

水／軽油・エマルジョン燃料の燃費と排気

遠山 壽・脇 俊隆

1. ま え が き

人口増加，経済活動の飛躍的増加に伴い，運送は列車からトラックなど自動車へと主力がシフトし，その結果排気問題は大変厳しくなっている。先進国全体としても，その公害問題と中東戦争による石油問題がほぼ同時発生した1970年代以来，積極的取り組みがなされてきた。その結果，ガソリンエンジンについては相当改善されてきているのは周知の通りであるが，ディーゼルエンジンについては，粒子状物質（PM）とNO_xがまだ解決と言えるにはほど遠い状況にある。その同時削減法としてここ四半世紀にわたって水／軽油・エマルジョン燃料が研究されてきた。

その研究の歴史は古く，1850年にすでに水を液体石油燃料に混合することで燃焼形態が大幅に変わることが報告されていたようである⁽¹⁾。1960年代，米国が自動車王国の地位を確固たるものにしたころ，本格的に研究が開始された⁽²⁾。さらに1970年代の石油ショック，あるいはほぼ同時に問題化されたロスアンゼルスのスモッグ問題の解決の一手段として，一層研究に拍車がかかったようで，1977年には，水／燃料・エマルジョン学会が発足し，第一回会議が開かれている⁽³⁾。日本で研究が開始されたのは，ちょうどそのころである⁽⁴⁾。

水と油のエマルジョンには二種類有り，一つは水粒子が油中に懸濁している状態，他方は逆に油粒子が水中に懸濁している状態のものである。いずれも，水と油の分離を防ぐために界面活性剤が使われる。自動車の場合，適用が期待されるのはディーゼルエンジンであり，前者が使われ当然燃料は軽油である。従来の研究では，水粒子の平均直径は1～10 μ程度であった。エマルジョン燃料がディーゼル燃料として効果的な理由は，以下のように説明される。すなわち，噴射された燃料油滴中のこの水粒子が着火までにその中で凝集し，油に囲まれて中心に集まる⁽⁵⁾。すると沸点が軽油より低い水が断熱圧縮された高温雰囲気中で突沸を起こす。そのため周囲を覆う油が爆発的に飛散する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この現象はマイクロ爆発と名付けられており，実物大の油滴で実際のエンジン条件で観察するのは難しいので，直径1ミリ～0.5ミリ程度のサイズで，単純加熱条件で調べられ，その現象が確認されている。こうしてマイクロ爆発が起これば，最近の高圧噴射と同様の油滴の微粒化が可能となりPMの改善が期待でき，一方水を含むことから燃焼温度が低下し，NO_x発生も抑制できる一石二鳥の方法として期待を集めたのであった。

しかし，現状では普及に至っていない。それは三つの大きな欠点によるとされる。すなわち，

(i) エマルジョン状態の長期安定性が低い(油水分離までの期間が短い), (ii) 水による噴射弁に至るまでの燃料系の錆, (iii) 低温時の水滴の凍結である。またおそらくマイクロ爆発の発生条件が単純ではないことや, ミクロ爆発の効果も単純ではないことからと思われるが, 期待された効果が出なかったり場合によっては逆効果を生み, 情報を混乱させ, 普及にブレーキをかけた一因と考えられよう。

ところが最近状況が変わってきた。すなわち, 東京都の排ガス規制強化により, S&S 社製エマルジョン装置が条件付きとは言え認可されるに至ったこと, 海外では Lubrizol (米: Lubrizol 社)^{(8),(9)} あるいは Aquazol (仏: Elf 社)⁽¹⁰⁾ などのサブミクロン級のエマルジョン燃料が市販され, ロンドン, パリなどの市バスに採用されるに至っているように, その長所を生かす環境も整ってきている。それは, とくに (i) を解決するために, S&S 社製のように車載で水・油混合を行い, 必要なときに必要量を製造供給することで, (ii), (iii) の同時解決を図ったり, 水粒子径をさらに微粒化することで懸濁状態の長期化を図ったことが効を奏している。ここでは, 後者タイプと同等品を製造するマトリックスジーティ社から, 種々の条件のエマルジョン燃料の供給を受け, 調べることにした。本研究の最終的な目的は, PM や NO_x 対策が不十分な従来型噴射方式および最新の高圧噴射(コモンレール)それぞれに対し, 適した平均粒径, 粒径分布が存在するのか, 最適含水率などを調べることにある。今回は, 従来型噴射系を持つ渦流室式ディーゼルエンジンを対象に選び, シャシーダイナモ上の実走行条件で, 燃費, 排気組成に及ぼす含水率の影響を主に調べた。

