

ディーゼル機関のNO_x対策と黒煙排出量

芳住 邦雄 梅原 秀夫 福岡 三郎
石黒 辰吉

1 はじめに

東京都内におけるディーゼル車の登録台数占有率は、約5%であるが、交通量にすると1026万km・台/日であり、全体の約14%を占めると推定されている。¹⁾ディーゼル機関は、ガソリン機関に比較しエネルギー効率に優れていることから事業用、特に、大型トラックに用いられており、都市環境大気汚染の主要な要因の一つになっている。とりわけ、NO_xおよび粒子状物質の発生源として大気汚染防止対策上の大きな課題である。

ディーゼル排出ガス対策確立のために、エンジンダイナモメータ上での基礎的研究としてこれまで当所では、昭和53年度事業として副室式エンジン的一种である渦流室式エンジンを用いて排気特性の検討を加えた。²⁾さらに、昭和54年度事業として直接噴射式エンジンを用いて、その機関特性を把握しながら、都市走行状態におけるNO_xおよびHC排出量、燃費特性を明らかにした。³⁾この渦流室式エンジンは、小容量エンジンとしての適性があり、小型貨物車および乗用車に使用され、直接噴射式エンジンは大型トラックに多く用いられる。

本研究では、前年度に引き続き直接噴射式エンジンをエンジンダイナモメータ上で駆動し、その排出ガス中のNO_xの低減手法について検討するとともに、また、その際の黒煙排出量への影響を明らかにすることを目的とした。すなわち、ディーゼル機関のNO_x排出量を低減させる手法として、本研究では、噴射時期遅延、水噴射およびEGR(排気再循環)に着目し、全エンジン駆動条件においてNO_x排出量に対するその効果を検討した。さらに、黒煙排出量をボッシュ式スモーク反射率および希釈風洞による排出質量として測定し、対策技術との関連を考察した。

2 実験方法

直接噴射式ディーゼルエンジンを明電舎製渦流式エ

ンジンダイナモメータ上で駆動し、その排出ガス中のNO_xおよび粒子状物質(黒煙)を測定した。供試エンジンの主要諸元は、表1に示したとおりで排気容量

表1 供試エンジンの主要諸元

エンジン形式	水冷, 4サイクル, 4気筒 ディーゼルエンジン
エンジン型式	いすゞ 4BBI
燃焼式形式	直接噴射式
排気総量	3595 ml
噴射時期	22°/1000rpm, 31°/3300rpm
噴射ポンプ型式	ボッシュ NP-PES 4A 85 C412
変速機形式	手動前進5段

3.6ℓの直接噴射式国産エンジンである。等価慣性質量は、供試エンジンが搭載される車両の最大積載量の1/2に車両重量および乗員1名を加えたものとして、フライホイールを選定した。走行抵抗は、前報³⁾に示したように、当該車輛に係る特性定数を用いての計算値が、エンジンダイナモメータ上で再現されるように行った。

NO_x分析は、排出ガスを直接採取する方法により行い、分析計に堀場製MEXAC I型NO_x計(CL)を用いた。吸入空気量は司測研製層流型流量計を、燃料消費量は小野測器製MF601・MF802型質量流量計を、それぞれ用いて測定した。実走行モード運転時の排出量は、分析計の連続濃度値に吸入空気量を乗じて求めた。サンプリング間隔は1秒間とし、分析計の遅れ時間は1秒以下を四捨五入して設定した。湿度および乾きガス補正は6モード試験法に拠った。データの読み取り演算は、日本電子製JEC-6型ミニコンピュータによりオンライン処理によって行った。

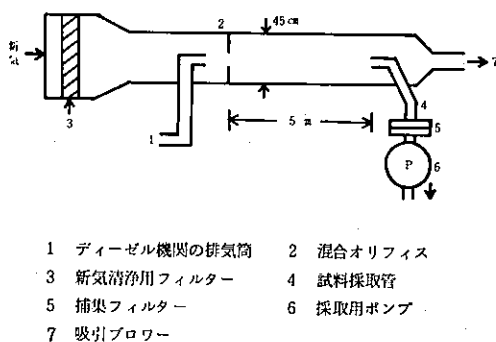


図1 ディーゼル黒煙採取用希釈風洞装置の概要

粒子状物質の採取には、米国EPAの規定する希釈サンプリング法⁴⁾に準じて、図1に示した希釈風洞を用いた。おおよそ6~15倍に希釈された排出ガスを、テフロンろ紙(住友電工FP-080)上に20ℓ/minの流速で通気し、マイクロ天秤により粒子状物質の捕集量を測定した。また、わが国の公定法であるボッシュ法⁵⁾⁶⁾をも用いた。

