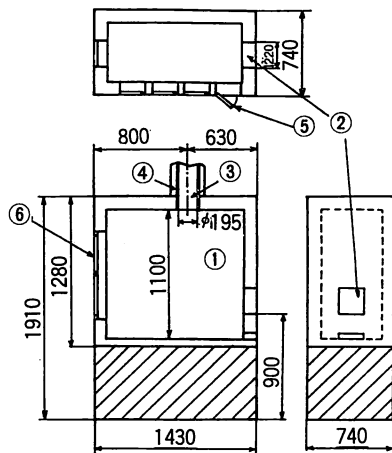


- ① 補助タンク ⑧ ヒータ ⑮ 積算流量計
- ② フィルター ⑨ 温度計 ⑯ ヒータ
- ③ ギャポンプ ⑩ A重油タンク ⑰ 圧力計
- ④ リターンバルブ ⑪ ギャポンプ ⑱ 温度計
- ⑤ 圧力計 ⑫ リターンバルブ ⑲ ニードルバルブ
- ⑥ 流体論理素子 ⑬ 圧力計 ⑳ 流量検定用ノズル
- ⑦ 乳化燃料油タンク ⑭ フローメータ

図-2 実験装置概要

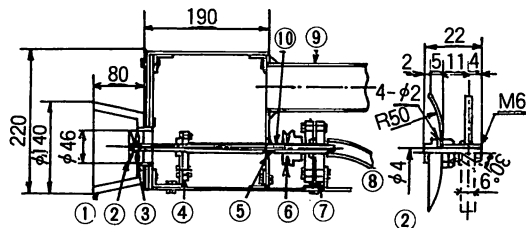
に報告してあるので⁴⁾、ここでは動作原理についてのみふれておく。図-1でφ3mmの円形ノズルから素子中に噴出した水を含んだ燃料噴流は、ノズル上下にすきまがあるためにコアンダ効果による自動的な発振が生じ、左右にゆれ動き素子内の燃料と水を攪拌混合する。目視によるとこの際左右の発振だけでなしに、深さ方向の循環も生じ混合を一層活発にしている。出口近くに設けたしゃへい板は発振の圧力振りを大にする役目を持ち、かつしゃへい板下流の空間は流体が十分混合しないまま2箇の出口ノズルより流出してしまうのを防ぐ役割を果たしている。

つぎに実験装置の概要を図-2に示す。図-2で一点鎖線で囲まれた部分が乳化燃料生成回路である。タンク①でA重油と廃油の混合油に水が適当な割合で投入され、フィルタ②を経てギャポンプ③により流体論理素子⑥に送られ、再びタンク①にもどり循環する。数分の循環で完全に乳化される。乳化燃料はタンク⑦に移され、ギャポンプ⑩によりフローメータ⑭、積算流量計⑮を経てバーナに送られる。なお乳化油は温度に対して非常に敏感で、粘性の変化により流量が微妙に変化する。そのために燃料供給系統を保温すると共に、ヒータ⑧、⑯を用いて約40℃に油温制御した。また実験を開始するにあたっては、配管内を恒温にしたあと毎回油量の検定を行った。実験中はフローメータ⑭を



- ① 燃焼炉 ② バーナ取付口 ③ 煙道
- ④ 断熱材 ⑤ 開閉窓(側部) ⑥ 開閉窓(後部)

図-3 燃焼炉



- ① 保炎筒 ② 回転円板(φ46) ③ 旋回羽根 ④ 軸受
- ⑤ 空気シール ⑥ プーリ ⑦ オイルシール軸受
- ⑧ 燃料パイプ ⑨ 送風パイプ ⑩ 主軸

図-4 バーナ

常に監視するとともに、5分おきに積算流量計⑮を読みとり、流量が一定するよう注意を払った。燃焼炉を図-3に示す。炉は耐火レンガ製で、側部に3箇所、後部に1箇所観察用開閉窓が設けられている。図-4は使用したバーナで、バーナの回転円板直径はφ46mmである。燃料は燃料パイプの側面にあけたφ2mmの4箇の穴から半径方向に流出し、円板の遠心力により円板周縁から飛散、微粒化される。なお、回転数と空気流量の独立の制御が必要のため、プーリ⑥で強制駆動できるように市販のバーナを作りかえている。旋回羽根③をとおる空気流は40℃に温度制御されている。用いた燃料はA重油をベースに、A重油：廃油＝8：2の容積割合で廃油を混合した混合油である。廃油は本校の廃油タンクに貯蔵されたもので、エンジンオイル廃油が主体であるが、一部機械油廃油が混じっている。燃焼時の実験条件は混合油の油量（正味燃焼量） Q_f を常に一定の $Q_f = 3.0 \text{ l/h}$ に保った上、水添加し設定

