軽油・水(W/O形)乳化燃料に関する研究 (噴霧特性の時間的推移について)

梶谷 修一^{*1}, 澤 則弘^{*1}

A Study on Gasoil-Water (Water/Oil Type) Emulsified Fuel (The Effects of Lapse of Time on The Spray Characteristics)

Shuichi KAJITANI and Norihiro SAWA

In the previous report, the fluidity (viscosity) of emulsified fuel was shown as a function of water content and lapse of time. Therefore, The spray characteristics of emulsified fuel are also functions of water content and lapse of time. The experiments indicated that the more water content increase, the more the sauter mean diameter of emulsified fuel increases, and the more the lapse of time increases, the more the sauter diameter of emulsified fuel decreases. This tendency is expressed by the newly introduced specific surface area ratio of emulsified fuel : S_p/S_e , which is in close relationship to the distance between the water droplets in the fuel. S_e is the surface area of an emulsified fuel droplet which is assumed to be spherical and S_e is the sum of surface areas of distributed water droplets in the fuel (which are also assumed to be spherical). The more water content increases, the more the value of T_p/S_e increases. The more the lapse of time increases, the value of S_p/S_e decreases. Then the relative viscosity of the fuel is proportional to the value of S_p/S_e . Therefore, the increased S_p/S_e produced the increased mean sauter diameter of the emulsified fuel.

Key Words: Internal Combustion Engine, Emulsion, Emulsified Fuel, Lapse of Time, Fluidity, Relative Viscosity, Spray Characteristics

1. 結 論

乳化燃料に関する開発, 研究は低公害, 省エネルギー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ことが指摘され, その原因についての化学動力学的および燃焼学的研究も進められている。しかし乳化燃料は内燃機関の燃料としてはまだ実用化されるには至っていない。乳化燃料を内燃機関(Diesel 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流動特性, 燃料噴霧の特性(噴霧粒径分布, 到達距離, 噴霧角など), 高温壁面における蒸発特性などのいわゆる混合気形成過程の特性を明確にし, これらの機関性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

前報⁽¹⁾において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 および製造後経過時間で燃料中の分散水滴径分布は変化し, このため流動特性(粘度)は y および経過時間で大きく変化すること, さらにこの変化の原因は主に分散水滴の合一であり, 合一

の程度は比表面積 S_p/S_e (乳化燃料全体を球としたときの表面積 S_e でその中に含まれる分散水滴の総表面積 S_p を除いた値で油中水滴間距離に関係する) の変化で表示できること, したがって同一の y の乳化燃料であっても油中水滴径を小さくすると相対粘度 μ_r (乳化燃料の粘度/軽油の粘度) は増加することを明らかにした。

一般に燃料の粘度が増加した際の噴霧特性に関しては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る。定量的には粘度を大幅に変化させた噴霧特性は田畑ら⁽²⁾がグリセリン水溶液をディーゼル噴射弁で噴射(噴射圧 11 MPa, 雰囲気圧 3 MPa, 噴孔径 0.4 mm のノズルから連続噴射)したときに, 動粘度 $\nu = 2.99 \sim 4.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (軽油に相当) の噴霧角は $0.28 \sim 0.05 \text{ rad}$ (約 $16 \sim 3^\circ$) であるのに対し $\nu = 14.83 \sim 31.3 \times 10^{-6}$ (50°C 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 $\nu = 10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を大幅に超えた燃料では微粒化不可能としている。

18°C における動粘度が $\nu = 19 \times 10^{-6}$ である乳化燃料(含水率 $y = 0.51$) を大気中に噴射した(噴射圧 19.6 MPa) 吉本ら⁽³⁾の報告では噴霧角は $10 \sim 12^\circ$ (軽油の噴霧角の $10 \sim 15\%$ の減少), ザウター平均粒径は軽油の

* 平成 2 年 1 月 29 日。

*¹ 正員, 茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢 4-12-1)。

ときに比較し約20%増であり、大気中噴射の実験結果とは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、および平均粒径の増加よりは少ない。