2. 実験装置

用いたエマルジョン燃料はマトリックスジーティ社製で, 図1にこの燃料の水滴粒径分布を示す。水滴のメディアン径は 0.44μ , 粒径分布の標準偏差は 0.13μ (HORIB LA-910 レーザ回折/散乱式粒度分布測定装置により測定) である。このサイズのエマルジョンの水分含有率は 10, 15, 20%, ベース燃料は低硫黄軽油 JIS 2号である。粒径分布を図1に示す。これらの燃料のエマルジョン状態を安定化させるために, 2%の界面活性剤を用いている。

用いた車はトヨタカルディナ(平成4年)でエンジンは4気筒・総排気量 1974cc の渦室流式ディーゼルエンジン, 動力伝達装置はオートマチックである。緒元を表1. に示す。

動力性能測定には当学所有の(株)明電舎製・MEIROLL-S を, 排気ガス分析には(株)ファームテック製 EXL-2300S を, すず濃度は ZEXEL 製・DSM-10N を用いた。なお, すず濃度測定は, この装置をそのまま用いると, 長い採集管中でのロスが発生する可能性があったので, エンジン排気管直後で JIS で参考として定められた円形濾紙を用いるダスト捕集器により流量を測定しながら採集した。その円形ろ紙の光の吸収率を上述測定装置で測定した。

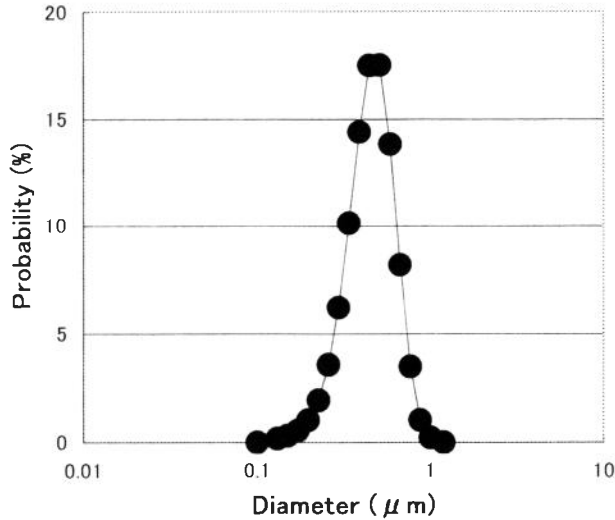


図1. 水滴径分布

表1 使用乗用車仕様

| | |
|------------|--------------------|
| 車種 | トヨタカルディナ ・ディーゼル |
| 型式 | XCT CT190GDWPES |
| 車重 | 1.4ton (車両のみ) |
| 排気量 | 1974cc |
| 圧縮比 | 23.0 |
| エンジン燃焼室タイプ | 渦流室式 |
| 噴射ポンプ型式 | 分配型 |

3. 実験結果と考察

性能評価は20km/h～100km/hと負荷を変化させて、排気特性(CO, THC, NO_x, CO₂, O₂, Smoke), および燃費を調べた。また実走行に近い条件の10・15モード燃費も調べた。まず、定速走行条件における各汚染物質濃度について示す。

3.1 HC, CO

排ガス中CO, HC濃度を図2., 図3. に示す。

CO濃度は、全般に軽油よりエマルジョンの方が高く、とくに低速でその傾向は顕著である。また、当然のことではあるが、含水率が高いほど、多くなる傾向が示されている。以前の研究でも同様⁽⁶⁾のことが指摘されてきており、その原因はまだはっきりしていない。同じ未燃成分としてCOと似た傾向を示すのがTHCであり、軽油よりかなり高濃度を排出する。とは言え、COの傾向と異なり、どちらかと言えば高速側でより多くを排出している。CO, THCは低速で増加、

