

軽油・水エマルジョン燃料の実用性に関する研究

飯田 靖雄 福岡 三郎 舟島 正直
石井 康一郎 竹永 裕二 坂西 丕昌
大聖 康弘*

(* 早稲田大学理工学部)

要 旨

ディーゼル車から排出されるNO_x 低減対策としてエマルジョン燃料の実用性について検討した。本研究で使用したエマルジョン燃料調合装置は燃料噴射ポンプの直前で、軽油中に水を噴射し、機械的に攪拌混合するものである。7.1ℓ 6気筒直接噴射式ディーゼルエンジンを使用したエンジン実験では、注水率約20%のエマルジョン燃料を使用することにより、エンジン性能を損ねることなく、NO_x を7~60%低減できることを確認した。

次に、エマルジョン燃料使用によるエンジン各部位への影響の有無を把握し、実用性を評価するため同型のエンジンを搭載した4トントラックを使用して、累積5万Kmの路上走行試験を実施した。エマルジョン燃料のみ使用した2万km走行試験では、噴射ノズルスプリングの折損が多発した。このような悪影響を防ぐため種々検討した結果、注水する水に予め防錆及び潤滑効果のある界面活性剤を0.1%添加した1.5万kmの走行試験では、噴射ノズルスプリングの折損を防ぐことができた。

Study on the Practical Use of Water-Emulsion Diesel Fuel

Yasuo Iida, Saburo Fukuoka, Masanao Funeshima,
Koichiro Ishii, Yuji Takenaga, Motomasa Sakanishi
and Yasuhiro Daishou *

*Waseda University, Department of Mechanical Engineering

Summary

Experimental studies have been carried out on the use of diesel fuel emulsified with water to reduce NO_x emitted from diesel engines. Water was injected into the diesel fuel just prior to the injection pump to prepare mechanically emulsified fuel. The engine used was a 6 cylinder, direct-injection diesel having a displacement of 7.1 liters. The test results show that by using diesel fuel emulsified with approximately 20% water content, NO_x can be reduced by 7 to 60% depending on the operating conditions without any deterioration in engine performance. Then, using a 4-ton diesel track equipped with the emulsion device, a 50,000 km road test was conducted for two years to ensure the durability of the engine parts. Around 20,000 km, some of the injection nozzle springs were broken due to corrosion. To solve this problem, a 0.1% surface active agent having anti-corrosion and lubrication effects was added to the water used. The agent was effective during a 15,000 km road test.

1 はじめに

ディーゼル車から排出される窒素酸化物 (NOx) を低減する1手法として、軽油に乳化剤を利用して予め水を混合した軽油・水エマルジョン燃料(以下、「エマルジョン燃料」という。)を用いる方法が、1970年代に試みられた¹⁾²⁾。しかしながら、このようなエマルジョン燃料は乳化剤を使用することによる燃料コストの上昇やエマルジョン燃料を調合・貯蔵する設備整備等に費用を要することなどから、実用にはいたらなかった。

しかし、近年の自動車排出ガスに起因する大都市地域のNOx 大気汚染状況から、使用過程中的ディーゼル車のNOx 低減対策として、各種の排出ガス低減装置が市販・製作されている。その一つとして、エマルジョン燃料も再び注目されている³⁾。

本研究では、エマルジョン燃料の前述の問題を解決するため開発された車載型の機械式エマルジョン燃料調合装置をエンジンダイナモ上に設置した6気筒直接噴射式ディーゼルエンジン(7.1ℓ)に適用し、排出ガス低減効果やエンジン性能への影響等を把握した。

その後、4トン貨物車に同エマルジョン燃料調合装置

を装着し、1992年、1993年の2か年にわたって、それぞれ2万km、3万kmの路上走行試験を行い、エマルジョン燃料を使用した際の車両の運転性及びエンジン各部位への影響を調査した。

2 実験装置及び実験方法

(1) エマルジョン燃料調合装置の概要

本研究で使用したエマルジョン燃料調合装置とエンジンへの装着の概略を図1に示す。同装置は、エンジンの噴射ポンプの直前に取り付けられ、エンジンの運転条件により変動する燃料流量をフローセンサーで検出し、軽油に対し、常時一定の注水率になるよう、電磁バルブにより水量を調節し、それと軽油とをミキサー部で混合攪拌し、エマルジョン燃料として供給するものである。

