軽油・水（W／O型）乳化燃料の流動および噴霧特性に関する研究

梶谷　修一，沢　則弘

（平成2年8月3日受理）

A Study on Fluidity and Spray Chraceristics of Gasoil-Water (Water／Oil type) Emulsified Fuel

Shuichi KAJITANI*, Norihiro SAWA*

ABSTRACT–The fluidity and spray characteristics of an emulsified fuel made by gas-oil and water were analyzed as a function of water content and lapse of time. As a result, the emulsified fuel is unstable fuel, therefore, the fluidity is the function of water content and lapse of time. This instability is mainly caused by coalescence of distributed water droplets in the fuel. And the degree of the coalscent is expressed by a newly introduced specific surface area ratio of emulsified fuel:S_P/S_e,which has close relationships to the distance between the water droplets. S_e is the surface area of emulsified fuel which is assumed as a shere and S_P is the sum of distributed water droplets. The more water content and the more lapse of time increase, the more the value of S_P/S_e decresae. The relative viscosity of the emulsified fuel is propotional to the value of S_P/S_e. Therefore, the increased S_P/S_e produces the increased mean sauter diameter of emulsified fuel. Futhermore, the relative viscosity under disintegration decreases because of the existence of water droplets distribution in the emulsified fuel. Furthermore, the sparay penetration length and spary angle are also the function of S_P/S_e

1．諸　論

乳化燃料に関する開発，研究は低公害，省エネルギの観点から活発に進められてきた。その結果，乳化燃料は燃焼効率を高め，排出ガス中の煙濃度を低減すると同時にNO_x濃度を減ずるのに有用である事が実験的に指摘され[1-5]，その原因についての化学動力学的[6-10]および燃焼学的研究[11-20]も進められている。しかし乳化燃料は内燃機関の燃料としては未だに実用化されるには至っていない。

乳化燃料を内燃機関（ディーゼル機関）に利用しようとする場合，燃料供給系統における乳化燃料の①流動特性，②燃料噴射の特性（噴霧粒径分布，到達距離，噴霧角度等），③高温壁面における蒸発特性等のいわゆる混合気形成過程，さらに④燃焼過程の特性を明確にし，これらの⑤機関性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。従ってこれら諸特性を明確にする上で大きな影響をもつ乳化燃料の物性を明らかにする事は重要である。なかでも粘度は主要な物性の一つであるが，乳化燃料は非ニュートン流体[21]で，その流動特性は複雑であり，流動特性の推定方法に関する情報，特に乳化燃料に関しては乏しい。さらに噴霧特性

＊茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

に関しては，一般に燃料の粘度が増加した際に噴霧径，噴霧到達距離は増加し噴霧角は減少するという共通の理解はあり，定量的には粘度を大幅に変化させた噴霧特性は田端ら[22]がグリセリン水溶液をディーゼル噴射弁で噴射（噴射圧11MPa，雰囲気圧3MPa，噴孔径0.4㎜のノズルから連続噴射）した時に，動粘度$\nu=2.99\sim4.31\times10^{-6}m^{2/s}$（軽油の相当）の噴霧角は0.28～0.05 rad（約16°～3°）であるのに対し$\nu=14.83\sim31.3\times10^{-6}$(50℃に加熱したB重油相当）の噴霧角は0.025 rad（約1.5°）となり，また噴射圧が低いと$\nu=10\times10^{-6}m^{2/s}$を大幅に越えた燃料では微粒化不可能としている。一方，軽油・水乳化燃料（含水率0.51）の18℃における動粘度が$\nu=19\times10^{-6}$である吉本ら[23]は乳化燃料（含水率y＝0.51）を大気中に噴射した時（噴射圧は19.6 MPa）の噴霧角は10°～12°（軽油の噴霧角の10～15％の減少），ザウター平均粒径は軽油の時に比較し約20％増であり，大気中噴射の実験結果といえ乳化燃料の粘度の増加から予想される噴霧角の減少，及び平均粒径の増加よりは少ない。

そこで本報告では前述の乳化燃料の①流動特性に関し実験的に解明し，その流動特性は本研究で導入した比表面積S_P/S_eで評価出来る事を明らかにした。さらに②噴霧特性（噴霧粒径分布）に関してもS_P/S_eを用いて検討を加え，噴霧角，噴霧到達距離に関しては油中噴射法とS_P/S_eを用いて検討し，更に③（壁面上での噴霧の広がり）に関しても検討した。以下その結果について報告する。

2．　供試燃料

供試乳化燃料は軽油（JISI号規格），蒸留水，界面活性剤からなるW／O型乳化燃料である。W／O型の乳化物はHBL価3.5～6の界面活性剤が適している事[24]から界面活性剤として第一工業製薬㈱製S40-H(HLB価4）を使用した。界面活性剤の量は軽油と界面活性剤の混合物と蒸留水の界面張力が限界に達している点，すなわち軽油質量の1％とした（図1参照)。製造は以下の手順で行なった。静止型管内混合器（ハイミキサー，東レ㈱製），熱交換器付タンク及びギヤポンプ等からなる装置内をまず界面活性剤を混ぜた軽油をギヤポンプで循環させながら含水率yに見合う水を50cc／mimの割合で除々に供給する。水の供給終了後も数分間循環させて乳化燃料の製造完了とした。ここで含水率yは$y=V_w/(V_w+V_o)$，V_w：水の体積，Vo：軽油の体積とした。なおタンク内の乳化燃料の

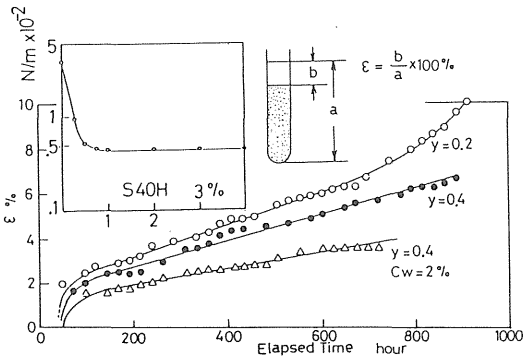

Fig.1 Effect of the elapsed time on the separation

温度は25℃一定にした。図1に製造後経過時間による乳化燃料の分離割合εを示す。経過時間が増加するにしたがって油中水滴の擬集(Flocculation)，合一(Coalescence)及び排液(Drainage)によって分離度は増加し例えばy＝0.4，800時間では5％である。この分離度は異なった界面活性剤（三洋化成㈱）製10NET S2を用いた村山ら[4]や塚原ら[5]の乳化燃料の分離度と比較するとやや少ないか同程度である。界面活性剤の量を2％とすると分離度は約半減する。しかし経過時間が50時間以内であれば分離は観察されず界面活性剤ニッサン02（日本油脂㈱）を2％使用した水谷ら[22]の観察とも一致する。従ってここで用いた乳化燃料は分離度の観点からは一般的な乳化燃料といえる。分離度を初め乳化燃料の物性は当然温度によっても変化するが本報告では室温（約25±5℃）のもとでの挙動のみを検討した。