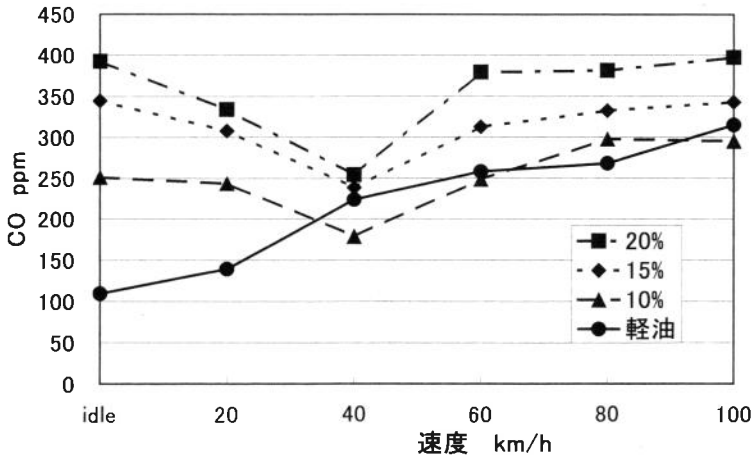


図2. CO

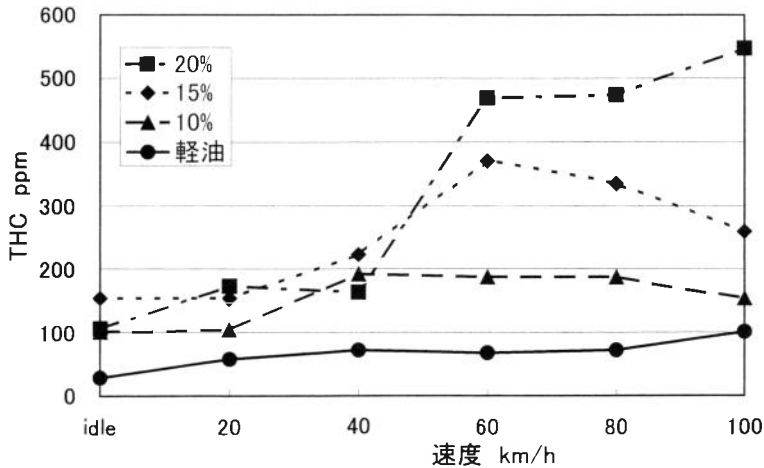


図3. THC

高速で減少という報告^{(11),(12)}もあり、THCについては傾向が合わない。同じ未燃成分とは言え、HCは燃料そのものも含んで計測されるのに対し、COは燃料となる高級炭化水素から中間生成物である種々のHCを経てCO₂になる一歩手前の成分である。もちろん、HCは高温では全く不安定となり、分解されてしまうが、COは条件により高温でもかなり高濃度で安定に存在できる成分である。したがって、内燃機関から排出される傾向を同じくするとは限らない。

エマルジョン燃料は、軽油と比較して密度が高く、その分、貫徹力が強いと言われている。そのため、壁面に付着しやすく、付着したエマルジョン燃料中の気化熱が大きいと、可能性としては渦流室の壁面温度を下げやすい。それが事実とし、まだ確実に検証されたわけではないが、マイクロ爆発も本当に存在すると仮定するならば、その爆発までに飛行距離が必要であり、直噴式

