない。

油中水滴形 (W/O) エマルジョン燃料は (c) に示す構造をもち、(b) の油と水を入れ変えた形をしている。燃料として使える水の添加範囲では安定性は良くないが、粘度上昇も少なく、さらに後述するように留出残渣油には好ましい燃焼特性をもたらす。

第2図に O/W エマルジョン (a) と (b) および W/O エマルジョン (c) の顕微鏡写真を示す。99.0 vol% と極端に高濃度のエマルジョンでも、水溶性染料で外相を染め、それと反対色の裏光をあてると鮮明な写真を撮ることができ、第3図に示した14面体の切断面である六角形セルが認められる。第2図 (b) は高性能ライン・フロー混合機で調製した軽油エマルジョン写真の一例で、内相の粒径が $< 10 \mu\text{m}$ でばらつきの少ないものが安定度が高い。(c) では内相の水の形状は外相が重油であるだけに明瞭ではないが、黒い部分が水相、白い部分が油相で $1 \sim 3 \mu\text{m}$ の球状である。

3. 実験方法

限られた寸法の燃焼器へ噴霧された燃料散滴の燃焼時間が長いと、火炎が大きく伸びて燃焼室容積を広くする必要を生じたり、未反応炭化水素の排出量の増加を招き、熱負荷分布、空気過剰率や伝熱特性にも影響する。エマルジョン燃料は常識的には燃焼速度が遅くなると考えられ、このような危ぐをもたれるのは当然と思われる。本実験はそれが現実のものであるかを確かめるために計画された。

液体炭化水素燃料滴で採られてきた古典的な燃焼速度測定装置を第4図に示す。300W白熱灯を裏光として、NDフィルタおよび青色フィルタを通し試料滴にあて、影写真を12~100 f/sの駒速度で16mmフィルムに収めた。通常この種の実験では試料滴を吊すのに0.1~0.3mm ϕ の石英糸を用いるが、高濃度エマルジョンは燃焼途中で滑落してしまう。そこで、石英糸を0.9mm ϕ と太くし、第4図(a)および(b)に示すように先端に約1.9mm ϕ の球をつくったものと、(c)に示す従来形の0.2mm ϕ のものと、エマルジョンの粘着性と濃度によって使いわけた。

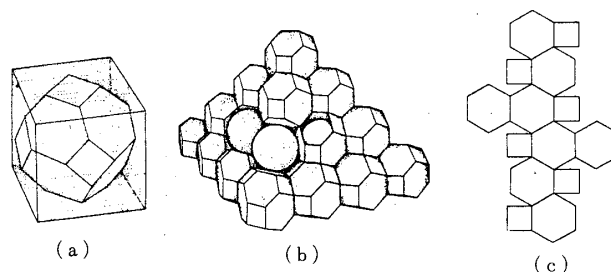


Fig. 3 Basic tetrakaidecahedron (a), tetrakaidekahedral packing (b) and two-dimensional nets for the construction of tetrakaidecahedron (c)

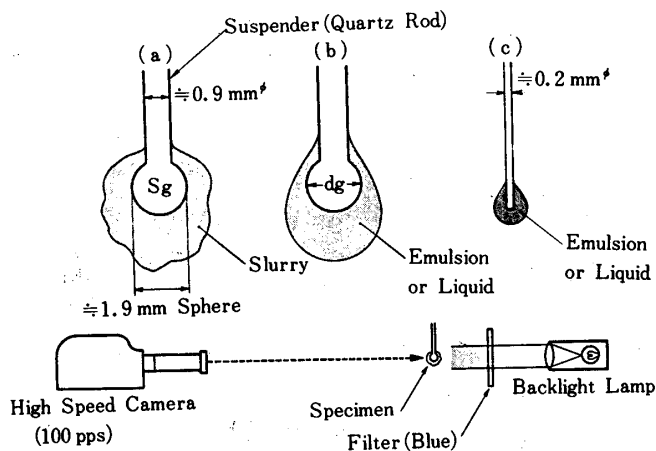


Fig. 4 Suspended droplet configuration and experimental apparatus

エマルジョン燃料は界面活性剤としてジエタノールアミン脂肪酸アמיד ($C=9\sim 14$) とジエタノールアミン [1:1] 混合溶液 (以下 SAA (a) という), N-アルキル β -アミノプロピオン酸 ($C=12\sim 14$) [5] (以下 SAA (b) という) および X-8102 (成分機密) を O/W 系エマルジョン燃料をつくるのに用い, エマルファイン H (以下 SAA (c) という, 成分機密) を W/O 系エマルジョン燃料に用い, 既報 [6] の方法で調整した。試料滴はスポイトで石英チップにつけ, 着火は炭酸ガスレーザ [7] または LPG パイロット炎により行った。

燃焼滴径は高速度写真を引伸して断面積 (S) を求め, 小林らの方法 [8] によりなす形燃焼滴を同じ断面積をもつ球に置き換え, $d=2\sqrt{S/\pi}$ をもって相当径とした。

n -ヘプタン, n -オクタン, JP-4 およびケロシンの O/W エマルジョンについては走査熱量計, 示差熱天秤および微分熱天秤を使って熱分析を行い, ミクロ爆発, 曇点および可溶化限界と温度の関係について検討を加えた。

4. 実験結果と考察

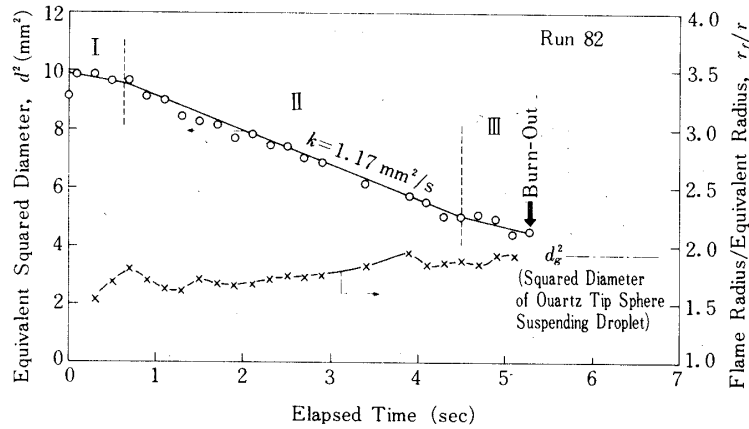
4.1 留出油 O/W エマルジョン燃料滴の燃焼特性

燃焼データは単一組成の液滴が燃焼する場合の整理法として知られている d^2 と, 対向流火炎面半径 r_f と滴の相当半径 r との比の, 時間 (t) 変化でまとめている。燃焼が蒸発過程によって律速されているときには,

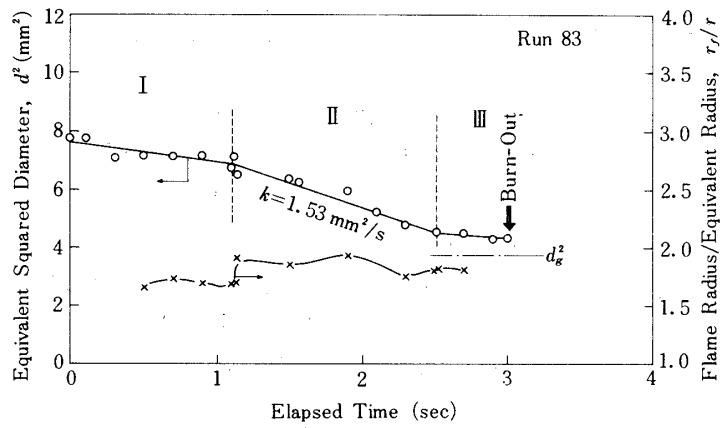
$$d^2 - d_0^2 = k(t_0 - t) \quad (1)$$

が成立つ。ここで, d は滴の直径, d_0 はこの関係が成立つときの初期径, k は燃焼速度定数, そして t_0 は d^2 則開始時点である。

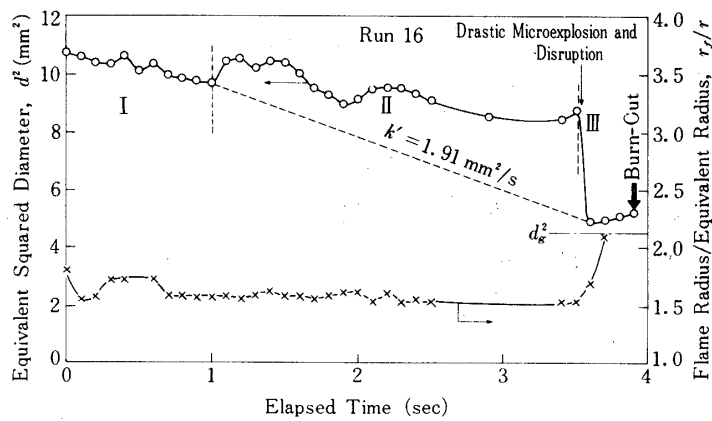
留出油エマルジョンの燃焼過程は, それぞれ長短の差が燃料の種類, 濃度, 周囲の条件により生ずるが, 次の 3 期に分けて考えられる。I 期は慣用燃料滴にも存在する着火遷移期,



