超高 EGR による低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼の 諸特性と燃料噴射量依存性*

小 川 英 之^{*1}, 清 水 肇^{*2}
木 戸 伸 吾^{*3}, 宮 本 登^{*4}

Characteristics of Ultra-High EGR and Low Oxygen Diesel Combustion and Its Dependence on Injected Fuel Quantity

Hideyuki OGAWA^{*5}, Hajime SHIMIZU,
Shingo KIDO and Noboru MIYAMOTO

^{*5} Division of Energy and Environmental Systems, Hokkaido University,
N 13 W 8 Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

Ultra-low NO_x, smokeless, and quiet operation without significant deterioration of engine performance and emissions is possible at up to half of rated torque (0.45 MPa IMEP) with a large ratio of cold EGR to create an oxygen concentration of less than 9-10%. However, at higher loads, with the oxygen concentration kept below 9-10%, the air/fuel ratio has to be set over-rich in order to attain or exceed half of rated torque, and thermal efficiency, CO, and THC deteriorate significantly. As EGR rate increases, exhaust gas emissions and thermal efficiency vary according to intake oxygen content rather than with excess air ratio. While decreasing the oxygen content to 12% actually increases smoke emission, a further reduction of oxygen can decrease smoke. With low oxygen combustion, ISF of particulate matter is significantly reduced, but SOF cannot be eliminated. Although the combustion efficiency suffers remarkably from the reduced oxygen content, the indicated thermal efficiency does not significantly deteriorate because the low combustion temperature results in reduced cooling loss.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Combustion Products, Exhaust Gas Recirculation Smoke, Nitric Oxides, Exhaust Gas Emission, Particulate Matter

1. 結 論

排気再循環(EGR)は、ディーゼル機関における窒素酸化物(NO_x)低減対策として非常に有効であるが、EGR率を過度に高めた場合には微粒子(PM)が増加するため、従来は比較的低い EGR 率までの適用に留まっていた。それに対して、佐々木らは低負荷で EGR 率をきわめて高く設定することにより燃焼を低温化させてスートの生成を抑制する無煙低温ディーゼル燃焼法⁽¹⁾⁻⁽³⁾を提唱している。一方、木村らは高スワール比と遅延噴射にともなう着火遅れ増大による予混合化に高 EGR 率を組み合わせた MK 燃焼法⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾を提唱しており、すでに部分負荷では実用に供している。

これらの燃焼法によれば NO_x およびスートはごく微量なレベルにまで低減できるが、条件によっては一酸化炭素(CO)、未燃炭化水素(THC)、および PM 中の可溶性有機物質(SOF)の増加が懸念される。しかし、これら不完全燃焼成分は酸化触媒により比較的容易に除去可能であることから、排気における後処理が困難な NO_x およびスートをごく低レベルに抑え得るこれらの燃焼法は、今後の排気後処理装置を搭載するディーゼル機関において有用な技術になるものと考えられる。しかし、佐々木らの報告では、この燃焼を低負荷に限定して検討しており、より高い負荷への適用に対しては言及していない。木村らの MK 燃焼も適応負荷範囲の拡大は試みられているが、高負荷までの適用には至っていない。

本研究では、より高い負荷で低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼の特性解明を試みるとともに、種々の燃料噴射量について低酸素濃度雰囲気燃焼を試みた際の機関性能および排気特性について検討を行った。以下にその詳細について記述する。

* 原稿受付 2005 年 1 月 18 日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)。

^{*2} トヨタ自動車(株)(〒471-8571 豊田市トヨタ町 1)。

^{*3} 北海道大学大学院工学研究科。

^{*4} 正員、北海道大学名誉教授。

E-mail: h-ogawa@eng.hokudai.ac.jp

2. 実験装置および方法

供試機関には最新のコモンレール噴射系(デンソー製)を有する単気筒・無過給・四サイクル直噴式ディーゼル機関(ボアφ110 mm, ストローク106 mm, 行程体積1007 cm³, 圧縮比16, スワール比2.2)を使用した。機関運転条件は, 回転速度を1320 rpm, 噴射圧力を120 MPa, 冷却水温度を80°Cとした。燃料噴射時期は, EGR率によって着火遅れが大きく変化するため, 着火が上死点で生ずるように各条件で変更・設定した。EGRは, 排気管から分流した実排気を冷却して吸気に還流することにより行った。この際, 吸気温度は30°C以下になるようにした。EGR率は全吸入ガス中に占める再循環排気の体積割合(標準状態)で定義した。供試燃料には市販のJIS2号軽油を用いた。