本装置の製造元のスイスのHarrier社によれば、軽油と噴射された水とを機械的に高速攪拌することにより、長時間安定したエマルジョン燃料が調合できるとしている。なお、軽油と水との混合比率(以下、「注水率」と記す。)は任意に設定が可能である。

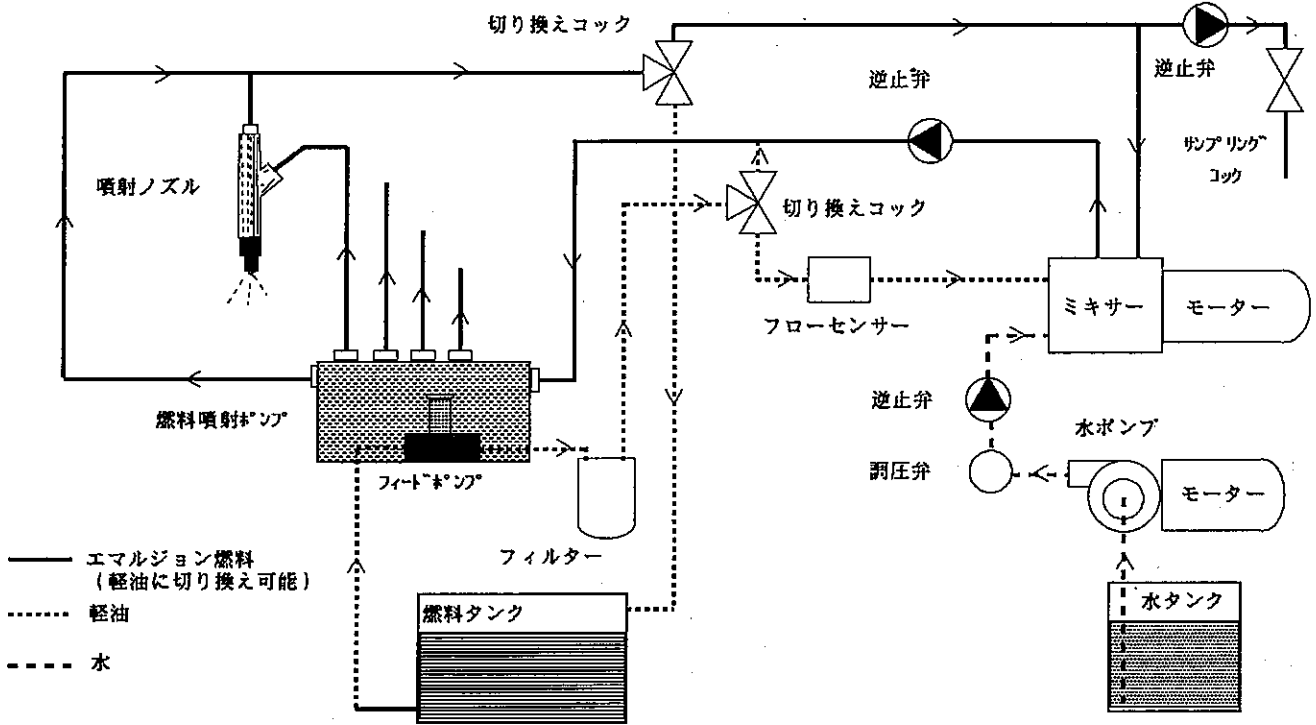


図1 軽油・水エマルジョン調合装置概略図

(2) エンジンベンチ試験

本研究に用いた直接噴射式ディーゼルエンジンと路上走行試験に使用した実験車の主要諸元を表1に示す。供試エンジンは平成元年規制適合エンジンであり、通常4～8トン積みのトラックに搭載されている。

実験は、先ずエマルジョン燃料の注水率を決定するため、つぎのような予備実験を行った。

供試エンジンを軽油のみで、1500rpmの一定回転数、一定負荷で駆動し、エマルジョン燃料調合装置の注水率を約5%刻みで変化させた際のNOx低減効果、及びエンジン性能への影響(燃費の悪化で評価)を調べた。