3．　測定方法

乳化燃料の諸特性値の測定には次の方法を用いた。

1）　**分散水滴粒径分布**　倒立型金属顕微鏡を透過光にして写真撮影を行ない，倍率1000倍に拡大した写真を直接スケールで測定した。

2）　**流動特性及び粘度**　流動特性及び粘度は回転二重円筒式粘度計を用いて剪断速度γを0～812.4 [1／s]の範囲で変えて測定した。

3）　**界面張力**　軽油，界面活性剤混合物と蒸溜水の界面張力σは滴容法(JIS K3362に準ず）により測定した。

4）　**噴霧径分布**　噴射弁は単孔ホールノズル（ジィーゼル機器製NPDLI55SNPI）で，噴孔径は0.4

26㎜である。噴射開弁圧は11.7 MPa (120 kgf／㎠) で大気中に噴射させた。受止液はミヨシ油脂㈱製ペレテックスLT150をウラニル塩(2wt%) で染色し，更に噴霧粒子の突入時の分裂を避けるため水で二倍に希釈した。この受止液は軽油，乳化燃料を徐々に溶解するので噴霧粒子を受け止め後15秒以内（30秒以内であれば粒子の溶解がない事は確認）で撮影した。なお受止液は噴孔先端から760㎜の位置に設置する事で噴霧粒子の分解，分散を極力避ける様に配慮し，またその厚みは被写深界度の点から1㎜とした。

5）　噴霧到達距離，噴霧角及び噴霧の壁面上での広がり　4）と同じ噴射弁，噴射条件でアクリル製容器内（450×280×240㎜）の軽油中に噴射を行ない，噴射開始時刻から2.5 msec間隔でストロボを発光させ，噴霧先端のキャビティションによる反射光を写真撮影して噴霧到達距離，噴霧角の測定を行なった。また噴射弁から30,70㎜の位置に垂直に置かれた壁面で噴霧の広がりの測定を行なった。

4．　実験結果および考察

4．1　乳化燃料の流動特性について

［A］含水率ｙと油中分散水滴径分布

図2に種々の含水率，及び製造後経過時間での油中水滴径の写真の一例を示す。油中分散水滴径はほぼ2～5μmの間に分布しほぼ均一としている報告もあるが，詳細にその分散水滴径分布を測定すると図3に示すように水滴径分布（製造後3時間経過）は含水率ｙによって変化している。すなわちｙの増加に従って径の大きな水滴が増加しているのが特徴的である。この粒径分布曲線の推移はHellerが提唱した最小粒子直径，分布の幅をパラメータとする粒径分布関数から算出される結果[25]と定性的には一致しているが $(dN/dX)_{max}$ を与える値がやや粒径の小さな方にシフトしているので，ここでは棚沢ら[26]の噴霧粒径分布関数として使用されている次の分布関数

$$dN/dX=\alpha X^{a}EXP(-\beta X^{b}) \cdots\cdots ①$$

を水滴粒径分布にも適用してみる。

この場合Sauter平均径d_{32}は

$$d_{32}=\{[\alpha/(b\beta^{(a+4)})]\Gamma\{(\alpha+4)/b\}\}/[\alpha/(b\beta^{(a+3)})]\Gamma\{(\alpha+3)/b\} \cdots\cdots ②$$

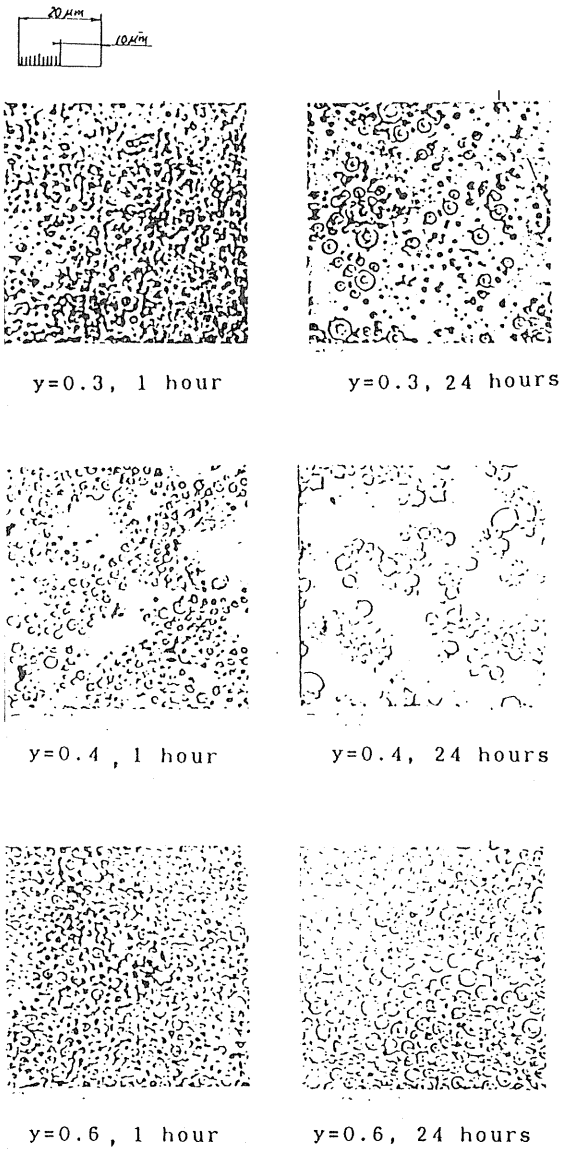

Fig.2 The effects of water content and lapsed time on the water droplets distribution

で与えられる。ここにNは水滴の個数，Xは水滴径，α，β，a，bは実験定数，Γはガンマ関数である。実験結果（図4）から平均径d_{32}と含水率ｙとの関係を求めると図3に示す様に0.2＜ｙ＜0.55の範囲では

$$d_{32}=4.5y+1.3\ [\mu m]$$

の関係が得られる。いま棚沢らと同様にａ＝2，ｂ＝

1とすると$\beta=(1/d_{32})\Gamma(6)/\Gamma(5)$となる。一方水滴数NはN＝∫dN＝2／$b^3\Gamma(3)$であるから$\alpha=N\beta^3/\Gamma(3)$となる。本実験ではNは500±50としたのでN＝450，500，550について計算すると図4のy－α線図が得られる。従って本実験の測定個数の範囲では

$$\alpha=10^{2.061}10^{-2.0393y}$$

と近似出来る。これらを総括すると乳化燃料中の水滴の分布曲線は式③で計算出来る事になる。

$$dN/dX=\alpha AX^2EXP(-\beta X) \cdots\cdots③$$
$$\alpha=10^{2.061}10^{-2.0393y}$$
$$\beta=0.997(1/d_{32})$$
$$d_{32}=4.5y+1.3\ [\mu m]$$

