

ディーゼル機関のNO_xおよび黒煙対策技術の検討

芳住 邦雄 梅原 秀夫 石黒 辰吉

1 はじめに

大気汚染発生源のうち、環境中のNO_xおよび粒子状物質に対する寄与の少なくないディーゼル排出ガスは、他の発生源に比較しその対策技術の進展が、現状では充分でない。わが国においてディーゼル排出ガス中のNO_x規制は、いわゆる第二段階規制値が設定された現今では、最終目標値に達したとされているが、その都市全体の排出量における削減効果は、必ずしも充分であるとは言いがたい。また、黒煙排出量は、昭和47年以来、ポッシュ濃度50%のままであり、いわば第一段階にある。米国におけるディーゼル黒煙の質量基準の排出規制が、1982年に小型車に対し0.373 g/Kmと設定され、1985年には乗用車0.124 g/Km、貨物車0.162 g/Kmに強化され¹⁾、また、1986年から大型車にも0.25 g/BHP-hrの規制²⁾がなされることになっており、わが国での排出規制の一層の促進が望まれよう。

ディーゼル排出ガス対策に関する基礎的研究として、これまで当所では、エンジンダイナモメータを用いて、昭和53年度には、副室式エンジンの一種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ている。昭和54年度には、大型トラックに多く装着されている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⁴⁾。また、昭和55年度には、直接噴射式エンジンに対するNO_x対策技術としてEGR(排気再循環)、噴射時期遅延および水噴射に着目し、その低減効果を黒煙排出量への影響をも含めて検討した⁵⁾。別途、硫酸塩の排出についても詳細に明らかにした⁶⁾。

本研究では、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、前年度のNO_xおよび粒子状物質低減手法の検討に引き続き、前報⁵⁾において有効性を報告したEGR対策について改良を行った。また、EGR、水噴射および噴射時期遅延の3種類の対策を単独ではなく、複合して作用させた場合の効果を明らかにすることを目的とした。本報告は、ディーゼル排出ガス対策を確立するための研究の一環であり、対策技術の有用性およびマイナス面の効果を検討することを主眼とした。

2 実験方法

排気容量3.6ℓ、4サイクル、4気筒の直接噴射式ディーゼルエンジン(いすゞ4BB1)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。

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MEXA-C1型NO_x計を用いた。粒子状物質の測定には、わが国の公定法であるポッシュ式スモークメータ⁷⁾を用いた。ポッシュ法では、300mlの排出ガスを直径3cmのフィルターでろ過吸引し、粒子状物質によるフィルターの黒化度を測定するものである。また、比較のため、米国EPAの規定する希釈サンプリング法¹⁾に準じて、直径45cm長さ5mの希釈風洞を用いた。水分の凝縮を避けるため6~15倍に希釈された排出ガスを、テフロンフィルター(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秤量した。