(1) Gas Oil 100%



(2) Gas Oil 90 vol %, H₂O 6.7%, SAA (c) 3.3%



(3) Gas Oil 90 vol %, H₂O 6.7%, SAA (b) 3.3%

Fig. 5 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning gas oil and O/W emulsified gas oil droplets

Ⅱ期は(1)式が成立つ準定常燃焼域、そしてⅢ期はⅡ期後半から間欠的に起こっていたマイクロ爆発と分裂が盛んになり、時には母滴が一瞬のうちに消滅、霧散してしまう領域である。マイクロ爆発(Microexplosion)と分裂(Disruption, Disintegration)は同じ意味で使われることが多いが、ここでは燃焼滴から熱水あるいは水蒸気が噴き出す現象を指し、分裂は母滴から複数の子滴が飛び出して、分布燃焼をするイベントと定義する。

軽油液滴は d^2 則にしたがって燃焼するが(第5図(1))、そのエマルジョンは第5図(2)のように d^2 則があてはまるⅡ期をもつ場合と、全くあてはまらない第5図(3)の d^2 履歴をたどることが往々にしてある。後者においては滴内に水蒸気泡が発生して、本例では着火後3.53secの時点でその急激な放出があり、1/100sec以内に粒径が大きな変化をしている。第6図はその前後における高速度撮影写真のシーケンスを示したものである。この時点で水蒸気の霧散とともに軽油の微粒子が広く散布され燃焼している様子がうかがえる。第5図(2)と(3)がどのような条件で起こるのかは明確ではないが、結果的にみていずれの場合も燃焼時間はエマルジョン滴の方が軽油液滴の燃焼寿命より短い。

それはマイクロ爆発と分裂によって、熱水散滴は飛沫同伴作用により水蒸気が油滴を撓ね飛ばし、機械的に燃料を微粒子の形で持ち去るため見掛けの燃焼速度が大きくなるからであって、燃焼滴からの蒸発速度が高まるためではない。

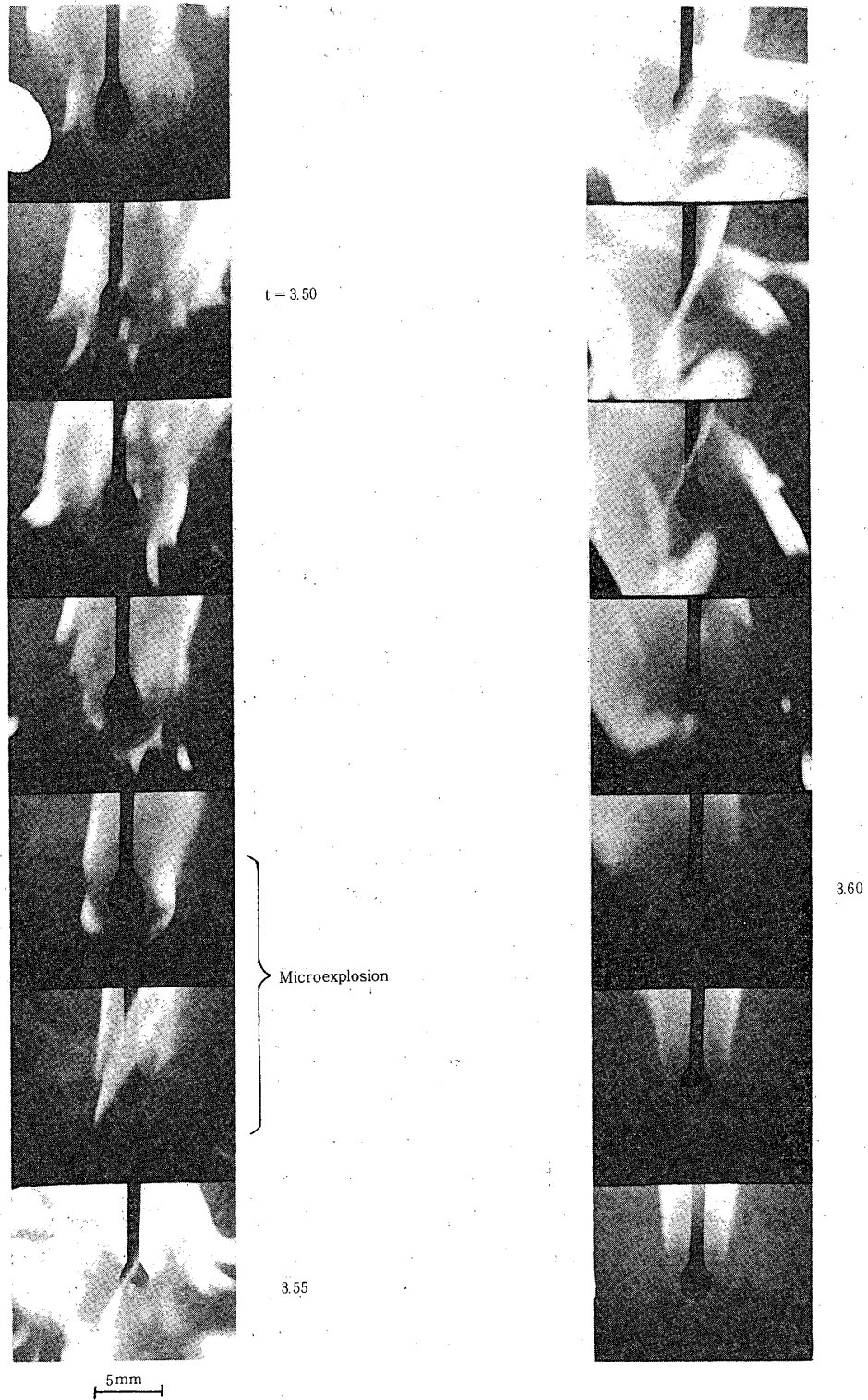
いま、水と界面活性剤が軽油の平均沸点において可溶化していると仮定し、多成分系の燃料液滴燃焼理論[9]を適用すると k は次式で表わされる。

$$k = \frac{8\lambda}{\bar{C}_p \rho_e} \ln \left\{ 1 + \frac{1}{Y_f L_f + Y_w L_w + Y_s L_s} \left[\frac{Y_{0,\infty} Q}{i} + \bar{C}_p (T_\infty - T_e) \right] \right\}$$

ここに、 \bar{C}_p : 滴表面と火炎面間のガスの平均温度における定圧比熱、 i : $(Y_o^*/Y_f^*)_{stoich}$ 、 Y_f^* , Y_o^* : 燃料ガスと酸素の全反応物質に対する重量分率、 L_f , L_w , L_s : 燃料、水および界面活性剤の蒸発潜熱、 Y_f , Y_w , Y_s : エマルジョン中の燃料、水および界面活性剤の重量分率、 $Y_{0,\infty}$: 空気中の酸素の分率、 Q : 反応熱、 ρ_e : エマルジョン密度、 λ : 熱伝導係数、 $T_{0,\infty}$: 雰囲気温度、 T_e : 燃焼滴の表面温度である。

上式を $T_e = 250^\circ\text{C}$ 、軽油の L_f はNelsonチャート[10]から求め、界面活性剤の $L_s = 200 \text{ cal/g}$ として計算してみると、10%の水を含む軽油エマルジョンは20%程度の k の低下をもたらすはずである。しかし、第5図(2)の k は $1.53 \text{ mm}^2/\text{s}$ と純軽油の $1.17 \text{ mm}^2/\text{s}$ よりも高い。(3)においてもⅠ期の終点からⅢ期の始まりの間を仮に第5図(3)に示すように直線で結ぶとそのこう配は $1.91 \text{ mm}^2/\text{s}$ となり実質上、軽油滴の k より大きい。しかし、このような d^2-t 曲線は第7図(2)に示されるように、水または水蒸気が燃料で蔽われて滴心に析出しているときに起こりうるもので、第5図(2)は析出した水が表面に到達する前のある程度の大きさに成長し急速に噴出する第7図(1)のモデルに近いと思われる。