本報では乳化燃料を用いた際の噴霧特性に関し粘度の観点から検討した。以下その結果について報告する。

2. 供 試 燃 料

供試乳化燃料は前報⁽¹⁾と同じである。すなわち軽油(JIS 1号規格)、蒸留水、界面活性剤からなるW/O形乳化燃料である。界面活性剤は第一工業薬(株)製S 40-H(HLB値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。製造は以下の手順で行った。静止形管内混合器[ハイミキサ、東レ(株)製]熱交換器付きタンクおよびギアポンプなどからなる装置内をまず界面活性剤を混ぜた軽油をギアポンプで循環させながら含水率 y に見合う水を50 cm³/minの割合で徐々に供給する。水の供給終了後も数min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 $y = V_w / (V_w + V_o) V_o$ ：水の体積、 V_o ：軽油の体積とした。なおタンク内の乳化燃料の温度は25°C一定にした。ここで用いた乳化燃料の分離度は異なった界面活性剤[三洋化成(株)]製IONETS-2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。また経過時間が50 h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(株))を2%使用した水谷ら⁽⁶⁾の観察とも一致する。したが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。なお分離度を初め乳化燃料の物性、および噴霧特性は当然温度によっても変化するが本報では室温(約25±5°C)のもとの挙動のみを検討した。

3. 測 定 方 法

3.1 噴霧粒径分布 噴射弁は単孔ホールノズル(ディーゼル機器製NPDL 155 SNP 1)で、その噴孔径は0.426 mmあり、噴射開弁圧は11.76 MPa(120 kgf/cm²)に設定し大気中に噴射させた。受止液はミヨシ油脂(株)製ペレテックス LT 150 をウラニル塩(2 wt %)で染色し、さらに噴霧粒子の突入時の分裂を避けるため水で2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止め後15 s以内(30 s以内であれば粒子の溶解がないことは確認)で撮影した。なお受止液は噴孔先端から760 mmの位置に設置することで噴霧粒子の分解、分散を極力避けるように配慮し、またその厚みは被写界深度の点から

1 mmとした。

4. 実験結果および考察

4.1 W/O形乳化燃料の噴霧径分布の時間的推移

乳化燃料の噴霧径分布に関しての報告の中では、その動粘度が増加し、平均粒径が増加するという共通の理解以外に以下のような報告がある。(1)吉本らの⁽³⁾乳化燃料(軽油、水)の動粘度は軽油に比較し3倍に増加し、その結果微粒化は悪化し、ザウター平均粒径は増大する。(2)廣安ら⁽⁷⁾の(C重油、水)乳化燃料では総燃料流量を一定に保って含水率 y を増加させたほうがザウター平均粒径が大幅に増加している。この理由として動粘度の増加に加え後者のほうの総燃料流量の増加、すなわちノズル近傍でのせん断応力の増加を原因としている。(3)乳化燃料に加わるせん断応力に関しては岩間ら⁽⁸⁾は強いせん断で乳化燃料(ペンタデカン、水)は排液するとし、(4)三橋ら⁽⁹⁾は噴射された噴霧一滴内には噴射以前の水滴径より細かな水滴を観察(写真から判断すると噴射前の水滴径の約1/10程度に微細化されている)している。(5)水谷ら⁽⁶⁾の乳化燃料

図1 含水率 y (0.1, 0.2, 0.4)および経過時間(3, 48 h)と噴霧径分布曲線の関係

図2 経過時間と比ザウター平均径 d_{32}/d_{32_0}

では動粘度は2.9倍に増加し平均粒径は1.2倍に増加している。さらに噴射後の平均水滴径は噴射前の2倍になっている。

製造後3, 48 h経過した $y=0.1, 0.2, 0.4$ の乳化燃料を大気中に噴射したときの噴霧径の頻度分布を図1に、ザウター平均粒径 d_{32} と経過時間および含水率 y との関係を図2に示す。図1, 2において y が増加するほどモード直径 $[(dN/dX)_{\max}]$ は大きくなり、 $(dN/dX)_{\max}$ は小さくなっている。したがって d_{32} の値は y の増加とともに増加する。しかし同一の 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} は小さくなるのがわかる。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3になる。前報⁽¹⁾で述べたように S_p/S_e の値は y の減少、経過時間の増加に伴って減少するので d_{32} も S_p/S_e に比例することとなる。これから実験式を作ると図3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式(1)となる。