3 実験結果および考察

(1) NO_x低減対策の検討

ア 噴射時期遅延

ディーゼル機関のNO_x低減技術としてこれまで最も注目されてきた手法は、噴射時期の遅延である。噴射時期を遅延させる方法には、イニシャルタイミング自体を遅延させる方法と、噴射タイミング進角タイマーの特性を変更させる方法の2通りがある。ここでは、簡便な方法であり、使用過程車対策としても有効であると考えられるイニシャルタイミングを10°遅延する方法について検討した。噴射時期を遅延するとは、出力および燃料消費率が最良となっている噴射時期に遅れて燃料を噴射することである。

ディーゼル機関の燃焼過程には、次の3つの期間がある。すなわち、燃料噴射始めから着火までの着火遅れ期間、着火から圧力急上昇の完了までの予混合燃焼期間、および圧力急上昇後、燃焼が終るまでの拡散燃焼期間である。噴射時期を遅らせると着火遅れ期間中の圧力および温度がすでに高くなっているため、着火遅れ期間が短くなり、その結果、予混合期間も短縮さ

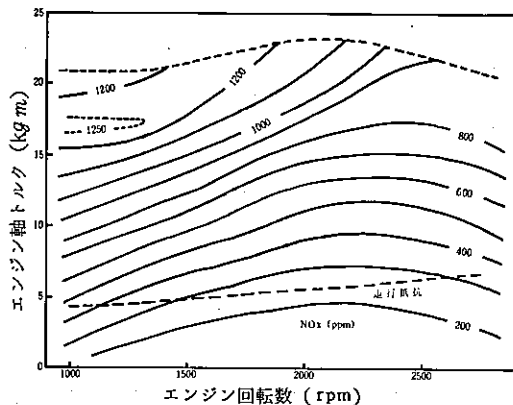


図2 直接噴射式ディーゼル機関の標準状態におけるNO_x排出特性

れNO_x生成量は少なくなる。すなわち、最大圧力が低くなり、その発生時期も遅くなるので、燃焼ガス最高温度の低下および滞留時間の短縮がなされ、NO_x生成の抑制が期待される。

まず、供試エンジンをメーカー仕様により標準状態に整備した条件でのNO_x排出特性を図2に示した。エンジン回転数に対してエンジン軸トルクを変化させたときのNO_x濃度が、表示されている。上限の破線で示した曲線が、最大トルク特性である。走行抵抗は、トップギア位置での定速走行がこの特性曲線に沿って行われることを意味する。したがって、40km/hあるいは60km/hなどの定速条件でのデータは、ここに示した面的領域上の点にしかすぎない。実際の都市走行においては、種々の加速度に応じて上限トルク曲線で示される値までのエンジン軸トルクをとりながら図示のNO_x濃度を排出することになる。なお、本実験では、エンジン回転数1690rpmが40km/hに相当する。

噴射時期を10°遅延したときのNO_xの排出特性を、図3に示した。エンジン出力は、図2の標準状態と比較すると、1000rpmで7.1%、1500rpmで7.0%、2000rpmで5.7%、2500rpmで12.7%低下している。平均的には、8%程度の低下と言えよう。その低下分だけ、エンジンの加速性能が悪化したことになる。