Aは積分区間で決る係数

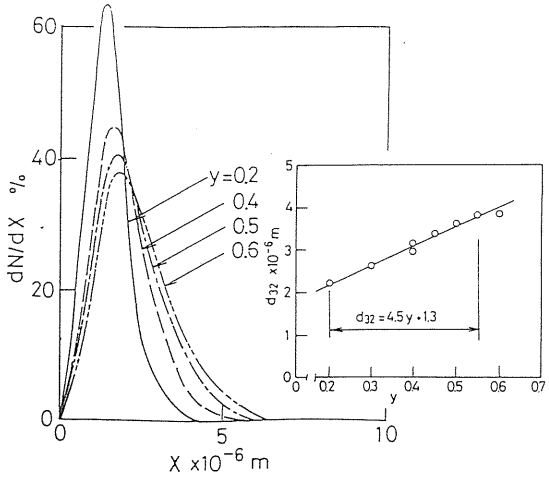

Fig.3 The effect of y on the water droplets distribution and on the sauter mean diameter (d32) of water droplets

この水滴径の分布関数から求めた水滴分布曲線は図4のとおりである。

乳化燃料を圧縮着火機関の燃料に使用する場合を考えると，混合気形成過程，とくに供給乳化燃料の蒸発速度はシリンダー内雰囲気の状態はもちろんの事，噴霧液滴の粒径（すなわち噴霧を球とした時の表面積Se）に大きく影響され，この粒径は乳化燃料の粘度や表面張力等に影響される。とくに粘度はRobison[27]，森[28]，乙竹[29]らによると隣接する分散粒子間の距離に関係づけられている。一方噴霧液滴内部の水滴群への熱

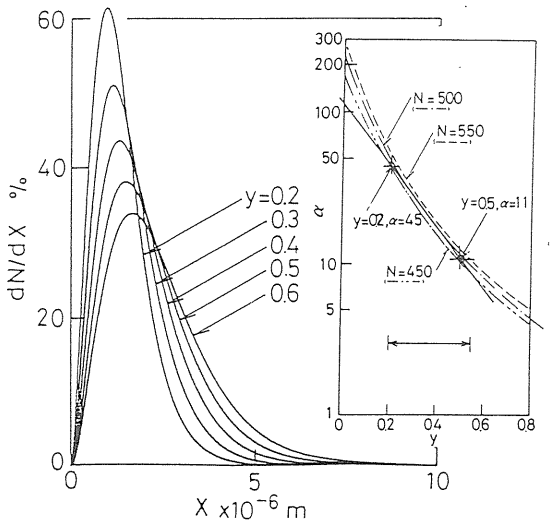

Fig.4 Water droplets distribution calculated with formula ① and α versus y

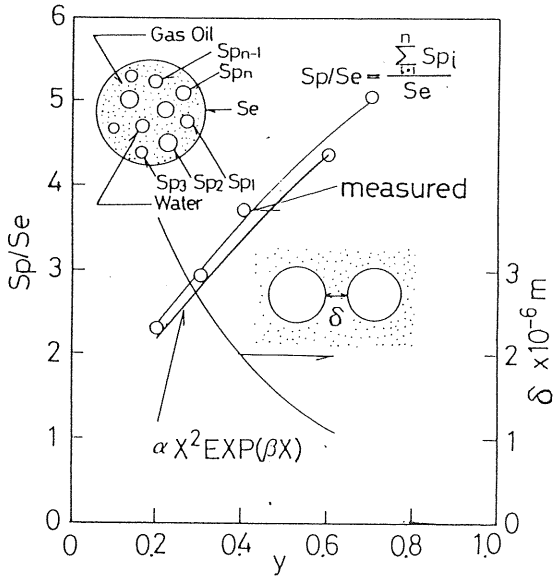

Fig.5 y vesus S_P/S_e

伝導を考えると水滴粒子の総表面積（すなわち噴霧粒子内部に存在する分散水滴粒子を全て球と仮定した時の総表面積S_P）が影響する。そこで乳化燃料の特性値として分散水滴粒子間距離に関係し，噴霧液滴及び内部分散水滴粒子への熱伝導にも関係する両者の比すなわち比表面積S_P/S_eに注目した。図5には測定した水滴粒子径から直接求めたS_P/S_eと水滴分布関数式①を

用いて算出したS_P／S_eの値をｙに対してプロットしている。図によると両者ともS_P／S_eの値はｙに比例して（平均水滴粒径d_{32}に比例して）増加し，定量的にもかなりよい一致を示している。

［B］製造後経過時間と油中分散水滴分布

図２に示したように同一含水率においても製造後経過時間が増加すると油中水滴系は増加する。そこで含水率ｙ＝0.4の乳化燃料を用い製造後３時間～48時間経過時に実測した水滴径分布曲線を図６に示す。同図

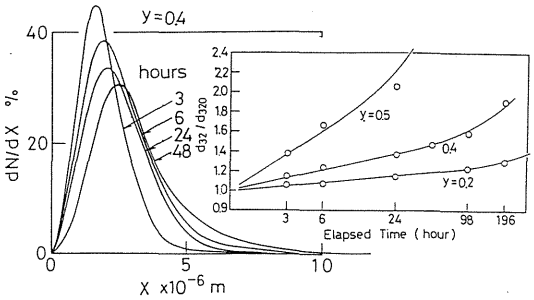

Fig.6 The effect of lapse of time on the water droplets distribution and on the specific sauter mean diameter of water droplets

中に経過時間に対する比平均粒径d_{32}／d_{320}（d_{320}は初期直径）の推移も示す。両図によると製造後の時間経過とともにモード直径（$(dN/dX)_{max}$を与える直径）は大きくなり，$(dN/dX)_{max}$は減少しd_{32}／d_{320}は増加する。しかもｙが大きいほど増加は顕著である事がわかる。この現象を分散水滴相互の合一の結果と考え以下の仮定のもとに計算した。①乳化燃料は製造直後は直径0.5μｍの均一水滴からなる。②水滴は接触により合一する。③水滴は合一した時の平均水滴径で再び均一な水滴となる。④水滴の移動は沈降速度1.88μｍ／s[24]とする。水滴間の距離δはV_oを軽油の体積，S_Pの水滴の総表面積とすると$\delta/2=V_o/S_P$で近似できる[29]。

水滴が一回の移動でℓだけ進み，Ｎ回移動した後，出発点からＸの距離の所にいる確率を考える。水滴はＮ回移動した後，－Ｎ，－Ｎ＋１，……，－１，０，Ｎ－１，Ｎで表されるいずれの位置にもいることが出来る。水滴がＮ回移動後ｍにいる確率をＰ（ｍ，Ｎ）とするとある一定の順序のＮ回の移動の起る確率は，この順序の各一回の移動が起る確率が１／２であるから$(1/2)^N$になる。従って$P(m,N)=(1/2)^N$×(Ｎ回の移動後位置ｍに達する異なった配列の数）となる。位置ｍに達するには(Ｎ＋ｍ)／2の移動は正で(Ｎ-ｍ)／2の移動は負でなくてはならない。従って位置ｍに達する配列の異なった数はN!／{[1／2 (N+-m)]！[1／2(N-m)]！}となる。従って

$$P(m,N)=\frac{N!}{N!/\{[1/2(N+m)]!\,[1/2(N-m)]!\}}\left(\frac{1}{2}\right)^N \cdots\cdots ④$$

