エタノール混合燃料を活用したディーゼル機関の排気改善*

Ali MOHAMMADI^{*1}, 石山 拓二^{*1}, 奇 成 燮^{*1}
堀 部 直 人^{*2}, 角 田 貴 章^{*3}Improvement in Exhaust Emissions from a Diesel Engine
Utilizing Ethanol Blended FuelAli MOHAMMADI^{*4}, Takuji ISHIYAMA, Sung-Sub KEE,
Naoto HORIBE and Takaaki KAKUTA^{*4} Graduate School of Energy Science, Kyoto University,
Yoshida Honmachi, Sakyo ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

Effects of ethanol blending on performance and emissions of a direct injection diesel engine equipped with common rail injection and cold EGR systems were investigated under various ethanol blending conditions. The results indicate that ethanol blending with high injection pressure offers smoke-free combustion under high engine loading. However, this gives an increase in combustion noise and NO_x emissions. In such a condition, employing pilot injection and cold-EGR lowers the combustion noise and greatly improves the NO_x-PM trade-off. Under low engine loading, usage of pilot injection with proper timing and amount improves combustion stability and lowers emissions of unburned species. The overall results indicate that maximum acceptable ethanol blending does not exceed 20%.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Fuel Injection, Ethanol Blend

1. はじめに

エタノールは含酸素燃料であるため、ディーゼル機関で用いることによって高いすす抑制効果が期待できる⁽¹⁾⁽²⁾。したがって、有用な代替燃料の一つとして早くから注目され、エンジンにおける利用法について研究が行われてきた。エタノールはセタン価が非常に低いため、着火性を確保することが主眼とされ、グロープラグや点火プラグによる着火、補助燃料の噴射、および軽油との混合による利用などの燃焼技術が検討されてきた。

最近では、バイオマス燃料の一つとして、CO₂抑制の観点からエタノールが再び注目されるようになり、取り扱いの安全性、製造コスト、ならびに排気改善効果など幅広く研究が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。最近の研究においては、機関の改造が最小にできることから、軽油との混合による利用が主に取り扱われ、軽油その他の燃料との相溶性や、相溶剤、セタン価向上剤の効果などについても検討されている⁽⁵⁻¹⁰⁾。

排気改善効果に関するこれまでの研究によると、NO_xに及ぼす効果については確定的ではないが、15%程度の混合で40%の粒子状物質PMの低減が得られることが報告されている⁽⁴⁾。一方、セタン価が低下するため、高負荷時には燃焼騒音の増加が、低負荷時には不完全燃焼による未燃排気物質排出量の増加と熱効率の悪化が報告されている⁽⁶⁾。しかしながら、これらの研究は従来型の燃焼制御技術を含んだディーゼル機関で行われた研究が多く、高圧噴射や排気再循環(EGR)などの最新技術を採用したディーゼル機関での研究は少ない。最近の電子制御噴射系の柔軟な制御性を活用すれば、前述のようなエタノール混合による性能・排気の悪化を抑制できる可能性がある。

そこで、本研究では、パイロット噴射が可能な高圧燃料噴射装置およびCold-EGRを採用したディーゼル機関においてエタノール混合燃料が機関性能、排気特性に与える影響を実験的に調査したのち、高負荷における騒音増大の抑制とNO_x-PMトレードオフの改善効果、ならびに低負荷における性能・排気の改善を目的として、主として噴射条件の最適化の方策を明らかにする。

2. 実験装置および方法

試験に使用した供試機関は、コモンレール式燃料

* 原稿受付 2004年11月1日。

^{*1} 正員、京都大学エネルギー科学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 日産自動車(株)(〒230-0053 横浜市鶴見区大黒町)。