NO_xの最高濃度は、標準状態では1260rpmであるのに対して、噴射時期遅延では550ppmと大幅に低下しており、これはいずれも低回転数・高負荷領域に

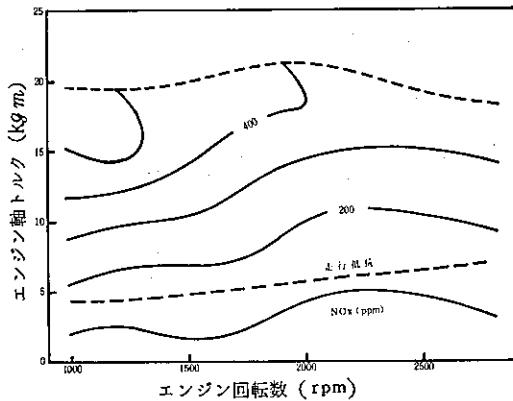


図3 直接噴射式ディーゼル機関の噴射時期遅延(10°)時におけるNOx排出特性

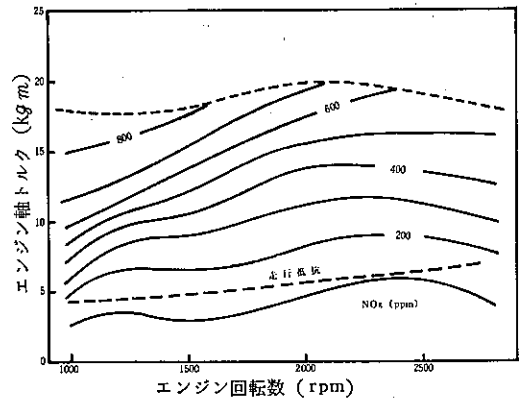


図4 直接噴射式ディーゼル機関の水噴射(20vol%)時におけるNOx排出特性

ある。また、エンジン回転数が上昇しても顕著にNOxは増加しない特性であり、エンジンの高速領域においてもNOx低減効果が見込まれる。エンジン負荷に対するNOx変動幅の大きい1000rpm付近でNOxの低減効果を読みとってみると、エンジン軸トルク5kgmのとき60.4%で、20kgmのとき44.6%であるが、全般的にみても、50%程度の低減効果があり低減手法として非常に有効であると考えられる。しかし、排出ガス温度の上昇によるエンジン耐久性の劣化および始動性悪化についての懸念は残る。

イ 水噴射

水噴射とは、吸気マニホールド、あるいは、シリンダ等へ水を噴射してシリンダ内ガスの熱容量を高めることによる燃焼温度の低下、あるいは、水蒸気による実質的な混合気の希薄化によるNOxの低下を期待する方法である。したがって、比較的多量の水添加が必要とされるため、本研究では20vol%の蒸留水を市販軽油に添加した。添加方法としては、特別な装置を要しない界面活性剤1%を混入するエマルジョン法によった。

水噴射した場合のNOx排出特性を、図4に示した。エンジン出力は、回転数1000rpmで11.9%、1500rpmで16.3%、2000rpmで13.0%、2500rpmで13.6%であり、平均的には、14%程度と言えよう。先に検討した噴射時期遅延よりも出力低下が大きい。これは本実験では、現用の燃料噴射ポンプをそのまま用いており、水添加体積量に相当するだけ、実質的に燃料供給量が

少なくなるためである。

NOx最高濃度は、800ppm程度と低下しており、全般的な排出傾向は、標準状態での低濃度領域を拡大した特性となっている。また、エンジン回転数が高くなるにつれて、エンジン負荷に対するNOx濃度の変化が小さくなっており、高回転数領域におけるより顕著な低減効果が期待される。1000rpmでの水噴射による低減効果をみると、エンジン軸トルクが5kgmで48.4%、18kgmで24.6%であり、全体的にみても25%程度である。NOx低減手法としては、先に検討した噴射時期遅延よりも劣る。また、シリンダライナーの腐食および水の混入による潤滑油の劣化は、今後の問題点である。

ウ EGR (排気再循環)

EGRは、既にガソリンエンジンのNOx低減対策として実用化され、最も重要な低減技術の一つであり、ディーゼル機関への応用が望まれている。その原理は、吸入空気の一部として排出ガスを還流し、供給気として吸入するものである。排出ガスは空気より熱容量が大きいために燃焼ガス温度を下げることで、および、酸素濃度を下げることの両面からNOxを低減させる効果がある。しかし、ディーゼルエンジンでは、空気過剰率は2~16の範囲にあり常に空気過剰のもとで燃焼が行われるので、排出ガス中にも常に17~7%程度のO₂が存在しており、⁷⁾その効果は、ガソリンエンジンの場合より低下せざるをえない。

本研究では、EGR効果検討の第一段階として、固

定内径 (20mm) のパイプで吸気および排気マニホールドそれぞれの前および後を連結し、還流装置とした。ポンプあるいは制御弁を用いておらずエンジンの排圧によって排出ガスが還元する構造である。したがって還流率はエンジン回転数に依存する。EGRの有無による吸入空気量の変化から求めた還流率は、おおよそ1000 rpmで8%, 1500 rpmで10%, 2000 rpmで14%, 2500 rpmで16%であった。エンジンを空気と燃料を吸入して、吐き出すポンプと考えれば、EGRは、そのポンプにバイパスをつけることに相当するので吸入空気量の変化から還流率が求めうることになる。