が得られる。Ｎが大きい時Stirlingの公式ｌｎＮ！＝（Ｎ＋１／２）ｌｎＮ－Ｎ＋１／２ｌｎ２πを用いこれを上式に代入すると次式を得る。

$$\ln(p,N)=(N+1/2)\ln N-1/2(N+m+1)\ln[N/2(1+m/N)]-1/2(N-m+1)\ln[N/2(1-m/N)]-1/2\ln 2\pi-N\ln$$

２Ｎが大きい時ｍ＜＜Ｎであるから次の様に展開出来る。

$$\ln(1\pm m/N)=\pm m/N-m^2/2N^2\pm\cdots\cdots$$

従ってｌｎｐ（ｍ，Ｎ）は

$$\ln p(m,N)=(N+1/2)\ln N-1/2\ln 2\pi-N\ln 2-1/2(N+m+1)(\ln N-\ln 2+m/N-m^2/2N^2)-1/2(N-m+1)(\ln N-\ln 2-m/N-m^2/2N^2$$

$$\ln p(m,N)\fallingdotseq -1/2\ln N+\ln 2-1/2\ln 2\pi-m^2/2N$$

すなわち

$$p(m,N)\fallingdotseq(2/\pi N)^{1/2}\exp(-m^2/2N)\cdots\cdots ⑤$$

となる。いま一回の移動距離がℓであるからｍ回の移動距離は$x=m\ell$となる。今水滴がＮ回移動後ｘとΔｘの間にある確率$p(x,N)$は$p(x,N)\Delta x=p(m,N)\Delta x/2\ell$である。ここでｍはＮが偶数か奇数であるかに従って偶数か奇数をとるから$\Delta x=2\ell\Delta m$とすると$\Delta z/\ell$は偶数となる。従って⑤はGaussの誤差関数⑥となる。

$$p(x,N)\Delta x=(1/2\pi\ell^2N)^{1/2}\exp(-x^2/2N\ell^2)\Delta x\cdots\cdots ⑥$$

ここで水滴がM回移動し$X=m\ell$で合一するのは$X=\delta$と仮定するとその確率は⑥で計算できる。図7にyを0.2, 0.4, 0.6と変えた際のm（時間経過に相当する）に対する均一分散水滴粒径d，及び比表面積S_P/S_eを示す。mが増加すると，またyが増加すると水滴径は増加しており図6の傾向と一致する。実測されたザウター平均粒径は$m=(0.8\sim1.0)\times10^3$付近の図中○印と一致する。すなわち$y=0.2, 0.4, 0.6$でそれぞれ2.2, 3.1, 4 μmである。またS_P/S_eはそれぞれ，2.6, 1.8, 1.4とyが大きくなるほど小さくなり先に示した図6の結果とは逆になる。しかし先に求めた分布関数④を用いてS_P/S_eを求めると図中の●となりyが増加するとS_P/S_eは増加し実測したS_P/S_e（図中▲印）とは良い一致を示す。従って乳化燃料の分散水滴径の分布は木本ら[19]が注目したように非常に重要となる。なお厳密には水滴径が小さい時にはブラウン運動の効果を，大きい場合には水滴の沈降に伴う排液の効果をも含めて考える必要がある。以上の様に乳化燃料は完全に安定したものではなく時間とともに変化するので，その物理的性質，つまり流動特性や噴霧特性も時間とともに変化するものと思われる。

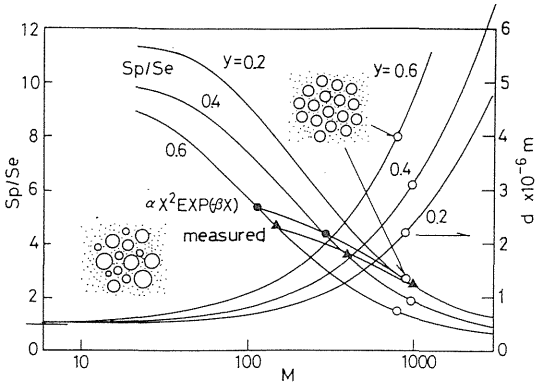

Fig.7 Calculated mean diameter, specific surface (S_P/S_e) and measured mean diameter, S_P/S_e versus M

［C］乳化燃料の流動特性とS_P/S_e

図8に製造後3時間～96時間経過した乳化燃料の粘度を回転式二重円筒粘度計で剪断速度$\dot{\gamma}=760(1/S)$で測定し，含水率yに対し相対粘度μr（乳化燃料の粘度／軽油の粘度）を整理したのを示す。乳化燃料はyが0.4以上で急激に見掛け粘度が増加し，非ニュートン流動性が顕著になる。しかもyが大きいほど，乳化燃料製造後の経過時間が少ない程その傾向は強い。

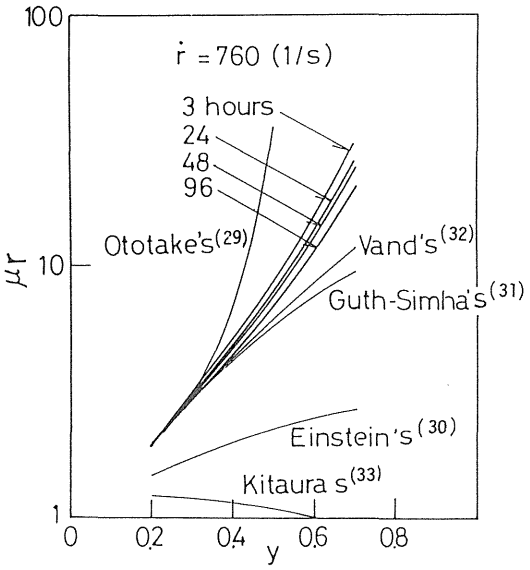

Fig.8 Relative viscosity versus y

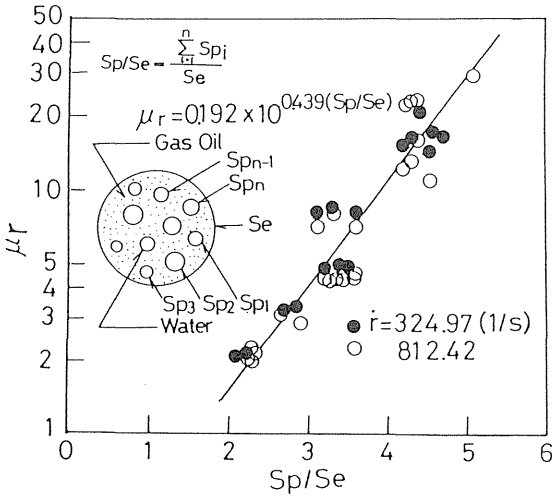

Fig.9 Relative viscosity versus S_P/S_e

従ってμrの値は$\dot{\gamma}$のみならず経過時や含水率によって変る。この様に乳化燃料のμrは$\dot{\gamma}$が一定であっても経過時間及びyの関数であり，一つの物理特性値として扱うのは不都合である。この種のレオロジーの問題に関してEinstein[30],Guth-Simha[31],Vand[32]，北浦[33]，乙竹[29]等の粘度式が提唱されている。同図中にこれらの式の幾つかで計算した結果を併記しているが実験結果と定性的にまた一部yの小さい範囲では定量的にも一致している。しかし先に示した様に経過時間によっ