各濃度の測定には, 二酸化炭素および一酸化炭素は非分散型赤外分析計(NDIR)を, 酸素は磁気式酸素計を, NO_xは化学発光法(CLD)を, THCは加熱型水素炎イオン化検出器(HFID)を, 水素はセクタ型水素分析計を, 黒煙はボツシュ式スモークメータをそれぞれ用いた。微粒子は, 分流型希釈トンネルにより十倍程度に希釈した排気からフィルターにより捕集し, フィルターソーキ法により不溶成分(ISF)と可溶性有機成分(SOF)を計量した。

3. 実験結果および考察

3・1 低酸素濃度雰囲気燃焼時の排気エミッションおよび熱効率 図1は, 一サイクル当たりの燃料噴射量 Q_f を二分の一負荷相当(図示平均有効圧: 0.45 MPa)の32 mm³/stroke一定としてEGR率により空気過剰率 λ を変化させ, 着火が上死点で生ずるように燃料噴射時期を設定した際の結果である。図において, 横軸は空気過剰率およびEGR率を, 縦軸は上から順に噴射時期, 排気二酸化炭素濃度(Exhaust CO₂), および吸気酸素濃度(Intake O₂)を取っている。噴射時期はEGR率の増加にともなって着火遅れが増大するため, 着火が上死点で生ずるようにするためには進角する必要があるが, 逆にこれにより予混合化の促進が期待できる。排気二酸化炭素濃度はEGR率の増加にともなって増加するが, 空気過剰率が1.1以下(EGR > 60%)では次に述べる一酸化炭素の増加と相まって減少に転ずる。吸気酸素濃度は, EGR率の増加にともなって量論比までは低下するが, 過濃領域に入るとそれ以上の低酸素濃度化は不可能になる。そして過濃領域に入ってからさらにEGR率

を増加させようとする, 燃焼が不安定になって運転が不可能になる。

図2に, 図1と同一条件における排気エミッションを示す。EGR率を増加させ酸素濃度を低下させることによりNO_xは大幅に低減し, EGR率40%以上($\lambda < 1.6$, 吸気酸素濃度 < 16%)ではほとんど排出されなくなる。黒煙はEGR率が55%($\lambda = 1.3$, 吸気酸素濃度 = 12%)程度までは顕著に増加しており, NO_xとのトレードオフ関係が見受けられるが, さらにEGR率を増加させると急激に減少し, EGR率が60%($\lambda = 1.1$, 吸気酸素濃度 = 9.5%)になるとボツシュの指示値ではゼロ以下になる。しかし, 黒煙が減少を始める高EGR・量論比近傍では水素(H₂), THCおよびCOが著しく増加する。

図3に, 図1中における三通りのEGR率について微粒子(PM)中の不溶成分(ISF)と有機性可溶成分(SOF)の濃度(上段, 排気1 Nm³当たりの重量[mg/m³])および排出量(下段, 1時間図示出力当たりの重量[mg/(kW_i・h)])を示す。ISFはEGR率を30%にすると顕著に増加するが, 62%になると著しく低くなっており, 図2における黒煙の排出傾向と良く対応

Fig. 1 Behaviors of injection timing for TDC ignition, carbon dioxide in exhaust gas, and oxygen in intake gas with large quantity of cold EGR ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

Fig. 2 Effect of large quantity of cold EGR on exhaust gas emissions ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

している。一方、SOFはEGR率が62%になると著しく増加しており、低酸素濃度雰囲気燃焼により黒煙がゼロになっても全微粒子濃度はかなり高い。しかし、このEGR = 62%のSOFは濃度 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ のみと顕著に増加しているが、排ガス量が減少するため排出量 $[\text{mg}/(\text{kW}_i \cdot \text{h})]$ でみるとむしろEGR = 0%よりは減少している。

以上の図2および図3に示した排気特性は、佐々木らが行ったより低い負荷条件(正味平均有効圧: 0.2 MPa)の結果⁽¹⁾とおおむね一致している。

図4に、図1と同一条件における図示熱効率 η_i お

Fig. 3 Effect of large quantity of cold EGR on particulate matters ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

