含酸素燃料によるディーゼル燃焼の
低エミッション・高効率化とその特性*宮本 登^{*1}, 小川 英之^{*1}, Nabi Mohammad NURUN^{*2}
小畑 浩一^{*2}, 有馬 輝芳^{*3}Improvement of Emissions and Thermal Efficiency in Diesel Combustion
with Oxygenated Agents as Main FuelNoboru MIYAMOTO, Hideyuki OGAWA, Nabi Mohammad NURUN,
Koichi OBATA and Teruyoshi ARIMA

The diesel combustion and emissions with four kinds of oxygenated agents were investigated as main fuel in high speed DI diesel engines. Simultaneous improvements in smoke, particulate matter, NO_x, THC, and thermal efficiency were obtained for all four agents, and engine noise was also reduced for the two agents with higher ignitability. The improvements in the exhaust gas emissions and the thermal efficiency almost only depended on the oxygen content in the fuels regardless of oxygenated agents-diesel fuel blending ratios and kinds of oxygenated agents. Completely smokeless operation with simultaneous improvements in NO_x, THC, noise, and thermal efficiency was realized with some oxygenated fuels including, diethylene glycol dimethyl ether (DGM). The rate of heat release diagram of the DGM shows an optimum combustion with a milder first stage combustion, more active main stage combustion, and shorter combustion period. The unburnt THC and odor intensity under starting operation with DGM were much lower than with diesel fuel only.

Key Words: Diesel Engines, Thermal Efficiency, Fuel, Oxygenated Agents, Exhaust Emissions, Smoke, Particulate, NO_x, Noise

1. ま え が き

ディーゼル機関の排気エミッション改善を主眼として、機関の燃焼系、燃料性状あるいは排気後処理等に対する検討がなされている。その中で燃料性状については、着火性、蒸留特性、芳香族成分、あるいは硫黄含有割合など基本的な性状因子の適合化に加え、アルコール等の低エミッション化物質添加が試みられてきた。特にメタノール等に代表される低級アルコールは、含酸素物質であるため軽油への添加により黒煙を低減し得ることが報告されているが、軽油との溶解性が悪く分離しがちなこと、あるいは混合燃料の潤滑性が低下することなど障害が多い⁽¹⁾。またこれら低級アルコールは着火性が非常に低いため、ディーゼル機関における単体あるいは高濃度での使用は着火に対する何らか

の補助手段がない限り不可能である。一方、エーテル系含酸素物質の一つであるジメチルエーテル(DME)をディーゼル機関で用いることにより無煙で良好な燃焼が実現し得ることが報告されている⁽²⁾。DMEは低級アルコールとは異なり高セタン価燃料であって、圧縮着火は容易であるが、通常の状態ではガス体であるためディーゼル燃料としては難点がある。

Table 1 Specifications of tested engines

Engine	A	B
Name	YANMAR NF19	YANMAR NFD13
Bore × stroke	φ110 × 106 mm	φ92 × 96 mm
Stroke volume	1007 cm ³	638 cm ³
Compres. ratio	16.3	17.7
Rated power	11.8 kW / 2200 rpm	8.6 kW / 2600 rpm
Nozzle hole	φ0.33 × 4 -150°	φ0.26 × 4 -150°
Opening press.	19.6 MPa	30.0 MPa
Combus. chamber	Toroidal(φ 55.8)	Toroidal (φ 50.5)

* 原稿受付 1997年7月22日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科 (〒001-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。^{*2} 学生員, 北海道大学大学院。^{*3} トヨタ自動車(株) (〒471-0826 豊田市トヨタ町1)。

Table 2 Properties of oxygenated agents

Oxygenated agent	Abbreviation	Molecular equation	Oxygen content [wt. %]	Density [g/cm ³]	Boiling point [°C]	Calorific value [MJ/kg]
Diethylene glycol dimethyl ether	DGM	$\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OCH}_3$	35.8	0.950	163	24.5
Ethylene glycol mono-n-butyl ether	ENB	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OH}$	27.1	0.905	171	32.4
2-ethylhexyl acetate	EHA	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{O}(\text{CO})\text{CH}_3$	18.6	0.878	199	35.2
Di-n-butyl ether	DBE	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3(\text{CH}_2)_3$	12.3	0.771	142	38.7