表1 A重油と廃油の元素分析値および性状

油名	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	W (%)
A重油	86.7	13.1	0.02	0.07	0.1以下
廃油	84.5	13.3	0.10	0.88	0.62

灰分 (%)	残留炭素分 (%)	発熱量 (kcal/kg)	比重 (20°C)	引火点 (°C)	動粘度 (30°C)
0.01以下	0.07	10900	0.838	108	4.24 cst
0.61	0.96	10839	0.88	109	70

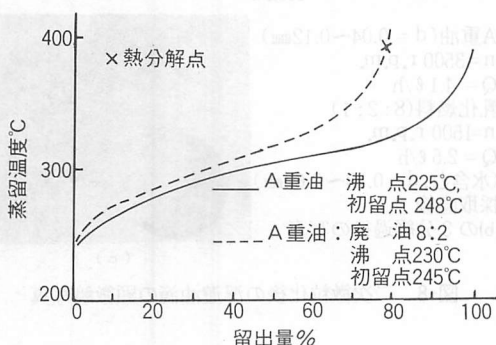


図-5 燃料油蒸留曲線

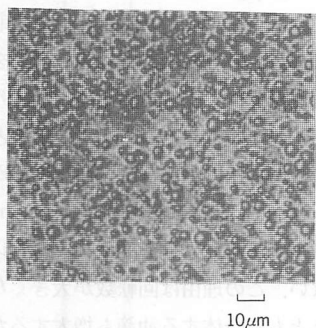
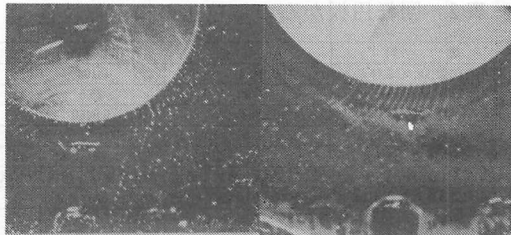


図-6 乳化燃料の顕微鏡写真 (A重油: 廃油: 水 = 8: 2: 2)

した。水添加率は混合油 100 に対する水添加量 (容積割合) で定義される。

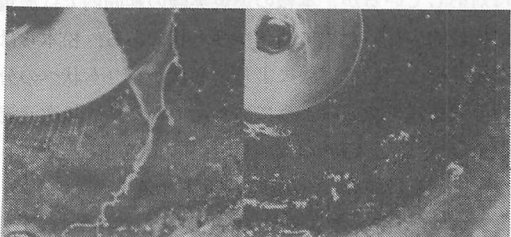
3. 燃料油の性状および微粒化特性

A重油と廃油の元素分析結果および性状を表1に示す。表1より廃油の発熱量はA重油と大差ないが、硫黄分、灰分、残留炭素分および粘性はそれぞれ1桁以上大きく、民生用に利用するには相応の注意を払う必要がある。図-5にA重油と混合油の蒸留曲線を示す。これより混合油の場合はA重油よりかなり重質化していることがわかる。混合油の×点 (390°C付近) は熱分解点で、これ以上の蒸留実験は不可能であった。図-6に上記混合油に水を20%添加した乳化燃料のバーナ



A重油
n=1500 r. p. m.
Q=4.1 l/h
(a) 滴状分裂

乳化燃料 (8: 2: 1)
n=1500 r. p. m.
Q=2.5 l/h (水含む)
(b) (ひも状) 分裂



乳化燃料 (8: 2: 1) A重油
n=1500 r. p. m. n=1500 r. p. m.
Q=6.5 l/h (水含む) Q=4.1 l/h
(c) 膜状分裂 (d) 単発閃光撮影による油滴挙動