よびその関連因子である全投入熱量に対する冷却水への冷却損失の割合 ϕ_w 、燃焼効率 η_c 、および発熱の等容度 η_{gin} を示す。黒煙の低減が得られるEGR率55%以上になると燃焼効率が顕著に低下するが、図示熱効率は黒煙がほぼゼロになるEGR率が60%程度までは量論比に近いにもかかわらず比較的高い値を維持する。これは、高EGR時では燃焼温度低下にともなって図に示す通り冷却損失が減少するためと考えられる。また、燃焼期間が増加することで等容度の低下が懸念されたが、その低下はわずかである。しかし、当然のことではあるが、量論比にさらに近づくとも燃焼効率が顕著に悪化し、図示熱効率の低下も著しくなる。したがってEGR率は黒煙と熱効率のトレードオフを考えて設定する必要がある、少なくとも量論比よりは希薄側に設定するのが熱効率を考えると現実的である。

図5に、図1と同一条件における燃焼騒音および最大圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{\text{max}}$ を示す。EGR率の増加により噴射時期を早期化して着火遅れが増大しているにもかかわらず、最大圧力上昇率および燃焼騒音が著しく低減しており、とくに黒煙の低減が得られるEGR率55%以上で効果が顕著になる。

図6に、図3の各条件におけるインジケータ線図および熱発生率(ROHR)を示す。噴射時期は着火が上死点で生ずるようにEGR 0%では 7°CA BTDC に、30%では 13°CA BTDC に、62%では 19°CA BTDC にそれぞれ設定しており、図中に噴射期間を示している。EGR率が増大すると、予混合燃焼による熱発生のピーク値が減少するとともにその熱発生期間が長期

Fig. 4 Effect of large quantity of cold EGR on factors related with thermal efficiency ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

化し、圧力上昇率が低下している。これは、低酸素濃度化にともなう雰囲気低温化によって酸化反応速度が低下したためと考えられる。また、EGR 62%では、拡散燃焼部分が消失しているが、これは、着火遅れが長期化して噴射終了から着火に至るまでに十分な期間が得られ、予混合化が促進されたためと考えられる。この場合低温酸化反応による小さな熱発生が主熱発生の前に観察され、いわゆる予混合圧縮着火燃焼の様態を呈している。このような着火遅れ増大による希薄予混合化も低温化を助長するものと考えられる。

以上の結果から、高EGRによる低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼は、「低温化」と「着火遅れの増大による予混合化」の両者が相乗的に NO_x と黒煙の生成抑制をもたらしているものと解釈できる。また、「低温化」は「予混合化」にともなう燃焼の急激化を抑制するほか、冷却損失の低減にも強く作用しているものと考えられる。

3・2 燃料噴射量の影響と高負荷運転の可能性

図7は、三通りの燃料噴射量 Q_f について、EGR

Fig. 5 Effect of large quantity of cold EGR on combustion noise and the maximum rate of pressure rise ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

Fig. 6 Effect of large quantity of cold EGR on in-cylinder pressure and the rate of heat release (ROHR) diagrams ($Q_f = 32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$)

が図示熱効率および排気エミッションに及ぼす影響を示した結果であり、横軸にはEGR率によって変化する空気過剰率を取っている。いずれの噴射量でも空気過剰率の低下、すなわちEGR率の増加にともなう NO_x が低下してゼロレベルになるとともに黒煙が増加してピークを呈する。さらに空気過剰率が低下すると黒煙は再び低下して量論比付近でゼロレベルになるが、THCおよびCOが顕著に増加し、図示熱効率が低下する。以上の基本的な特性は燃料噴射量にかかわらず同様であるが、噴射量が多いほどそれらの特

Fig. 7 Effect of large quantity of cold EGR on indicated thermal efficiency and exhaust gas emissions for three fuel quantities, Q_f

性を呈する空気過剰率がリッチ側にシフトする。中でも燃料噴射量が $27 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ および $32 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ では量論比よりも希薄側で黒煙がゼロになるのに対し、 $37 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ では過濃領域に設定しなければ黒煙をゼロにできなくなり、その場合著しい図示熱効率の低下と多量の CO および THC の排出をとまう。

図 8 は、図 7 に示した三通りの噴射量にさらに $21 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ および $41 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ の二通りを加え、横軸に酸素濃度を取って整理し直した結果である。各エミッションは噴射量により絶対的な濃度は異なるものの、いずれの噴射量においても、酸素濃度が 16% 以下になると NOx はゼロレベルになる一方、黒煙の増

