

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2 粒子状物質排出特性 —

竹永裕二 福岡三郎 飯田靖雄
舟島正直 横田久司 梅原秀夫

要 旨

排気量3.6ℓの直噴ディーゼルエンジンに排気ガス再循環(EGR)システムを適用し、粒子状物質の排出特性について調べた。実験は、EGR率、エンジン負荷、回転数別の定常試験により粒子状物質(PM)をサンプリングし、炭素成分の分析を行った。また、同時に車両総重量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粒子状物質の排出量を調べた。

- ① EGRによる時間当りのPM排出量は、低負荷では見かけ上減少する場合がある。高負荷ではPMは増加し出力は低下する。
- ② EGRによる粒子状物質中の炭素成分への影響は、EGRの増加により有機炭素成分は低負荷側で減少し、高負荷側で増加する。無機炭素成分は、EGRをかけることにより空気過剰率の小さい高負荷側で増加する。
- ③ 新規モードでEGR率0、20、40%で粒子状物質の排出量(g/kW・h)を比較すると、20、40%でそれぞれ3.1、7.4倍となった。

1 はじめに

現在、東京の大気汚染は、NO₂及び浮遊粒子状物質の環境基準の達成が困難な状況にある。これらの汚染物質排出量への自動車の寄与は大きく、特に排出ガス低減対策が困難なディーゼル車が問題となっている。これはディーゼル機関では、NO_xと粒子状物質の生成機構がトレードオフの関係であることに起因する。NO_x低減手法として、エンジンに排気ガス再循環(exhaust gas recirculation: 以下、EGRという。)をディーゼル車に適用した場合にも、NO_xは低下するが粒子状物質は増加する。また、ディーゼルエンジンでは、空気過剰率は常に1以上の範囲が用いられるため、燃空比(燃料と燃焼空気の重量比)が小さくなるにつれて排出ガス中の酸素濃度が上がる。このため、EGRを適用するにしても排出ガスの還流する割合は、高くしなければならない。また、粒子状物質の他にも燃料中の硫黄分による硫酸ミストによる腐食等の問題から、わが国ではディーゼルエンジンの実車には、乗用車の一部を除いてEGRを適用していない。

ディーゼル車から排出される粒子状物質(以下、PMという。)については、生成量自体を減らす方法と排出後捕集する方法の両面から検討されている。捕集方法として、トラップオキシダイザー等の後処理装置による粒子状物質の除去が考えられている。この後処理装置技術検討の基礎資料として、EGRがPM中の炭素成分に与える影響について実験を行った。

また、89.11の中央公害対策審議会の答申¹⁾の中で、ディーゼル車のPMの重量規制と新しい試験モード(10.15モード、13モード)が提示された。この試験モードの内、車両総重量が2500kgを超えるものに適用される13モード試験によるPMの測定を行い、EGRを適用した場合のPMの増加量を調べた。

2 実験

実験装置の配置を図1に示す。

- (1) エンジンダイナモメータ: 渦流式
吸収動力110kW
- (2) 供試エンジン: いすゞ4BE1

表1 粒子状物質に係わる許容限度設定目標値

自動車の種類別		許容限度設定目標値(平均値)	
		短期	長期
軽油を燃料とする普通自動車及び小型自動車 (専ら乗用の用に供する乗員定員10人以下のものを除く。)	車両総重量が1700kg以下のもの	0.2 g/km	0.08 g/km
	車両総重量が1700kgを超え2500kg以下のもの	0.25 g/km	0.09 g/km
	車両総重量が2500kgを超えるもの	0.7 g/kWh	0.25 g/kWh
軽油を燃料とする普通自動車及び小型自動車であって、専ら乗用の用に供する乗員定員10人以下のもの		0.2 g/km	0.08 g/km