第8図に示すようにエマルジョンの灯油含有量が97vol%と高濃度の場合、Ⅱ期における k の減少はみられず、 k が原材燃料の k より小さくなるのは第9図および第10図をみると90vol%以下の濃度をもつエマルジョンである。たとえⅡ期において、 k が小さくなくても燃



A combustion sequence of emulsified gas oil droplet at the final period (Gas oil 90 vol%, Water 6.7%, SAA(b) 3.3%, 100 pps)

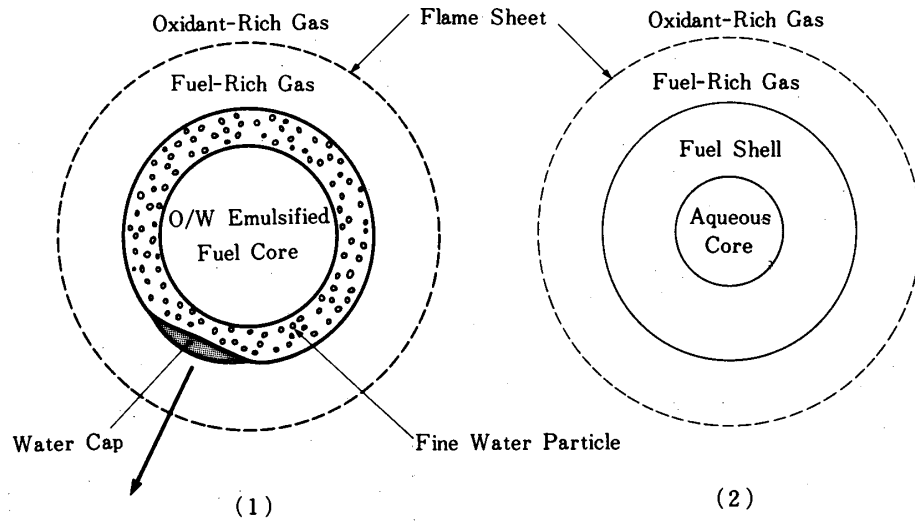
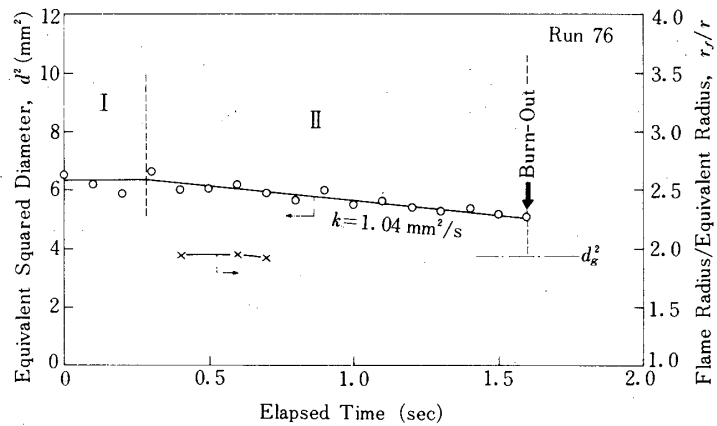
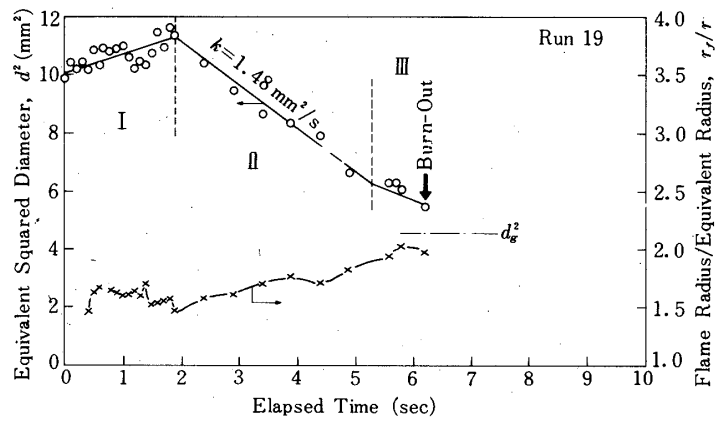


Fig. 7 Models of emulsified-fuel droplet combustion



(1) Kerosene 100%



(2) Kerosene 97 vol %, H₂O 2%, SAA (a) 1%

Fig. 8 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning kerosene and O/W emulsified kerosene droplets

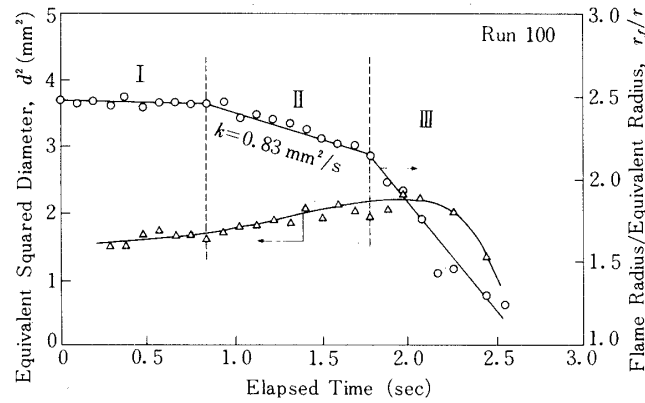


Fig. 9 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning O/W emulsified kerosene droplets (Kerosene 90 vol%, Water 6.7%, SAA(a) 3.3%, Quartz droplet suspender 0.2mm dia.)

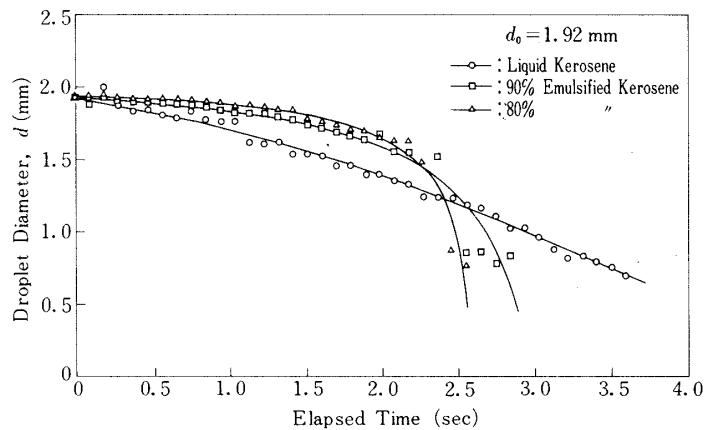


Fig. 10 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning emulsified kerosene droplet (Water:SAA(a)=2:1 by volume)

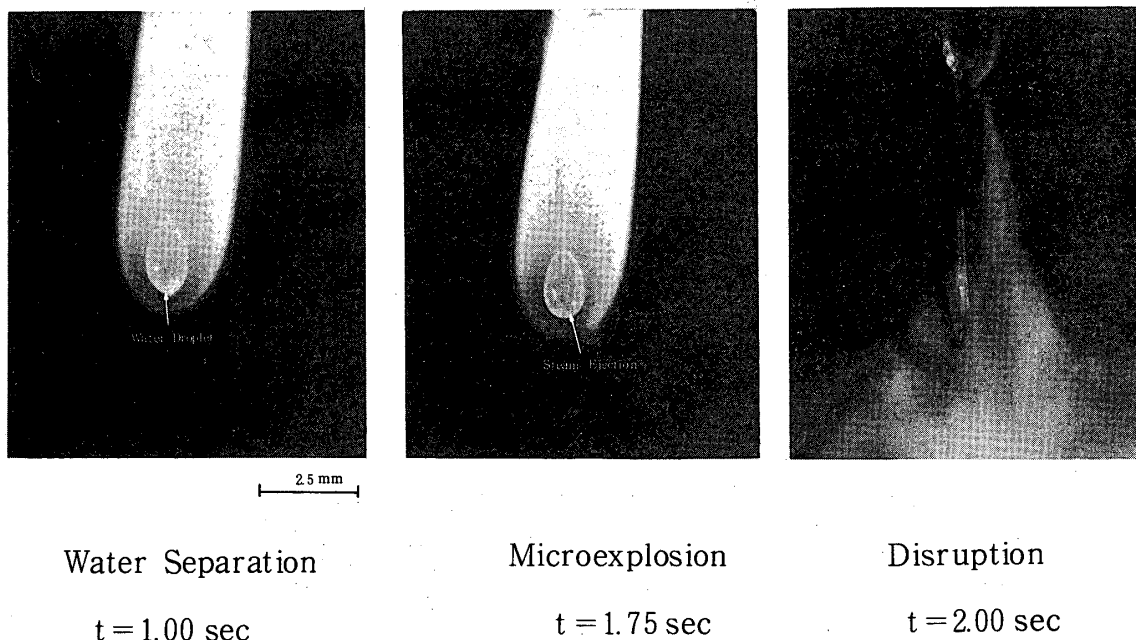


Fig. 11 Singular combustion of kerosene emulsion droplet (Kerosene 96 vol%, Water 2.7%, SAA(a) 1.3%)