加が顕著になること、酸素濃度が 12% 以下になると黒煙が減少に転ずるとともに CO および THC の増加が顕著になること、および酸素濃度が 9 ~ 10% 以下になると黒煙がゼロレベルになることが明らかである。すなわち、各排気エミッションの増減特性が噴射量のいかんにかかわらず酸素濃度に対して一義的に対応している。一方、同一吸気酸素濃度でも噴射量が多くなると空気過剰率は低くなるが、前述した通り図 7 においては噴射量の増加にともなう、各排気エミッションの増減特性が低空気過剰率側にシフトしている。これらの結果は、各排気エミッションが空気過剰率よりもむしろ吸気酸素濃度に比較的強く支配されていることを示唆しており、酸素濃度に左右される燃焼温度を支配因子として挙げるができる。とくに酸素濃度が 9% 以下になると $41 \text{ mm}^3/\text{stroke}$ でも黒煙がゼロレベルになることは特記に値するが、その場合図において網掛けで示す空気過剰率が 1 以下の過濃領域に入るため、前述した通り著しい図示熱効率の低下と多量の CO および THC の排出をとまう。したがって、より高い負荷まで低酸素濃度雰囲気燃焼による無煙運転を実現するためには、少なくとも希薄領域となる酸素濃度において低温化を何らかの方策で図ることが必要である。具体的には、過給が最も有効な手段として考えられるほか、圧縮比の低下による温度レベルの低下などが有効になるものと考えられる。また、混合気の均一化を図れば、局所的高温領域が消滅してより高い吸気酸素濃度まで低酸素濃度雰囲気燃焼による無煙運転が可能になると思われ、そのためには高圧噴射、低圧縮比化あるいは低セタン価燃料の利用による着火遅れの確保が有効になるものと考えられる。

図 8 の NOx および黒煙の酸素濃度依存性は、図 9 に示す Akihamara が提唱した NOx およびスートの当量比-温度 (ϕ -T) マップ⁽⁹⁾ で定性的に説明できる。すなわち、酸素濃度が 21% から 16% までは酸素濃度の低下にともなう温度が低下し、図 9 における 2200 K 以上の NOx 生成領域が減少するとともに 2000 K 付近のスート生成領域が増加して図 8(a) の NOx 低下と (b) の黒煙増加という結果となる。酸素濃度が 16% から 12% では、もはや 2200 K 以上の NOx 生成領域は存在しなくなって超低 NOx になる一方、2000 K 付近のスート生成領域がピークに達する。図 9 の通り 2000 K 付近のスート生成量は非常に当量比依存性が高いが、それは、図 8(b) の酸素濃度 12% 付近において、燃料噴射量の増加とともに黒煙濃度が著しく高くなることに対応している。この場合、酸素濃度の低下により総括当量比が増加することも黒煙濃度増加を助長する。さらに、燃料噴射量にかかわらず酸素濃

Fig. 8 Influence of intake oxygen content changed with cold EGR on exhaust gas emissions for five fuel quantities

 Fig. 9 ϕ -T diagram for soot and NOx⁽⁹⁾

度 10% 以下で黒煙が消滅するのは、1800 K 以下で当量比にかかわらずスートが生成されなくなることに対応している。また、酸素濃度が 10% 以上では着火遅れが比較的短く当量比 2 以上の領域を多く含むのに対し、酸素濃度が 10% 以下になると総括当量比は増加するものの、着火遅れが増大して均一化が進行する結果、当量比 2 以上の領域が減少することもスート消滅に対して相乗的に作用しているものと考えられる。

図 10 に、三通りの噴射量について EGR により量論比に達する限界近くに設定した際の熱発生率および指圧線図を示す。空気過剰率は、32 mm³/stroke (黒煙: 0%) の場合が 1.10、37 mm³/stroke (黒煙: 16%) および 41 mm³/stroke (黒煙: 55%) の場合が 1.03 といずれもきわめて量論比に近く、吸気酸素濃度は、32 mm³/stroke が 9.5%、37 mm³/stroke が 10.0%、41 mm³/stroke が 11.2% となっている。噴射量が多くなるほど燃焼が急激になっているが、これは吸気酸素濃度が高いためであり、燃焼温度が高くなり黒煙の生成が避けられなくなることに対応している。また、噴射量が増加するほど着火遅れが減少するとともに噴射期間が増加して、噴射終了から着火までの期間が短縮し、均一性が低下することも黒煙増加の要因になっているものと考えられる。