エマルジョン燃料による排出ガス低減効果、エンジン性能への影響は注水率を決定した後、以下の条件でエンジンを駆動して調べた。

エンジン回転数として、1000、1500、2000、2500rpmの4条件、それぞれの回転数に対する負荷として、エンジン性能曲線図から求めた最大トルクの1/8ピッチ毎、無負荷から全負荷までの9条件とした。

なお、使用したエンジンダイナモメータ及び排出ガス分析装置は、それぞれ榊原電舎製直流ダイナモメータ

(吸収220kw)、堀場製MEXA-9100D排出ガス直接排出ガス分析装置である。

(3) 実車路上走行試験

エマルジョン燃料の実用性を評価するため、エンジンベンチ試験で使用したエンジンと同型エンジンを搭載した4トン貨物車(表1)にエマルジョン燃料装置を装着し、初年度2万km、2年度3万kmまでの路上走行試験を実施した。

路上走行試験では、エマルジョン燃料使用による車両の運転性能及びエンジン各部位へ悪影響が現れるかどうかの主眼をおき、厳密には走行ルートは定めず、概ね、一般道路3、高速道路7の割合で1日あたり500km前後走行させた。実験車への積載量は、2万km走行試験では半積載の2トン、3万km走行試験では満積載の4トンとした。

実際の路上走行にあたっては、実験車のエンジンのスタートと暖機運転は軽油のみで十分行った後、エマルジョン燃料調合装置を作動させて、徐々にエマルジョン燃料をエンジンに供給して行うようにした。また、1日の走行が終了し、エンジンを停止するにあたっては走行終了の約10分前頃に、エマルジョン燃料調合装置の作動を停止し、軽油のみの運転に切り換えた。これにより、エンジン停止時に燃料噴射ポンプ内に残っているエマルジョン燃料が、軽油と水とに分離し、エンジン始動性を悪化させたり、噴射ノズル、噴射ポンプへの悪影響をできるだけ少なくするように配慮した。

路上走行中、日常点検として、運転者による一般的な点検の他に、エマルジョン燃料調合装置の点検、水の補給並びに車両の運転性に関する調査(5段階評価)を実施した。

また、エマルジョン燃料使用によるエンジン各部位への影響調査として、5千km毎に噴射ノズルの分解・点検を行い異常の有無を調べた。さらに、路上走行試験終了後、吸気系、排気系の異常の有無について、目視点検、噴射ポンプ及びエンジンの分解・点検調査を実施した。

3 実験結果と考察

(1) エンジンベンチテスト結果

先ず、供試エンジンをを用いた予備実験では、軽油のみでエンジンを駆動させてからエマルジョン燃料調合装置を作動させ、注水率5%、10%、15%、20%、25%のエ

表1 供試エンジン及び実験車の主要諸元

エンジン		車両	
形式	6HE1	全長	7.520 mm
排気量	7,127 cc	全巾	2.240 mm
最大出力	195PS-2,900 rpm	ホイールベース	2.425 mm
最大トルク	51kgm-1,800 rpm	車両重量	3.430 kg
圧縮比	17.0	最大積載量	4.250 kg
ID回転	530 rpm	乗車定員	2 人
噴射ポンプ	列型 (ボッシュ式)	車両総重量	7.790 kg
噴射ノズル	多孔式4-0.33mm	登坂能力	0.44
噴射圧力	185kg/cm ²	最小回転径	6.700 mm
弁開閉時期	吸気:開14、閉51 排気:開49、閉16	燃料タンク	100 ℓ
弁すき間	吸気・排気 : 0.40mm	水タンク	20 ℓ

マルジョン燃料をエンジンに供給した。NO_x 低減効果はほぼ注水率に比例して現れた。しかし、注水率が25%を超えると、エンジン回転が不安定になり出力が極端に低下した。このため、NO_x低減効果とエンジン出力との関係から、以後の試験では注水率を約20%とした。

エマルジョン燃料使用によるエンジン性能への影響は、注水率の増加に比例して低下する傾向が認められた。これは、注水した水量に応じて、軽油の噴射量が少なくなるためであり、エンジン回転、負荷を一定に保って運転すると注水率の増加とともにアクセルの踏み込みが大きくなり、アクセル全開で、エンジン性能曲線で示されている最大トルクが得られなくなった。しかし、エマルジョン燃料を使用すると、黒煙濃度が低下するため、エマルジョン燃料の増量が可能になった。このため、以下の実験では、エマルジョン燃料使用時にも、最大定格トルクが得られるように燃料噴射ポンプのラック位置を調整し、エマルジョン燃料を増量した。