と比較し、壁面まで飛行する距離が短い渦流室のとくに高負荷域は適さないと言えよう。その考察は、HCの傾向と合致する。このHCとCOの関係について、さらに想像をたくましくして考察することもできようが、現実離れする可能性が高くなり、その考察の意義も認められにくくなるので、ここでは単に、従来の傾向と似ているというにとどめたい。同様の混合燃料で、アルコール／ガソリンブレンド燃料があるが、この場合、マイクロ爆発ではなくディスラプション（マイクロ爆発のように燃料が高温下ではじけるが、爆発というほどではなく、油滴の崩壊的な破裂現象）が発生、やはり燃料と空気の混合を促進するとされ、この場合は⁽¹³⁾ HC、COの削減に効果があるとされるなど、現象の理解に有効な情報も有り、今後、それらを参考にしながら詰めるべき課題であろう。

3.2 NOx

図4. にNOx濃度を示す。一般の内燃機関で発生するNOxはほとんどがThermal NOと言われているが、エマルジョン燃料は、水分の蒸発熱で着火前温度が低くなり、さらに発熱量が少ないため燃焼温度が低くなり、NOx生成量が減少すると期待されてきている。しかし、最近平均水滴径が0.5 μ程度とされるLubrizolでもNOx低減効果は劇的とまでは言えないことが報告され、厳しいNOx規制には排気後処理装置との併用で対応するとしている⁽⁸⁾。図4で見ても、含水率が20%であってもやはり激減とは言えず、全体に軽油より4～5割程度減少しているものの大幅な減少はできていない。これは、最近のサブミクロン水滴／軽油・エマルジョンでなく、旧来のミクロン級水滴／軽油・エマルジョンで言われて来たこととも類似の傾向である。

このことを簡単な理論計算で試してみた。この場合、等容度は1とした。噴射時期はしたがってTDCである。ディーゼルエンジン内は知ってのとおり拡散燃焼であり、不均一燃焼であるが、渦流室式でNOxの生成速度と比較し混合が早いとの観点と単純化から、筒内ガスは均一とした。平均当量比は0.6とし、エンジン回転数は2400rpm、圧縮比は20、圧縮および膨張中の放熱はポ

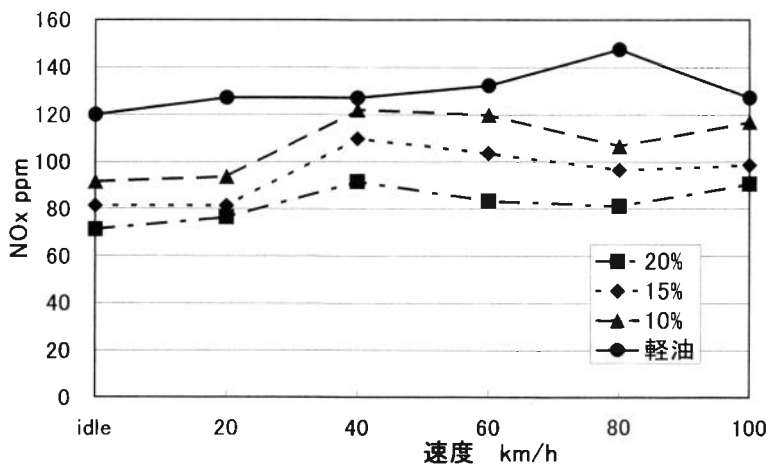


図4. NOx

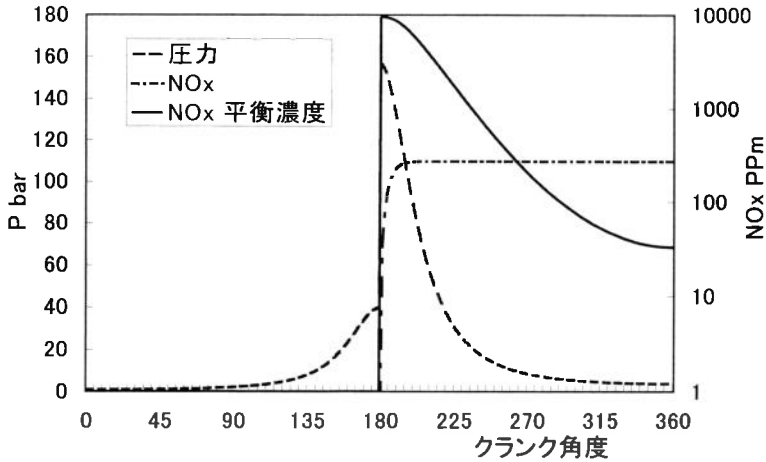


図 5. NOx 生成履歴 (計算)