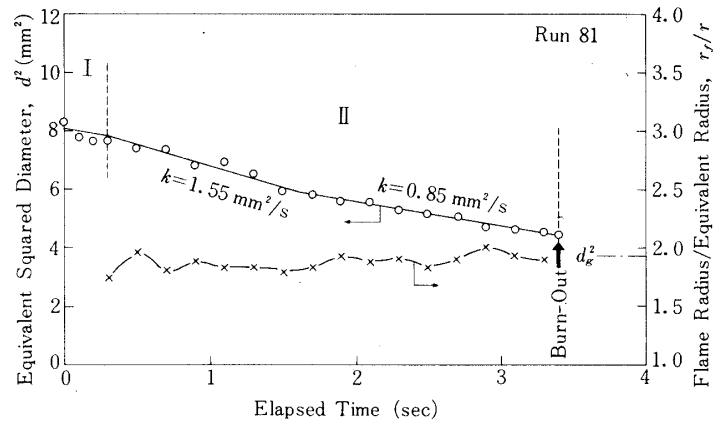
燃焼時間は原材燃料よりずっと短くなることを第10図が明らかにしている。すなわち、燃焼後期において起こるマイクロ爆発と分裂は見掛けの燃焼速度を著しく増加させ、約2mm ϕ の初期径をもつ灯油でそのO/Wエマルジョンは20~25%燃焼時間が短くなる。灯油エマルジョンのⅡ期後半における水の析出、水蒸気の噴出およびⅢ期にたまたま起こった分裂の様態を第11図の写真は示している。

これらの燃焼写真をみると、着火後3.5secとかなり時間が経っているにもかかわらず、滴中心には排液されずにエマルジョン状態を保っている部分があること、しかもエマルジョンの透明度が高いことに気付く。ここに使われている界面活性剤は、非イオン形のジエタノールアミン脂肪族アמידで、常温付近では水相にとけミセルをつくり油がその中に溶けこんだ可溶化状態から多量の油を加えてO/Wエマルジョンにしたものであるが、燃焼している間に中心に残っているエマルジョン滴は次第に加熱され、可溶化度を高め、曇点を過ぎるとW/Oへ転相し、油の方へ今度は界面活性剤が多く溶けるようになりそのなかに水を溶解する逆形ミセルをいったん形成する。この透明部分はこのようにO/W、W/Oおよび可溶化界面活性剤相が同心球状につながった状態にあり、外側に排液された油相をもっている。

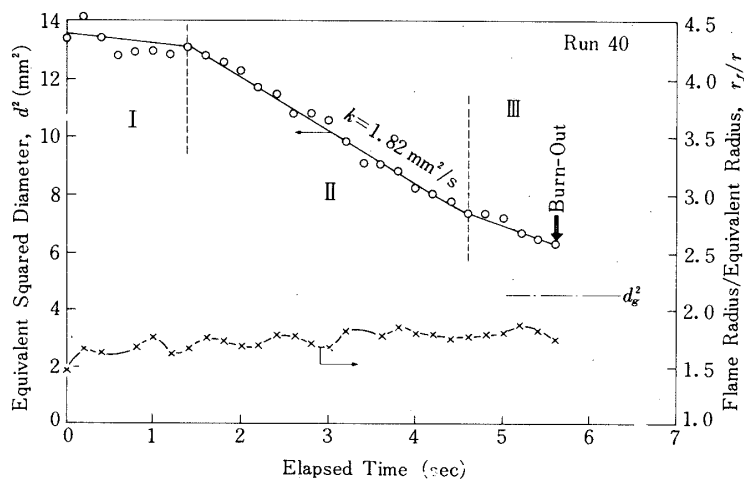
したがって、O/Wエマルジョンは熱によって滴内で壊れていく過程で、可溶化の進展、W/Oへの転相、逆可溶化、そして曇点に達した後、排液するという目まぐるしい変化を受ける。エマルジョン内では対流がなく、滴内の温度こう配は急であり、析出した水は滴の表

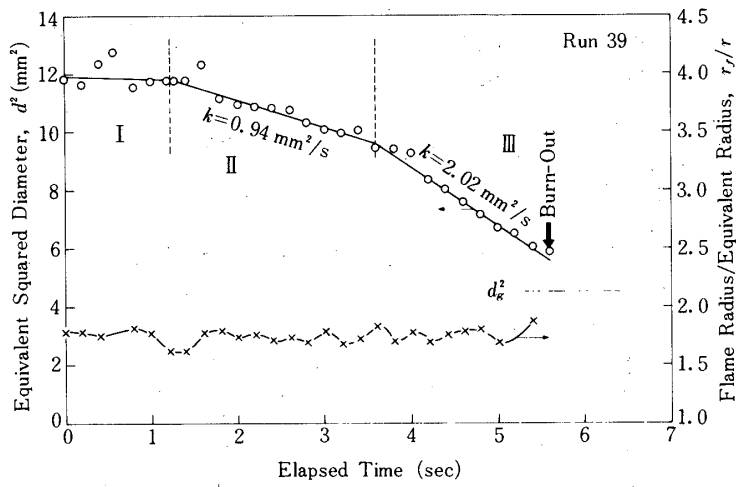
面温度が 100°C よりずっと高ければ必ず急速加熱を受けるであろう。JP-4、灯油、軽油および重油エマルジョンのマイクロ爆発はこのような機構によって熱水と過熱水蒸気を噴き出していると考えられ、それによって油に対する微粒化効果が期待できる。

ただし、この実験では水と界面活性剤の比率を 2 : 1 と一定にしているため、燃料濃度が低いものほど可溶化率を高めている。もちろん、実用化されているエマルジョン燃料の界面活性剤添加量はコスト面の制約から 0.1 ~ 0.3% に抑えられているため、油一相の逆可溶化ミセルが形成される過程を経ることなくエマルジョンはいきなり水滴を析出し表面から熱水あるいは過熱水蒸気となって噴出するのである。この場合のモデルは第7図(1)に示されている。

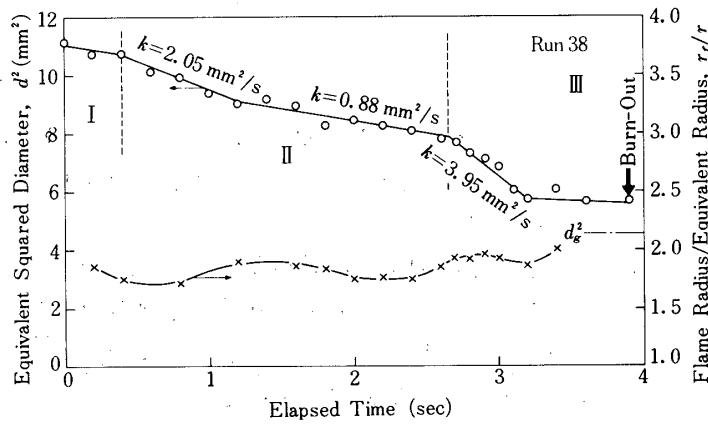


(1) JP-4 100%

(2) JP-4 99 vol %, H_2O 0.67 %, SAA (a) 0.33 %



(3) JP-4 95 vol %, H₂O 3.34%, SAA (a) 1.66%



(4) JP-4 90 vol %, H₂O 6.67%, SAA (a) 3.33%

Fig. 12 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning JP-4 droplets

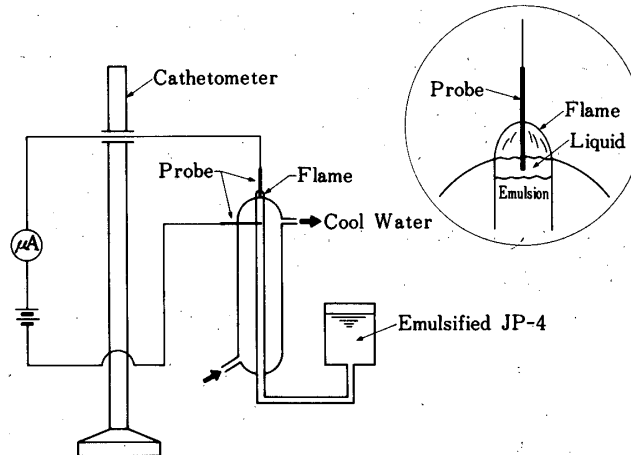


Fig. 13 An apparatus for measuring the drained layer thickness on burning emulsified fuel surface