このようにしてエマルジョン燃料使用すると、エンジン出力を損ねることなく、NO_xを低減することが可能であることが認められた。

供試エンジンを軽油のみで駆動した際のNO_x排出濃度特性を図2に示す。NO_x排出濃度は、概ねエンジン回転数と負荷の増加に比例して増加する傾向が認められる。このようなNO_x排出特性を持ったエンジンにエマルジョン燃料を使用したときのNO_x低減効果を図3に示す。

この図からは、エンジン回転数1500から2000rpmにおいて、負荷6/8付近の運転領域では、NO_x低減率は10%未満と小さい。また、それ以外の運転領域ではNO_x低減効果は30%から60%ほどであった。

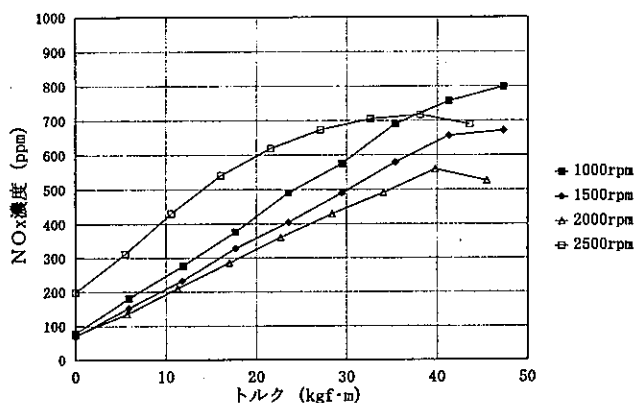


図2 NO_x 排出特性

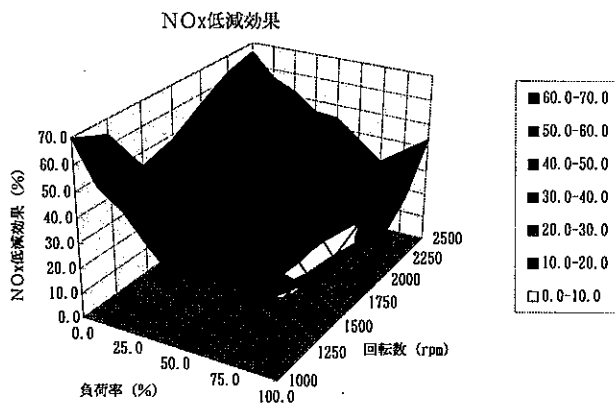


図3 NO_x 低減効果

このようなNO_x低減効果の現れ方は、実際の自動車の走行状態において部分負荷が多いことを考慮すると、実路走行時のNO_x低減効果が大きいことを示唆している。

CO、THC濃度排出ガス特性を図4に示した。エマルジョン燃料使用時には軽油のみの運転時に比べ両者とも2~10倍排出量が増加した。

ディーゼル車の長期規制との関連を見ると、NO_x排出量は目標値を満足しているが、ベースエンジンのNO_x排出量がもともと低いため、NO_x低減率で見ると、約20%の低減であった。一方、CO、THC排出量は規制値を上回る結果となった。

以上の結果から、エマルジョン燃料を使用する場合には、増加するCO、THCを低減するため、排出系での酸化触媒を適用するなどの排出ガス対策が不可欠であることが示されている。

黒煙濃度に対するエマルジョン燃料の影響例を図5に示す。黒煙濃度は著しい改善が認められる。しかし、黒煙濃度の低減にもかかわらず粒子拡物質、排出重量で見ると、1分間当たりの粒子状物質排出量は、12.9mgから14.4mgとやや増加した。これは、エマルジョン燃料を使用すると、排出ガス中に未燃焼成分としてCO、THCとともに黒煙濃度としては計測されない有機炭素成分などの未燃焼成分などが増加しているためと考えられる。

次に、増加するCO、THC低減対策として、排気系に酸化触媒装置を取り付けた際の実験例を図6に示す。これからは、エマルジョン燃料の使用により増加するCO及びTHCなどの未燃焼成分は、酸化触媒により低減が