リトローブ比を 0.9 として考慮した。また燃焼熱はその 90% が有効に使われ、10% が損失したと仮定した。まず、図 5 に NOx 生成の様子と平衡濃度の関係をクランク角度を横軸にとって示す。平衡濃度は、圧力の履歴にしたがって温度も変化しているため、最大濃度は TDC で記録される。一方、thermal NO は TDC で急速に生成を始めるが、 $\theta = 200^\circ$ 付近までの急速な圧力降下に伴う温度の低下で、生成速度は急減し凍結に至っている。こうして排気濃度はピストンがまだ頂部にあるところに急速に凍結する。ただし、これは当量比を 0.6 としたため筒内温度が比較的低温で推移するからである。当量比が 1 に近ければもっと膨張してから凍結する。

このように種々の条件で計算して、エマルジョン燃料中含水率の及ぼす NOx 生成量への影響を調べたのが図 6 である。これは $\phi = 0.6$ についての計算結果であるが、 $\phi = 0.8$ でも、ほとんど同じ結果を得ている。この結果によれば、含水率 15% では、純軽油燃料の場合に対し NOx 削減率は

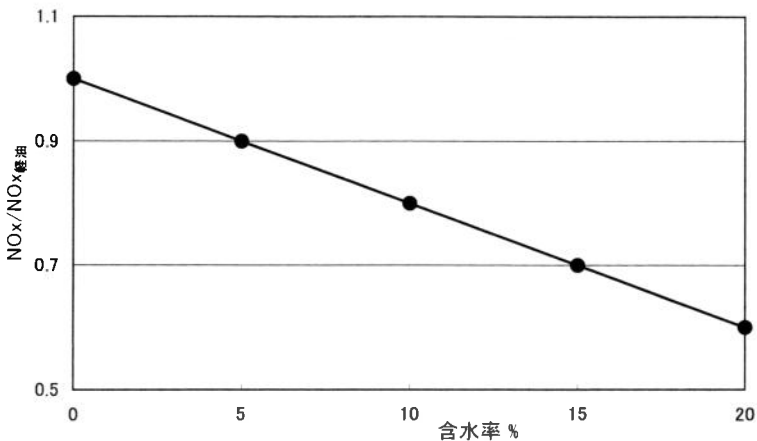


図 6. 含水率の NOx 生成量への影響 (計算)

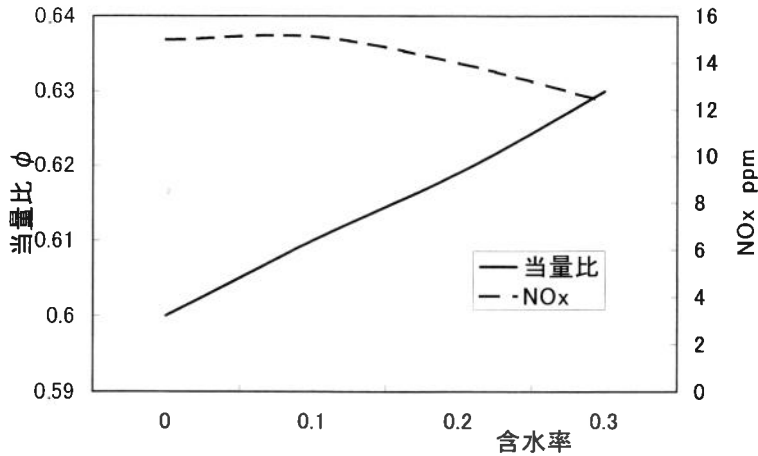


図7. 等出力条件のNOx排出量(計算)

15%である。実車走行時は、含水率が高くなると出力が減るため、当量比を若干上げて走ることになる。それを考慮して、同じ出力となるように当量比を変化させて比較してみたのが図7である。含水率が高いと当量比を高くして出力を一定にするため、NOxは増加、図6より一層軽油との差は縮まっている。