て分散水滴径の分布が変化する乳化燃料の特性を説明するには不十分ではない。図9に比表面積S_P/S_eを用いて$\dot{\gamma}$＝324.97，812.42(l／S)に於ける相対粘度μrをプロットしている。これから乳化燃料の相対粘度μrに関する実験式を求めると⑦式となる。

$$\mu r = 0.192 \times 10^{0.439(S_P/S_e)} \quad \cdots\cdots⑦$$

ここに$S_{P/S}e$は基本的には水滴間の距離δに関係するのでyが増加すると増加し，経過時間が増加すると減少する。従って経過時間及びyの広い範囲で相対粘度μrの変化を説明できる。

4．2　乳化燃料の噴霧特性について

前節に示したように乳化燃料の流動特性（粘度）は含水率y及び製造後経過時間によって変化するので，当然噴霧特性にも影響を及ぼす。そこでまず乳化燃料の噴霧径分布について検討を加えた。

［A］　乳化燃料の噴霧粒径分布

図10に種々の含水率及び製造後経過時間の乳化燃料の噴霧の一例を示す。総じて含水率yが大きいと大きく，経過時間が大きいと噴霧径は小さい傾向がある。図11に含水率y，及び製造後経過時間3及び48時間の乳化燃料を大気中に噴射した時の噴霧径の頻度分布，及び製造後経過時間とザウタ平均粒径の変化を示す。両図においてyが増加するほどモード直径は大きくなるが，同一yで比較すると乳化燃料製造後の経過時間が長いほどd_{32}は小さくなる事がわかる。このd_{32}を比表面積S_P/S_eを用いてプロットすると図12となる。これから実験式を作ると図中に併記した式が得られる。次に噴霧粒径分布にも乳化燃料中の分散水滴の分布と同じ関数を適用すると次式⑧となる。

$$dN/dX = \alpha A^2 EXP(-\beta X) \quad \cdots\cdots⑧$$
$$\alpha = 10^{-1.9}\, 10^{-0.069(S_P/S_e)}$$
$$\beta = 0.997\,(1/d_{32})$$
$$d_{32} = 20.5\,(S_P/S_e) + 73\,\mu m$$

S_P/S_eを1.5～5と変化させた時の噴霧粒径分布を計算した結果が図12である。図11の実験結果とよく対応している。

次に乳化燃料の噴霧（液滴）形成過程について以下に検討する。乳化燃料の油中水滴間距離δは$\delta/2 = V_O/S_P$(V_O：軽油体積，S_P：油中水滴の総表面積）で与えられる事から，油中水滴群が乳化燃料中に均質に

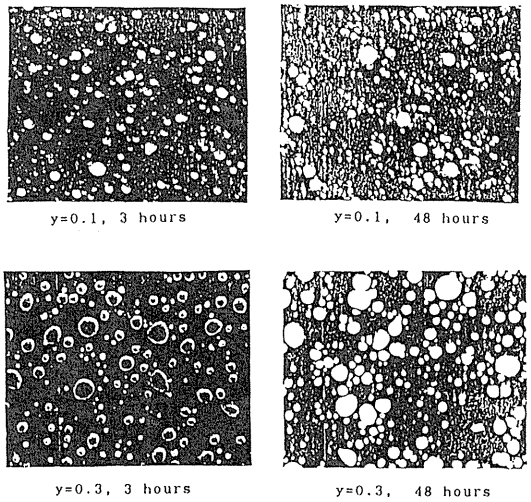

Fig.10 The effect of water content and lapsed time on the fuel droplets distribution

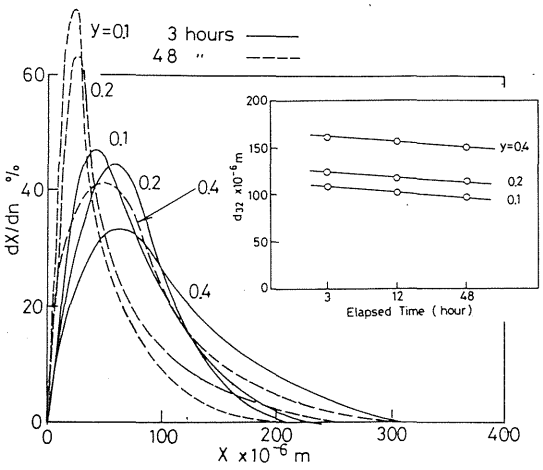

Fig.11 The effect of y and lapse of time no the fuel droplets distribution

分布していればいくら微小な油滴（n個）に分割されても水滴間距離は一定となり乳化燃料の粘度は変らない。しかし前節で明らかにしたように油中水滴径は分布を有する事，及び標本毎に変動した値をとる事に注意する必要がある。（図13参照）すなわち油中水滴が乳化燃料中に均一に分布し，分裂した各油滴中の水滴径分布が同一になる可能性より，油滴の分裂に際し，比較的大きな水滴径を含む油滴（標本1）と，比較的小さな水滴径を含む油滴（標本2）に分裂する可能性

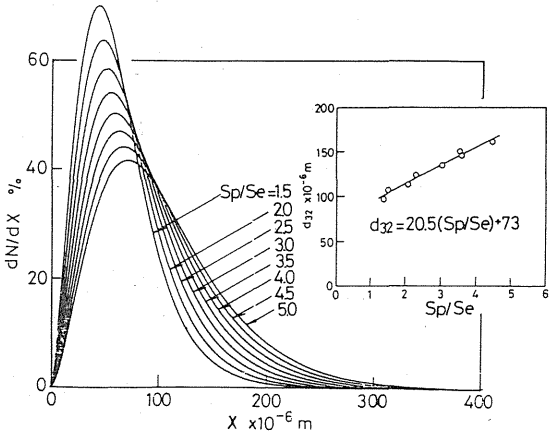

Fig.12 Fuel droplets distribution calculated with formula⑧ and d_{32}versus S_P/S_e