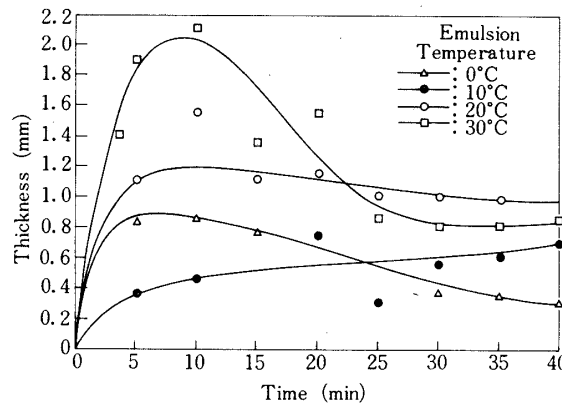


Fig. 14 Thickness of drained liquid layer on burning JP-4 emulsion (JP-4 99 vol%, Water 0.67%, SAA(a) 0.33%)

第12図にJP-4およびそのエマルジョン燃焼滴の d^2-t 、および $r_f/r-t$ 曲線を示す。ワイド・カット・ガソリンと呼ばれているJP-4は灯油とガソリンの混合物として取扱うことができ、 d^2-t 曲線には灯油とガソリン・エマルジョンの双方の特性が現われる。Ⅱ期では多くの低沸点炭化水素と同様、前半の燃焼速度が高く、後半には低くなる傾向がみられること、Ⅲ期におけるマイクロ爆発が原因となる見掛けの燃焼速度の増大は、灯・軽油エマルジョンと共通する現象である。それ故、JP-4でもエマルジョン化によって燃焼時間の短縮は期待できるが、灯・軽油の場合とは異なり分裂はあまり起こらない。燃焼末期における r_f/r の急激な上昇や振動も灯・軽油エマルジョンと比べると小さい。

ここで、エマルジョン滴の着火過程における排液層の発達について考えてみよう。着火から準定常燃焼へ移行するまでの遷移期、すなわちⅠ期ではエマルジョンの排液速度が燃焼速度を支配している。Ⅰ期の長さは試料滴表面のマトリックスの堅牢さ、空気ばく露時間、周囲温度、湿度等、種々の因子によって変わるが、エマルジョンの排液速度が質量燃焼速度の準定常値に追いつくのはⅡ期に入ったときである。

第13図は液面燃焼で排液層が発達する速度を調べる目的で準備した簡単な装置を示す。O/W エマルジョンは外相マトリックスが水で形成されているために電気伝導度が高く、たとえばJP-4の比抵抗は $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ のオーダーであるがエマルジョンにすると $(2 \sim 10) \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ に下がる。この性質を利用して燃焼面からプローブを挿入して、電流が急増する位置をカセットメータで読みとれば排液層の厚さを知ることができる。排液層の厚さの着火後の変化は第14図に示されているように、エマルジョン温度を一定に保っている場合は、非常にゆっくりとしている。その値は排液量と蒸発量が一致したところで定常状態となるが、それまでには分のオーダーの時間がかかっている。エマルジョン滴の燃焼中の温度分布は非定常であって、排液層の厚さが一定になるのはずっと早い、それでもエマルジョン相が消滅するのには、少なくともJP-4ではⅡ期中途まではかかると思われる。

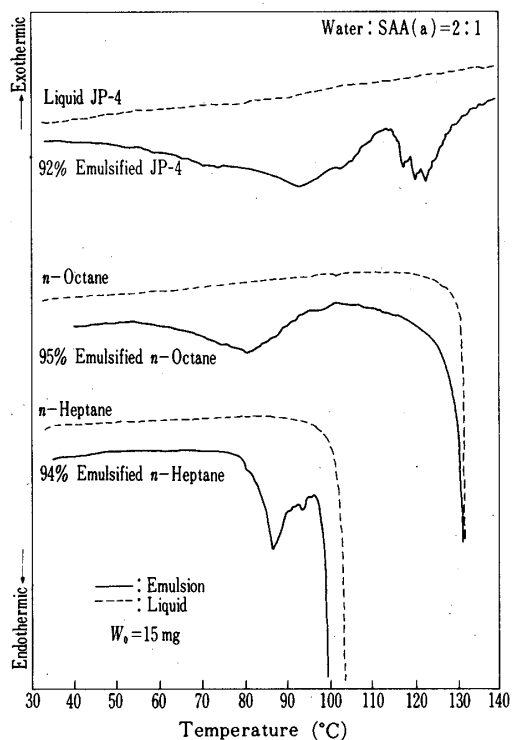


Fig. 15 An example of DSC curves of JP-4, n-octane, n-heptane and their O/W emulsions (Water:SAA(a)=2:1 by volume)

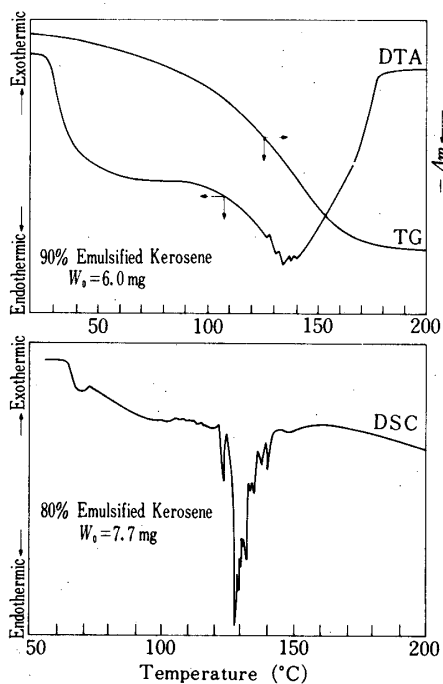


Fig. 16 An example of DSC, DTA and TG of emulsified kerosene (Water:SAA(a)=2:1 by volume)

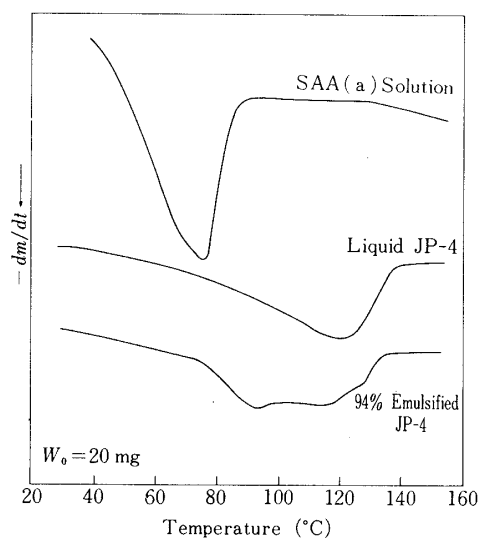
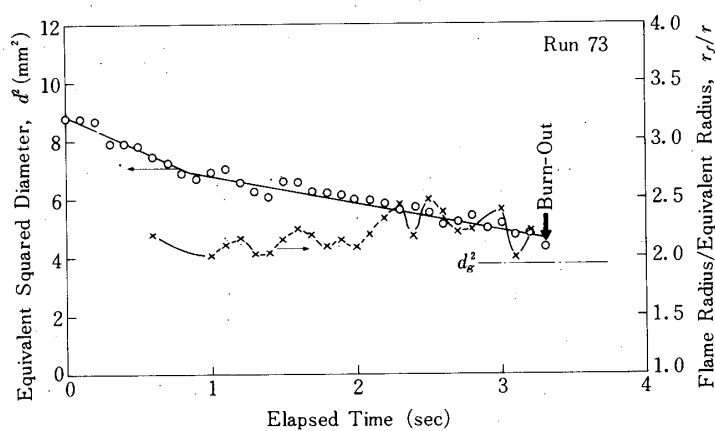


Fig. 17 An example of DTG curves for JP-4 emulsion (Water:SAA(a)=2:1 by volume)