実車の図4はこれらの結果と比較し、NOx減少率が大きい。この原因は、現状ではわからないが、計算は非常に単純であるため、実際にシミュレートできる精度が無いことは容易に想像できる。ただ、一般に水の存在がNOxを激減するという予測がそれほど期待できるものではないことは説明できたと言えよう。

3.3 smoke

次に smoke 排出量を見てみよう。

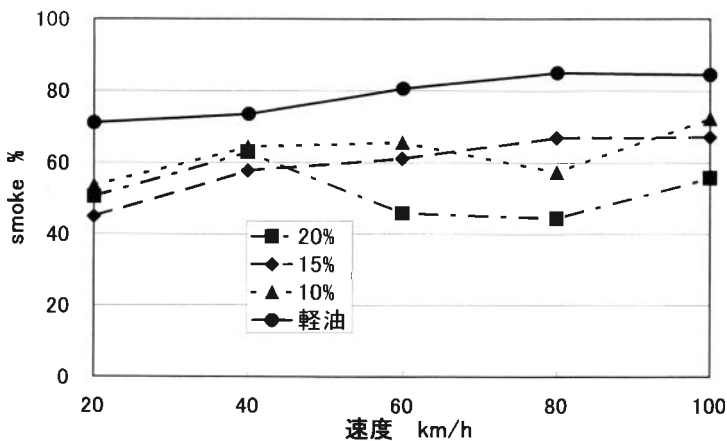


図8. smoke レベル

図8に、やはり速度を横軸にとって軽油との比較を示す。とくに時速100km/hでは、目視でも軽油は排気中 smoke が際だって観測されるレベルであるが、エマルジョンではそれが見えなくなった。そのフィルターの吸収率を示している（吸収率は実際のすす量の指数関数になっているので、数値の大小はそのまま数値に比例してすすの大小の絶対量比較はできない。実際はこの数値の開き以上に差が有る）。純軽油、エマルジョンともに負荷が高い高速になるほど、燃料噴射量が増加するとともに空気不足領域が増え、smoke が増えている。ただ、他の排気ガス成分濃度と比較し、filter の着色度で測定する smoke 評価は、ばらつきが大きく出ている。実験中、アクセルをなるべく一定に保とうとするものの、速度を一定に保つためにはアクセル開度の修正がしばしば必要になり、この条件では smoke が大幅に変動し、誤差を与えていると考えられる（排気ガス成分でも CO や THC は比較的こうした変動の影響を受けやすい）。そうした背景を考慮して図を見てみると、含水率が高いほど smoke レベルは低くなり、20%の場合、最大で半減程度が期待できる（実際の smoke 量は、前述のようにもっと削減されている）。条件によっては、目視で emulsion 燃料はほぼ透明なのに、軽油では明らかにススが見えていることが観測されており、emulsion 燃料は smoke 削減に効果的であることがわかる。なお、規制は smoke というより、PMで行われる。今回は PM も測定したが精度不足であった。今後重要な測定項目として取り組むべきであろう。