Fig. 1 Exhaust gas sampling system for starting operation

これに対して有機溶媒などに用いられている液体の含酸素物質に着目し、それらと軽油との混合によるディーゼル機関での出力性能、燃焼、ならびに排気特性についても解明が試みられている^{(3)・(7)}。その中で著者らは9種類の含酸素物質を添加剤として軽油に最大10vol-%まで混合することにより、黒煙および微粒子を他の排気特性および熱消費率を悪化させることなく低減し得ること、またその低減の程度は燃料中の酸素含有割合に概ね依存すること等を明らかにした⁽⁸⁾。

本研究では前報で用いた9種類の含酸素物質の中で単体での圧縮着火が可能な4種類の物質に着目し、それらを高濃度あるいは単体で燃料とした際の、ディーゼル燃焼および排気の特性について解明を行った。以下、その結果について詳述する。

2. 実験装置および方法

実験には表1に示す2台の単気筒、無過給の四サイクル直噴式ディーゼル機関を用いた。ここで供試機関Bは始動時の排気測定にのみ用い、他の試験はすべて供試機関Aを用いた。機関Aの運転条件は、原則として回転速度 1320rpm、動的燃料噴射時期 TDC、吸

気温度 30℃、冷却水温度 80℃とした。機関の運転に際して、インジェクタ線図も測定し、そのデータをパソコンで処理することにより、熱発生率および着火遅れなどを算出した。

実験では、表2に示す4種類の含酸素物質を単体で燃料としたほか、リファレンス燃料である市販ディーゼル軽油(JIS 特三号)にそれらを溶解混合したものを用いた。これらの含酸素物質は前報で用いた9種類の中で本供試機関においてその単体での圧縮着火が可能なものとした。各含酸素物質はエーテル系(-O-)のDiethylene glycol dimethyl ether (DGM)とDi-n-butyl ether (DBE)、エーテル-アルコール系(-O-+OH)のEthylene glycol mono-n-butyl ether (ENB)、およびアセテート系(-O(C:O)-)の2-ethylhexyl acetate (EHA)の4種類である。またそれらは、一分子当たりの酸素含有割合が多様ではあるが、沸点が142℃~199℃の範囲にあり、いずれも任意の割合で軽油との混合が可能である。

排気濃度については、NO_xを化学発光法で、THCをFID法で、排気黒煙濃度をボッシュスモークメータでそれぞれ測定した。微粒子の測定では、排気の一部を

希釈トンネル(内径310mm,有効長さ3100mm)に導入して空気です約10倍に希釈した後,テフロンコーティング石英フィルタ(203×250mm)により微粒子を捕集した.全微粒子重量(TPM)は,採集前後のフィルタ重量差から求め,SOFの抽出はジクロロメタンを溶媒とするフィルタソーク法によった⁽⁹⁾.

本研究では始動時における排気をサイクルオーダで時系列的に採取し,THCと臭気濃度を求めた.始動時には機関Bを冷却水温度15℃,600rpmでモータリングし,燃料量を零から空気過剰率1.8に相当する量までステップ状に噴射した.この際,始動後の回転速度の上昇は動力系の自動吸収により極力抑えた.図1に始動時の排気採取システムを示す.排気採取は,空気圧駆動のパタフライ弁によって排気主流を閉塞させると同時に,排気採取管の電磁弁を解放して排気をサンプリングバックに導くことによって行った.また始動の際は,燃料噴射ポンプのラック移動と同時にカウンタ回路を作動させ,噴射ポンプ軸回転回数をカウントすることにより排気採取時期を任意に設定した.このシステムによりサイクルオーダでの排気採取が可能となった.本実験ではこのシステムにより任意の時期における連続した3サイクル分の排気をサンプリングバックに採取し,アクリル製気体採取混合容器により一定量抜き取った後,既知量の窒素ガスを封入したにおい袋に注入希釈してガス分析に供した.臭気の評価は6名の試験者による三点比較式におい袋法によった.