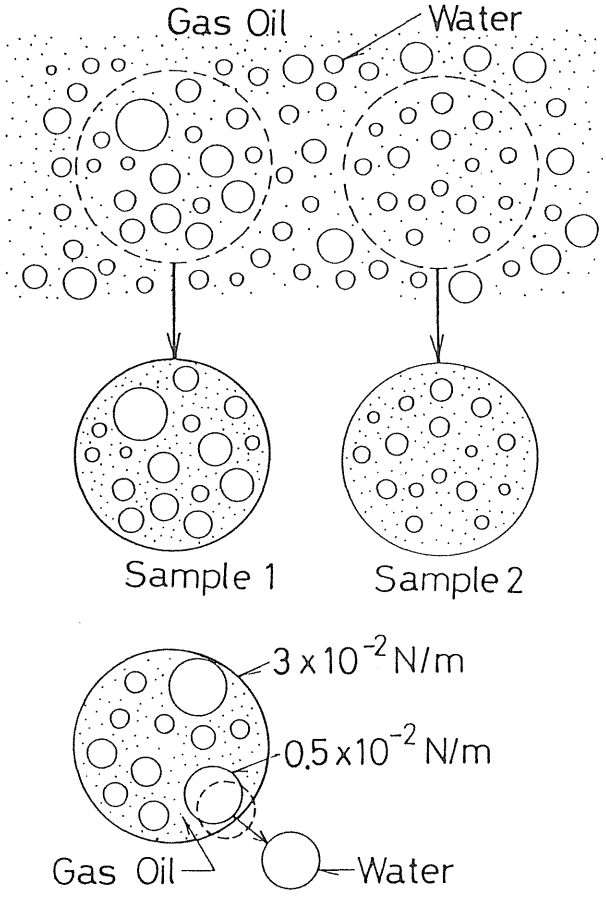

Fig.13 Image of the disintegration of emulsified fuel

の方が高いと考えられる。比較的大きな径の水滴群を含む油滴は，含水率ｙの増加と同等であり，水滴間距離は小さくなり相対粘度μｒは増加する。しかしこの油滴に関してはさらに次の２つの現象が考えられる。すなわち①油中水滴が大きいと水滴の合一の可能性は大きくなる（前節で明らかにしたように乳化燃料製造後経過時間による油中水滴径の変化は含水率ｙの大きなものほどその径は大きくなる。即ちｙが大きいほど合一の頻度は高い）から水滴間距離は大きくなり相対粘度は低減する。②水滴間距離が小さいと乳化燃料油滴表面の軽油膜(W／O型)は薄くなり，その結果油滴と空気の剪断によって排液（即ち水滴が油滴から分離し飛出す意味で経過時間で軽油と水が分離するいわゆる排液現象とは物理的意味が異なる）の可能性が大きくなる。その結果，含水率ｙは減少し相対粘度μｒは低下する。ここで現象が短時間である事から②の現象が支配的と考えられる。そこでこの排液の程度を以下の様にして見積もった。図14に於いて実験で求めた乳化燃料のd_{32}/d_{320}と棚沢の式で計算されるd_{32}/d_{320}のそれぞれの相対粘度の関係を求め同図中に示す。すなわち噴射前の乳化燃料の相対粘度μｒは噴射すると低減し，その低減の程度は相対粘度が高いほど大きい。ここでこの低減した相対粘度を修正相対粘度μｒ*とよぶ。一方相対粘度とS_P/S_eの関係すなわち含水率ｙとの関係は前節で既に求めているのでこの相対粘度μｒの低減を含水率の低減として計算出来る。その結果を図15に示す。すなわち相対粘度が高くなるに従い（含水率ｙが増加するに従い）排液割合は加速度的に増加する。なおO／W型ペンタデカンエマルジョン滴を高速チョッパで切断する方法で排液すると噴霧滴の10%弱しかミクロ爆発しない事[7]から乳化燃料噴射時の排液現象も考えられる。

一方比較的小さな径の水滴群を含む油滴は含水率ｙが減少する事と同等であるから，油滴間距離は増加し（S_P/S_eの減少），相対粘度μｒは減少する。いずれにしても油中水滴径が分布を有し，かつ水滴群が不均質に乳化燃料中に分布する結果，噴射すると噴射前の相対粘度μ$_r$以下にその粘度が低減するものと結論できる。以上は乳化燃料の粘度低減を全て含水率の低減から説明した結果で，当然不均質な乳化燃料液滴の分裂現象は均質な燃料の分裂現象とは異なっていると考えられる。例えば①軽油の密度は水より小さく，②乳化燃料と空気間の界面張力（即ち表面張力）は（軽油＋界面活性剤）と水間の界面張力より大きい（軽油及び乳化燃料の表面張力は（含水率に係わらず）約

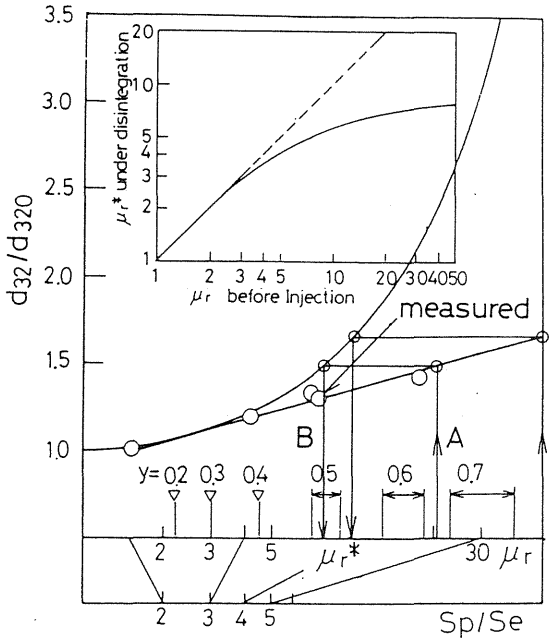

Fig.14 Relaive viscosity under the disintegration

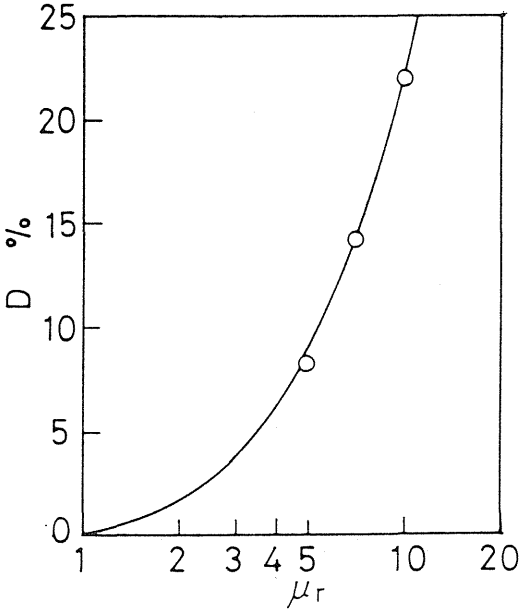

Fig.15 The relationships between relative viscosity and the calculated drainage

3×10^{-2}N／m，軽油水間の界面張力は約4×10^{-2}N／m，軽油＋界面活性剤と水間の界面張力は約0.5×10^{-2}N／m）事から次の現象も考えられる。即ち油中水滴の運動量は軽油より大きくなり，油滴内部における水滴群の分布はより不均質となり分裂しやすくなる。また油滴表面近傍の水滴が空気との抵抗で油滴から剝脱すると油滴の抵抗は増加し，油滴は分裂しやすくなる等が考えられる。いずれにしても乳化燃料の噴霧径は噴射前の粘度で予想される値よりは小さくなる。

［B］乳化燃料の最小噴霧直径

次に乳化燃料の到達し得る最小直径について修正相対粘度μr^*を用いて考察する。油滴内に現れる摩擦力P_sはNewtonの法則から式⑨で与えられる。

$$P_s=\mu F du／dz \cdots\cdots⑨$$

滴の子午線に沿っての表面張力は式⑩で与えられる。

$$P_s t=\sigma \pi d \cdots\cdots⑩$$

ここでμ：粘性係数，F：油滴の子午線断面積，du／dz:滴内部の剪断速度勾配，σ：表面張力，d：滴直径である。滴の抵抗係数ψ_kを$=12.5\sqrt{Re}$[34]で与えると式⑪が成立する。

$$\psi_k \rho_k d^2 \pi／4 \cdot W^2=\sigma d \pi+\mu \pi d^2／4 \cdot du／dz \cdots\cdots⑪$$