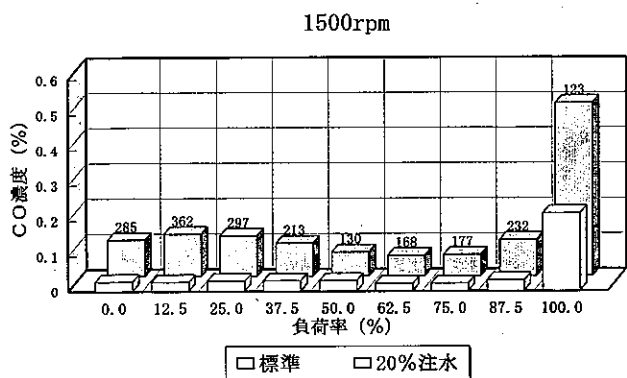


図 4-1 CO排出特性

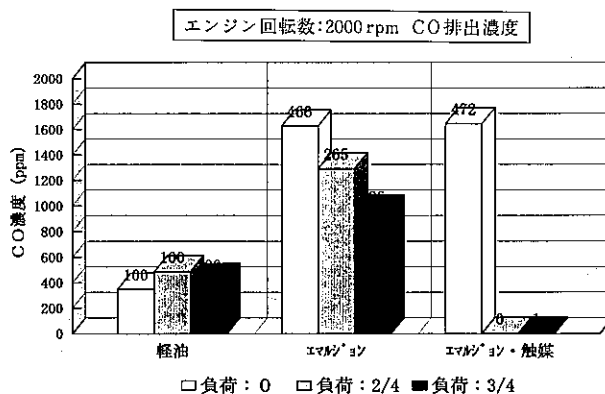


図 6-1 酸化触媒の効果 (CO)

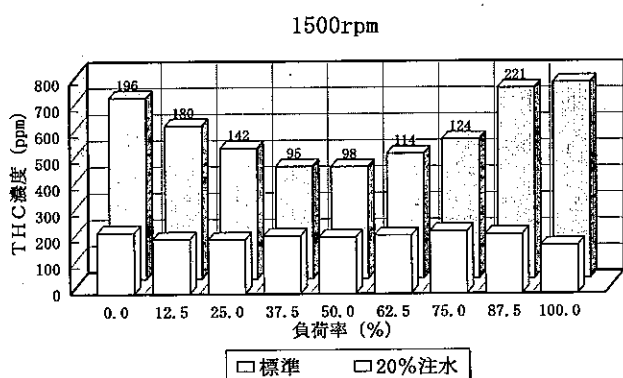


図 4-2 THC排出特性

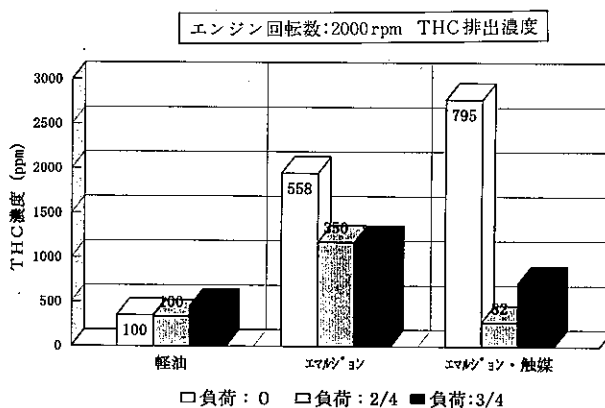


図 6-2 酸化触媒の効果 (THC)