3. 実験結果および考察

3・1 各種含酸素物質を主燃料とした際の燃焼,排気および性能特性 最初に,4種類の含酸素物質について,それらと軽油との混合燃料および各物質単体をそれぞれ用いた際の機関性能および排気特性を検討した結果を図2に示す.図において,横軸は燃料の酸素含有割合を,黒塗りのシンボルは含酸素物質単体の値を,また白抜きのは混合燃料での値をそれぞれ示す.いずれの含酸素物質においても軽油との混合割合,つまり燃料中の酸素含有割合の増加にともなって,熱消費率(BSEC),およびNO_x,黒煙,CO等の排気エミッションは大幅に低減しており,その程度は燃料中の酸素含有割合が0%から36%までと極めて広い範囲で変わったとしても,含酸素物質の種類,および単体が混合燃料かのかいかにほぼ関係なく燃料中の酸素含有割合に大きく依存していることが明らかである.特に黒煙に注目すると,酸素含有割合の増加によるその低減の程度が極めて大きいことに加え,各混合燃料と含酸素物質単体の値が概ね同一線上に載ることが注目に価する.一方機関騒音は,軽油と比べ

Fig. 2 Improvements in diesel combustion and emissions with four kinds of oxygenated agents (BMEP=0.75MPa)

Fig. 3 Improvements in particulate matter with oxygenated agents (BMEP=0.75MPa)

て着火遅れが短いDGMとDBEでは混合割合の増加によって減少するのに対し、着火遅れが長いENBとEHAでは著しく増加することがわかる。

図3に軽油、DGM、およびENBの三者をそれぞれ燃料とした際のTPMを示す。図の縦軸は軽油での値をベースとしたTPMの比率であり、またTPMは可溶成分(SOF)と不溶成分(ISF)に別けて示した。DGMおよびENB単体においては、軽油に比べてTPMが90%程度も減少すると同時にSOFも低下している。

図4にDGMおよびENBの単体におけるインジケータ線図と熱発生率を軽油に比較して示す。軽油に比べてDGM単体では、着火遅れの短縮により第一期燃焼での急激な熱発生が著しく抑制されると同時に、主燃焼が活発でかつ燃え切りが良好な理想的ともいえる燃焼が得られることが明らかであり、このことから熱消費率、NO_xおよび騒音の同時改善が推察できる。なお、一般に着火遅れが過度に短縮すると、後燃えの増加による熱効率の低下と黒煙の増加が生ずることが多いが、DGMではそれらの弊害が生ずることなく、むしろ改善されている。

一方ENB単体ではDGMおよび軽油に比べて着火遅れが著しく増加し、その結果、第一期燃焼の急激な熱発生が得られており、それとともなって騒音が増加したものである。通常、着火遅れの増大により、NO_x、THCおよびTPM中のSOFがそれぞれ増加する傾向があるが、ENBでは逆にそれらが減少していることから、軽油での着火遅れの増減にともなう弊害が含酸素燃料ではむしろ改善されることが明らかになった。なお、DBEはDGMと、またEHAはENBとそれぞれ同様な熱発生率ならびに機関騒音特性を示した。

本燃料噴射系はポンププランジャ径などが軽油仕様のため、発熱量の低い含酸素物質を用いた場合には、噴射期間が長くなっており、それを最適化すれば更に排気ならびに熱効率の改善効果が期待できる。

Fig. 4 Indicator and ROHR diagrams for oxygenated agents and diesel fuel (BMEP=0.75MPa)