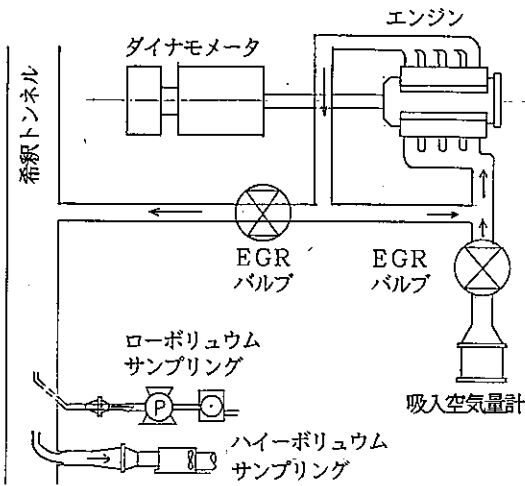


図1 配置図

直噴式4気筒

総排気量 3.636 ℓ

58年規制

最高出力 (PS/rpm) 105/3500

(3) 排気ガス分析計: MEXA8120D直接ガス分析計
CVS57T

(4) EGR制御装置: VCU-01 (電動バルブ式)
MEXA1120EGR

(5) 粒子状物質サンプリング:

粒子状物質のサンプリングは排出ガスを全量希釈後ローボリュームムエアサンプラーを用い、ディーゼル13モード試験の場合は同じく全量希釈後、ハイボリュームムエアサンプラーを用いて行った。

(6) 炭素分析: RF-8900熱分析計

350℃, 950℃をそれぞれ有機炭素成分, 無機炭素成分の燃焼温度上限の条件とした。

(7) 測定条件

ア. ディーゼル13モード試験を図2に示す。PM測定における排出物質への重みづけ (単位時間当りの重量に係数を乗じる) は、トータルサンプリング時間に各モードにおける係数を乗じて得た値を各モードのサンプリング時間とした。

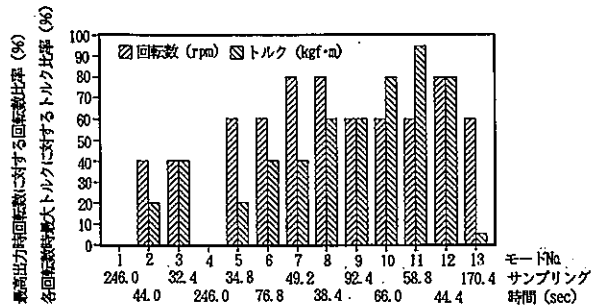


図2 ディーゼル13モード

規制値に示された単位時間及び単位仕事当りの粒子状物質の排出量は次式による。

$$W = \frac{M \div T}{\sum (K_i \times P_i)}$$

W : 排出量 (g/kWh・h)

M : 各モードにおいて排出されたPM重量の総和 (g)

T : トータルサンプリング時間 (h)

K_i : 各モードにおける係数

P_i : 各モードにおける仕事率 (kW)

イ. 定状試験の粒子状物質サンプリングポイントは、エンジン回転数1000~3500rpm間で500rpm間隔で各回転数における最大トルク値に対して8等分点を排出ガス測定、4等分点をローボリュームムサンプリング、1000, 2000, 3000rpmの回転数ではハイボリュームムエアサンプラーによるサンプリングも同時に行った。

EGR試験は、EGRをかけない状態でエンジン条件を

設定した後、電動バルブにより還流経路を開きEGRをかけた。エンジンダイナモメータは定回転制御で行いEGRをかけることによるトルク低下の補正は行わなかった。

本実験では、次式によりEGR率とした。

$$\alpha = \frac{A_n - A_f}{A_n} \times 100$$

EGR率： α

EGR・OFFの吸入空気量： A_f

EGR・ONの吸入空気量： A_n

3 結果及び考察

(1) ディーゼル13モード試験

ディーゼル13モード試験についてはPMのサンプリング方法の詳細が定まっていなかったため、本実験では各測定条件のサンプリング時間において排出ガスを全量希釈後し、ハイボリュームエアサンプラーでサンプリングを行った。ハイボリュームエアサンプラーの吸引流量はEGR 0%で725 l/min, EGR 20%, 40%で648 l/minで行った。