$$dN/dX = \alpha A X^2 \exp(-\beta X) \cdots \cdots (1)$$

$$\alpha = 10^{-1.91} 10^{-0.069(S_p/S_e)}$$

$$\beta = 0.997(1/d_{32})$$

図3 比表面積 S_p/S_e とザウター平均噴霧径 d_{32}

図4 比表面積 S_p/S_e と噴霧径分布曲線

$$d_{32} = 20.5(S_p/S_e) + 73 [\mu\text{m}]$$

A は積分区間で決まる係数

式(1)を用い S_p/S_e を1.5~5と変化させた際の噴霧粒径分布を計算すると図4に、ザウター平均粒径(比平均半径でプロット)を計算すると図5となる。平均噴霧径を計算する式で粘度および表面張力を含む棚沢の式⁽¹⁰⁾と前報(1)で求めた相対粘度を表す式 $\mu_r = 0.192 \times 10^{0.439 * (S_p/S_e)}$ とで計算した結果を図5に併記している。この場合、比平均直径 d_{32}/d_{320} と比表面積 S_p/S_e との関係は定性的には一致するが定量的には相対粘度 $\mu_r=5$ 以上で大きく異なる。油滴の分裂は、油滴の密度、初速度、表面張力、粘度、周囲雰囲気気の密度、粘度、油滴と周囲空気との相対速度、噴霧ノズルの径などが関与することが知られているが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(すなわち表面張力)は(軽油+界面活性剤)と水間の界面張力より大きい(軽油および乳燃料の表面張力は(含水率にかかわらず)約 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)ことから次の現象も考えられる。すなわ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はく脱すると油滴の抵抗は増加し、油滴は分裂しやすくなるなどが考えられる。ここでは簡単化して以下のように考えた。本実験では噴射率を一定に設定していることから(初速度は一定と考えられる)油滴と周囲空気の相対速度を等しいと仮定すると、軽油の密度、表面張力が 0.833 g/cm^3 , $4 \times 10^{-2} \text{ N/m}$,

図5 比表面積 S_p/S_e と比平均噴霧径 d_{32}/d_{320}

乳化燃料の密度, 表面張力が $0.87(y=0.2) \sim 0.902(y=0.4) \text{ g/cm}^3$, $3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ であることから, 油滴の平均粒径に大きく影響するのは粘度である。乳化燃料油滴の分裂機構は上述したように単味燃料や溶解燃料とは多少異なると考えられるが, ここでは乳化燃料に特有な現象と考えられる油滴の分裂に伴う相対粘度 μ_r の変化について検討する。

前報⁽¹⁾において乳化燃料の流動特性は含水率 y および経過時間で変化するいわゆる非ニュートン流体であるためその流動特性は油中水滴間距離 δ に関する特性値 S_p/S_e によって大きく変化することを報告した。