4. 結 論

本研究では、低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼の基本的特性を把握するとともに、その無煙・高効率運転負荷領域拡大の可能性を解明するため、燃料噴射量の影響を中心に検討した。その結果を要約すると、およそ以下の通りである。

1. 噴射量のいかんにかかわらず、コールド EGR により酸素濃度が 16% 以下になると NOx はゼロレベルになる一方、黒煙の増加が顕著になる。さらに

Fig. 10 In-cylinder pressure and the rate of heat release (ROHR) diagrams near stoichiometric condition with cold EGR for three fuel quantities

酸素濃度が 12% 以下になると黒煙が減少に転ずるとともに CO および THC の増加が顕著になり、酸素濃度が 9~10% 以下になると黒煙がゼロレベルになって、超低 NOx・無煙の「低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼」を実現できる。ただし、二分の一負荷 (図示平均有効圧: 0.45 MPa) 以上になると、吸気酸素濃度を 9~10% まで低下させるには量論比よりも過濃にせざるを得なくなって熱効率、CO、および THC の大幅な悪化をとまう。より高い負荷まで低酸素濃度雰囲気燃焼による高効率・無煙運転を実現するためには、過給などのほか、均一予混合化促進が有効になるものと考えられる。

2. EGR の増加にともなう各エミッションおよび熱効率は空気過剰率の低下よりも、むしろ吸気酸素濃度の低下に対応して変化する。
3. 低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼では、微粒子中の ISF が顕著に減少するものの SOF はかなり排出される。
4. 低酸素濃度化にともない、燃焼効率が低下するが、冷却損失が減少するため、量論比に過度に接近しない限り、図示熱効率の悪化は比較的小さい。
5. EGR 率の増加により噴射時期を早期化して着火遅れが増大しているにもかかわらず、最大圧力上昇率が減少し、燃焼騒音も著しく低減する。とくに黒煙の低減が得られる EGR 率 55% 以上でその効果が顕著になる。

文 献

- (1) 佐々木, ほか2名, ディーゼル機関の無煙低酸素燃焼法-第1報: 冷却された大量EGRガスを用いた理論空燃比前後での無煙燃焼-, 自動車技術会論文集, 34 (1), 65-70, 2003.
- (2) 稲垣, ほか3名, ディーゼル機関の無煙低酸素燃焼法-第2報: 数値計算によるメカニズムの解明-, 自動車技術会論文集, 34 (1), 71-76, 2003.
- (3) 佐々木, ほか2名, ディーゼル機関の無煙低酸素燃焼法-第3報: 吸蔵還元型 NO_x 触媒のディーゼル機関への適応-, 自動車技術会論文集, 34 (1), 77-81, 2003.
- (4) 松井, ほか2名, 小形DIディーゼル機関の新燃焼コンセプト-第1報: 基本燃焼コンセプトの紹介-, 自動車技術会論文集, 28 (1), 41-46, 1997.
- (5) 木村, ほか2名, 小形DIディーゼル機関の新燃焼コンセプト-第2報: 新コンセプト燃焼の多気筒機関への適用-, 自動車技術会論文集, 28 (2), 41-46, 1997.
- (6) 木村, ほか2名, 小形DIディーゼル機関の新燃焼コンセプト-第3報: MK燃焼領域拡大の可能性-, 自動車技術会論文集, 29(3), 55-60, 1998.
- (7) 木村, ほか3名, 小形DIディーゼル機関の新燃焼コンセプト-第4報: 高圧噴射化による低温予混合型燃焼コンセプトの適用領域の拡大-, 自動車技術会論文集, 30(2), 23-28, 1999.
- (8) 木村, ほか3名, 小形DIディーゼル機関の新燃焼コンセプト-第5報: 低温予混合型燃焼(MK燃焼)による低エミッションと高効率の可能性-, 自動車技術会論文集, 30(3), 11-16, 1999.
- (9) Akihama, K., et al., "Mechanism of the smokeless Rich Diesel Combustion by Reduced Temperature," SAE Paper, 2001-01-0655 (2001).