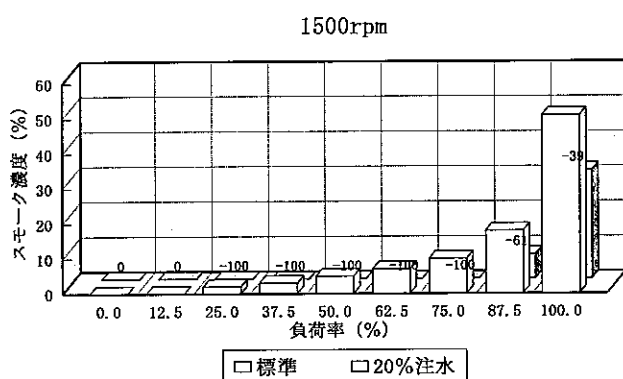


図 5 黒煙排出特性

可能であることが示されている。

したがって、エマルジョン燃料の実用化にあたっては増加するCO、THC低減対策として、酸化触媒を組み合わせた排出ガス低減システムを組む必要がある。

以上のようなエンジンベンチ試験結果から、エマルジョン燃料の実用性について検討するため実車を使用して2ヵ年にわたって路上走行試験を実施することとし、

エンジン各部位への錆や損傷の発生及び車両の運転性能への悪影響の有無を調査した。

(2) 2万km走行試験の結果

実験車の路上走行にあたり、車両の改造申請を関東運輸局へ行った。改造申請にあたっては、エマルジョン燃料装置の車両への取り付け図、改造申請書及び6モード排出ガス試験結果を提出した。また、エマルジョン燃料使用にあたっては、燃料噴射ポンプの増量調整は行わなかった。同局における審査の結果、試験車両は「使用車種規制(NOx)適用、改造内容：燃料装置(水添加装置)」として自動車検査証の交付(H.5.11)を受けた。

実験車の路上走行開始当初、発進・加速時に不規則的ではあったが、後方車両の視界が遮られるような白煙の排出が認められた。このため、路上走行試験を中断し、当所の大型車排出ガス計測用シャシダイナモを用い、白煙発生の原因とその対策を検討した。その結果、白煙発

生時の炭化水素濃度は5000ppm(分析計のF.S5000ppm)を超えており、白煙の原因が軽油の未燃焼分であることがわかった。また、このような白煙の発生時には、実験車の燃料配管系の圧力が通常約2.5kg/cm²であるものが、発進・加速時には0.5kg/cm²以下と極端に低下することが確認された。このような時に、エマルジョン燃料調合装置の注水圧力が一定に制御されているため、結果として注水率が極端に増加(推定では40%を超えた)したことが、白煙の発生原因になったと考えられた。

そこで、エマルジョン燃料調合装置を組み込んだ燃料供給系を点検し、実験車の発進・加速時に燃料圧力が極端に低下しないよう配管系を改善した。この措置により、白煙の発生をほぼ抑制することができた。

次に、実験車の2万km走行期間中の運転者による運転性能に関する評価結果を表2に示す。これによると、日常の運行時にはエマルジョン燃料使用による運転性能への影響はほとんど発生していないように見受けられた。

しかし、5千km走行毎の噴射ノズルの分解点検調査では、軽油使用時にはほとんど発生しないノズルスプリングの折損が毎回発見された。同スプリングの折損箇所は噴射ノズルの下位部分に近い一巻き目の部位であった。この原因として、エンジン停止時に噴射ノズル内の軽油中に僅かに残る水分がノズルの下部に分離し溜まり、その部分にさらされたスプリングの個所に錆が発生し、そこが腐食割れしたためと推定された。

2万km路上走行試験終了後の燃料噴射ポンプ及びエン

ジン分解調査結果、エンジン本体の各部及びピストンシリンダーの磨耗等は通常の使用範囲内であった。しかし、燃料噴射ポンプのプランジャーの所見では、通常軽油のみの使用時には現れない圧縮圧力の低下が認められた。この原因として、エマルジョン燃料の潤滑性が軽油にくらべ低下するため、ピストン・シリンダーの磨耗が発生したためと考えられた。

以上のようにエマルジョン燃料を使用すると、燃料噴射ポンプ及び噴射ノズルへの悪影響が発生したため、その防止対策を講ずる必要があることが判明した。

(3) 3万km走行試験の結果

本走行試験では、前年度の走行試験でエマルジョン燃料影響が顕著に現れた「噴射ノズル」及び「噴射ポンプ」機構内の発錆に伴う機能低下等、具体的にはノズルスプリングの折損を防ぐため次の対策を検討した。まず、防錆加工(ウニゼンメッキ)を施したスプリングを使用することとし、エマルジョン燃料をより安定化させるために、①軽油に少量の水が混入した際それを分散させる効果のある燃料添加剤、②注水用水へ潤滑・防錆効果を有する添加剤を使用することとした。こうした対策の効果を見るため、それぞれ1.5万km走行させることとした。なお、路上走行試験の方法は前年度同様とした。

