

ディーゼル排出ガス低減手法の検討(I)

- EGR と Ba 添加剤の効果 -

飯田 靖雄 舟島 正直 茅島 正資
 福岡 三郎 鈴木 正次 梅原 秀夫
 石黒 辰吉 佐々木 裕子 遠藤 立一
 (保健部) (保健部)

1 はじめに

ディーゼル機関は燃料経済性に優れ、大型化が容易であったことなどから、トラック・バスなどに搭載され、この分野での自動車の大型化やディーゼル化に大きな役割を果たしてきた。最近では小型高速型のディーゼル機関が開発され、乗用車の分野でもディーゼル化が進む傾向がある。

こうしたディーゼル車に対する排出ガス規制は、昭和48年度の黒煙規制に始まり、昭和49年度に一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)ならびに窒素酸化物(NOx)に対する規制が加えられ、以後、NOxについて機関別に、段階的に規制の強化が図られ、現時点では直噴機関に対する昭和58年規制の実施で、その最終段階を迎えている¹⁾。しかしながら、現在の大気汚染状況、とりわけ自動車沿道の汚染状況からは²⁾更にNOxを低減し、ディーゼル黒煙に代表される粒子状物質についても規制を検討することが重要な課題となっている。

ディーゼル機関では、NOxの規制強化に対応する低減手法として、基本的には燃料噴射時期遅延対策がとられてきた。しかし、この手法は、機関出力、燃費ならびに黒煙発生などの面から技術的に限界に達したといわれている。したがって、さらにNOxを低減し、黒煙の発生を抑制するためには、噴射時期遅延に変わる対策技術を確立する必要がある。

本研究では、小型ディーゼル乗用車を用いて、ガソリン機関のNOx低減に大きな効果をあげている排出ガス再循環(EGR)とディーゼル黒煙の抑制に効果の知られている^{2) 3)}バリウム(Ba)系燃料添加剤を併用することにより、NOxおよび黒煙を同時に低減する手法として検討した。また、こうした排出ガス対策を

施した際の粒子状物質排出状況と、その変異原活性への影響なども検討し、排出ガス対策の有効性について調査した。

2 実験方法

(1) 実験車と実験装置

実験車として、渦流室式エンジンを搭載した54年規制小型ディーゼル乗用車を用いた。その主要諸元を表1に示す。

表1 実験車の主要諸元

車名	フローリャンディーゼル
トランスミッション	4速
型式	K-PAD30(DC)
エンジン	渦流室式
型式	C190
排気量	1951cc
最大出力	62 / 4000 (PS/rpm)
最大トルク	12.5 / 2000 (kg·m/rpm)

実験はエディーカーレント式動力吸収装置を装備したシャンドイナモメータ(万才自動車製)上で、実験車を走行させて実施した。排出ガスの分析には堀場製排出ガス測定装置(MEXA-2300型)を用いた。また、黒煙濃度は半自動式のポッシュ式スモークメータ(万才自動車製)を、粒子状物質については、希釈トンネル(内径450φ,有効長7m)にハイボリウムエヤサンプラーを接続して希釈排出ガスを毎分750ℓで吸引し、石英ガラスファイバー濾紙上に捕集した。なお、エンジン吸入空気量は司測器製ラミナー型空気量を、燃料消費量は小野測器製燃料計を用いた。

(2) EGR装置とBa系燃料添加剤

ア EGR装置

実験車に付加したEGR装置は、内径15mmの金属製フレキシブルパイプを用いて、排気マニホールドと吸気マニホールドとを連結し、その中間にストップバルブを設けた構造である。これにより、排気背圧と吸気負圧との差圧を利用して、排出ガスの一部を吸気側に還流した。本装置による排出ガスの還流率（EGR率）は次式により求めた。

$$\text{EGR率(\%)} = \frac{\text{標準時吸入空気量} - \text{EGR時吸入空気量}}{\text{標準時吸入空気量}} \times 100$$