^{*3} 京都大学エネルギー科学研究科。

E-mail: ali@energy.kyoto-u.ac.jp

Fig. 1 Engine specification

噴射装置（デンソー製 ECD-U2P）を備えた水冷無過給単気筒直接噴射式ディーゼル機関（口径 102mm, 行程 105mm）である。その主要諸元を図 1 に示す。燃料噴射ノズルは噴孔径 0.18mm の六噴孔のものを使用した。燃料には JIS2 号軽油（真発熱量 45.8MJ/kg, セタン指数 57）, ならびに、軽油とエタノール（真発熱量 27.7MJ/kg）を体積比 85 : 15, 80 : 20 および 75 : 25 で混合した燃料を使用した。また、混合燃料に対して分離防止のため添加剤としてオクタノールを体積比で 2% 添加した⁽¹¹⁾。混合燃料の真発熱量は、エタノール混合割合 15, 20, 25% に対して、それぞれ軽油より 5.8, 6.9, ならびに 8.8% 減少する。本研究では、EGR 率を変更したときの吸気温度の変化を避けるため、Cold-EGR を採用した。すなわち、高温の排気ガスを水冷式クーラーで冷却して常温とした後、混合タンク内で吸入新気と混合し、機関に吸入させた。EGR 率は排気および吸気中の CO₂ 濃度の計測値から総吸気量に対する再循環ガスのモル比として計算した。試験機関は主噴射開始時期を TDC に固定して、冷却水入口温度 80°C 一定のもと、回転速度 1800rpm で運転した。主噴射開始時期（TDC）は、高負荷運転時の燃料消費量、NOx および PM の排出量を熟考の上決定した。

黒煙、窒素酸化物 NOx, 全炭化水素 THC, 一酸化炭素 CO の濃度は、それぞれ Bosch 式スモークメータ、CLD 分析計（ヤナコ製, ECL30）, 加熱 FID 分析計（ヤナコ製, KA-300）, FIA 分析計（ヤナコ製 ALTAS-121）を用いて計測した。粒子状物質 PM は小型希釈トンネルを用いて採取し⁽¹²⁾, ソーク法を用いて固形炭素分 SOLID と可溶有機成分 SOF に分離して秤量した。また、排気中に含まれる低級炭化水素、

Fig. 2 Effects of ethanol blending on engine performance under various engine loads

アルデヒド類など微量成分の測定には、FTIR 分析計（堀場製作所製 MEXA-4000FT）を使用した。

燃焼解析のため、筒内圧力および燃料噴射弁リフトを、圧電式圧力変換器（KISTLER 6052A）ならびに Hall 効果型センサを用いて計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 エタノールの混合による機関性能への影響

初めに、エタノールの混合による基本的な性能・排気の変化を把握するため、負荷を変化させながら運転を行い、軽油運転の結果と比較した。図 2 に比較的低い噴射圧力（ $p_i=60\text{MPa}$ ）のもとで、エタノール 15% の混合燃料を使用したときの正味平均有効圧力 p_e に対する正味熱効率 η_e および排出物質濃度を軽油運転と比較して示す。さらに、図 3 に、このときの最大熱発生率 $dq/d\theta_{\max}$, 最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{\max}$, ならびに着火おくれ θ_s を示す。ここで、着火遅れ θ_s は噴射開始から、熱発生量が総発生熱量の 5% に達するまでの期間とした。

図 2 によると、これまでも報告されているように、エタノールの混合によって中負荷から高負荷にかけて黒煙 Smoke の低減がみられる。これは、エタノール自身の黒煙抑制効果だけではなく、図 3 に示すように着火遅れが長く予混合燃焼の割合が増加したことも原因と考えられる。また、どの負荷においても η_e に違いは見られない。NOx は中負荷においてわずかに増加するが、高負荷でエタノール混合によるセタン価低下に起因して $dp/d\theta_{\max}$ が大きく増加し、低負荷域において CO, THC などの未燃成分が増加することが問題である。

Fig. 3 Effects of ethanol blending on combustion characteristics against engine load

そこで次に、電子制御燃料噴射系の良好な制御性を利用して、上記の問題点を解消することを試みた。その際、高負荷ならびに低負荷それぞれについて性能・排気の改善方法を検討するとともに、エタノール混合率の影響も併せて調査した。

