

論文

直噴式ディーゼルエンジンへのEGRシステムの適用

— その1 NO_x低減効果 —

福岡三郎 飯田靖雄 舟島正直
横田久司 竹永裕二 梅原秀夫

要 旨

排気量3.6ℓの直噴ディーゼルエンジンに電動式EGRシステムを適用し、NO_x低減状況を調査した。

調査は、EGRの車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される新しい規制モードにおけるNO_x低減効果と、同じくエンジン負荷、回転数領域別のNO_x低減効果とを明らかにすることを目的として行った。調査に適用したEGR率は、20%と40%とした。

調査の結果、新しい規制モードにおけるEGRによるNO_x低減率は、EGR20%で58%、同じく40%で79%であった。しかし、現行のディーゼル車に適用されている6モードの加重平均濃度方式で評価した場合、上記低減率は16~17%低くなるのが分かった。

また、エンジン使用領域別では、高負荷領域ほどNO_x低減割合が著しく大きいのが、都市実走行モードにおいて出現頻度の多い低負荷、低回転領域でのNO_x低減率は低かった。

1 はじめに

ディーゼル車は、その燃焼特性すなわち、①ガソリン車に比べ酸素過多の状態では燃焼していること、②燃料軽油中のS分の含有率が多いこと、③黒煙の排出がさげられないこと等の理由からEGR（排出ガスの一部をエンジンに還流しNO_xを低減する）によるNO_xの低減が、エンジン負荷の軽い乗用車を除いて行われていない。

しかし、大気中のNO_x汚染は、依然深刻な状況にあることから、平成元年12月中央公害対策審議会は、大型ディーゼル車を中心としたより厳しいNO_x低減目標を答申した¹⁾。この目標をクリアするためには、ディーゼル車では従来から行われてきた、NO_x低減技術（燃料噴射時期遅延を中心とした対策）のみでは対応しきれないことが想定され、EGR等の新しいNO_x低減技術の実用化が望まれている。また、一方では軽油中のS分の含有率の低減化計画が進められていること、エンジンオイルやフィルターの改良などエンジン耐久性を損なう要因を克服する技術の開発が進んでいることなど、EGRの実用化に明るい見通しも見られている。

このような状況のなかで、筆者らは、今後のディーゼル車のNO_x低減技術として期待されるEGRシステムを、

直噴式ディーゼルエンジンに適用し、そのNO_x低減効果について検討したので報告する。

2 実験方法

(1) 供試エンジン

表1に実験に用いた直噴式ディーゼルエンジンの諸元を示す。

(2) 実験に使用した機器

ア エンジンダイナモメータ

(株)明電舎製、TWDI型、動力計型式：渦電流式、
吸収能力：110Kw、動力計制御方式：速度、トルク
走行抵抗、回転速度：2,000~7,000rpm

イ 排出ガス分析計

(株)堀場製作所製、MEXA8120D型

主要諸元を表2に示す。

ウ EGRシステム

(株)堀場製作所製：VCU-01型、MEXA1120

EGRシステムの概要を図1に示す。システムに用いているバルブは電動式で、図に示した制御機構からの指令信号によって作動する。制御システムでは、EGR率を任意に設定でき、EGRバルブの開放のみでは所定の

表1 供試エンジンの諸元

型 式	4 B E 1
燃焼室型式	直接噴射式
排 気 量	3636cc
圧 縮 比	17.5
最 高 圧 力	105/3500
最大トルク	22.5/2000
変 速 機	前進5段

表2 排出ガス分析計の諸元

項目/区分	測定原理	レンジ数	測定範囲
CO	NDIR	4	0～10%
CO ₂	NDIR	2	0～16%
NO _x	化学発光法	9	0～5000ppm
NO	NDIR	2	0～3000
T・HC	FID	9	0～5000
O ₂	磁気式	2	0～16%