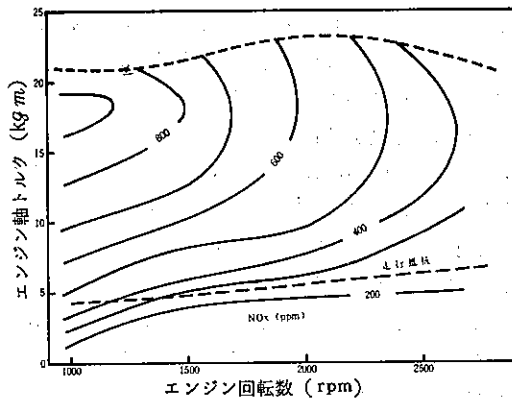


図5 直接噴射式ディーゼル機関のEGR時におけるNOx 排出特性

上述の条件でEGRを施した場合のNOx 排出特性を、図5に示した。最高濃度は、低回転数でみられ900 rpm程度と標準状態と比較し、大幅には低下していないが、高回転数領域でのNOx 低減効果が著しいことがわかる。これは、前述のようにEGR還流率がエンジン回転数に依存することにもよろう。一方、エンジン出力については、低下はなく標準状態と実験誤差以内で一致することが認められる。これは、EGRが空気過剰率を変化させる働きをするが、上述したようにディーゼルエンジンでは常に空気過剰側で運転されるため本実験でのEGR還流率では、熱効率には影響を与えないことによると思われる。

表2には、過渡運転状態を含む種々の運転条件におけるEGRによるNOx 低減効果を示した。実走行パターンのNo.5⁸⁾では、25.2%、M-15モードで

表2 ディーゼルNOx 排出量のEGR対策との関係

走行条件	標準状態	EGR付加	減少率
実走行パターン No.5	3.26 g/km	2.44 g/km	25.2%
M-15モード	4.01 g/km	2.95 g/km	26.4%
6モード	570 ppm	422 ppm	26.0%

は、26.4%のそれぞれ低減効果を有することがわかる。EGRの少なからぬ効果が、本実験で用いたような簡易な還流装置によっても得られたことになる。なお、わが国の公定法である6モード試験でも、26.0%の低減効果が認められた。

(2) 黒煙排出量への影響

噴射時期遅延、水噴射およびEGRの黒煙排出量への影響をエンジン回転数1000 rpmにおいてボッシュメータによって測定した結果を、図6に示した。ボッシュ濃度は白色のろ紙に一定量の排出ガスを吸入した

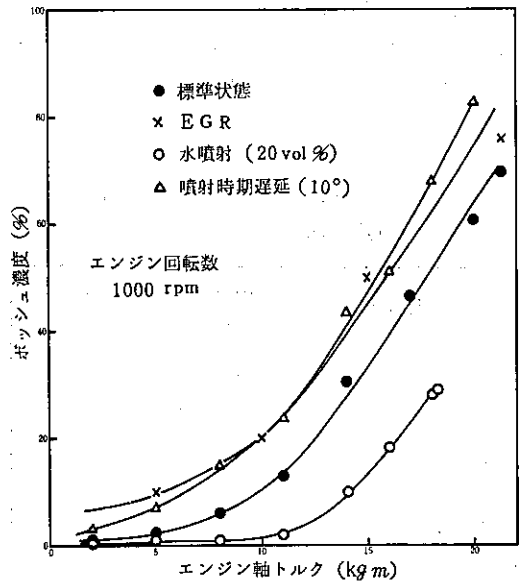


図6 直接噴射式ディーゼル機関におけるNOx 対策における黒煙排出濃度

ときに、粒子状物質が付着して生ずるろ紙の黒度を表わしている。噴射時期遅延では、全負荷時にボッシュ濃度は80%を超え、黒煙排出量が大幅に増大することがわかる。NO_x 低減には、極めて有効な噴射時期遅延も直接噴射式エンジンの黒煙排出には逆効果を有する。NO_x 排出特性のところでも述べたが、噴射時期を遅延すれば、着火遅れが短くなり、予混合燃焼時期が短くなる。その結果、拡散燃焼時期が長くなる。拡散燃焼時期では燃料蒸気と酸素との拡散混合律速によって燃焼が進行している。したがって燃料蒸気が酸素不足の状態では高温に保たれている機会が多くなり、炭素を主成分とする黒煙が生成されやすくなることになる。