3.2 高負荷における性能・排気の改善

3.2.1 噴射圧力の影響 最近のディーゼル機関は、PM 排出量を低減する目的で、高負荷において高い噴射圧力を用いている。そこでまず、噴射圧力の変化がエタノール混合の効果に与える影響について調べた。図 4 は、エタノール混合割合を 15% とし、 $p_e=0.6\text{MPa}$ の条件のもとで、噴射圧力 p_i が熱効率 η_e 、最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{\max}$ および排出物質濃度に及ぼす影響を示す。いずれの燃料でも p_i の上昇にしたがつ

Fig. 4 Effects of injection pressure on engine performance and emissions

て、黒煙 Smoke が低減するとともに両者の差が小さくなり、 $p_i=120\text{MPa}$ では同等となる。このように、高い噴射圧力では、過濃混合気の形成が防がれ、通常の軽油でもほぼ無煙燃焼となるため、エタノール混合による黒煙低減効果は得られない。 $dp/d\theta_{\max}$ および NO_x はどちらの燃料においても、 p_i が高くなるにつれて増加する。特に $p_i=120\text{MPa}$ ではエタノール混合燃料、軽油どちらにおいても過大になるので対策が必要である。なお、 $dp/d\theta_{\max}$ は高い噴射圧力の条件でもエタノールの混合によって増加する。

3.2.2 パイロット噴射の適用 PM の低減を目的に高い噴射圧力を利用する場合には、通常の軽油を使用する場合でも燃焼騒音が過大となる。したがって、最近のディーゼル機関の多くは、高負荷域においてパイロット噴射を行い、主燃料の着火を短縮することで圧力上昇率を抑えている。そこで、本研究ではエタノール混合燃料にパイロット噴射を最適化し、圧力上昇率を軽油と同等にすることを目指した。

Fig. 5 Improvement in combustion process by pilot injection

図 5 はエタノールを 15% 混合した燃料について、 $p_e=0.6\text{MPa}$ 、 $p_i=120\text{MPa}$ の条件のもとでパイロット噴射を行ったときの筒内圧力 p 、熱発生率 $dq/d\theta$ およびニードルリフトセンサ出力 NL の変化を軽油と比較して示す。ここで、パイロット噴射量および時期はそれぞれ $Q_p=2\text{mm}^3/\text{st}$ 、 $\theta_p=15^\circ\text{BTDC}$ である。いずれの燃料でも、パイロット噴射によって着火遅れが短縮され、主燃料の熱発生率が低下する。エタノール混合燃料については真発熱量の低下もあってパイロット燃料の発生熱量がやや低いが、主燃料の熱発生率経過は軽油の場合とほぼ同等になる。

図 6 は $p_e=0.6\text{MPa}$ 、 $p_i=120\text{MPa}$ の条件のもとでパイロット噴射量を $Q_p=2\text{mm}^3/\text{st}$ に固定し、着火遅れ θ_s (主噴射からの期間)、 $dp/d\theta_{\max}$ および排気濃度に及ぼすパイロット噴射時期 θ_p の影響を示す。パイロ

Fig. 6 Effects of pilot injection timing on combustion and emissions

ト噴射量については予備実験の結果から、黒煙濃度の増加を抑えるため極少量とするのがよいことが分かっており、調量の精度も勘案して $Q_p=2\text{mm}^3/\text{st}$ とした。図より、いずれの燃料でも、パイロット噴射によって θ_b が短縮し、 $dp/d\theta_{\max}$ が減少する。軽油においては、 θ_p を 30°BTDC 付近まで進角しても、 $dp/d\theta_{\max}$ を低く抑えることができるが、エタノール混合燃料の場合は、 $dp/d\theta_{\max}$ を軽油と同等のレベルにするためには、比較的に遅い 15°BTDC に選ぶ必要がある。 θ_p を早めると、パイロット燃料の発生熱量が低下し、主燃料の熱発生率が上昇するのが見られた。エタノールの混合により、パイロット燃料の着火遅れが長くなり、希薄化した一部の混合気が熱発生にあずからないことが原因と見られる。