次にエマルジョンの排液温度やマイクロ爆発の発生が始まる温度を知るために、ジェットノール脂肪酸アמידでエマルジョンにした n -オクタン、JP-4および灯油について走査熱量計(DSC)、示差熱天秤(DTA, TG)、微分熱天秤(DTG)による熱分析を行い、第15、16図および17に測定例を示した。DSCデータよりSAA(a)を用いたエマルジョンの排液温度は約60°Cであること、80~95°Cにおける吸熱はエタノールアミン水溶液の蒸発によるものであることが判り、そしてJP-4と灯油エマルジョンでは、115~125°Cおよび120~140°Cに鋭い吸熱スパイクが認められた。これがマイクロ爆発や分裂を起こす温度範囲であることを知ることができた(第15、16図)。第17図のDTG曲線においてもJP-4が115~125°Cで重量減少率が最大となる第2ピークがあり、原材料のその位置より約10°C低いところにある。ここにおいて燃料が飛沫放散を盛んに起こしていることがわかる。

一方、 n -ヘプタンおよび n -オクタン・エマルジョンは排液後、水溶性の界面活性剤原料が蒸発することによる吸熱と油自身が沸点に達したときの蒸発以外には大きな吸熱は認められない。

この結果を裏づけるものとして、 n -ヘプタンと n -オクタンのSAA(a)および(b)によるエマルジョン滴は、消火直前の試料を懸垂している石英チップの過熱によって界面活性剤を含んだ僅かに残った油が燃焼するときのマイクロ爆発を除いて、燃焼の途中ではマイクロ爆発も分裂も起こさないことを見出した。第18図および第19図にこれらのエマルジョンの d^2-t および $r_f/r-t$ 曲線を示す。高速度撮影フィルムをみると n -オクタン、 n -ヘプタンともに表面に排液層がないか、あるいはたとえあったとしても極めて薄いこと、すなわち全燃焼過程を通じて燃焼速度を律速しているのは排液(エマルジョンの破壊)速度である。著者らは n -デカンより炭素数が多い燃料エマルジョンのプール上を火炎が伝播すると



(1) n-Octane 100%

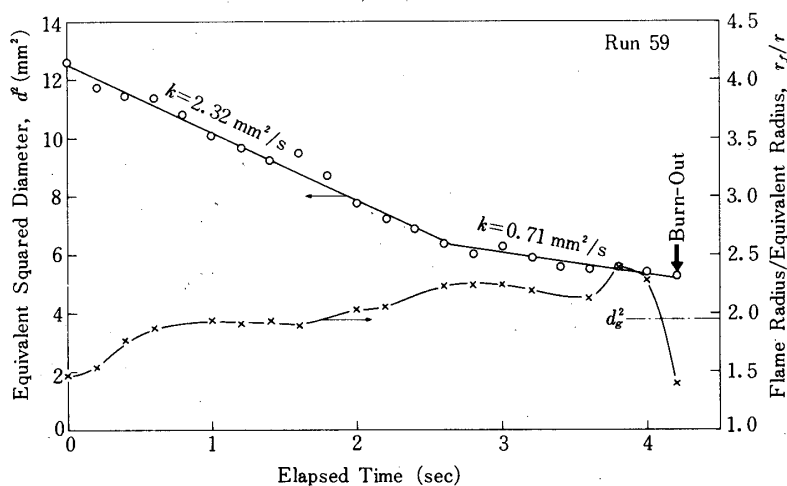
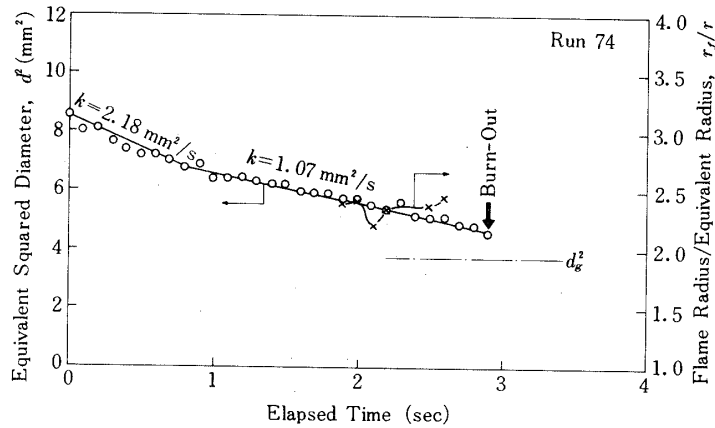
(2) n-Octane 90 vol%, H₂O 6.67%, SAA (a) 3.33%

Fig. 18 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning n-octane and its O/W emulsion droplets

き排液流の存在が前提となるが、*n*-ノナンより炭素数が少ない燃料について排液流がないことを見出しており [11], これは滴の燃焼と全く同様の現象であることは興味深い。

以上の事実により、*n*-ヘプタンと*n*-オクタンのエマルジョン滴の燃焼においては JP-4 より高い留出温度をもつエマルジョン燃料滴に存在する I および III 期に相当する過程はない。燃料蒸気と水蒸気は 2 節に示したエマルジョンのセルから発生したミクロン規模で相接するコラム集団を形成して、エマルジョン表面を離れるので、マクロにみると両者はよく混合された形で火炎面へ進入する。ミクロ爆発や分裂が起こらないのは滴表面から離れるまで水滴が過熱される条件にないからであろう。しかし、表面の微細構造については W/O に既に転相しているのか、沸点に近い表面温度で逆可溶化により水が油に溶けて油連続の一相になった薄膜が存在しているのか、あるいは余分の水の析出量が極めて僅かな状態であるのかは不明であり今後の研究を待ちたい。



(1) n-Heptane 100%

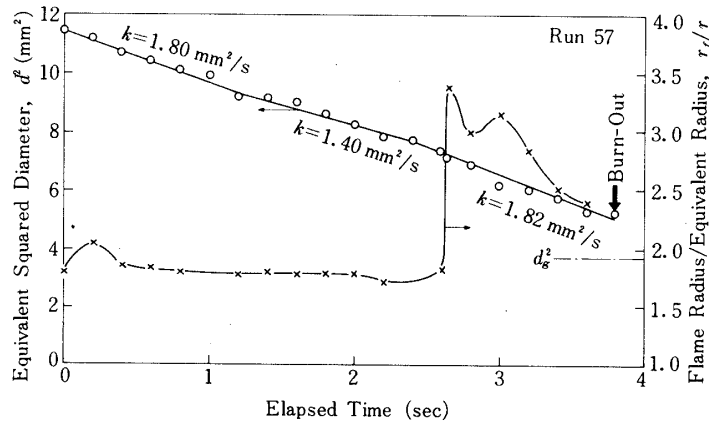
(2) n-Heptane 90 vol %, H₂O 6.67%, SAA (a) 3.33%

Fig. 19 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning n-heptane and its emulsion droplets

なお、これまで述べてきた留出油エマルジョンの r_f/r は、見掛け燃焼速度が同じならば原材燃料のそれよりも小さくなる傾向がある。これはエマルジョン化のために燃料の質量噴き出し速度が小さくなることと関連しているためであって、従来の単一液滴の理論と実験に矛盾するものではない。

4.2 C 重油エマルジョン燃料滴の燃焼

重油液滴の燃焼研究の多くは、高温酸化性雰囲気中に液滴を急速に挿入する方法で行われてきた。常温雰囲気では揮発性成分と燃焼過程で高分子量成分が熱分解をうけて発生したガスが燃焼した後に、多量の炭素状物質 (Cenosphere) を残し、高温雰囲気でないとは燃焼がそこで中断されるからである。しかし、常温空気中における重油エマルジョン滴の燃焼実験によっても、いくつかの原材燃料にはない特性を見つけることができる。エマルジョン化によって、一般に炭化水素燃料はパイロット火炎による着火性が良くなり、煙も減少するので実