EGRについても、噴射時期遅延と同程度に黒煙の排出が増加していることがわかる。EGRは、排出ガスの一部を吸気に還元する方法であり、供給気中の酸素濃度は減少する。したがって、拡散燃焼期間における燃料と空気の会合がより妨げられ、黒煙を生じることになる。

水噴射では、黒煙の排出量は大幅に低下したように見える。この機構について詳細は不明であるが、次のように説明されている。⁹⁾ すなわち、水添加した燃料をエンジン燃焼室に噴霧して燃焼させる際に、分散相として噴霧油滴中に含まれている水分が急激に沸とうし、油滴の微細化が促進される。これにより燃料と空気の混合が促されて、黒煙の発生が抑えられる。また、火炎中で炭化水素から生成する遊離炭素が水分と反応する水性ガス反応等により炭素分の燃焼が進む結果、排出黒煙量が低減するとも考えられる。

表3 ディーゼル黒煙排出量の排出ガス対策との関係

機関状態 a)	黒煙排出量 (mg/km)	増加率 (%)
標準	348	—
EGR	424	21.8
噴射時間遅延 (10°)	490	40.8

a) 走行条件：実走行パターンNo.5

実走行パターンNo.5の走行条件でのEGRおよび噴射時期遅延による黒煙排出量への増加影響を検討した結果が、表3である。EGRでは、21.8%、噴射時期遅延では、40.8%の増加をみており、NO_x 低減対策としては、いずれの方法も実用上大きな問題点を有することが結論される。

4 ま と め

直接噴射式ディーゼルエンジンをエンジンダイナモメータ上で駆動し、排出ガス中のNO_x 低減技術について、その黒煙排出量への影響も含めて検討した。ディーゼル排出ガス中には、黒煙が多量に存在し、また、O₂ が負荷率と共に変動しながら高濃度に存在することから、ガソリンエンジンの場合に比較し、NO_x 対策は容易ではない。本研究では、噴射時期遅延、水噴射およびEGRの3種類の対策技術に着目した。

噴射時期遅延が最も低減効果が顕著であり、しかし、予混合燃焼期間が短縮され拡散燃焼期間が長くなることから黒煙排出量の増加をみた。実走行パターンNo.5の走行条件では、40.8%の排出量増加があった。また、8%程度の出力低下が認められた。

水噴射では、黒煙は増加せずかえって減少したが、約14%の出力低下は避けられなかった。NO_x の低減効果は25%程度であった。実用化にあたってはエマルジョン燃料の補給あるいは寒冷時の水分凍結等の問題があろう。

EGRでは、本研究で用いた簡易な方法でも都市走行条件で25%程度のNO_x 低減効果を有することが判明し、EGR対策がディーゼル車についてもNO_x 対策として重要なことがうかがわれた。しかし実用化に当っては、本研究でも認められた黒煙排出量の増加および還流ガスによるエンジンへの影響等解決すべき問題は少なくない。

本研究を遂行し、とりまとめるに当っては、清掃局企画部井上浩一、東京電機大学学生持塚多久男および平尾真一の諸氏に多大な御援助をいただいた。ここに深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 東京都公害局大気保全部：自動車公害ハンドブック (昭和55年3月) P. 51.
- 2) 井上浩一ほか：渦室式ディーゼルエンジンの汚染

- 物質排出量の検討 - NO_x を中心にして - , 東京都公害研究所年報, 1980 年版, 21, (1980).
- 3) 芳住邦雄ほか: 直噴式ディーゼルエンジンの排気特性, 東京都公害研究所年報, 1981 年版, 21, (1981).
 - 4) Federal Register, Standard for Emission of Particulate Regulation for Diesel-Fueled Light-Duty Vehicles and Light-Duty Trucks, Vol. 45 No. 45 (March 5, 1980).
 - 5) JIS D 1101 - 73 ディーゼル自動車排気煙濃度測定方法.
 - 6) JIS D 8004 - 71 ディーゼル自動車排気煙濃度測定用反射式スモークメータ.
 - 7) 芳住邦雄ほか: 過渡運転時における直接噴射式ディーゼル機関の NO_x, 大気汚染学会誌, 15, 374 (1980).
 - 8) 芳住邦雄ほか: 東京都内走行パターンの解析, 公害研究所資料 1-4-18 自動車排出ガスに関する調査研究, P. 1, (昭和52年3月).
 - 9) 三橋一哉ほか: 乳化燃料のディーゼル機関適用に関する研究, 三菱重工技報, 15, 238 (1978).