3 実験結果および考察

(1) 標準状態

供試エンジンをメーカー仕様により標準状態に整備

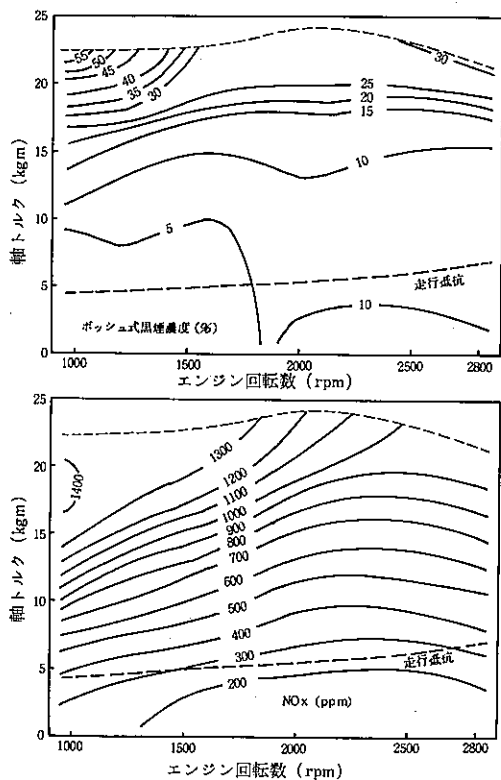


図1 標準状態におけるNOxおよび黒煙排出特性

した条件でのNOxおよび黒煙の排出特性を、図1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NOxおよび黒煙濃度が、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り、これ以上の出力トルクは、本供試エンジンでは発生されない機構となっている。走行抵抗特性は、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表わす。この走行抵抗の上側が加速運転時に使用される領域であり、下側が、減速運転時に使用される領域である。実際の都市走行においては、種々の加速度に応じて上限の最大トルク特性で示される値までの軸トルクをとりながら、図示のNOxおよび黒煙濃度を排出することになる。本実験では、エンジン回転数1690 rpm および 2540 rpm が、それぞれ、40 km/h および 60 km/h に相当するが、これらの車速における定速条件でのデータは、上述したようにエンジンの面的使用領域の、僅かに点データにしかすぎない。すなわち、図1に示されているようにNOxは1400

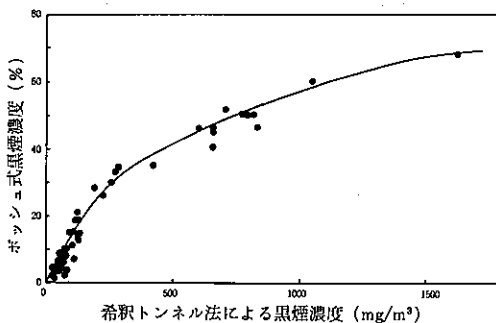


図2 ディーゼル黒煙濃度の希釈トンネル法およびポッシュ式による比較

ppm、黒煙は55%まで、最高値として変化するにもかかわらず、定速条件での実験結果では、NOxが200～300 ppm、黒煙濃度が2～7%程度の値が観察されるだけであることがわかる。このように、定速条件による限られた測定値を得るのみでは、複雑な運転状態となる都市走行の実態を把握するには不十分と考えられ、本研究では、面的な全エンジン駆動条件での排出特性を把握することに力点をおいた。

黒煙濃度の測定にポッシュ式スモークメータを用いた結果をも、図1に示したが、これは、黒煙による捕集フィルターの黒化度を一定光源からの光の反射率によってパーセントで示したものであり、質量濃度を直接求めるものではない。希釈風洞を用いたロウポリウムフィルターによる質量濃度の測定結果と比較したのが、図2である。ポッシュ法は、わが国の公定法⁷⁾であり簡便な測定方法であることを特徴とするが、このポッシュ法による測定値によっても質量濃度と関連づけることが充分可能であることが、確認されたことになる。従来より、CRCによるポッシュ法測定値を質量濃度に換算する係数が示されているが、⁸⁾ 本研究の結果は、それらと大略一致すると言いうる。また、ポッシュ法では、フィルターの材質ならびに形態および吸引速度によって黒煙粒子の付着の状態に差異が生じることが指摘されているが、⁹⁾ 本研究でのバラツキもそうした要因に基づくものであろう。

黒煙濃度の特性は、負荷率が増加するにつれて増加

し、1000rpmで50%以上となっていることがわかる。全負荷での排出基準は、最高出力回転数の40%および60%の回転数で黒煙濃度50%と定められており、本供試エンジンは、こうした規制値を満足してはいる。

(2) EGR (排気再循環)

EGRとは、吸入空気の一部に排出ガスを還流して、燃焼過程の温度および酸素濃度を低下させ、NO_x生成を抑制するものである。前年度事業では、EGR検討の第一段階として8~16%の還流率の装置を試作し、その有効性を確認したが、本年度は、還流率の増加をはかる装置の改良を行った。EGR装置は、固定径のパイプで吸気および排気マニホールドの前後を連結する構成となっている。ポンプあるいは制御弁を本研究では用いておらず、エンジンの排圧によって排出ガスが、吸気側に還流し、還流率はエンジン回転数に依存する。EGR還流率は、EGRの有無による吸入空気量の変化から求められ、図3に示すようにエンジン回転数の増加と共に増大し、13~23%の範囲にあった。なお、エンジン負荷による影響は、ほとんど認められなかった。ガソリンエンジンと異なり、気化器を用いていないために、吸入空気量がエンジン負荷に依存しないことによるものである。