イ Ba系燃料添加剤

Ba化合物による黒煙の抑制効果は添加剤の性状や形態にはあまり影響されず、燃料中に添加された「金属Ba」量に依存することが知られている^{3) 4)}。そこで、本実験では、取扱いの容易さから有機Ba化合物を高濃度に含有する重油用添加剤（A社製）を用いた。

(3) 実験条件の設定

実験は車速を40Km/h、80Km/hの2定速度とし、これらの速度で負荷を変化させた際の排出ガス低減効果等を検討した。負荷条件は次のようにして設定した。すなわち、ジャンダイナモメータの制御方式を「定速度制御」として実験車を所定の速度で運転し、ついで、負荷設定ダイヤルを操作して、吸収トルク計の表示で2kg・m毎に負荷を重くしながら、燃料消費量を計測した。この際、負荷の増大に対してはエンジン回転計で回転数をモニターしながら、アクセルペダルを加減して車速を一定に保った。このようにして、燃費と吸収トルクとの特性を求め、アクセルペダルを最大限に踏みこんで運転したときの最大吸収トルク（エンジンに対して全負荷）を基準にして、次のように負荷条件を定めた。ここで、40Km/h、80Km/hでの最大吸収トルクは22.0kg・mで一致した。

ここで、走行抵抗負荷は実験車の平坦路走行時の燃

費をジャンダイナモ上で再現したときの値である。

(4) 実験方法

実験は(3)項で設定した実験条件で、標準状態(Std)、排出ガス再循環(EGR)、Ba系添加剤(Ba)ならびに排出ガス再循環プラスBa系添加剤(EGR+Ba)の4試験内容で実施した。

実験手順としては、まず実験車を十分に暖機運転した後、40Km/hで走行抵抗負荷に合せ、排出ガスが安定したことを確認し、Std状態の測定を行い、終了後、ただちに、EGRバルブを全開し、同様に排出ガスが安定した後EGR状態の測定を行った。以後、負荷を設定し、Std、EGR状態の測定を繰り返した。また、Ba、Ba-EGR状態も、燃料にBa系添加剤を混入し、燃料を切り換えたあと、同様の操作で実施した。なお、排出ガスの測定は排気マフラーから直接分析計に導びき、粒子状物質採取の前後2回、約30秒間について行った。粒子状物質の採取は負荷条件の違いにより、排出量に変化し一定時間の採取が困難であった。本実験では、Hi-Vol サンプラーの採取流量が約750ℓ/minを保持できる時間（5～40min）とした。

3 実験結果と考察

(1) EGR率とBa添加量

本実験で実験車に付加したEGR装置は極めて初歩的なものでEGR率の制御や実用上の考慮はされていない。ここでは、実験条件に応じてEGR率を変化させることをせず、本装置の最大EGR量であったEGR率約8%で全実験を実施した。

また、Ba系添加剤の軽油への添加量は次の試験により決定した。すなわち、軽油1ℓ中に金属Baとして、1g、0.5g、0.25g、含有するよう調整した3種の燃料を用いて「使用過程車の黒煙規制試験法」である自由加速試験にもとずき、黒煙濃度を比較検討した。その結果、3種の燃料を使用した際の黒煙濃度に差異が少なかったこと、また添加されたBa化合物が新ら

表 2 実験条件の設定

車 速	エンジン回転数	ジャンダイナモ吸収トルクkg・m（負荷）				走行抵抗kg・m
40 Km/h	1500 ± 5 rpm	22.0,	16.5,	11.0,	5.5	1.8
80 Km/h	3000 ± 5 rpm	(4/4)	(3/4)	(2/4)	(1/4)	3.8