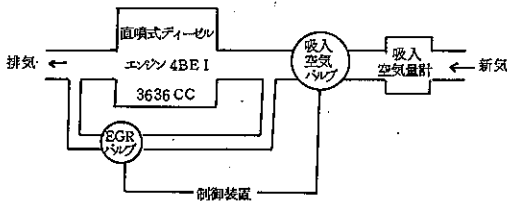


図1 ERGシステム概要図

EGR率が得られない場合、吸入空気バルブを閉じて設定したEGR率を確保するようにしている。

EGR率(λ)は、次式で算出した。

$$\lambda = \frac{\delta - \epsilon}{\delta} \times 100$$

δ : 標準状態の吸入空気量
 ϵ : EGR時の吸入空気量

3 実験内容

(1) 平成元年12月の中央公害対策審議会で答申され、平成6年から実施が予定されている、車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される規制モードにおけるEGR20%、40%のNO_x低減効果調査。

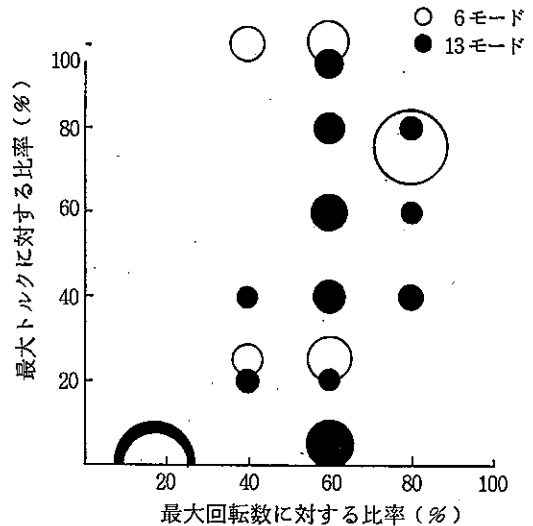
(2) 供試エンジンのエンジン負荷(1/8～8/8),

回転数領域(1,000～3,500まで500rpmきざみ)別のEGR20%、40%のNO_x低減効果並びに燃費、出力影響調査。

4 実験結果と考察

(1) 規制モードにおけるNO_x低減効果

平成元年12月中央公害対策審議会は、自動車排出ガスに関する新たな規制強化の方針を答申した。答申では、NO_xに対する新たな規制強化の低減目標を設定するとともに、規制モードについても変更すべきことを提言している。それによると、車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される規制モードは、エンジン負荷と回転数の組み合わせが図2に示すように現在の6モードから13モードに変更になる。新しい規制モードの特徴は、モードの数が増加したこと、アイドリングの比率を高めていること、規制単位を汚染物質加重平均濃度(ppm)からエンジン仕事当たりの汚染物質排出量(g/Kw・h)としたことなどである。



注1. 円の大きさは重み係数を表わす。
 2. 13モードではアイドリング2回分を合計している。

図2 ディーゼル車新旧規制モードの比較

まず始めに供試エンジンの、現行規制モードである6モードの測定結果(NO_x)を、モード別に図3に示す。

NO_xの6モード値401ppmは、このエンジンの適用規制年次である58年規制の排出許容限度520ppmをかなり下回っており、次の平成元年規制の排出許容限度をもく

リアしている。NOx濃度を各構成モード別にみると、モードNo.6（エンジン負荷75%、回転数80%）の寄与率が著しく大きく（構成比率33%）、次いでNo.2（負荷100%、回転数40%）の寄与率が大きい。

次に、このエンジンに新しい規制モードを適用した実験結果について検討する。

車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される新

モードNo.	エンジン条件		NOx 濃 度 (ppm)					
	負荷 (%)	回転数 (%)	20	40	60	80	100	120
1	0	アイドリング	[Hatched pattern]					
2	100	最高出力時の回転数	[Hatched pattern]					
3	25	40	[Hatched pattern]					
4	100	60	[Hatched pattern]					
5	25	60	[Hatched pattern]					
6	75	80	[Hatched pattern]					