まず、運転者による運転性能に関する調査では、積載量を満積載としたが、運転者による評価は前回並であった。

燃料添加剤を混入した前半の1.5万km走行試験では、給油時に運転者に所定量の添加剤を混入してもらったが、均一に溶け込まなかった場合もあり、作業そのものに問題があった。また、噴射ノズルの5千km毎の分解調査では、スプリングの折損は前年度よりやや改善されたものの、毎回折損が発生し、燃料添加剤の効果は認められなかった。また、メッキ加工の効果も無かった。

注水する用水へ防錆・潤滑効果を有する少量(水に対し0.1%)の界面活性剤を添加した後半の1.5万kmの走行試験では、噴射ノズルスプリングの折損が発生しなかった。この手法を採用することにより、燃料供給系への悪影響を抑制することが可能と考えられ、今後、さらに走行距離を延ばして確認する必要がある(表3の1.5~3万kmまでの試験結果)。

3万km路上走行試験終了後のエンジン分解調査結果からは、エンジン本体、潤滑系及び排気系へのエマルジョ

表2 試験車両の運転性に関する評価

評価項目		2万km試験 (n=41)	3万km試験 (n=61)
運 転 性 の 評 価	エンジン始動性	4.8	4.5
	IDの円滑性	3.0	3.7
	エンジン加速性	2.7	3.2
	エンジン応答性	2.8	3.0
	エンジン力強さ	2.6	2.7
	各ギア時の運転性	3.1	3.4
	各ギア時の登坂性	2.4	2.3
	エンジン音	3.0	3.4

5:良好 4:やや良好 3:普通 2:やや劣る
1:劣る

表3 噴射ノズル点検結果 (3万km)

距離		ノズル番号	1	2	3	4	5	6
燃料添加剤を使用	0.5万Km	圧力	110	100	85	130	80	84
		針弁	×	×	×	×	×	×
		バネ	×	×	×	×	-	×
燃料添加剤を使用	1.0万Km	噴霧	△	△	×	△	△	×
		圧力	110	120	85	120	10	90
		針弁	×	×	×	×	×	×
燃料添加剤を使用	1.5万Km	バネ	×	-	×	-	×	-
		噴霧	×	△	×	△	△	△
		圧力	0	10	185	10	185	15
注水用水に添加剤を使用	2.0万km	針弁	×	×	×	×	×	×
		バネ	×	×	-	×	-	×
		噴霧	×	×	△	△	△	×
注水用水に添加剤を使用	2.5万km	圧力	178	168	178	180	140	160
		バネ	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		噴霧	△	○	△	△	△	△
注水用水に添加剤を使用	3.0万Km	圧力	178	168	178	180	140	160
		バネ	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		噴霧	○	◎	○	△	◎	○
注水用水に添加剤を使用	3.0万Km	圧力	180	180	180	200	200	195
		バネ	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		噴霧	◎	○	◎	◎	◎	◎

圧力: kg/cm²、針弁: ×膠着、バネ: ×切損、◎良好
噴霧: ◎良好、○やや良好、△切れ悪、×不良

燃料使用による悪影響は認められなかった(表4)。

3万km路上走行終了後の排出ガス試験結果を表5に示す。NOxについては、低速の都実走行パターンを除き、26~42% 低減されている。しかし、THC、COの排出は6モード規制値内に抑えられるものの、実走行パターンでは2~4倍程度増加する。このため、エマルジョン燃料の実用化にあたっては、排気処理用としてエンジンダイナモ試験で検討した酸化触媒を併用する排出低減システムの検討が必要である。

4 まとめ

エマルジョン燃料の実用性を評価するため、4t貨物車を使用して累積5万Kmの路上走行試験を行い、エマルジョン燃料がエンジン各部位及び車両の運転性能に及ぼす影響について調査を行った。