3.2.3 エタノール混合割合の影響 パイロット噴射の適用によって過大な圧力上昇率を防ぐことができたが、その反面、黒煙濃度が増加傾向にあった。そこで、エタノール混合割合の増加による黒煙低減の効果を調べた。そのために、前節で求めたパイロット噴射条件のもとでエタノール混合割合を 20 および 25%まで増加させた実験を試みた。しかし、混合割合を 25%としたところ、燃焼変動が激しく、出力を一定に維持することが困難であった。これは、噴射量の変動によるもので、エタノールの混合による沸点の低下に起因して、噴射系内にボイドが生じた可能性がある。したがって、以下の結果においては、混合割合を 20%に制限した。

図 7 はエタノール混合割合を変更したときの筒内圧力 p 、熱発生率 $dq/d\theta$ およびニードルリフトセンサ出力 NL をクランク角 θ に対して示す。混合割合を増すとともにパイロット燃料の着火遅れが長くなり、発生熱量が減少する。これにより上死点付近での p が下がるとともに、主燃料の熱発生開始時期が遅れ、最大筒内圧力が若干減少する。

Fig. 7 Effects of ethanol blending ratio on combustion process

図 8 は正味熱効率 η_e および排出物質の濃度に及ぼすエタノール混合割合の影響を示す。混合割合の上昇によって、Smoke, NO_x および CO の排出量が減少し、 η_e が増加する。前述のように筒内圧力の低下が見られることから、燃焼温度の低下により NO_x が減少し、さらに熱損失の低下により、熱効率が改善されたものと考えられる。なお、THC 排出濃度に及ぼすエタノール混合割合の影響は小さい。

3.2.4 EGR とエタノール混合の組み合わせ NO_x 排出濃度の大きな低減には、EGR が必須である。そこで、EGR とエタノールの混合を組み合わせたとときの排気特性を調べた。

Fig. 8 Effects of ethanol blending ratio on emissions

Fig. 9 Effects of EGR on emissions under various ethanol blending ratios

図 9 はエタノール混合割合を 20%まで、EGR 率を 25%まで変化させたときの排出物質濃度、正味熱効率 η_e および最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ の変化を示す。なお、混合割合を 20%としたときは、EGR 率を 25%まで上昇させると燃焼変動が非常に大きくなり、出力を維持した運転ができなかった。EGR 率の増加によって NO_x 排出濃度が大幅に減少するが、燃料による差は小さい。また、EGR 率の増加によってどの燃料でも Smoke が増加するが、高 EGR 率においてエタノール混合燃料では増加が小さく、EGR=20%、エタノール混合割合 20%においては軽油に比べ大幅に低下する。しかし、混合割合が 20%の場合には、EGR 率の増加にともなって $dp/d\theta_{max}$ が急激に上昇しており、これが実用上問題になる。

Fig. 11 Effects of EGR rate on PM emissions under various ethanol blending ratios

図 10 は同じ条件での筒内圧力 p 、熱発生率 $dq/d\theta$ を示す。EGR 率 20%、エタノール混合割合 20%の場合、EGR によってパイロット噴射の着火遅れが長くなり、発生熱量も大きく減少するため、主燃料の初期熱発生率が増加する。これが前述の $dp/d\theta_{max}$ の増加につながる。他の燃料の場合でも同様の傾向が見られるが、その変化は小さい。これは、エタノール混合量の増加によって燃料の着火性は大きく悪化するためと考えられる。この結果については、さらに検討する必要がある。

図 11 は EGR に対する粒子状物質 PM、可溶有機成分 SOF および不溶性成分 Solid の排出濃度の変化を示す。EGR 率が高くなるにつれて PM の排出濃度が増加する。しかし、Smoke と同様に、エタノール混合によって高 EGR 率においても PM 排出濃度の増加が抑制され、EGR 率 20%、エタノール混合割合 20%において軽油に比べて PM が 70%減少する。また、PM

Fig. 10 Effects of ethanol blending ratio on combustion process under various EGR rates