図3 供試エンジンの6モード、モード別NOx濃度

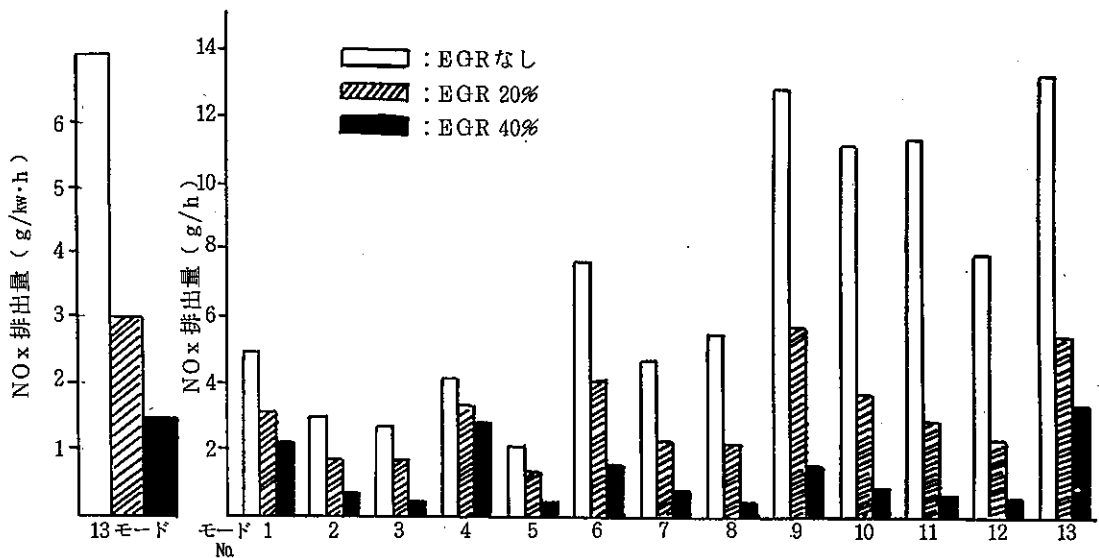


図4 新しいディーゼル規制モード、構成モード別NOx排出量

しい規制モードについては、まだ、その測定方法 (TRAIAS) が定められていないので、本実験では、既存の公定法²⁾ (ディーゼル6モード測定法) を準用し排出ガス測定を実施した。また、エンジン出力の算定法については、多くの要因が関与しているものと思われるが、算定方法に取り決めがないので、エンジンダイナモメータ測定結果から単純に出力を算出している (従って、変速機などの伝達ロスなども全く補正していない)。

図4に新しい規制モードにおけるエンジン標準状態、EGR20%、同40%の3条件のNOx排出量を、構成モード別に示す。NOx排出量 (g/Kw·h) は、次式で求めた。

$$g/Kw \cdot h = Vg \times \frac{46}{22.4} \times NOx \times 3,600 \times \frac{1}{P} \times 10^{-6} \times K \times Kh$$

- ここで、
- Vg : 吸入空気量
 - NOx : 排出ガス中NOx濃度 (ppm)
 - P : エンジン出力 (Kw)
 - K : 乾きガス量補正值
 - Kh : 湿度補正

このエンジンの標準状態におけるNOx排出量は6.9g/Kw·hで、答申の車両総重量2.5t以上の直噴式ディー

ゼル車に対する規制短期目標値6.0g/Kw・hを15%程度上回っている。

図4に見るとおり、EGRによるNOx低減効果は顕著で、モード全体でEGR20%で約58%、同40%で約79%のNOx低減率が得られている。EGR20%で答申の短期目標値、長期目標値をクリアできている訳であるが、もちろんEGRを行うことによって、燃費悪化、出力低下、黒煙増加、エンジン摩耗などのデメリットの発生が予想され、EGRの実用化はそう簡単ではない。

しかし、以上の実験結果から見て、デメリットを克服さえすれば、EGRはディーゼル車のNOx低減システムとしてかなり有望な手法であると思われる。

構成モード別のNOx低減率を見ると、エンジン高負荷、高回転領域であるNo.11, 12のモードのNOx低減が著しく、低負荷、低回転領域（No. 2, 5, 6）でのNOx低減度はやや小さい。