験は容易になり、COMについても重油エマルジョン/石炭系の方が水を含まない系より着火、燃焼性ともに優れている。

第20図に示す写真(a)はC重油の燃焼初期に暫時続く穏かな燃焼、(b)は内部から熱

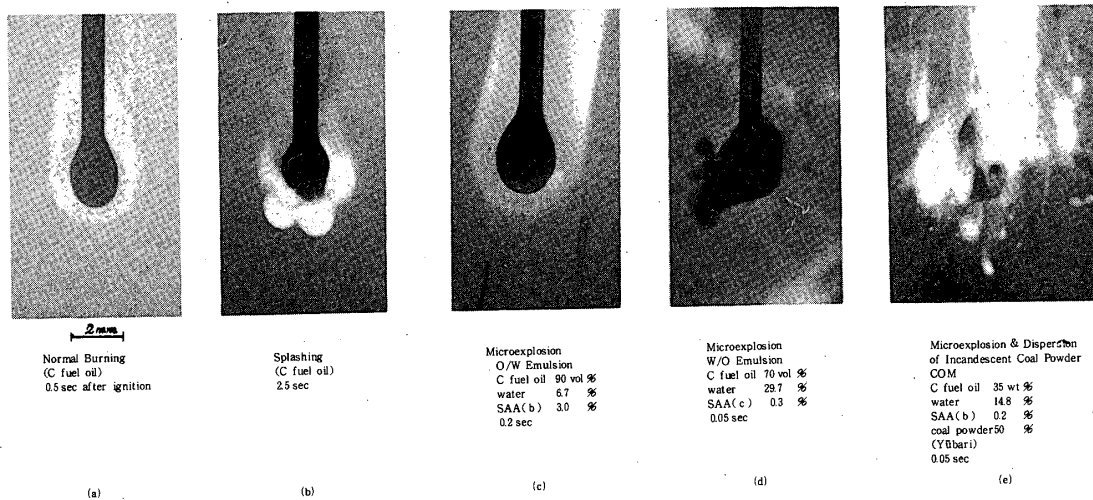
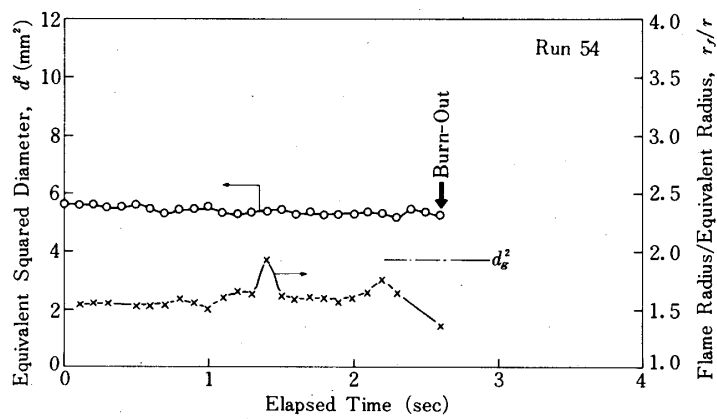
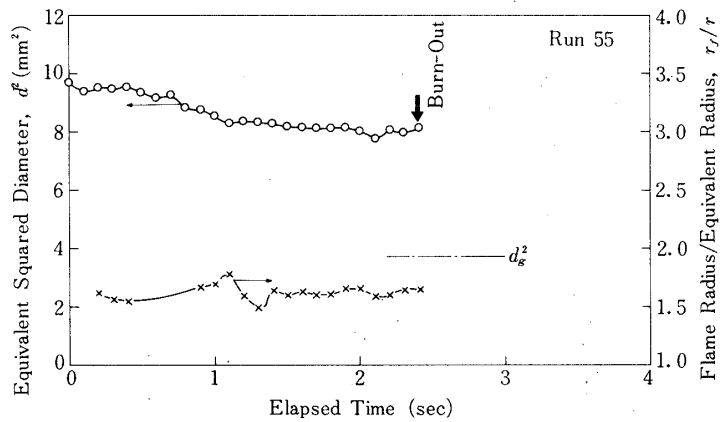


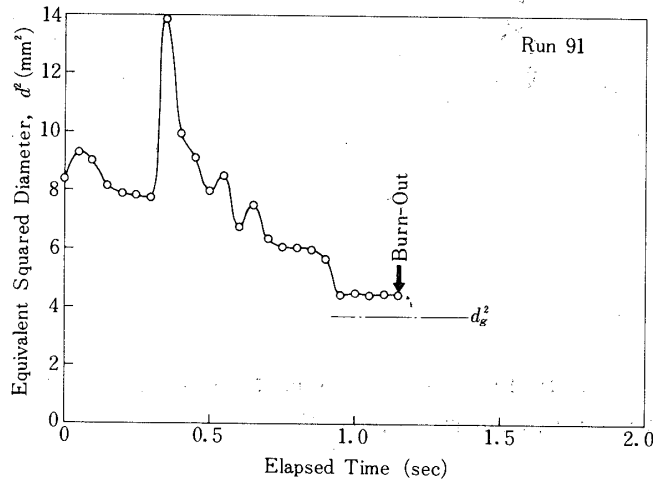
Fig. 20 A comparison of burning droplet characteristics for C heavy oil, its emulsion and, C heavy oil and coal powder mixture (COM)



(1) C heavy Oil 100%



(2) O/W Emulsion, C heavy Oil 90 vol%, H_2O 9.7%, SAA (b) 0.3%

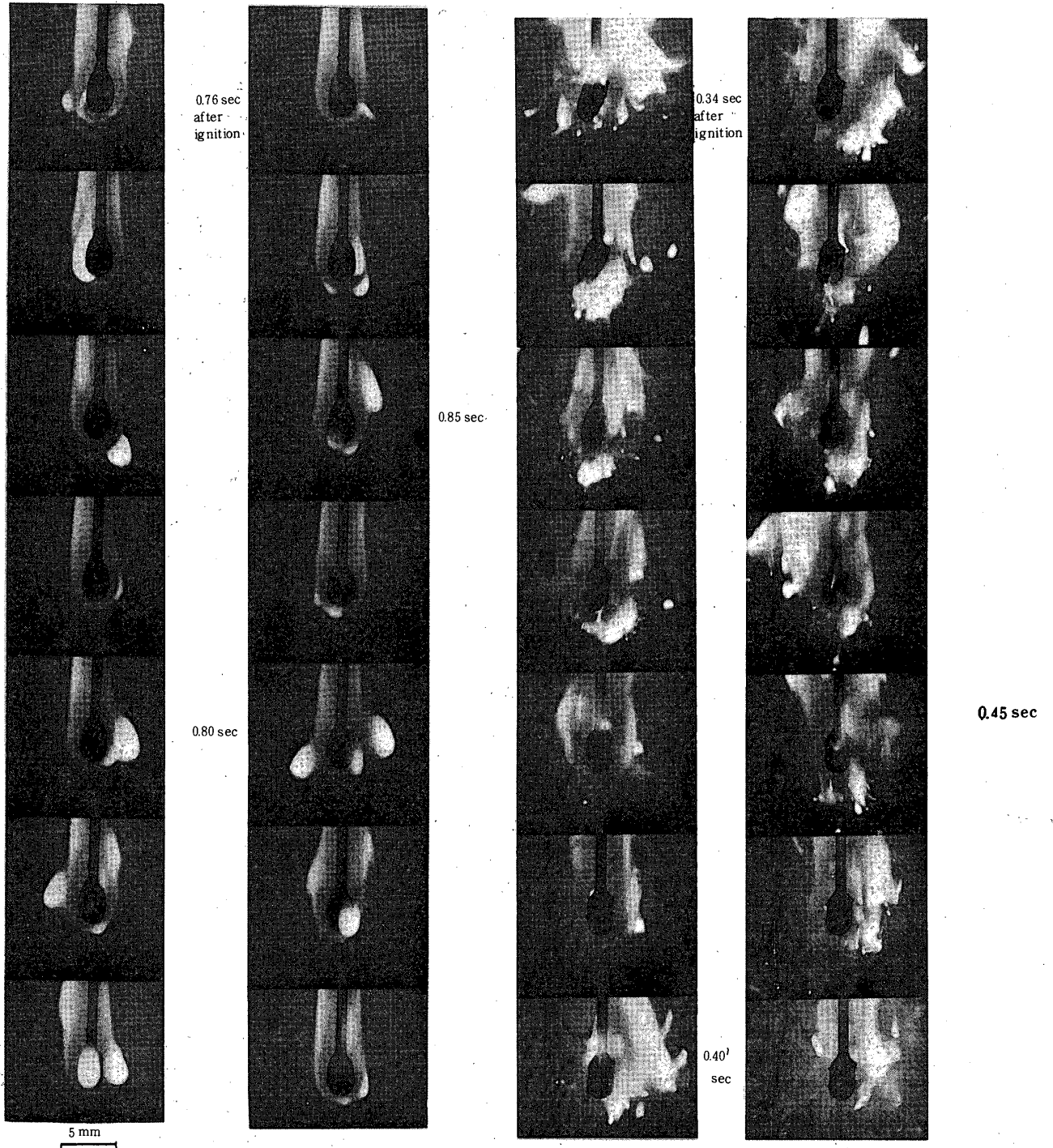


(3) W/O Emulsion, C heavy Oil 70 vol%, H_2O 29.7%, SAA (c) 0.3%

Fig. 21 Time history of equivalent diameter and flame radius ratio for burning C heavy oil and its emulsion droplets