図-7 回転円板周縁での微粒化の様子

直前での顕微鏡写真を示す。前述の乳化器により平均水滴径 3 μm 程度の安定したエマルジョンが生成されている。乳化状態は本報の実験範囲内では水添加率にあまり影響されず、バーナ直前まで分離、排液されることなく安定しているので、本流体論理素子は乳化器として実炉に十分適用できる。廃油添加は微細な水滴の安定したエマルジョンの生成に特に効果的であるが、これは廃油に含まれている界面活性物質が乳化剤の役割を果たすからである。ちなみにデヌーイ界面張力計で界面張力を測定すると、A重油と水の界面では 35 dyne/cm (20°C) であったものが、10%廃油を混合することにより 19 dyne/cm (20°C) と半分近くに減少する。このように廃油の混合は燃料としての利用と界面活性剤としての役割の一石二鳥の効果があり、きわめて有益である。

図-7は本バーナ (図-4) の回転円板周縁での微粒化の様子を示している。乳化燃料の割合はすべてA重油: 廃油: 水の順である。図-(a)~(c)はストロボで回転円板に同期し撮影したもので、図-(d)は単発閃光撮影による油滴挙動を示している。一般に回転円板からの微粒化現象は、滴状、ひも状、膜状の3つの分裂状態

表2 回転円板からの微粒化の様子と粒径

燃 料	A 重 油				乳 化 燃 料 (8:2:1)			
動粘性係数 ν (cd/s)	0.0424				0.104			
表面張力 σ (dyne/cm)	30.0				25.6			
密 度 ρ (g/cd)	0.8352				0.8460			
回転数 n (r. p. m.)	1500		3500		1500		3500	
流 量 Q (ℓ/h)	2.5	4.1	2.5	4.1	2.5	4.1	2.5	4.1
式(1)による分裂挙動の判定	滴状	滴状	滴状	滴状	滴状	滴状	滴状	ひも状
式(2)による平均粒径 \bar{d} (mm)	0.676	0.676	0.290	0.290	0.621	0.621	0.266	
実験による粒径の範囲 d (mm)	0.217	0.217			0.245			
	∫	∫			∫			
	0.521	0.521			0.490			
実験による平均粒径 \bar{d} (mm)	0.340	0.401			0.361			

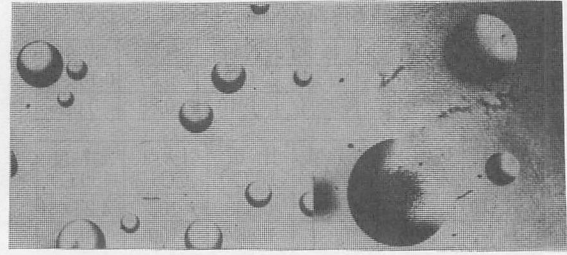
のあることが知られている。図-(a)~(c)は各分裂挙動に対応しているが、本報の燃焼実験の範囲内では流量が比較的少ないために滴状かひも状である。松本らは次元解析と広範な実験により、滴状からひも状への分裂の遷移式を次式のようにあてている⁵⁾。無次元流量を $Q^+ = Q/2 \pi R^2 \sqrt{\nu \omega}$ 、レイノルズ数を $Re = R^2 \omega / \nu$ 、ウェーバー数を $We = \rho R^3 \omega^2 / \sigma$ とすると