EGRによりもたらされるデメリットのうち燃費、出力に与える影響については、表3のとおりである。表3に見るとおり、燃費はEGR量が増す毎に悪化しており、EGR40%では10%に近い燃費増加率である。出力は、EGR20%ではそれほど影響はないが、EGR40%では16%に及ぶ出力の低下が見られている。

さて、EGRによるNOx低減効果を評価する場合、排出ガス中のNOx濃度の低減状況のみで比較することは、真のNOx低減状況を表していない点に注意する必要がある。一般的にNOx排出量は、前述の計算式で算出される。この式で使われている吸入空気量（排出ガス量とほぼ同じとみなされる）は、EGR時は、その時のEGR量によって変動する。従って、EGR時のNOx濃度の変動のみでNOx排出量の変動を把握することは出来ないのは当然である。

表3 規制モードにおける燃費、出力低下状況

項目	項目	標準状態	EGR 20%	EGR 40%
燃費	g/ps	55.1	58.2	72.1
	増加率%	—	5.6	30.8
出力	ps	17.9	17.9	15.0
	低下率%	—	0	16.1

このような観点から考えると、現行のディーゼル6モードで用いられている加重平均濃度方式は、排出ガス量の

観念が入っていないことから、EGRシステムにとって、NOx低減度合評価上やや不利になることは否めない。

例えば、前述のディーゼル新モードにおける標準状態、EGR20%、同40%それぞれのNOx加重平均濃度方式と仕事当たり排出量方式によるNOx低減率を算出すると表4のようになり、加重平均濃度方式ではNOx低減率を仕事当たり排出量方式に比べて16%~17%低く評価していることが分かる。

このように平成6年以降車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される規制モードの改定は、EGRシステムによるNOx低減状況を的確に評価しうるものであり、EGRシステムの実用化に当たって、不利な条件をなくしたことになる。

表4 加重平均濃度方式と排出量方式の低減率比較

項目 区分	加重平均濃度方式		排出量方式	
	NOx濃度	低減率	排出量	低減率
標準状態	308.9	—	6.931	—
EGR 20%	179.1	42.0%	2.944	57.5%
EGR 40%	116.1	62.4	1.449	79.1

低減率は(標準状態-EGR)÷標準状態で算出

(2) エンジン使用領域別NOx低減効果

ア 供試エンジンのNOx排出特性

図5に負荷別（4段階）のエンジン回転数とNOx濃度との関係、また、図6に同じくエンジン回転数と仕事当たりのNOx排出量との関係を示す。

図5、図6に見るとおり、エンジン負荷、回転数とNOx排出量（濃度）との関係には、次のような特徴が見られる。

- ① 負荷が増す毎にNOx濃度は高くなるが、仕事当たり排出量では負荷による差異がそれほどなく、低負荷（1/4）で排出量が若干多い程度である。
- ② エンジン回転数との関係では、3,500rpmの場合は別として、各負荷ともにエンジン回転数が少ない程NOx濃度が高く、排出量も多い。

さらに、エンジン負荷及び回転数とNOx排出量との関係を等量線を描いて検討してみる。図7に縦軸を負荷、横軸をエンジン回転数に取った場合の仕事当たりNOx等排出量線を示す。図7に見るとおり、仕事当たりの

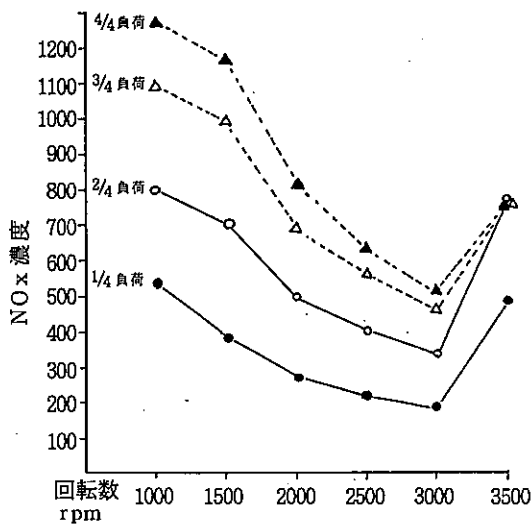


図5 負荷別NOx排出特性 (排出濃度)