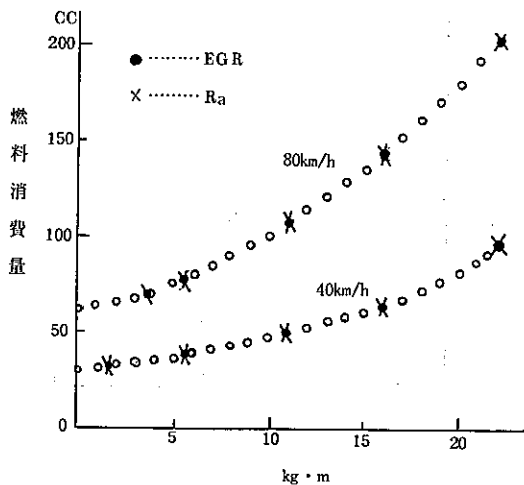


図1 燃料消費量特性

たな粒子状物質として排出されることなどから、最小添加量であった0.25 g/lを用いることとした。

(2) 燃費特性

実験車の燃料消費量とジャンダイナモ吸収トルクとの関係を図1に示す。

ディーゼル機関では一定速度で運転された場合、吸入空気量は常時一定であり、エンジン負荷に応じて燃料噴射量が増減する。したがって、本実験で実施した排出ガス低減対策にともなうエンジン出力への影響を知るためには、標準状態における車速と吸収トルクを再現し、その時の燃料消費量の変化を求めれば、間接的に出力への影響を知ることができる。図中にEGR, Ba等の対策を施した際の燃費を合せて示しているが、いずれの場合も、実験計測上の精度内で標準状態と一致しており、エンジン出力への影響は認められていない。

(3) NO_x 低減効果

NO_x 濃度の変化とその排出特性を図2に示す。StdのNO_x 排出傾向を見ると、40km/hでは負荷が高くなるに従い排出濃度が上昇する傾向が認められ、80km/hでは3/4負荷までは40km/hと同様の傾向を示しているが、全負荷時には濃度が低下することが特徴として現われている。

EGR時のNO_x 排出濃度はStdに比べ、全体的に

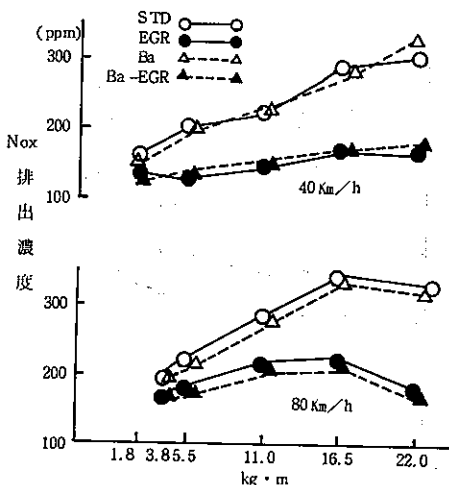


図2 NO_x 排出特性

低下しており、負荷が高くなっても排出濃度はそれほど上昇していない。NO_x 低減率を見ると、走行抵抗負荷で、20%前後、全負荷で約45%であり、負荷が高くなる程、NO_x 低減効果は大きくなっている。

EGRによるNO_x 低減手法はガソリン機関で実用化され大きな効果をあげているが、その原理は次のように説明されている。熱容量の大きい排出ガスを取り入れることにより燃焼温度が低下すること、空燃比が変化し酸素(O₂)濃度が減少するため、NO_x 生成反応が抑制される。

こうした原理からすると、ディーゼル機関は常時、空気過剰で運転され、排出ガス中のO₂濃度も高いことから、EGRによるNO_x 低減効果は少なく、空燃比が比較的低い高負荷領域では黒煙の発生が著しく、EGRは困難だといわれてきた⁵⁾。しかし、本実験では、排出ガス中のO₂濃度が軽負荷側で約15%、全負荷で約5%であったが、前述のようなNO_x 低減効果が認められた。軽負荷でのNO_x 低減効果がやや低いのがEGR率を増加させることにより効果を上げることが可能だと考えられる。また、本実験車の10モード運転時のNO_x 排出量は2.04 g/KmであったがEGRを付加すると、約30%減の1.41 g/Kmとなった。