こうしたEGR条件でのNO_xおよび黒煙排出特性を、図4に示した。NO_xの減少効果は、低負荷時に

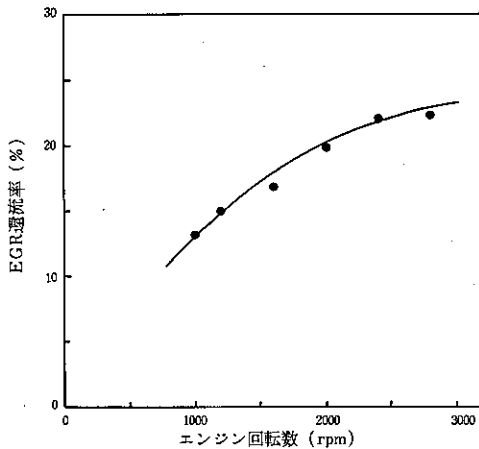


図3 EGR還流率のエンジン回転数との関係

においては10%以下で顕著ではないが、高負荷時には35~50%にも及ぶ大幅な減少率を示すことがわかる。これは排出ガス中に存在する酸素濃度が、おおよそ7~17%の範囲にあり、¹⁰⁾ 負荷率が増加するほど、酸素

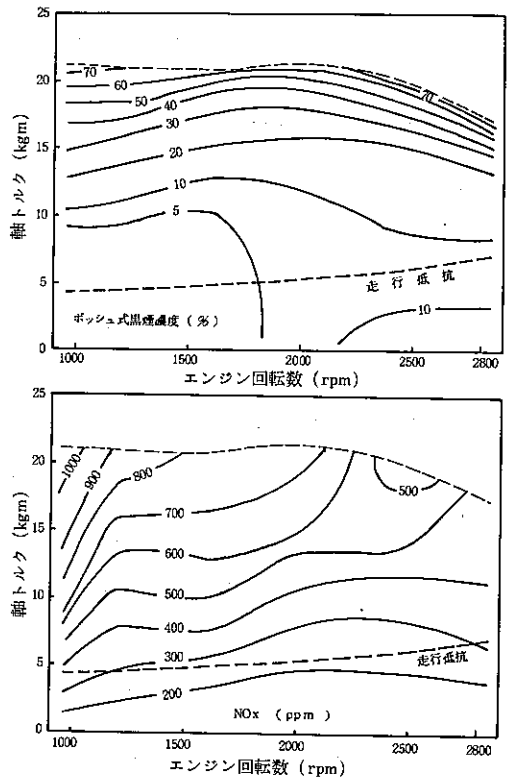


図4 EGR時におけるNO_xおよび黒煙排出特性

濃度が減少していることによる。すなわち、高負荷時ほど再循環される排出ガス中の酸素濃度は低く、吸気中の酸素濃度を下げてEGR効果を増大させるためである。NO_x排出特性の実態は、図1に示されているように負荷率の高いほどNO_x濃度は高くなっているため、高負荷時ほどEGR効果が有効であるこれらの特性は、実用上も有意義なものと考えられる。

一方、黒煙濃度は、図4に示したように高負荷時には、急激な増加をみており、全負荷時には、70%以上に及んでいる。これは、全負荷時50%という規制基準を超過しており実用化におけるネックとなる。低および中負荷時の黒煙濃度の増加は、それほど著しくはない。前述のように、EGRでは、吸気中の酸素濃度を低下させる。黒煙濃度は、高負荷条件と対応する空気過剰率約2以下で急激に増加する排出特性となっているため、⁹⁾ NO_xの場合と逆の効果として、EGRを加えると高負荷時になるほど黒煙排出量は、増加することになる。