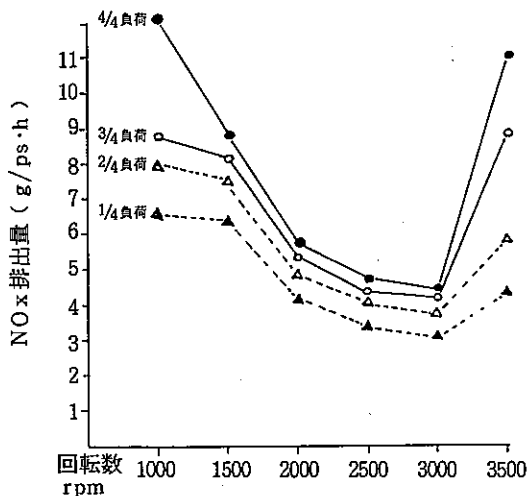


図6 負荷別NOx排出特性 (排出量)

NOx排出量は、低負荷、低回転領域と低負荷、高回転領域で著しく多く、排出量の少ない高負荷領域の3~4倍の排出レベルとなっている。

都市の実走行モードにおいては、低負荷、高回転領域のエンジン使用頻度はそれほど多くないが、低負荷、低回転領域のエンジン使用頻度は、渋滞走行モードを中心にかなり多いことが想定される。図8、9は、昭和61年

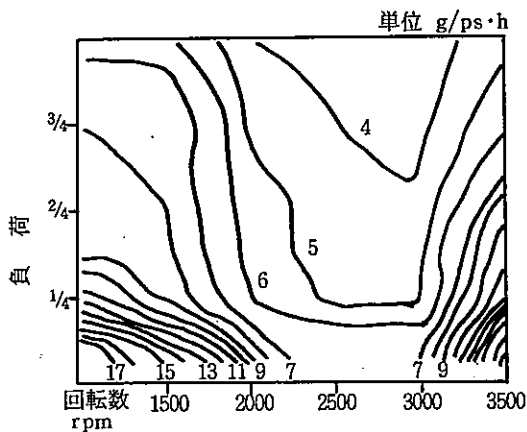
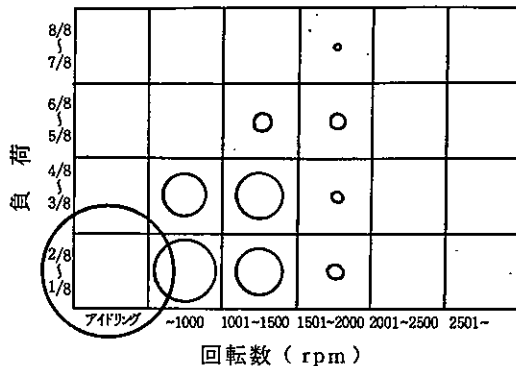


図7 NOx等排出量線 (標準状態)

度に環境保全局大気保全部が(財)日本自動車研究所に委託して行った、排出ガス削減対策手法別実測調査結果から、積載量3.25tの直噴式ディーゼルトラックを対象に東京都実走行モードNo.2, No.10についてエンジン負荷、回転数別の発生頻度を調べたものである。実車の場合、ギアなどによる伝達ロスが1~2割生じるもので、エンジンダイナモメータ実験データに当てはめることは難しいかもしれないが、おおよその傾向として、実走行No.2のような平均車速の遅いモードでは、アイドリングと回転数1,000~1,500rpmの低負荷領域に出現頻度が著しく多いこと、また、実走行No.10のようなかなり平均車速の早いモードでも、回転数1,500rpm前後の負荷領域の頻度が多いことなどが指摘できる。このような低負荷、低回転