Ba添加剤によるNO_x 濃度の変化は80km/hで、

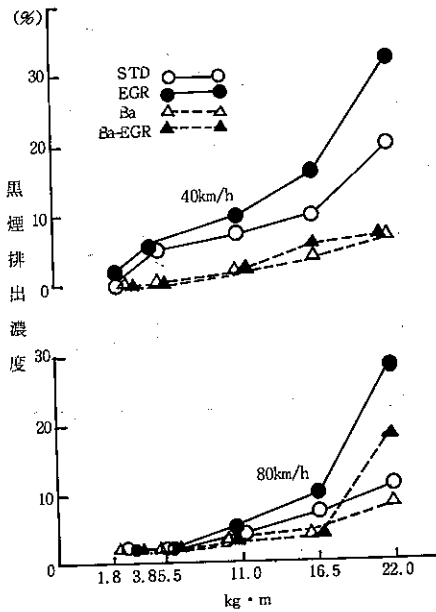


図3 黒煙排出特性

若干低下する傾向が認められるが、これがBaによる効果か、実験上の誤差か区別できなかった。また、EGR+Ba状態ではNO_x濃度の変化と排出傾向は、EGR単独時とほぼ同様であった。

(4) 黒煙濃度の抑制効果

わが国ではディーゼル排出粒子を排気黒煙として、その濃度を規制している。その測定法は、一定量の排出ガスを吸収ポンプで採取し、その途中におかれた伊紙の黒化度を光反射式のメータで読みとり、汚染度(%)として測定するものである。この方法により排気黒煙濃度を求めたのが図3である。実験車がもともと排気黒煙の少ない渦流室式エンジンであるため、黒煙濃度はStdの全負荷で、最大20%であり、EGRを付加すると、全体的に黒煙濃度は増加し、全負荷では約50%増加の32%になった。また、自由加速時の黒煙濃度はStdで12%、EGRで17%、Baで6%、EGR+Baで10%であった。図4にBa添加剤を使用した場合と、使用していないときの黒煙濃度の関係を示したが、直線の傾きがゆるやかになっており、黒煙抑制効果を示していることがわかる。

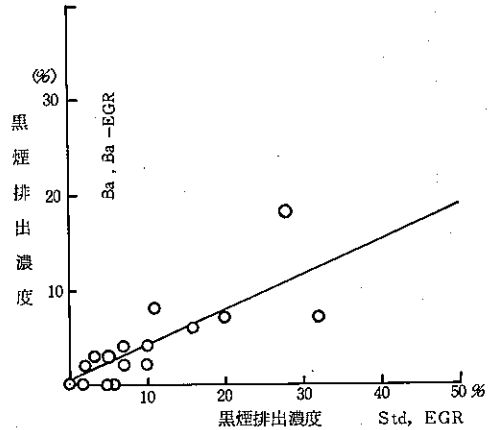


図4 Ba添加剤の黒煙抑制効果

以上の結果から、EGRはNO_xを低減する一方で、黒煙濃度の増加をもたらすが、Ba添加剤を使用することにより増加する黒煙を効果的に抑制することがわかった。

(5) HCおよびCO濃度への影響

HC、CO濃度への影響を図5、6に示す。EGRならびにBaとも、HC、COに対しては全条件で、その排出濃度を増加させること、また、Ba+EGRではその現象がそれぞれの効果を相加された結果となり、CO、HC対策上は問題が残る。

(6) 粒子排出量への影響

ア 希釈トンネル-Hi・Vol法で求めた粒子排出量を図7に示す。図中の数値は各負荷条件ごとのStd排出量を100として、それに対する指数を表示したものである。

Stdの粒子排出量は他のガス状汚染物質と同様に、負荷が高くなるに従い増加する傾向を示し、全負荷では走行抵抗負荷時の約8倍(40km/h)、および約3倍(80km/h)と大幅な増加となる。EGRを付加すると、粒子排出量は全体的に増加(20~120%)することがわかる。また、Ba添加剤を用いると、黒煙濃度が全体的に低下しているにもかかわらず、粒子状物質排出量は負荷条件によって増減することがわかった。すなわち、Stdと比較し、2/4負荷を境に軽負荷側では20~40%の増加、高負荷側では逆に25~45%