Fig. 12 Effects of EGR rate on NOx-PM trade-off

のうち、特に Solid が抑制されていることがわかる。

図 12 は EGR 率を変更させたときの PM と NOx の関係を示す。図よりエタノール混合により PM と NOx のトレードオフ関係が改善されることがわかる。エタノール 20% 燃料では EGR 率 20% を用いることによって NOx 排出量 0.52g/kWh に対して 60% 以上の PM 低減が得られる。

3.3 低負荷における性能・排気の改善

図 2 で指摘したように低負荷運転時に CO および THC の排出量増加の問題がある。これは、長い着火遅れにより燃焼限界を超える希薄混合気が形成されることが原因と見られる。そこで、主としてパイロット噴射による改善を目指し、噴射条件の最適化について検討した。

3.3.1 噴射圧力の影響

まず、噴射圧力の上昇に

Fig. 13 Effects of injection pressure on combustion characteristics under a low engine load

よる着火遅れの短縮と性能・排気の改善効果を調べた。図 13 は正味平均有効圧力 $p_e=0.25\text{MPa}$ のときの燃焼特性に及ぼす噴射圧力 p_i の影響を示す。ここで δ_{pi} は燃焼変動の指標で、50 サイクルにおける図示平均有効圧力の標準偏差を平均値で割り算して求めた。噴射圧力が低いと、エタノール混合割合の増加によって燃焼変動率 δ_{pi} が大きく増加しているが、噴射圧力の上昇によって着火遅れが短縮され、 δ_{pi} も低く抑えられる。もし、許される最大の δ_{pi} を 0.1 と考えると、エタノール 15% および 20% で利用可能な p_i はそれぞれ 80MPa と 100MPa になる。この噴射圧力の範囲で排出物質濃度ならびに正味熱効率 η_e をプロットして図 14 に示す。燃焼変動は抑えられたものの、CO、THC の排出量はエタノール混合によって増加し、混

Fig. 14 Effects of injection pressure on emissions under a low engine load

合割合が増すほどに高い噴射圧力や噴射時期の早期化を必要とするため、NOx の大幅な増加が避けられない。そこで次にパイロット噴射の適用を検討した。

3.3.2 パイロット噴射の適用 図 15 は筒内圧力 p 、熱発生率 $dq/d\theta$ に及ぼすパイロット噴射の影響を示す。実験条件は $p_e=0.25\text{MPa}$ 、 $p_i=80\text{MPa}$ 、 $Q_p=3\text{mm}^3/\text{st}$ 、 $\theta_p=20^\circ\text{BTDC}$ である。図より、どの燃料についてもパイロット噴射を行うことによって大幅な着火遅れの短縮が得られ、エタノール混合割合が多くなっても主燃料の熱発生開始を TDC 近くに配置できる。

次に、パイロット噴射量 Q_p が熱効率および排出物質に及ぼす影響について調べ、その結果を図 16 に示す。エタノール混合燃料では、パイロット噴射によって正味熱効率 η_e が上昇し、軽油を上回った。これは、図 15 に見られるように、パイロット燃料の発熱

Fig. 15 Effects of pilot injection on combustion process under a low engine load

量が少なく、上死点付近の温度上昇が小さいため、軽油に比べて冷却熱損失が低減されたためと推定される。また、THC および CO の排出濃度はパイロット噴射によって大きく低下するが、パイロット噴射量 Q_p の増加により徐々に増加する。図より、軽油の場合、 Q_p を $1\sim 2\text{mm}^3/\text{st}$ に設定すれば NO_x の増加を防げる。エタノール混合燃料の場合は、 $2\sim 3\text{mm}^3/\text{st}$ とややパイロット噴射量を多くすると比較的低い THC、CO、 NO_x 濃度にできる。これは、エタノールは軽油と比べて発生熱量が少ないためと考えられる。