注 円の大きさは発生頻度(%)を表わす。

図8 実走行パターンNo.2におけるエンジン負荷、回転数別発生頻度

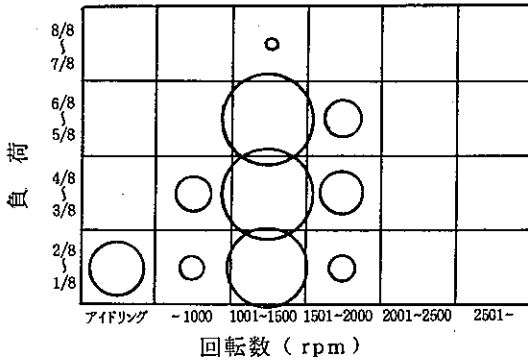


図9 実走行パターンNo10におけるエンジン負荷、回転数別発生頻度

領域の出現頻度の高い走行モードでは、必然的にNOx排出量が多くなる訳で、低負荷、低回転領域のNOx低減が重要なこととなる。

イ EGRによるNOx低減効果

図10にEGR20%におけるNOx等排出量線を示す。図7の標準状態の等排出量線と比べて、各領域ともかなりNOx低減状況が顕著である。領域別のEGR効果をはっきりさせるために、標準状態とEGR20%のNOx排出量比を求め、等比線として図11に示す。図11に見るとおり、NOx低減が著しいのは高負荷、高回転並びに高負荷、低回転領域であり、NOx排出量の多い低負荷、低回転領域での、NOx低減割合は悪く、低減率が50%を超えない領域がかなり見られる。

前述のように、新しいディーゼル車に対する規制モードにおけるEGR低減効果は、EGR20%で58%という結果を得ているが、実走行モード特に平均車速の遅い領域では、これらの低減効果もやや割り引いて考える必要がある。

次に、図12にEGR40%におけるNOx等排出量線を示す。図に見るようにNOx低減量は著しいものがあり、高負荷領域では低減率が90%を超えているが、出力低下などの悪影響も大きい。

エ EGRの燃費、出力低下に及ぼす影響

図13にEGRによる燃費増加率を示す。低回転領域ではEGR40%の全負荷を除いて、燃費増加率は10%以下で、特にEGR20% 1/2負荷では、2,000rpmまで標準状態とほとんど差がない。都市実走行モードで出現頻度の高い低負荷、低回転での20%程度のEGRは、燃費的には

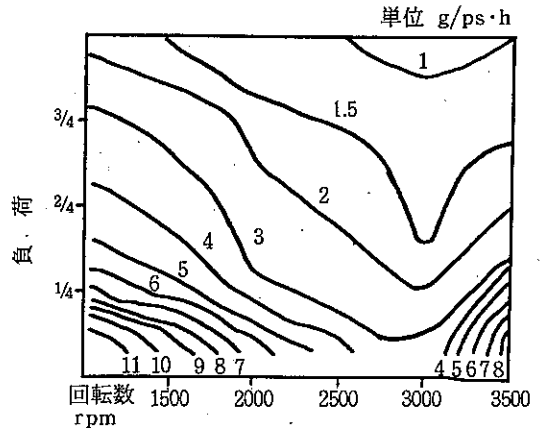


図10 NOx等排出量線 (EGR20%)

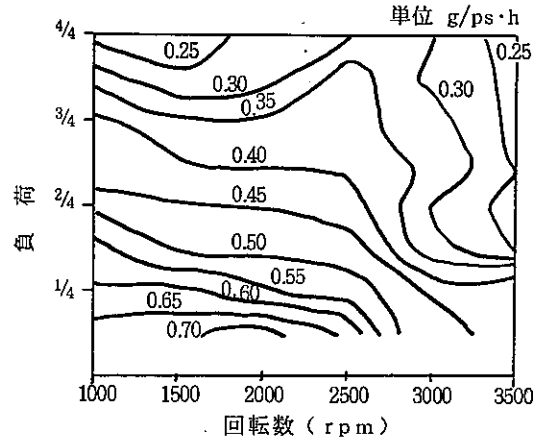


図11 NOx等比線 (EGR20%/標準状態)