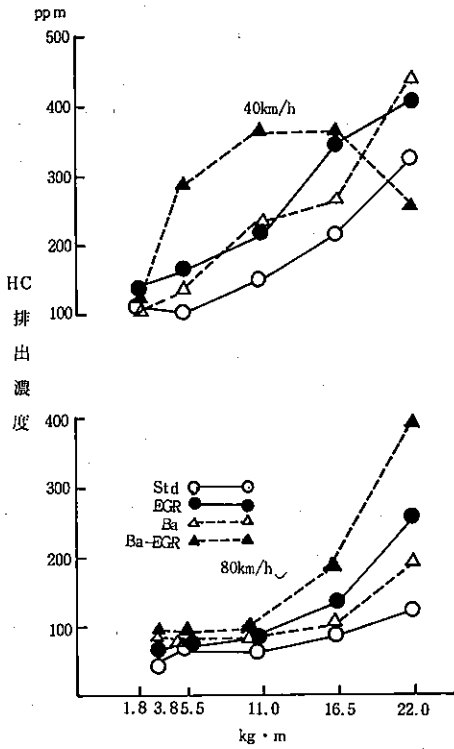


図5 HC排出特性

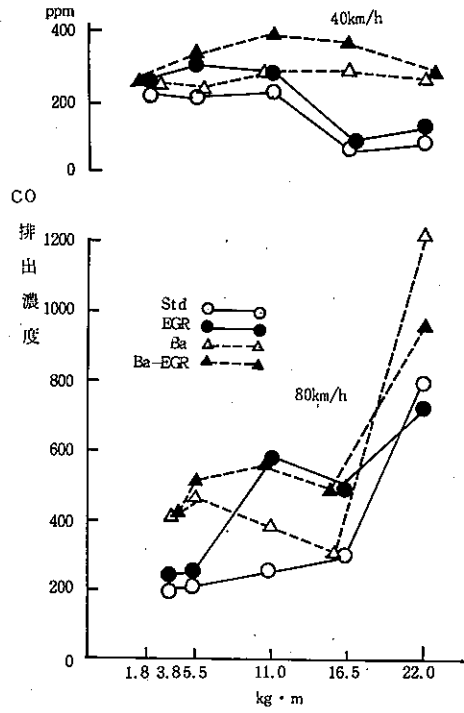


図6 CO排出特性

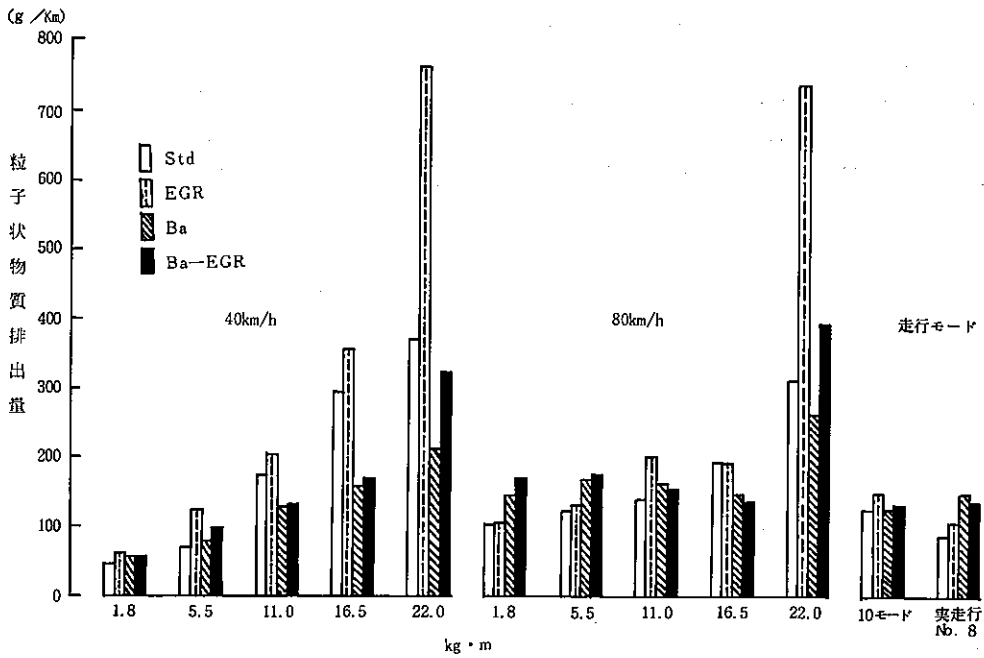


図7 粒子状物質排出特性

減少する傾向が認められた。また、図中に10モード（平均車速17.7Km/h）および実走行パターン₁₀（同様に、44.4 Km/h）における排出量を示したが、10モードでは増減はなく、実走行パターンでは増加した結果が得られた。こうした過渡運転を含む条件下では、エンジン使用領域が部分負荷で運転されるため、40 Km/h、80 Km/h時の2/4負荷より軽負荷の排出傾向と同様の結果が得られたものと思われる。

軽油中に添加されたBa化合物は大部分排出ガス中に排出される⁴⁾。したがって、Ba添加剤を使用した際の粒子状物質中にはBa化合物が含まれることになる。仮りに、40Km/hの条件で、燃料消費量から硫酸バリウム（BaSO₄）として全量排出されるとすると、走行抵抗条件で20mg/Km、全負荷で56mg/Kmとなる。

(7) 炭素成分含有率

元素分析により、40Km/h条件での粒子状物質中の炭素（C）成分含有量を求めたものを図8に示す。Stdに比較しEGRを付加するとC含有率や全体的にやや高くなる傾向が認められる。Ba添加剤を使用すると、負荷にもよるがC含有率は8~30%低下していることがわかる。