その結果、吸気系、排気系及び潤滑系には、エマルジョン燃料使用による異常な現象・所見等は認められなかった。また、車両の運転性能への著しい不具合も発生し

表4 エマルジョン燃料使用累積5万km走行時の総合点検結果

シリンダー	番号	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	圧縮圧力	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
エンジン	基準値30、使用限度26以内であり影響は認められず(単位: 冷間時; Kg/cm ² /200rpm)。						
	軸方向	1	1	1	1	1	1
	直角方向	1	2	1	1	1	1
ピストン	シリンダー磨耗量は、走行距離からみて通常の範囲内(単位: 1/100mm)。						
	<ul style="list-style-type: none"> ・ピストンヘッドの燃焼室凹部全面にほぼ均一にカーボン付着、予熱プラグ突出部にカーボン付着 ・ピストン頭部全面にほぼ均一にカーボン堆積、一部剝離が認められる。 ・ピストン、ピストンリングともひび割れ、磨耗等なし。 						
排気バルブ	<ul style="list-style-type: none"> ・バルブの厚み: 1.75mm(使用限度1.25) 正常値 ・バルブシート面の当たり異常なし。沈み量1.33mm(使用限度2.8mm)で異常なし。 ・バルブシステムに若干の磨耗が感じられたが、使用限度ないと判断された。 						
	<ul style="list-style-type: none"> ・オイルポンプ: ギヤ式ポンプ歯面異常なし。 ・オイルフィルタ: オイル中に少量の軽油の混入が認められたがフィルタエレメントに異常なし。 						
燃料系	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料配管系、フィードポンプ特異な異常なし。 ・噴射ポンプ: 注水用水への添加剤使用の1.5万Km走行後アイドル状態で噴射量の低下があり。 						
	排気マニホールド、排気管、消音器等異常なし。						

なかった。しかし、燃料供給系、特に、噴射ノズルスプリングの折損が多発した。

その対策として、注水する水に防錆・潤滑効果のある界面活性剤を少量添加することにより、悪影響の発生を抑制できた。今後この効果を確認するため、さらに坂路や満積載などエンジン負荷が大きい走行状態での影響を調査する必要がある。

しかしながら、エンジン本体及びエンジン潤滑系、排気系等には悪影響が発生しないことが確認されたことから、今後この種の走行試験を実施する際には、燃料供給系への影響調査を実施することで充分と思われる。

5 おわりに

車両搭載型の小型エマルジョン燃料調合装置は、使用

表5 都実走行パターンにおける排出ガス量
g/km

都実走行パターン	燃 料	NOx	THC	CO
No. 2 平均車速 (8.1 km/h)	EM	4.19	5.24	9.34
	STD	4.40	1.80	2.93
	増減率	0.96	2.77	3.19
No. 5 平均車速 (18.2 km/h)	EM	2.55	6.14	8.25
	STD	3.43	1.46	2.38
	増減率	0.74	4.21	3.47
No. 8 平均車速 (28.8 km/h)	EM	2.15	3.94	5.70
	STD	2.94	1.09	1.08
	増減率	0.73	3.61	3.10
No. 10 平均車速 (46.4 km/h)	EM	1.99	2.59	3.90
	STD	3.45	1.52	1.53
	増減率	0.58	1.70	2.55

EM : エマルジョン燃料、STD : 軽油、増減率 : EM/STD

過程中の車両に容易に装着することができる。しかも、車両性能を悪化させることなく、使用過程中のディーゼル車から排出されるNOx 低減対策として期待できる。

エマルジョン燃料使用によるエンジン各部位、なかでも燃料供給系への著しい悪影響も、注水用水に少量の防錆・潤滑効果のある添加剤を使用することにより防ぐことが可能である。また、エマルジョン燃料を使用するとNOx 及び黒煙濃度が低減するが、CO、THC等の未燃焼成分は増加する。このため、エマルジョン燃料の実用化にあたっては増加する未燃焼成分を制御するため、酸化触媒を付加した排出ガス低減システムとして完成させる必要がある。

本実験はセコム㈱のご協力を頂いた。また、路上走行試験は、東京いすゞ自動車㈱にお願いしたことを記し、担当された各位に感謝する。

参考文献

- 1) 加藤誠ら：軽油・水エマルジョン燃料によるNOx低減検討、トヨタ技、第31巻第2号、p.39~46 (1981)
- 2) 東京都交通局：バス、ゲル化軽油実用試験報告書 (1975)
- 3) 小高松男：エマルジョン燃料による直噴ディーゼル機関のNOx、黒煙の低減効果、第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集、p.241~246、(1992)