ここでρ_k：空気の密度，ρ_b：油滴の密度，w：滴と空気との相対速度である。単位はSIである。いま油滴の速度を零とし，油滴内部の剪断速度勾配は油滴直径の10倍（当然この値を小さくすれば剪断速度勾配は大きくなり，最小直径はより小さくなる）で主流の速度に等しくなる（即ち油滴を固定し，その周囲に油滴の飛行速度に等しい主流を想定する）と仮定し，更に油滴の分裂は単位時間[dt]の剪断距離[dm＝du×dt)]が油滴直径dより大きくなった時(dm＞d)と仮定すると式⑫となる。

$$dm=10\times(\psi_k \rho_k d \cdot w^2-4\sigma)／\mu\times dt>d \cdots\cdots⑫$$

当然，油滴の速度は滴の運動方程式⑬に従って減少す

る

$$-dRe/dt=18.75(\rho_k\nu_k)/(\rho_b d^2)Re^{1.5}\cdots\cdots\cdots⑬$$

ここで油滴のReはRe＝w×dmean／ν_kとし，油滴の代表長さにはdmean＝$N^{1/3}d_o$（N：分裂した油滴の個数，d_o：油滴初期直径）とする。仮定が大まかすぎるので定性的にしか評価出来ないが滴の初速度を100 m／s，滴の初期直径を400μm（噴孔径が426μmから仮定）とすると軽油の到達できる最小直径は相対粘度μrが大きくなるに従い急激に増加し，相対粘度μr＝6.2以上では分裂不可能になる。この値は田端らが測定した結果（相対粘度μr＝4.95～7.2で微粒化不能となった値）ともほぼ一致する。乳化燃料では排液現象があるとし図14の修正相対粘度μr*を用いて計算した。例えば修正相対粘度μr*＝3.5の到達可能な最小直径を計算すると軽油に比較し1.26倍［79.37μm／62.99μm］）あるいは26%［(79.37-62.99)／63.99×100］の増加となる。最小直径の増加とザウター平均直径d_{32}の増加との直接の比較は出来ないが，最小直径の増加は最大直径を増加させると考えると，この増加の程度は吉本ら[23]が実験で得た結果とほぼ同程度である。なお，最小直径の傾向と同図中に示した棚沢の式で計算たザウタ平均粒径d_{32}及び実験結果とは定性的には良い一致を示している。更に厳密には噴射率の変化（噴射期間中）による油滴の初期速度の変化，油滴の空気への運動量の転化に伴う油滴と空気間の相対速度の減少，油中水滴の合一，及び乳化燃料の分裂機構等も考慮する必要がある。

［B］乳化燃料噴霧の到達距離，噴霧角

乳化燃料の噴霧の到達距離，噴霧角に関し前節と同じ仮定で一個の油滴の挙動を計算した。この際，油滴の無次元飛行時間[t×W_o／d_o]，無次元分裂時間[dt×W_o／d_o]を導入し，計算は一個の油滴の分裂に要する時間が[dt＝d／du]で与えられる事から，分裂が終了する時間，すなわちdu×dt≧dで計算終了とした。さらに無次元貫徹距離は[L／d_o]／，但しL＝W-×dt，噴霧角は最小直径の子午線断面積の総和と同じ断面積を与える無次元直径[d／d_o]と無次元貫徹距離から求めた。この際噴霧角は油滴の無次元飛行時間が増加すると小さくなるが同一無次元飛行時間1.0で比較した。なおW_oは油滴の初速度，d_oは噴射ノズル直径である。図16にS_P／S_eに対する噴霧角比θe／θo

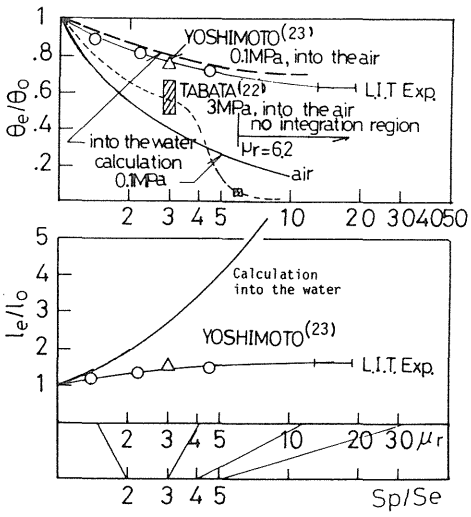

Fig.16 Specific penetration length and spray angle vesus relative viscosity

（乳化燃料噴射時の噴霧角／軽油噴射時の噴霧角）及び噴霧の貫徹距離比ℓe／ℓo（乳化燃料噴射時の貫徹距離／軽油噴射時の貫徹距離）を示す。同図中には本実験における液中噴射の実験結果，及び田端ら[22]，吉本ら[23]の実験結果，及び気中噴射の計算結果を併記してある。S_P／S_eが増加すると（含水率yが増加すると）噴霧角は低減し，さらに噴霧角の低減傾向は液中及び気中噴射の実験結果と定量的にも一致しているが噴霧到達距離の増加傾向は定性的に一致するが定量的に不十分である。これは以上の計算が油滴一個の挙動を検討し，更に油滴の速度を$N^{1/3}d_o$で与えた結果，油滴分裂後の速度降下が小さいために貫徹距離が大きくなった結果である。したがって油滴径が減少する油滴の速度を見積もるに一個の油滴とその周囲にあって同一速度で移動する空気を含めた仮想油滴直径で飛行速度を検討する必要があると同時に油滴の追越しに伴う半径方向への油滴の移動，油滴の蒸発も考慮し，さらに噴射量に見合う油滴を群として検討する必要がある。

［C］乳化燃料噴霧の壁面上での広がり

乳化燃料では軽油に比較し噴霧到達距離が増加し，噴霧角が小さくなる事から燃焼室壁面への噴霧の到達が考えられる。そこで液滴と壁面との衝突について検討した。液滴の壁面への衝突は液滴のもつ運動エネルギーが①液滴内部に発生する剪断速度に比例したエネ