本実験では、Ba添加剤を使用した全実験条件で、黒煙濃度が低下したが、粒子状物質については、運転条件や負荷条件の違いによって、増減する結果になった。こうした例は他の研究でも見られ⁶⁾黒煙濃度の低下は、一般にBa系添加剤の黒煙抑制効果から説明できる。すなわち、燃料過程における炭化水素の脱水素

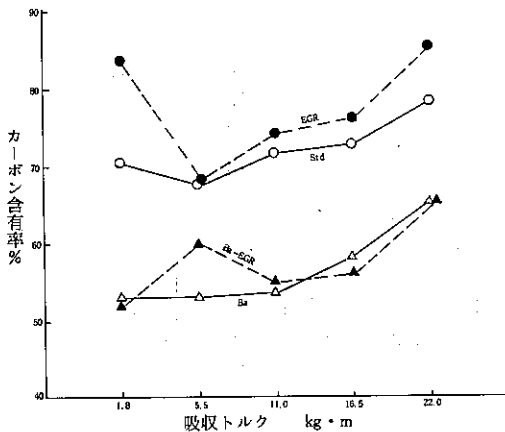


図8 炭素成分含有率

反応を抑制し、脱水素された炭素分子の環状化を阻害することから、炭素質が減少し、光反射式スモークメータでは粒子状物質が増加していても、結果的に黒煙濃度が低く計測されることになる。また、中負荷や高負荷側で、みかけ上、粒子状物質が同程度であったり、減少した結果については、負荷が高くなると排出ガス温度も上昇し、環状化が阻害されたこと、高沸点の炭化水素類が排気系で燃焼により減少したと考えられる。

(8) 変異原性試験

EGRやBa添加剤を用いると粒子状物質は質量とも変化する。それにともない粒子状物質の変異原性にも影響が生ずると思われる。ここでは、変異原性の側面から、排出ガス対策について評価を試みた。なお、変異原性試験には粒子状物質からベンゼン可溶性分（ベンゼン：エタノール、4：1）を用いて、以下の試験法で実施した。

A 使用菌株、変異原性試験

AmesのSalmonella typhimurium, TA100, TA98株を用いウイスター系ラットの肝S9（PCB誘導）mixによる代謝活性化法を併用するPreincubation法により検討した。

使用検体は40Km/h条件のStd, EGR, Baについて、それぞれ、走行抵抗（1.8 kg·m）および全負荷（22.0 kg·m）の2検体、計6検体を用いた。試験結果を図9に示す。