出力低下は、5.80～18.4%認められ、高回転時ほど著しかった。これは、図3に示したEGR還流率の高回転数時での増加傾向と対応している。燃料の供給量は変化していないのであるから空気過剰率低下による熱効率の大幅な低下といえる。出力の低下は、加速に使用しうる余力が減少し、それだけ、加速性能が悪化することを意味する。この対策としては、エンジン自体を若干大型化することによって出力低下を補うことも可能であろうが、熱効率を低下させないよう燃焼過程における空気流動の増加などの基本的な対策技術の確立が求められる。

EGRは、本研究でも示されたように、NO_x対策として有効性の高いものであり、黒煙排出との均衡を考慮するなかで今後実用化がはかられるべき不可欠の対策技術と言えよう。

(3) 3種複合対策

これまで述べたEGR対策以外に、水噴射および噴射時期遅延が、NO_x対策に有効であると考えられる⁵⁾。水噴射とは、燃料に20vol%の蒸留水を界面活性剤と共に添加し、供給気の熱容量を高め、NO_x生成を低下させようとするものであり、NO_x低減効果は平均的におおよそ20%であった。表1に示すように、6モード条件では30.4%の減少率を示し、EGR時の42.7%よりやや劣る。一方、出力低下が著しく18%程度の減少をみた。黒煙については、ボッシュ式濃度での非常に著しい低下がみられ、全負荷時でも10%以下の測定値が多い特性となっていた。その理由として、油滴の微細化および水性ガス反応などが挙げられるが¹⁾詳細は明らかでない。

噴射時期遅延では、標準状態から噴射時期を10度遅らせ、着火遅れ期間を短くし、高濃度のNO_xが発生する予混合期間を短くすることを意図している。表1の6モード試験結果からもわかるように、3種の対策

表1 ディーゼル6モードにおけるNO_x特性

	NO _x (ppm)	減少率(%)
標準	576	—
EGR	330	42.7
水噴射	401	30.4
噴射時期遅延	256	55.6
3種複合対策	92.5	83.9

の中でNO_x低減は、最も著しい。ほぼ全エンジン使用領域で、50%以上の低減効果があり、60%も低下している条件もある。出力の低下は、7.1～10.5%であり、3種類の対策技術のなかでは、最も少ない。黒煙濃度は、EGR時ほどではないが、著しく増加した。規制基準の全負荷時50%は、かろうじてクリアしているが実用上には、大きな問題点である。増加の原因は、噴射時期遅延により拡散燃焼期間が長くなったことによる。

以上の3種類の低減対策を複合的に用いたときの効果を検討したのが、図5である。NO_x低減効果は、きわめて顕著であり、80%程度の低減効果が認められ、対策技術として有用であると思われる。しかしながら、出力低下も著しく、21.9～35.3%の大幅な低下をきたした。特に、高回転時の低下が大幅である。これだけ低下すると、加速性能はきわめて悪化し、既報の都