3・2 DGMを用いた低エミッション・高効率なディーゼル燃焼

4種類の含酸素物質の中でも特に着火性がよく、また酸素含有割合の高いDGMにおける燃焼および排気について更に検討した。

図5に正味平均有効圧(BMEP)をパラメータとして、DGMの混合割合が排気特性、機関騒音、熱消費率、および着火遅れに及ぼす影響を示す。いずれの負荷においても、DGMの混合割合の増加にともなって、熱消費率、機関騒音、およびいずれの排気エミッションも著しく改善されている。特に黒煙については、DGM単体、つまり酸素含有割合が36wt-%ではBMEPが極めて高い0.83MPaにおいても完全無煙が可能となる。また、いずれの負荷でもDGMの増加により着火遅れは短縮し、機関騒音も著しく減少している。

DGM使用による特に熱消費率の改善原因に関連して、図6に燃焼効率 η_c 、発熱の等容度 η_{glh} 、冷却水への冷却損失を示す。負荷のいかに拘わらず、DGM混合割合の増加により冷却損失は殆ど変化しないが、等容度は明らかに増加している。また、燃焼効率は混合割合が増加してもBMEPが0.49MPaと0.69MPaとでは殆ど変化しないが、高負荷の0.83MPaにおいては大幅に改善されていることから、極く高負荷では等容度に加えて燃焼効率の向上も熱消費率の改善に対して大きく寄与することが明らかである。しかし、DGMを用いた際の熱消費率の改善はこの等容度と燃焼効率の向上だけでは必ずしも十分に説明できない。

この改善に関与する他の因子として総括的な空気過剰率ならびに燃焼時のモル増加が挙げられる。前者の空気過剰率は、図6に示されるようにDGM混合割合の増加にともなっていずれの負荷においても増大の傾向を示している。一方燃焼時のモル変化 δ については、図7にみられる様に、軽油に比べDGM単体においてかなり増加している。つまり、DGMでの熱消費率改善に

Fig. 5 Improvements in diesel combustion and emissions with DGM for three BMEP conditions

Fig. 6 Factors for improvement in BSEC with DGM

対しては、DGM使用時での等容度および燃焼効率の向上に加えて、空気過剰率と燃焼によるモル数の増加も関与しているものと考えられる。

図 8 に、高負荷において燃料噴射時期を変えた場合の NO_x と黒煙のトレードオフ関係を示す。軽油のみの場合、燃料噴射時期の遅延にともなう NO_x の低下と黒煙悪化のトレードオフ関係が明確に認められるのに対し、DGM と軽油を等量混合した場合には、その関係が大幅に改善されると同時に、熱消費率も若干改善されている。更に DGM 単体においては完全無煙となるため、燃料噴射時期の遅延との併用によって一層顕著な NO_x 改善が可能である。

なお、含酸素燃料における低 NO_x 現象に関連して図 9 に、化学平衡計算による軽油と DGM での断熱火炎温度と平衡 NO 濃度の計算例を示す。この場合、燃焼の初

Fig. 7 Increase in molecule numbers by combustion

Fig. 8 Trade-off relationship between NOx and smoke with DGM (BMEP=0.83MPa)

Fig. 10 Trade-off relationship between NOx and smoke with DGM under EGR condition (BMEP=0.75MPa)

期条件は800K、50MPaとしディーゼル燃焼で実現し得る条件に近いものとした。軽油と比較してDGMでは、断熱火炎温度および平衡NO濃度が若干ながら低下しており、特に過濃側でその差が若干拡大している。このような断熱火炎温度の低下は、含酸素物質の利用にともなうNOx低下の一因であるといえる。

図10に、DGM単体と軽油とにおけるEGRの影響例を示す。軽油では若干のEGRによってNOxが減少する一方で黒煙は増加するのに対し、DGMにおいては15%程度のEGRであっても無煙であると同時に、NOxは0.6g/(kW・h)程度と軽油の場合に比較して極

Fig. 9 Adiabatic flame temperature and equilibrium NO concentration for diesel fuel and DGM

Fig. 11 THC and odor concentration under starting with diesel fuel and DGM

めて低く抑えられることがわかる。

更に、軽油とDGMにおける機関始動時のTHCおよび臭気濃度例を図11に示す。図の横軸は始動開始からの経過サイクル数である。臭気濃度は三点比較式におい袋法による値であり、人が感知できなくなる最大希釈倍率で示される。始動時においても、軽油に比べて