ルギー損失②液滴の再分裂に消費されるエネルギー③液滴の表面張力のポテンシャル・エネルギーの増加④液滴と壁面間の摩擦損失に変換される。液滴の壁面における挙動は一般にはWe数で整理される事が多い[35,36]がWe数は粘性項を含まず先に挙げた運動エネルギーの消費は①が支配的と考えられる。液滴内部の剪断応力は剪断速度すなわち衝突速度に比例し，さらに乳化燃料の様な非ニュートン流体ではさらに（相対粘度μ_rの増加で明らかなように）含水率yの増加（すなわちS_P/S_eの増加，水滴間距離δの減少）に比例する。そこで乳化燃料の衝突に伴う剪断応力によるエネルギー消費を以下の仮定で計算した。①壁面に衝突した乳化燃料の液膜厚さは一定でδとする②剪断応力は$\gamma=\mu du/dz$であたえ，壁面$z=0$で$du=0$，$z=\delta$で$du=dv$とし，$0\sim\delta$間は一様な速度勾配とする。ただしvは油滴の衝突速度とすと油滴の壁面における最大広がり比dmax／dmaxoは$v/\mu_r(\rho_e/\rho_o)$で近似できる。図17に壁面における一個の油滴の広がり比，及び噴霧の広がり比を示す。相対粘度μ_rの増加で壁面の噴霧の広がりが小さくなるという定性的傾向は一致し，さらに乳化燃料の相対粘度に修正対粘度μ_r^*を用いると，その傾きは実験結果と良い一致を示す。

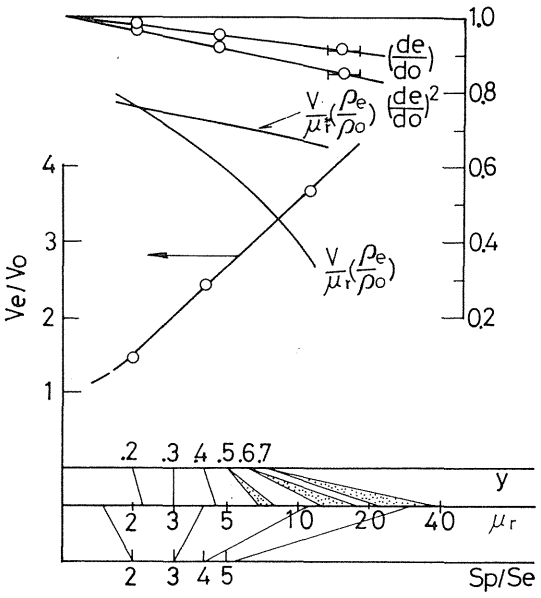

Fig.17 Specific spray area on the wall and specific velocity versus relative viscosity

5．結　論

W／O型乳化燃料の流動及び噴霧特性に関し以下の事が明らかになった。

1. 乳化燃料は必ずしも安定な燃料とはいえず，一般に含水率y及び製造後の経過時間で燃料中の分散水滴径分布は変化する。その結果流動特性（粘度）はy及び製造後の経過時間で大きく変化する。
2. この時間的変化の原因は主に分散水滴の合一であり，合一の程度はほぼ比表面積S_P/S_e（乳化燃料全体を球とした時の表面積Seでその中に含まれる分散水滴の総表面積S_Pを除した値）の変化として表示できる。
3. このS_P/S_eはyが増加すると増加し，製造後の経過時間が増加すると減少する。乳化燃料の相対粘度μ_rはS_P/S_eに比例する。
4. 従って同一yの乳化燃料で油中水滴径を小さくするとμ_rは増加する。
5. 乳化燃料の平均噴霧径は噴射前の粘度から予想される値よりも小さい。これは油中水滴群の径に分布があり，またその水滴の乳化燃料中における分布の不均質が原因と考えられる。
6. 乳化燃料の平均噴霧径から推定される相対粘度を修正相対粘度μ_r^*とすると，μ_r^*は噴射前の相対粘度μ_rに比較すると，含水率yが大きいほど小さくなる。
7. この修正相対粘度μ_r^*を用いて乳化燃料の油滴の挙動を調べた結果，軽油に比較した時の乳化燃料の噴霧径，噴霧の貫徹距離，壁面における広がりの変化を定性的に説明できた。なお以上は粘度の観点から単一油滴の挙動を考察した結果であり，乳化燃料の微粒化機構についても検討を加える必要がある。また乳化燃料中に存在する気泡は噴射率のサイクル毎の変動，さらには燃焼変動をもたらす可能性があり，これに関しても検討を加える予定である。

最後に実験に際しては堀昭三助手及び当時学部学生であった川嶋基（現三菱重工㈱），牧田実（現日産自動車㈱）の協力があったことを記して謝意を表します。

参考文献

(1) E. Valdmanis他1名"SAE 700736, 1970

(2) 三橋他5名　三菱重工技報Vol.15 NO.2 (1978), 238.

(3) T. Murayama他3名SAE 780224, (1978)

(4) 村山他2名　内燃機関合同シンポジュウム講演論文集(1979), 19.

(5) 塚原ほか自動車技術Vol.23 NO.296 (1984), 27

(6) M. S. Plesste & S. A. Zwick J. of Applied Physics Vol.25. NO.4 (1954), 493.

(7) M. T. Jacques Combustion & Flame 29 (1977), 77

(8) J. C. Lasheras他2名20th Symp. on Combstion (1984), 1761.

(9) C. H. Wang & C. K. Law Combstion & Flame 59 (1985), 53.

(10) 張他2名　日本舶用機関学会第42回学術講演 (1988), 28

(11) 岩間他5名　燃料協会誌第57巻第611号, (1978), 197.,岩間他2名　第10回液体の微粒化に関する講演会講演論文(1982), 37.

(12) 水谷他1名日機論文集47巻424号(1981), 2379.日機論文集47巻424号(1981) 2386.

(13) 木村他2名　第20回燃焼シンポジュウム(1982), 37.

(14) 廣安他2名　日機論文集48巻430号433号(1982), 1182. 1811

(15) 岡島他2名　日機論文集50巻455号(1983), 1769.

(16) S. R. Gollahalli他2名Com. b & Flame 55 (1984), 93

(17) 渡辺他2名　第22回燃焼シンポジュウム(1984), 217.

(18) 新井他2名　日機論文集50巻453号(1984), 1345

(19) 木本他2名　第23回燃焼シンポジュウム(1985), 220.

(20) 岡田他2名　日本舶用機関学会第36回学術講演 (1985), 55.

(21) 石川鐵彌著　混合液粘度の理論　丸善㈱(1968)

(22) 田端他2名　日機論文集51巻470号(1985), 3263.

(23) 吉本他1名　日機論文集54巻503号(1388), 1866.

(24) 辻薦　乳化・可容化の技術　工学図書㈱昭和54年

(25) W. J. Pangonis & W. Heller "Angular Scatering Functions for Spherical Particles" Waye Univ. Press (1960)

(26) 大井上博熱機関学大系第6巻　三海堂(1961)

(27) J. Robison J. Phs. Collod Chem., 53 (1949) 1042

(28) 森他1名　化学工学　第20巻第9号(1956), 31.

(29) 乙竹他1名　日本レオロジー学会誌Vol.3 (1975), 118.

(30) A. Einstein Ann. Phys., 4 (1906), 289

(31) E. Guth & Simha Kolloid-Z., 74 (1936), 266

(32) V. Vand J. Phys. Colloid Chem., 52 (1949), 277.

(33) 北浦他1名　化学工学第31巻第12号(1967), 1155.

(34) 坪内，加藤訳　ディーゼル機関の燃料噴射と燃焼　朝倉書店　昭和41年

(35) 佐藤他2名　日機論文集NO.84－161A (1984), 84.

(36) 徳岡他2名　日機論文集NO.84-162A (1984), 92.