油中分散水滴間距離 δ は $\delta/2 = V_0/S_p$ (V_0 : 軽油体積, x_p : 油中水滴の総表面積) で与えられることから油中水滴群が乳化燃料中に均質に分布(分散水滴径が一定で均一に分布, あるいは分布を有していても, 標本分布が母集団分布に等しく分布) 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わらない。しかし前報で明らかにしたように油中水滴径は分布を有すること, および標本ごとに変動した値をとることに注意する必要がある。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, 比較的小きな水滴径を含む油滴(標本2)に分裂する可能性のほう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, 水滴間距離は減少し(S_p/S_e の増加), 相対粘度 μ_r は増加する。一方比較的小きな径の水滴群を含む油滴は含水率 y の減少と同等であり, 水滴間距離は増加し(S_p/S_e の減少), 相対粘度 μ_r は減少する。しかし前者に関しては, 次のことが考えられる。乳化燃料の分裂に際して(1)油中水滴が大きいと水滴の合一の可能性は大きく, (前報⁽¹⁾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。すなわち y が大きいほど合一の頻度は高い) これがおきると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形)は薄くなり, その結果油滴と空気のせん断によって排液(すなわち水滴が油滴から分離し飛び出す意味で, このとき, 軽油+界面活性剤と水間の界面張力($0.5 \times 10^{-2} \text{ N/m}$)が軽油, 空気間の表面張力($2.6 \times 10^{-2} \text{ N/m}$), 空気間の表面張力($6 \sim 7 \times 10^{-2} \text{ N/m}$)より $1/10$ 程度小さいことが影響する)と考えられる。またこの乳化燃料から水滴のはく脱は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。この排液が生ずると, 含水率 y は減少し相対粘度 μ_r は低下すると考えられる。このことはO/W形ペンタデカンエマルジョン滴を高速チョップで切断すると噴霧滴の10%弱しかマイクロ爆発しないこと⁽⁸⁾から乳化燃料噴射時の排液現象が考えられることと類似している。

ここで現象が短時間であることから(2)の現象が支配的とし, この排液の程度を以下のようにして見積もった。(1)棚沢の式は乳化燃料にも適用できるとし, (2)しかし粘度としては噴射前の粘度より分裂過程においては(乳化燃料のように粘度が変化する場合)は時々刻々の粘度を用いるのが妥当とし, 実験結果と棚沢の式の不一致を粘度の変化に起因するものと仮定し, 逆に粘度変化, すなわち排液の度合いを見積もった。図3において実験で求めた乳化燃料の d_{32}/d_{32_0} と棚沢の式で計算される d_{32}/d_{32_0} とそれぞれの相対粘度の関係を求めると図6となる。すなわち噴射前の乳化燃料の相対粘度 μ_r は噴射すると低減し, その低

図6 相対粘度 μ_r と修正相対粘度 μ_r^* の関係

図7 含水率 y と比表面積の関係

図 8 相対粘度 μ_r と排液割合 D の関係

減の程度は相対粘度が高いほど大きい。この低減した相対粘度を修正相対粘度 μ_r^* とよぶ。一方相対粘度 μ_r と S_p/S_e の関係は $\mu_r = 0.192 \times 10^{0.439(S_p/S_e)}$ (1) で与えられ、 S_p/S_e と含水率 y とは油中分散水滴径の分布関数を用いて作図した図 8 で与えられることから乳化燃料の相対粘度 μ_r と修正相対粘度 μ_r^* の差を排液割合として見積もった。その結果を図 7 に示す。この μ_r^* を用い付録にあるように油滴の分裂を考えると実験結果と定性的一致が得られることから分裂中の乳化燃料の粘度は含水率が大きいほど排液割合は大きくなり、分裂過程の粘度は比較的小さいと考えられる。

5. 結 論

乳化燃料の噴霧特性の時間的推移に関し検討を加えた結果以下のことが明らかになった。

(1) 前報で指摘したように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 および製造後経過時間で分散水滴径分布、したがって比表面積 S_p/S_e は変化し、その結果流動特性(粘度)は大きく変化する。

(2) このため乳化燃料のザウター平均噴霧径も含水率 y の減少、製造後の経過時間の増加に伴って減少する。すなわち比表面積 S_p/S_e が増加するとザウター平均噴霧径は増加する。

(3) この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。これは乳化燃料における油中水滴群の径の不均質分に起因するものと考えられる。

(4) 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 に変化すると、含水率 y が大きいほど小さくなる。

なお以上は乳化燃料の噴霧特性に関し粘度の観点か

ら考察した結果であり、乳化燃料の微粒化機構についてもさらに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ごとの変動、強い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。

最後に本研究を実施するにあたり第一工業製薬(株)から界面活性剤の協力と当時学部学生であった川嶋基〔現三菱重工(株)〕、牧田実〔現日産自動車(株)〕の協力があつたことを記し謝意を表す。