図 17 は炭化水素、アルデヒド等微量成分の濃度を、パイロット噴射を行わないとき (w/o)、 $Q_p = 3\text{mm}^3/\text{st}$ としてパイロット噴射を行ったとき (w) とで比較した結果を示す。ここで、LHC は低沸点炭化水素 (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_6H_6) の総濃度を示す。図より、パイロット噴射を行わない場合、エタノール混合によって CO、THC、LHC、アルデヒド類

($\text{HCHO}+\text{CH}_3\text{CHO}$) やアルコール類 ($\text{CH}_3\text{OH}+\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) の排出濃度は軽油運転時と比べて大きく増加するが、パイロット噴射によってこれらの排出濃度が大幅に減少する。ただし、アルコール類の排出濃度は減少するものの、軽油と同等まで減らすことはできない。

4. おわりに

パイロット噴射が可能な高圧燃料噴射装置および Cold-EGR を採用したディーゼル機関においてエタノール混合燃料が機関性能、排気特性に与える影響について検討を行った結果、次のような知見が得られた。

高負荷運転時

- (1) エタノール混合燃料を用いた場合、噴射圧力の上昇によって無煙燃焼が得られるが、高い噴射圧力では軽油に対して黒煙低減のメリットは弱まる。
- (2) 最適なパイロット噴射によってエタノール混合による燃焼騒音の増加を防ぐことができる。
- (3) エタノール混合割合が上昇するとパイロット噴射の着火および燃焼に多少の影響が見られるが主燃料の燃焼形態はあまり変わらない。Smoke、 NO_x および CO の排出濃度がエタノール混合割合の上昇によって減少し、熱効率が上昇する。ただし、エタノール割合を 25% まで上昇させると燃焼変動が激しくなり、出力を一定に保つことが困難になる。
- (4) エタノール混合、高圧噴射、パイロット噴射と EGR の組み合わせによって PM の増加が小さく、 NO_x の低減が可能になり、 NO_x -PM トレドフが改善できる。ただし、エタノール混合割合が多いとき高い EGR 率を用いると、圧力上昇率が過大になる。

Fig. 16 Effects of pilot amount on emissions under a low engine load

Fig. 17 Effects of pilot injection on unburned emissions under a low engine load

低負荷運転時

- (5) 低負荷運転時では噴射圧力の上昇により着火遅れが短縮し、燃焼変動が小さくなる。このとき THC および CO の排出が低減される。しかし、エタノール混合割合が多くなるほど燃焼変動の増加を回避するために高い噴射圧力が必要となり、NO_x の増加が避けられない。
- (6) 最適なパイロット噴射は着火遅れの短縮に有効で NO_x を低く保ちながら THC, CO およびアルデヒド類が低減できる。

終わりに、実験に際し大学院生、松本哲平氏に多大なご協力を得たことに対して深く感謝します。また、噴射系を提供いただいた(株)トヨタ自動車に対して御礼申し上げます。なお、本研究は京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」の助成を受けた。

文 献

- (1) Murayama, T., et al., JSME Bull, 26(216), pp.1043-1049, (1983).
- (2) Eugene, E.E., et al., SAE paper, 840118, (1984).
- (3) MacLean, H.L., et al., J. Air Waste Manage. Assoc., 50(10), pp.1769-1779, (2000).
- (4) McCormick, R.L. and Parish, R., NREL/MP-540-32674, (2001).
- (5) Hansen, C.A., et al., BioResourceTechnology, vol. 96, Issue 3, pp.277-285, (2005).

- (6) Xing-Cai, L., et al., Fuel, 83, pp.2013-2020, (2004).
- (7) Pouloupoulos, S.G., et al., Atmospheric Environment, 35, pp.4399-4406, (2001).
- (8) He, B.Q., et al., SAE Paper, 2003-01-0762, (2003).
- (9) Cole, R.L., et al., SAE paper, 2001-01-1937, (2001).
- (10) Czerwinski, J., SAE Paper, 940545, (1994).
- (11) Miwa, K., et al., Proc. VIIIth Int. Symp. On Alcohol fuels, pp.595-600 (1988).
- (12) Ikegami, M., et al., SAE paper, 831290, (1983).