$$Q^+ = 0.096 Re^{0.95} We^{-1.15} \dots\dots\dots(1)$$

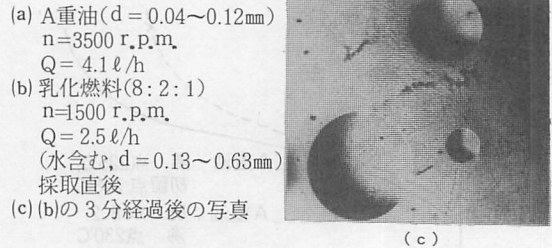
ここで、 Q は流量、 R は回転円板の半径、 ω は角速度、 ν 、 ρ 、 σ はそれぞれ動粘性係数、密度、表面張力である。もし設定条件から計算された Q^+ が式-(1)の右辺から計算された Q^+ よりも大きければひも状分裂で、小さければ滴状分裂となる。全実験条件に対して式-(1)より判定した結果を表2に示す。これを見ると乳化燃料(8:2:1)の図-7(b)の場合も滴状分裂と判定され、円板周縁からひも状に飛びだすようにみえる観察結果とあわない。彼等の実験では円板中心から半径方向に一様に流出するのに対し、本実験では4箇の穴から流出し、円板周縁から均等に微粒化されないのその違いがあらわれたのか、あるいはひもが短いために分裂機構としては本質的に滴状とみなした方がよいのかは不明である。他方乳化燃料の粘性はA重油のそれにくらべて大きいので、円板周縁での微粒化の非均一性が大になるのが観察される(図(b),(c))。次に滴状分裂の場合の平均粒径をあたえる実験式として、彼等は次式を得ている⁶⁾

$$\frac{\bar{d}}{R} = 2.69 We^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

表2には式-(2)によってみつめられる平均粒径と実験より得られた粒径の範囲およびその平均値も示されている。これを見ると式-(2)による計算値は実験値の約2倍程度大きいことがわかる。遷移の場合と同じ原因の他に、式(2)にはあらわれない粘性、流量の影響が大きいように思える。つぎに図-7(d)の油滴の軌跡を見ると、右下方では円板より接線方向に燃料が飛びだし、



(a) 100μm (b)



(a) A重油(d = 0.04~0.12mm)
n=3500 r.p.m.
Q = 4.1 ℓ/h
(b) 乳化燃料(8:2:1)
n=1500 r.p.m.
Q = 2.5 ℓ/h
(水含む, d = 0.13~0.63mm)
採取直後
(c) (b)の3分経過後の写真

図-8 二次微粒化後の浮遊油滴の顕微鏡写真

保炎筒壁面にぶつかった後、二次微粒化している様子がよくわかる。図-8は二次微粒化後の浮遊油滴をプレパレート(メチルセルロース塗布)上に採取し、顕微鏡写真撮影したものである。これらの写真をみると、通常の圧力噴霧等にくらべて油滴径はかなり大きく、その油滴(いわゆる主滴)のまわりに余滴とよばれる小さな油滴のあることがわかる。油滴の平均粒径は回転数が $n = 1500$ r. p. m. から 2500 r. p. m. の間では顕著に減少するが、 $n = 2500$ r. p. m. 以上では余り変化しない。この理由は回転数が大きくなると微細化されるとともに合体する油滴も増大するためと思われる。したがって微粒化の観点からみて回転数の過度の増大は無意味なようである。つぎに図-8(b)をみると大きな乳化油滴の中に微細な水滴が分散し、油中水滴形エマルジョンを形成しているのが明瞭にみられる。図-8(c)は3分後の同じ写真であるが、微細水滴は光源の熱を受け時間経過とともに合体をおこし、蒸発してみえなくなってしまっている。したがって、燃焼時にはこれらの微細水滴が合体し、マイクロ爆発に進むのではないかと思われる。

4. 燃焼状態の観察

後部窓から火炎を直接写真撮影した1例を図-9に示す。図中 Q_f は水を除いた正味の燃料流量である。火炎は一般に空気過剰率 λ が小さいときには推力が不足し、浮力により上に長く伸び、周辺部は暗赤色~赤橙色である。 λ が増加し保炎筒内の旋回が強くなるにつ



図-9 火炎の直接写真例
($Q_f = 2.45 \text{ l/h}$, $\lambda = 1.1$)

表3 火炎の形状 (単位mm)

空気過剰率	λ	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
A重油: 廃油 = 8:2	X	220	260	240	240	230	250
	Y	380	380	310	290	140	190
A重油: 廃油: 水 = 8:2:1	X	280	300	280	260	260	260
	Y	420	370	280	240	220	150

(a) 空気過剰率の影響 ($Q_f = 3.0 \text{ l/h}$, $n = 3500 \text{ r.p.m.}$)
上段: 水無添加, 下段: 水添加

水添加率	8:2:0	8:2:0.5	8:2:1	8:2:1.5	8:2:2
X	230	240	260	240	280
Y	140	160	220	260	290

(b) 水添加率の影響 ($Q_f = 3.0 \text{ l/h}$, $n = 3500 \text{ r.p.m.}$, $\lambda = 1.1$)