3.4 燃費

図9. に速度に対する燃費を軽油と比較して示した。

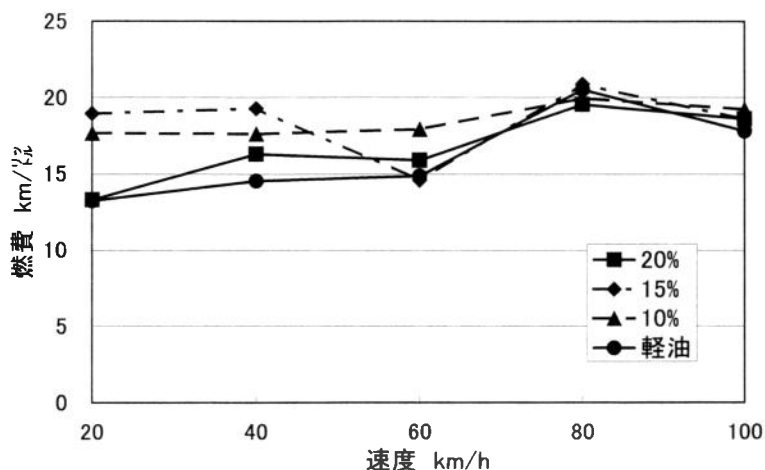


図9. 燃料消費率（定速走行時）

横軸は速度、縦軸は燃費を示し、軽油は供給したそれらの燃料量をそのまま燃費表現しているが、エマルジョン燃料はそれぞれの水分含有率分を除き、正味に供給した軽油量だけで示した値である。どの含水率も低速条件で軽油を上回っている。渦流室燃焼室タイプでは、COやTHCの項でも述べたように、燃料は壁に付着しやすく、軽油のみの場合と比較し、エマルジョン燃料は水分が含まれているだけ壁を冷やしやすいため、損失が多くなると想像される。マイクロ爆発が真に燃費向上にも貢献するとすれば、貫徹力の強さから、ある程度の飛行距離を与えられないと、飛行中のマイクロ爆発の効果が期待できないことになる（もちろん壁面に付着してマイクロ爆発を起こすこともあろうが、空中でのその効果の方がより高いであろう）。低速では、供給される燃料量が少ないため、壁面への付着量が相対的には少ないと期待できれば、低速燃費が高くなる説明になろうが、低速でCOが増加することの説明とは矛盾する。したがって、この理由を説明するにはこれらのデータだけでは無理と考える。同じ燃料につき、急速圧縮機で研究を進めている岐阜大学の結果などを合わせて検討すれば、説明が可能になるであろう。

ここで言えることは、エマルジョン化で燃費が下がることはなく、むしろ向上し、しかも含水率15%の場合、低速で40%に及ぶ改善率である。この15%が時速60km/hで非常に悪化し、軽油並みになっているが、この理由は現在不明である。今後検討したい。

以上は定速燃費であるが、加減速も含めた10・15モード燃費がむしろ重要であろう。図10.にその結果を示す。

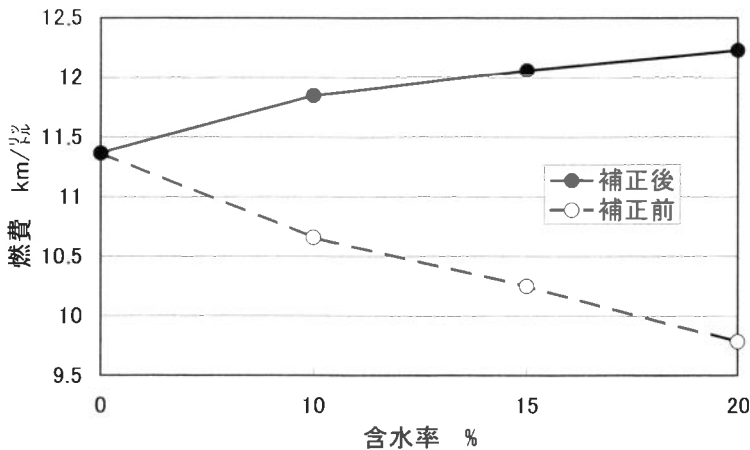


図10. 燃料消費率 (10・15モード)

図9.と同様に、水分を補正し正味の軽油量での評価を黒丸で示した。参考のため、水を含んだ量で整理した結果を白丸で示した。含水率が増えるにつれ、燃費も向上している。含水率20%の燃費改善率は8%である。この結果から、実走行時の燃費も改善できることが示されたと言えよう。

4. 結 論

微粒化した水滴を含む、水/軽油・エマルジョン燃料について、シャシーダイナモ上で渦流室式ディーゼルエンジン搭載の実車走行性能（排気濃度，燃費）から調べた。今回は含水率15%について、軽油との比較を主眼に行った。また、排気中NO_xへの影響については、簡単な計算も試みた。その結果以下の結論を得た。