THCが大幅に減少し、またその際の臭気濃度もかなり低下していることが明らかである。

4. 結 論

本研究は、圧縮着火が可能ないくつかの含酸素物質を燃料とした際のディーゼル機関における燃焼、排気および性能の特性について系統的な検討を行ったものである。結果を要約するとおおよそ以下の通りである。

(1) 圧縮着火が可能な含酸素物質を軽油に対して高濃度で溶解混合することにより、黒煙の大幅な低減に加えて、THC、COおよびNO_xの各エミッションと熱消費率の著しい改善が得られる。

(2) 上記の排気エミッションおよび熱消費率の改善効果は、軽油と含酸素燃料の混合割合を広範に変えたとしても、含酸素物質の種類ならびに軽油との混合割合に殆ど関わることなく、燃料中の酸素含有割合に概ね依存する。

(3) 着火遅れが短縮する含酸素物質(DGM, DBE)の単体燃料では軽油に比較して、第一期燃焼での急激な熱発生が大幅に抑制されるにもかかわらず、主燃焼は活発で燃え切りが良好な燃焼形態が得られ、機関騒音も大幅に低下する。

(4) 着火遅れが増加する含酸素物質(ENB, EHA)の単体では、軽油に比べて第一期燃焼での熱発生が急激となり、機関騒音は大きく増加する。

(5) 軽油に対するDGM混合割合が50%を越えると、極めて負荷が高い場合を除いて無煙かつ低NO_x燃焼が可能である。また、燃料噴射時期の遅延あるいはEGRを行った場合、DGM等の含酸素燃料では黒煙の排出を回避できるため、顕著なNO_x抑制が可能となる。

(6) 含酸素物質による熱消費率改善に対しては、等容度の向上と燃焼によるモル増加等が関与しており、特に高負荷では、燃焼効率の改善も相乗的に関与する。

(7) 含酸素物質の断熱火炎温度は軽油と比較して若干低く、これもNO_x低減の一因として考えられる。

(8) 軽油に比べてDGM燃料では、冷始動時でのTHCと臭気が大幅に改善される。

本研究の遂行に際しては、エネルギー総合工学研究所 含酸素軽油の開発可能性に関する調査委員会(委員長 富永博夫 東大名誉教授)ならびに陸用内燃機関協会のご助言とご協力を得た。また実験の遂行にあたり北大学院生 ライハン・カンドカー・アブ君、飯塚健一君、北大工学部学生 細川冬樹君ならびに研究生 曹 京紅君の協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) T. Murayama, et al., "A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel Blends", SAE Paper No. 821113.
- (2) S. C. Sorenson, et al., "Performance and Emissions of a 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fueled with Neat Dimethyl Ether", SAE Paper No. 950064.
- (3) Y. Akasaka, et al., "Evaluation of Oxygenated Fuel by Direct Injection and Direct Fuel Injection Impingement Diffusion Combustion Diesel Engines", SAE Paper No. 901566.
- (4) Y. Akasaka, et al., "Effects of Oxygenated Fuel and Cetane Improver on Exhaust Emissions from Heavy-Duty DI Diesel Engine", SAE Paper No. 942023.
- (5) K. Tsurutani, et al., "The Effects of Fuel Properties and Oxygenates on Diesel Exhaust Emissions", SAE Paper No. 952349.
- (6) N. Miyamoto, et al., "Improvement of Diesel Combustion and Emissions with Addition of Various Oxygenated Agents to Diesel Fuels", SAE Paper No. 962115.
- (7) 宮本 登・他3名, 燃料への含酸素物質混合がディーゼル燃焼・排気に及ぼす影響, 機論, 62-601, B (1996), 282-288
- (8) 有馬輝芳・他4名, 軽油への含酸素物質混合によるディーゼル燃焼・排気の改善, 自動車技術会学術講演会前刷集 964 (1996), 269-272
- (9) K. Yamane, et al., "Measurement of Particulate and Unburnt Hydrocarbon Emissions from Diesel Engines", SAE Paper No. 880343.