回転数 $n(\text{r.p.m.})$	1500	2500	3500	4500
X	340	320	260	270
Y	310	290	220	200

(c) 回転数の影響
(8:2:1 乳化燃料, $Q_f = 3.0 \text{ l/h}$, $\lambda = 1.1$)

れて推力も増加し、周辺部は黄橙色、中心部は白色に輝く高負荷燃焼をするようになる。これは保炎筒内での強い循環環により油滴の蒸発が促進され、燃料蒸気と空気との接触、混合がきわめてよくなるためである。

各実験条件における火炎形状を表3に示す。表3(a)は水無添加の場合と10%水添加の場合の火炎の大きさの比較である。これを見ると後者(10%水添加)の方が λ の小さいところで火炎が大きくなる傾向がある。特に $\lambda = 0.7$ では顕著で、この場合には保炎筒下部から未燃燃料の滴下が少しみられ、火炎は暗く水無添加の場合より燃焼状態は悪い。それに対し、 $\lambda = 1.0$ 以上では中心部の白色の輝きが水無添加の場合よりも増すように見え、かつ燃焼後の保炎筒壁面もきれいになる。特に $\lambda = 1.1, 1.2$ では壁面が白く、清浄化作用のあることが明らかである。おそらく、壁面近傍でのマイクロ爆発と水成ガス反応 ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$)

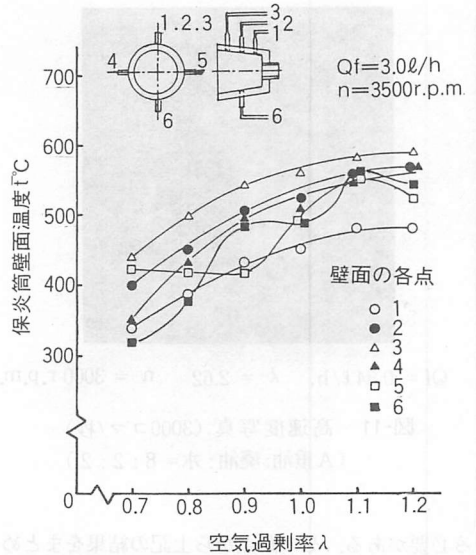


図-10 保炎筒壁面各点の温度
(A重油: 廃油: 水 = 8:2:1)

がそのような効果をもたらしたのであろう。図-10に10%水添加の場合の保炎筒壁面各点の温度(燃焼実験中5分おきに測定した1~6点の各点の時間平均温度)を各 λ に対して示す。測定は壁面に埋めこまれた6本のクロメル・アルメル熱電対により行われた。図-10をみると、 λ の増加とともに各点の温度があがり、より強い燃焼の生じることが確認される。先の図-5で混合油の熱分解温度は390℃付近であったから、 $\lambda = 1.0$ 以上では壁面全域で熱分解し酸化していると思われる。それに対し、 $\lambda = 0.7$ ではほとんど熱分解温度以下で保炎筒下部の点6の温度がもっとも低いのが注目される。これは保炎筒下部での未燃油膜の形成に原因があり、先に述べた未燃燃料の滴下に対応している。表3(b)は $\lambda = 1.1, n = 3500 \text{ r.p.m.}$ の場合の火炎形状に対する水添加率の影響を示している。これを見ると20%水添加の場合の火炎がもっとも大きい。特に浮力による上方向への浮きあがり非常に大きく、燃焼は不完全となるので、この場合の水添加率は大きすぎるということがわかる。表3(c)は回転数の影響を示している。 $n = 1500 \text{ r.p.m.}$ の場合の火炎がもっとも大きく、また燃焼は不完全である。回転数の増加につれて小さくなる傾向にあるが、 $n = 3500 \text{ r.p.m.}$ から $n = 4500 \text{ r.p.m.}$ の間では余りかわらない。微粒化特性の項で示したが、燃焼の様子から判断しても回転数を過度に大きくする必要はない。ところで、工業的に利用するには火炎が適当な大きさを保ち、かつ完全燃焼をさ