- (1) CO, HCは軽油より多くなり、数倍に達することもある。
- (2) 簡単なサイクル計算により、NO_xは含水率20%で40%程度減少する。ただし、出力一定条件ではその効果は減少し、期待されるほどのNO_x低減はできないことが予測できた。
- (3) 実際の走行試験では、NO_x, smokeは顕著と言うほどではないが、30-40%程度は減少させることができる。
- (4) 燃費は、低速で改善され、含水率15%では40%の改善が達成されている。また、加減速を含む10・15モード燃費も含水率20%では純軽油の場合より8%改善する。
- (5) 総じて、ここで扱った従来より微粒化した水滴径のエマルジョン燃料ではあったが、従来の結果と大きく異なるものは得られなかった。ただし、低速燃費は従来より改善率が高く、smoke低減率は従来より低めとなった。
- (6) 排気と燃費を考慮すると、最適な含水率は15%付近と言える。

以上、自動車メーカーが、1%の燃費アップに四苦八苦する中で、排気中NO_x, smoke濃度を下げながら8%の改善が単にエマルジョン燃料にただけで達成できるということは、実用化を積極的に進めても良いものと考えられる。今回は手始めに行った実験であり、以上をもとに、今後さらに含水率の影響、噴射時期の影響、水滴径分布の違い、中心粒径の影響などを調べることでよりよい使用条件が明らかになるであろうと考える。また、ここでは渦流室式燃焼室であったが、主流の直噴エンジンはむしろよりエマルジョン燃料の効果が期待されるのであり、評価検討を進めたい。最後に、研究遂行に有益な助言をいただき、また実験に協力いただいた岐阜大学工学部・若井和憲教授、同大学院（社会人）博士後期課程学生・鯉江和俊氏、学部学生・福井政広君、本学・山本純氏、燃料を供給してもらったマトリックスジーティー社に謝意を表す。

5. REFERENCES

1. A. Sjögren, Burning of Water-in-Oil Emulsions, Proc. Combust. Institute, 16, pp.297-305 (1977) .
2. Greeves G. Khan, I. M. and Onison G., Effects of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emissions, Proc. Comb. Inst., 16, p.321 (1977) .
3. Law, C.K., Water-in-Fuel Emulsion Conference, p.20 (1977) .
4. Murayama, Experimental Reduction of NO_x, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Using Uniquely Produced Water (0 - 80%) to Fuel Emulsion, SAE paper 780224pp.1-13 (1978) .
5. Lasheras, J. C., et al, Initial Observations on the Free Droplet Combustion Characteristics of Water-in-Fuel Emulsions,

- Comb. Sci. and Technol., 21, pp.1-14 (1979) .
6. 村山, ディーゼル排ガスと乳化燃料, 鉱山, 10, pp.17-40 (1992) .
 7. 寺地, 瀬川, 山崎, 角田, 高温壁面上におけるエマルジョン液滴燃焼時のマイクロ爆発, 第40回燃焼シンポジウム前刷集, pp.311-322 (2002) .
 8. Barnes, A, and et al, Evaluation of Water-blended Fuels in a City Bus and an Assessment of Performance with Emission Control Devices, SAE Technical Paper Series 2000-01-1915, pp.1- 5 (2000) .
 9. LUBRIZOL, 環境にやさしい省エネ水エマルジョン燃料, Motor Vehicle, 52-12, pp.30-33 (2002) .
 10. Barnaud, F. and et al, An Original Emulsified Water-Diesel Fuel for Heavy-Duty Applications, SAE Technical Paper Series 2000-01-1861, pp.1- 7 (2000) .
 11. Fonzo, M., Operation of Automotive Diesel Engine with Water in Oil Emulsion Gasoil / Water emulsion fuel for Automotive Diesel Engines, Energy Conserv. Ind. , 2, p.19, (1984) .
 12. Chiappini, E., Operation of Automotive Diesel Engine with Water in Oil Emulsion, Energy Conserv. Transp. New Engine Flywheels, 19, (1982) .
 13. Donnelly, J. J. Jr. and White, H. M., Water and Alcohol Use in Automotive Diesel Engines, US DOE Rep, pp.189(1983)