〔付録 単一油滴の分裂〕

油滴内に現れる摩擦力 P_s は Newton の法則から式 (2) で与えられる。

$$P_s = \mu F du/dz \quad \cdots \cdots (2)$$

滴の子午線に沿っての表面張力は式 (3) で与えられる。

$$P_{st} = \sigma \pi d \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで μ : 粘性係数, F : 油滴の子午線断面積, du/dz : 滴内部のせん断速度こう配, σ : 表面張力, d : 滴直径である。滴の抵抗係数 ϕ_k を $=12.5\sqrt{Re}^{(1)}$ で与えると式 (4) が成立する。

$$\phi_k \rho_k d^2 \pi / 4 \cdot w^2 = \sigma \pi d + \mu \pi d^2 / 4 \cdot du/dz \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで ρ_k : 空気密度, 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、油滴内部のせん断速度こう配は油滴直径の 10 倍で主流の速度に等しくなる(すなわち油滴を固定し、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、さらに油滴の分裂は単位時間 dt のせん断距離 [$d_m = du \times dt$] が油滴直径 d より大きくなったとき ($d_m > d$) と仮定すると式 (5) となる。

$$d_m = 10 \times (\phi_k \rho_k d \cdot w^2 - 4\sigma) / \mu \times dt > d \quad \cdots \cdots (5)$$

当然油滴の速度は滴の運動方程式 (6) に従って減少する。

$$-dRe/dt = 18.75(\rho_k \nu_k) / (\rho_b d^2) Re^{1.5} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで油滴の Re は $Re = w \times d_{mean} / \nu_k$ とし、油滴の代表長さには $d_{mean} = N^{1/3} d_0$ (N : 分裂した油滴の個数, d_0 : 油滴初期直径, ρ_b : 油滴の密度) とする。

以上の仮定および滴の初速度を 100 m/s、滴の初期直径を 400 μm (噴孔径が 426 μm から仮定) で計算した結果仮定が大まかすぎるので定性的にしか評価できないが軽油滴の直径は相対粘度 μ_r が大きくなるに従い急激に増加し、相対粘度 $\mu_r = 6.2$ 以上では分裂不可能になる。この値は田畑らが測定した結果⁽²⁾ (相対粘度 $\mu_r = 4.95 \sim 7.2$ で微粒化不能となった値) とほぼ一致する。乳化燃料では排液現象があるとし修正相対粘度 μ_r^* を用いて計算した。例えば修正相対粘度 $\mu_r^* = 3.5$ の

到達可能な滴直径を計算すると軽油滴に比較し 1.26 倍 $[79.37 \mu\text{m} / 62.99 \mu\text{m}]$ あるいは 26 % $[(79.37 - 62.99) / 62.99 \times 100]$ の増加となる。この計算で求めた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できないが、この直径の増加の程度は吉本ら⁽³⁾が実験で得た結果とほぼ同程度である。

文 献

- (1) 梶谷・澤, 第 8 回内燃機関合同シンポジウム講論集, (1990), 51.
- (2) 田畑・ほか 2 名, 機論, 51-470, B(1986), 3263.
- (3) 吉本・ほか 1 名, 機論, 54-503, B(1988), 1866.
- (4) 村山・ほか 2 名, 内燃機関合同シンポジウム講論集, (1979), 19.
- (5) 塚原・ほか 1 名, 内燃機関, 23-296(1984), 27.
- (6) 水谷・ほか 1 名, 機論, 47-424, B(1981), 2379, 2386.
- (7) 廣安・ほか 2 名, 機論, 48-433, B(1982), 1182, 1811.
- (8) 岩間・ほか 2 名, 第 10 回液体の微粒化に関する講演会講論集, (1982), 37.
- (9) 三橋・ほか 5 名, 三菱重工技報, 15-2(1978), 23.
- (10) 坂山・ほか 1 名, 機論, 5-18(1939), 136.
- (11) Sitkei, G., Kraftstoffaufbereitung und bei Dieselmotoren, (1964), 76, Springer-Verlag.