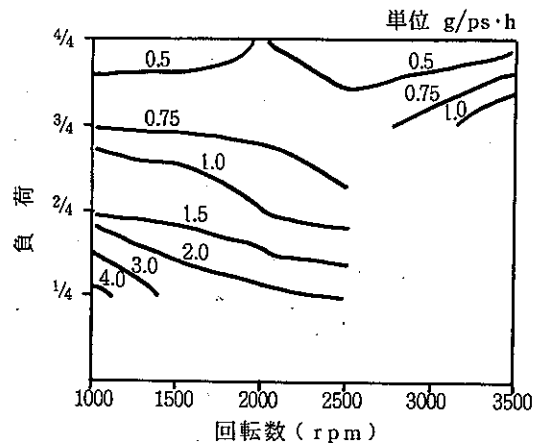


図12 EGR40%のNOx等排出量線

それほど支障を与えないものと思われる。

次に、EGRによる出力の低下状況を図14に示す。EGR 40%では、1/2負荷、全負荷ともに全回転領域で低下率が20%を超えている。それに対してEGR20%では、各負荷ともに回転数2,000rpmまで出力低下は10%以下になっている。

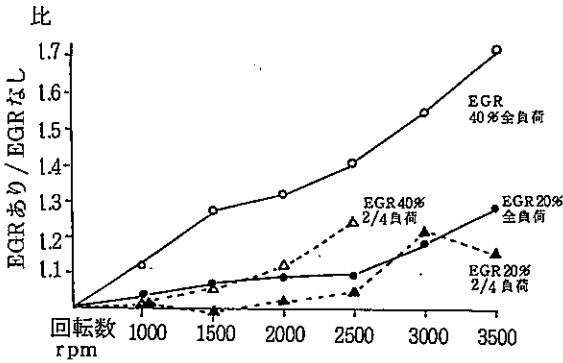


図13 EGRによる燃費増加率

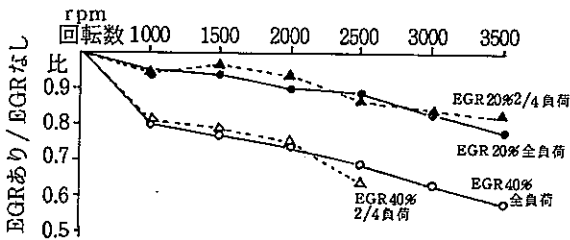


図14 EGRによるエンジン出力低下状況

5 まとめ

排気量3.6ℓの直噴式ディーゼルエンジンに電動式EGRシステムを適用し、NOx低減について検討した結果次のようなことが分かった。

- ① 車両総重量2.5t以上のディーゼル車に適用される新しい規制モードにおけるNOx低減率は、EGR20%で58%、同40%で79%であった。
- ② 現行のディーゼル車に適用されている加重平均濃度の規制方式では、EGRによるNOx低減効果は、排出重量方式に比べやや低く評価されることが分かった。
- ③ EGRによるNOx低減割合は、高負荷領域ほど著しく、都市実走行モードに出現頻度の多い低負荷、低回転領域での低減割合は低い。従って、前述の新しい規制モードにおけるNOx低減率も都市実走行モードにおいてはやや低く見積る必要がある。
- ④ EGRによる燃費及び出力低下などへの悪影響はEGR40%ではかなり顕著であるが、EGR20%では低回転領域を中心に影響が少ない領域が見られた。

参考文献

- 1) 中央公害対策審議会大気部会自動車排出ガス専門委員会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（報告）（1989）。
- 2) 自動車認証制度研究会編：新型自動車審査関係基準集，公文社，（1987）。
- 3) 財団法人自動車研究所：排出ガス削減対策手法別実測調査報告書（東京都環境保全局委託），（1987）。