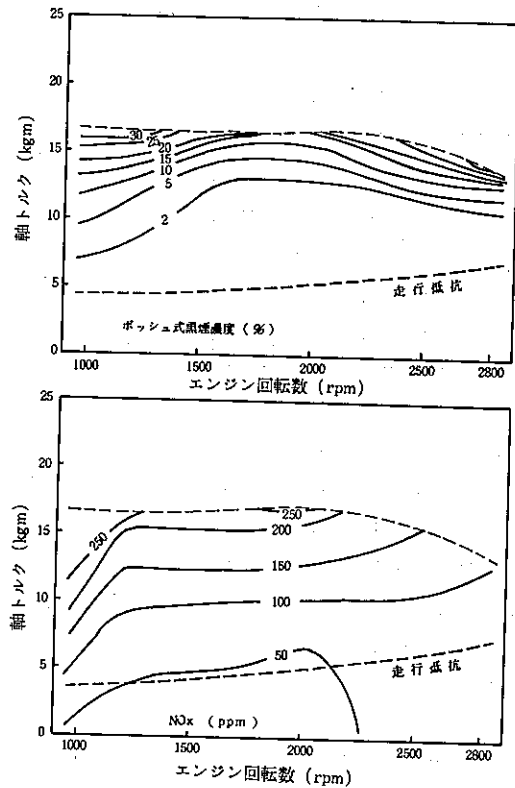


図5 3種複合対策時(EGR, 噴射時期遅延および水噴射)におけるNO_xおよび黒煙排出特性

市走行パターン¹²⁾に追従して運転するのは困難であった。表1に示したように、6モード条件では83.9%ものNO_x低減効果が、3種複合対策により認められた。

黒煙濃度は、図5に示したように、低負荷では標準およびEGR時よりも低濃度であるが、高負荷時では、かえって、増加している。EGRおよび噴射時期遅延による黒煙増加要因を、水噴射による低減作用によって抑制されるが、高負荷時には空気過剰率減少による濃度増加が優勢となるため、全体として、黒煙濃度は若干増加するものと考えられる。

以上のように、複合対策では、NO_xの減少は著しいが、黒煙の排出には問題が残されており、出力低下の問題と相まって実用上の課題は多いと結論される。

なお、表2には、アイドリング時における対策技術との関係を整理したが、噴射時期遅延時の黒煙増加および3種複合時のNO_x低減が非常に著しいことがわかる。アイドリングの都市走行状態への寄与の少ないことはすでに報告した⁴⁾

表2 アイドリング時におけるNO_xおよび黒煙濃度

	標準	EGR	水噴射	噴射時期遅延	3種複合対策
NO _x (ppm)	180	139	93.5	69.5	12.5
ポッシュ式 スモーク 濃度 (%)	1.0	1.0	1.0	4.0	1.0

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および黒煙排出について排出特性を求め、低減対策の効果を検討した。加速、定速および減速の全エンジン使用領域にわたって、NO_xは化学発光法、黒煙はポッシュ式スモークメータで測定した。ポッシュ法と希釈風洞法との関連が検討された。

本年度での装置改良により、EGR率は増加し、噴射時期遅延によるNO_x低減に匹敵するものであり、対策技術としての重要性が確認された。また、水噴射でも、相当なNO_x低減が認められたが、出力の低下も大きかった。これらの3種類の対策技術を複合して

実施した場合には、大幅なNO_x低減をみたが、出力低下が著しく実用上には大きな問題点を有していることが判明した。

これらの対策技術の黒煙排出への影響を検討したところ、EGR時には、黒煙の増加は著しく現行の排出基準をオーバーすることが認められた。噴射時期遅延によっても濃度の増大をみた。水噴射時には、黒煙濃度は減少し、3種複合対策時にも、低負荷時には減少効果が、認められた。しかし、高負荷時には、黒煙濃度の増加をみた。

参 考 文 献

- 1) Federal Register: Vol. 45, No. 45 (Mar. 5, 1980).
- 2) Federal Register: Vol. 46, No. 4 (Jan. 7, 1981).
- 3) 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)。
- 4) 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)。
- 5) 芳住邦雄ほか：ディーゼル機関のNO_x対策と黒煙排出量、東京都公害研究所年報、1982年版、14、(1982)。
- 6) 芳住邦雄ほか：ディーゼル機関による硫酸塩、大気汚染学会誌、17、144、(1982)。
- 7) 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。
- 8) SAE J 255a: Diesel Engine Smoke Measurement (1978)。
- 9) 倉林俊雄ほか：ろ紙式スモークメータの読み及ぼす各種因子の影響、自動車技術会論文集、No. 21、81、(1980)。
- 10) 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)。
- 11) 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)。
- 12) 芳住邦雄ほか：東京都における代表的走行パターン、第18回大気汚染学会予稿集 No. 739 (1977)。