分解ガスが噴出して燃えている“Splashing”と呼ばれている現象である。これを何度か繰返して Cenosphere を残して燃焼中断し、 d^2-t 曲線は第 21 図 (1) のような経過をたどり、直径はほとんど変化しないままに終わる。また、O/W 系 C 重油エマルジョンはマイクロ爆発がみられるのは軽油、灯油および JP-4 の場合と同様であるが (第 20 図 (C))、常温空気中においては Cenosphere を減らすことにはあまり効果はないようである (第 21 図 (2))

これに対し、エマルフェイン H (第一工業製薬) を界面活性剤に用いた W/O 系 C 重油エマルジョンは、マイクロ爆発がひん繁に起こるのはもちろん、第 20 図 (d) に示すように分裂も盛んに発生する。したがって、母滴は C 重油液滴を高温空気雰囲気における燃焼と同様、



C Fuel Oil 95 vol %, H₂O 3.34 %
 SAA(b) 1.66 % + NATAL [1:1]

C Fuel Oil 95 vol %, H₂O 3.34 %
 SAA(b) 1.66 % + Yūbari [1:1]

Fig. 22 A sequence of single droplet combustion of COM

僅かな炭素分しか石英チップに残さない (第 21 図 (3)).

石炭微粉/C重油/水/界面活性剤からなる石炭・重油混合系のスラリー形エマルジョン滴の燃焼の一例が第 20 図 (e) に示されている. 熱水, 水蒸気および重油熱分解ガスの噴出, 燃焼の挙動については O/W 系 C 重油エマルジョンと変わるところはないが, 灼熱石炭微粉が火炎面から飛びだし, 重油エマルジョン滴がつくる拡散火炎の影響がおよばないところで燃焼する. 夕張炭 (<150 メッシュ) のような例と, 拡散火炎帯のなかで燃焼が終わりエマルジョン滴の燃焼挙動と目立った差がみられない NATAL (>200 メッシュ) で代表される 2 つの燃焼形態をとるようである (第 22 図). 微粉の独立性と空気混合性は後者の方が良いが, 実際の燃焼器に噴霧されたときこのような燃焼をさせることは難しく, むしろ微粉がある程度の大きさの集団をつくって前者のような燃焼をするのではないかと思われる. スラリー燃料の燃焼については石炭の適正粒度, 界面活性剤の選定, 水の添加の有無, 物性, 噴霧性, 移送性, 貯蔵性など, それに進む前に研究すべき課題が多いため, 研究はまだ緒に付いたばかりであるが今後の発展が望まれる分野である.

Table 1. Overall Burning Rate Coefficient, k'

Run No.	Composition	Emulsion Type	Initial Dia. (mm)	k' (mm ² /sec)
54	100 vol %		2.53	1.03
55	H.O. 90 %, W 6.7 %, SAA (b) 3.3 %	O/W	3.08	2.40
88	H.O. 95 %, W 4.7 %, SAA (c) 0.3 %	W/O	2.63	1.28
C heavy oil	H.O. 90 %, W 9.7 %, SAA (c) 0.3 %	W/O	2.79	1.30
91	H.O. 70 %, W 29.7 %, SAA (c) 0.3 %	W/O	2.89	4.02
63	H.O. 95 % Emulsion+Yubari[1:1]	O/W	2.89	1.07
65	H.O. 95 % Emulsion+NATAL[1:1]	O/W	3.19	1.95
82	100 %		3.02	1.02
Gas oil	G.O. 90 %, W 6.7 %, SAA (b) 3.3 %	O/W	3.28	1.60
7	G.O. 90 % Emulsion+Yubari[1:1]	O/W	3.01	4.66
17	G.O. 90 % Emulsion+NATAL[1:1]	O/W	3.78	4.81

* See Fig 5(3)

** $k' = (d_0^2 - d_g^2)/t_b$

第 1 表はスラリーを含む軽・重油エマルジョン滴の燃焼速度を比較するために, 守屋の方法 [12] にしたがって $d_0^2 - d_g^2$ を燃焼時間 (t_b) で除した, 相当燃焼速度定数ともいふべき値を掲げたものである. O/W 系, W/O 系, スラリーとエマルジョンの種類を問わず, Cenosphere は減少するにもかかわらず, この値は原材燃料の C 重油のそれよりも大きくなっていて, 留出油と同じく燃焼時間の短縮に役立っている.

5. 結 論

(1) JP-4, 灯油あるいは軽油のように水の沸点より遥かに留出温度が高い成分をも

つ燃料は、O/W エマルジョン滴の燃焼末期に、熱水および過熱水蒸気が噴出するマイクロ爆発が起こり、時には瞬時に分裂して母滴が消滅する。これに対し、 n -オクタン、 n -ヘキサンなど沸点が100℃に近い燃料のエマルジョン滴は、そのエマルジョンが安定性が高いものであれば燃焼終点を除きマイクロ爆発現象は認められない。

(2) ミクロ爆発と分裂現象は燃料の微粒化に顕著な効果を持つほか、エマルジョン滴の準定常燃焼期における燃焼速度定数が、たとえ原材燃料のそれより小さくても、燃焼後期にひん発することによって燃焼時間を短縮させる役割を果たす。したがって、噴霧その他の燃焼技術が当を得たものならば、この燃料の採用によって燃焼器の寸法など根本的な設計変更をすることなく、低公害化と省エネルギーの目的に沿えると思われる。

(3) ミクロ爆発の発生したとき、噴出する熱水および水蒸気の温度は表面から離れる瞬間 JP-4 では115～125℃、灯油においては120～140℃、軽・重油についてはさらに高い温度と推定される。

(4) 重油を対象とするエマルジョン燃料はO/WよりW/Oの方が、著るしく燃焼時間を短縮させ、Cenosphereを減少させる。

(5) エマルジョン燃料と石炭微粉とを混合したスラリー燃料は上記の特性によって石炭微粉を使用した炉の温度負荷の偏在を抑え、灼熱粉炭の空間分布を良好な状態に保って燃焼させることができる。

1978年1月9日 材料部

参考文献

- [1] 岩間 彬, 青柳鐘一郎, 相波哲朗, 本間幸吉, 木村元雄: 東京大学宇宙航空研究所報告 2 (B), pp. 580～603 (1971)
- [2] 乳化コロイド燃料特別講演会要旨: 昭和52年9月, 燃料協会
- [3] M.T. Jacques: 16th Symposium on Combustion, pp. 307～319, The combustion Institute (1977)
- [4] K.J. Lissant: "Emulsions and Emulsion Technology" vol 6, Part 1, pp. 1～69 (1974) Marcel Dekker Inc. N.Y.
- [5] A. Iwama, M. Toyoguchi, M. Kimura and Y. Hamuro: U.S. Patent 3,850,586 (1974)
- [6] 岩間 彬, 豊口 満, 木村元雄, 井原博之: 日特許公 48-7906
- [7] T. Saito, T. Maruyama, K. Higashi and A. Iwama: Combustion Science and Technology 15, pp. 161～168 (1977)
- [8] K. Kobayashi: "Fifth Symposium (International) on Combustion", pp. 141～148 (1955) Reinhold Pub. Co., N.Y.
- [9] B.J. Wood, H. Wise and S.H. Inami: Combustion and Flame 4, 235～242 (1960)
- [10] W.L., Nelson: "Petroleum Refiner Engineering" 169 (1958) McGraw Hill Book Inc., N.Y.
- [11] 未発表
- [12] 守屋邦彦: 石油学会誌 17, 1 pp. 30～39 (1974)

正 誤 表

M-22 残留内圧の計測

宇宙航空研究所報告第14巻第1号(B)

1978年2月

個所	誤	正
p. 330		
p. 331		

エマルジョン燃料滴の燃焼

宇宙航空研究所報告第14巻第1号(C)

1978年3月

個 所	誤	正
p. 510, 12行目	黒い部分が水相, 白い部分が油相で1~3 $\mu\text{m}\phi$ の球状である.	黒い部分が水相, 白い部分が油相で, <u>前者は</u> 1~3 $\mu\text{m}\phi$ の球状である.
p. 511, 5行目	既報〔6〕の方法で調整した.	既報〔6〕の方法で調製した.
p. 513, 4行目	ここでは燃焼滴から熱水あるいは	ここでは <u>マイクロ爆発</u> は燃焼滴から熱水あるいは
p. 514	(図の番号欠落)	<u>Fig. 6</u>
p. 515. 最終行	kerosen and	<u>kerosene</u> and