$Q_f = 0.84 \text{ l/h}$, $\lambda = 2.62$ $n = 3000 \text{ r.p.m.}$

図-11 高速度写真 (3000コマ/秒)
(A重油:廃油:水=8:2:2)

せる必要がある。その観点から上記の結果をまとめると、空気過剰率、水添加率、回転数ともに適当な範囲があり、本研究の場合、それは $\lambda = 1.1$ 前後で水添加率は5~10%程度、回転数は $n = 2500 \sim 3500 \text{ r. p. m.}$ 程度である。水添加率がこのように小さい方がよいのは蒸発燃焼形式の本バーナ固有の特徴かもしれない。

最後に保炎筒壁面付近での燃焼挙動を観察するために、燃料流量を極端に絞った8:2:2の乳化燃料の燃焼状態の高速度カラー写真(3000コマ/秒)の一連の写真の1コマを図-11に示す。一連の写真より、油滴の大部分は壁面で二次微粒化後燃焼している様子で、燃焼は保炎筒壁面から生じているのが観察される。マイクロ爆発がおこっているかどうかは確認できないが、壁面に沿って部分的に青白いガスが観察される。この点を確認するために、燃料流量をやはり絞った状態で他の条件は同一にして水添加のある場合とない場合の火炎の様子、特に保炎筒壁面付近での火炎の様子を直接写真撮影し、比較してみた。その結果、水添加のある場合は青味が非常に増えているので、水成ガス反応が特に重要な役割を果たしているのではないかと想像される。

5. ま と め

民生用の保炎筒付回転円板バーナで、廃油等の低質油の利用をはかるために、A重油+廃油の混合油を使用して基礎的な検討を行った。主な結果をまとめると、

1. 既報告⁴⁾の自己発振流体論理素子は乳化器として実炉に十分適用できる。また廃油混合は燃料としての利用と界面活性剤としての役割の一石二鳥の効果を持ち、きわめて有益である。

2. 本報の燃焼実験の範囲内では、微粒化の様子は滴状分裂かひも状分裂である。松本らの滴状分裂の実験式と比較すると、みつめられた平均粒径は、本報での実験値の約2倍程度大きい。

3. 混合油に水無添加の場合と10%水添加の場合の燃焼状態を比較すると、空気過剰率 λ が小さい場合には後者(10%水添加)の方が燃焼状態は悪いが、 $\lambda = 1.0$ 以上では燃焼促進と保炎筒壁面清浄化の効果がある。微粒化および燃焼状態の観察から保炎筒壁面での二次微粒化現象が特に重要で、 $\lambda = 1.0$ 以上では保炎筒壁面に沿う全領域で燃料の熱分解と蒸発が起っているようである。

4. 本バーナで乳化燃焼を行わせる場合、空気過剰率、水添加率、回転数ともに適当な範囲がある。実験によると、 $\lambda = 1.1$ 前後で水添加率5~10%程度、回転数 $n = 2500 \sim 3500 \text{ r. p. m.}$ 程度がよい。

最後に本報では排気ガス特性についてはふれなかったが、それについては文献⁷⁾を参照されたい。実用化にあたっては長時間使用の場合、回転円板に残炭物がない積してくる問題点がある。これに対する何らかの対策と、各種の燃料使用が今後の課題である。

本研究は昭和56年度文部省科学研究費の補助を受けて行われた。謹んで謝意を表すると共に、実験に熱心に協力頂いた本校卒業生の野村伸司、山野義一、高島昌昇の3君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 水谷幸夫・多木昭雄；機械学会論文集(B編)，47巻—424号(昭56—12)，p2379.
- 2) 広安博之・新井雅隆・西田恵哉；機械学会論文集(B編)48巻—430号(昭57—6)，p1182.
- 3) Dryer, F. L.; 16th Symposium (Int.) on Combustion, the Combustion Institute, 1977, p279.
- 4) 大前義弘・木本恭司・尾鷲幸男；燃料及燃焼，49巻2号(昭57—2)，p1.
- 5) 松本史朗・高島洋一；第4回液体の微粒化に関する講演会講演論文集(昭50—5)，p22.
- 6) 前田太志・松本史朗・高島洋一；同上 p33.
- 7) 木本恭司・大前義弘・尾鷲幸男；第20回燃焼シンポジウム前刷集(昭57—11)，p332.