Stdの変異原性は、負荷条件ごとに、走行距離当り、粒子状物質当りで、TA100, 98の両菌株とも土S9で、ほぼ同程度の変異原性が認められた。負荷による

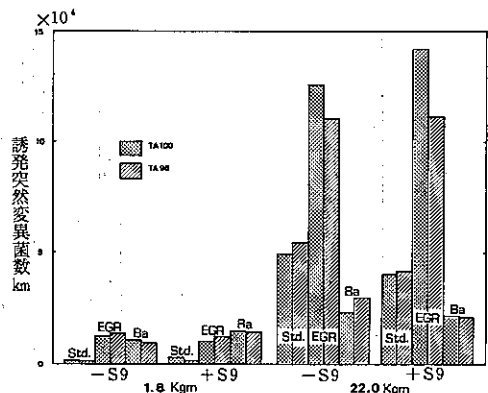


図9 変異原性試験結果

変異原性への影響は、粒子状物質当りで、全負荷の方が約6倍高くなり、排出量も多いので、走行距離当りでは10~40倍高くなった。また、EGRを付加すると、両負荷条件とも粒子状物質当りの変異原性は増加し、Stdに比べ走行抵抗負荷で4~10倍、全負荷で2~3.5倍高くなった。Ba添加剤を使用すると、粒子状物質当りの変異原性は、Stdに比べ、走行抵抗で4~7倍、全負荷では若干低下した。走行距離当りで見ると、前者で5~9倍、後方で約1/2になる。

以上のことから、EGR、BaともStdに比較し、粒子状物質の変異原性は全体として高まる傾向にあり、排出ガス対策として、変異原性を低減する有効な方法とは、現時点では言難い。

4 ま と め

渦流室式エンジンを搭載した小型乗用車を用い、EGRとBa系添加剤の両技術を併用し、NO_xおよび黒煙の低減手法について検討した。

- ① ディーゼル機関のNO_x低減にEGRは大きな効果をもたらすが、反面、黒煙、粒子状物質、HC、CO等が増加する。
- ② Ba系添加剤は、黒煙抑制に非常に効果的であり、EGRによる黒煙の増加に対して、それを抑制する働きが認められた。その一方で、HC、CO等は増加する傾向がある。
- ③ EGRとBaの併用の効果は、それぞれの単独の効果を相加した効果が現れた。NO_xと黒煙を低減することができたが、粒子状物質、HC、COについては更に検討が必要である。
- ④ Ba系添加剤を使用すると、粒子状物質排出量は負荷に依存し、軽負荷では増加、高負荷では減少した。

⑤ 粒子状物質中の炭素成分は70~90%であり、Ba系添加剤を使用すると8~30%炭素成分が減少した。

⑥ 粒子状物質の変異原性は、EGRやBa系添加剤を使用すると、全体として変異原性を増加させることが認められた。

⑦ ディーゼル機関のNO_x対策として、EGRは有効であるが、その障害となる黒煙対策として、Ba系添加剤を併用することは、軽負荷時の粒子状物質、HC、COならびに変異原性等の増加をもたらす、現時点では有効な手法とは言難く、更に検討が必要である。

以上が結果のまとめであるが、今後さらに実験を重ね粒子状物質の排出挙動、直噴機関に対する適用についても検討したい。

参 考 文 献

- 1) 中公審大気部会：「自動車排出ガス許容限度策定に関する技術報告書」(1981)。
- 2) 7大都市技術評価委員会：「1970年代における大都市の大気汚染状況」(1981)。
- 3) 久保田ほか：ディーゼル自動車排気黒煙制御試験について—中間報告—、東京都公害研究所報告(1971)。
- 4) 久保田ほか：ディーゼル自動車排気黒煙防止に関する調査研究(第2報)(1972)。
- 5) 7大都市技術評価委員会：ディーゼル自動車の低公害技術開発の現況と見通しについて(1981)。
- 6) T. J. Truex, et al : Effects of Barium Fuel Additive and Fuel Sulfur Level on Diesel Particulate Emissions: *Envir, sci, Tech* 14 1131-1124 (1980)。