EGR率ごとに採取量の流量補正を行った値 (mg) と、重量規制値に用いられる単位 (g/kW・h) に換算した値の比較を表2に示す。EGRによる粒子状物質の増加重量は、EGR率0%に対してEGR率20%, 40%でそれぞれ3.0倍, 6.3倍となった。一方、規制値比較ではEGR 20%で3.1倍, 40%で7.4倍となった。なお、EGRをかけた試験ではエンジン回転、トルクが安定しにくいいため、移行時間、ソーク時間等は考慮しなかった。

表2 13モードPM排出量

EGR率	サンプリング量 (mg)	重量比率 (%)	排出量 (g/kW・h)	排出量比率 (%)
0%	93.81	100	1.23	100
20%	283.62	302	3.82	311
40%	590.99	630	9.06	737

(2) 定状試験

ア. PM排出量

図3に、回転数別のハイボリュームエアサンプラーによる時間当りのPMの採取量を示す。まず回転数1000rpmでのPM排出量は、1/4負荷ではEGR率0%に

対して20, 40%の方が減少している。2/4負荷以上ではEGR率の増加に伴い排出量は増加している。全負荷(4/4)でPM排出量は20%で1.5倍, 40%で3.0倍となっている。回転数2000rpmに上昇すると1/4負荷と2/4負荷でPM排出量は減少しているが、3/4, 4/4負荷では回転数1000rpmと比較すると大幅に増加している。回転数3000rpmのPM排出量は、2000rpmと同じ傾向が見られる。

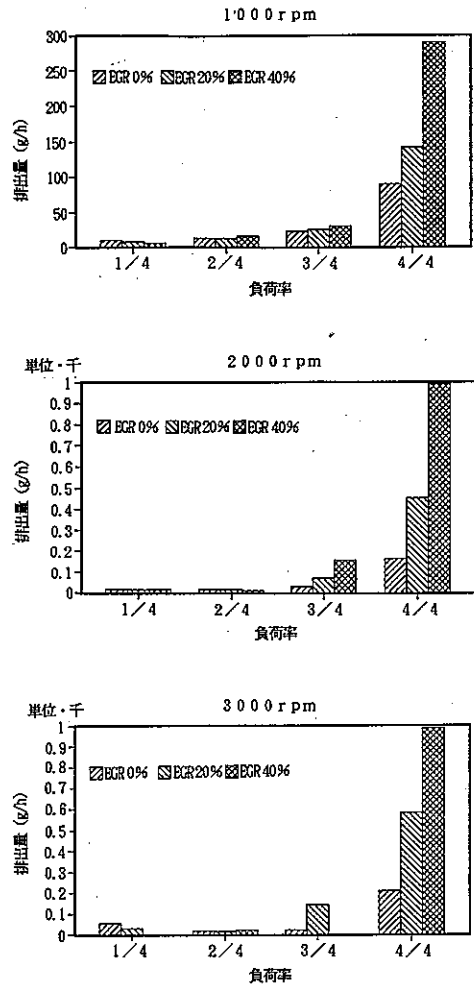


図3 PM排出量

低負荷において、EGRをかけたにもかかわらずPM排出量が減少したことは、EGRによるPM生成量の増加よりも排出ガスの還流による排出ガス量の減少の方が大き

いたためと思われる。全負荷におけるPM排出量の増加量は、EGR20%が1.5～3.0倍、40%が3.0～5.0倍となっている。

次に、PM排出量を時間当たり (g/h) と仕事率・時間当たり (g/kW・h) で示した値を比較してみる。都市内走行時に出現頻度が高い最高出力時の回転数の60%の回転数 (13モード試験では全体の41.6%の重みづけをされている) を供試エンジンで見ると回転数2100rpmである。定常試験において、回転数が近い回転数2000rpmの各負荷で、EGRを掛けない状態を基準に比較したものを図4に示す。EGRをかけることにより、時間当たりの排出量に対して仕事率・時間当たりの排出量の方が、EGR20%で3～10%、EGR40%で35～40%大きい値となっている。また、負荷3/4、4/4でEGR0%と40%を比較すると、時間当たりの排出量で5～6倍なのに対して、仕事率・時間当たりの排出量は7～8倍になっている。これはEGR40%ではPMの生成量が増加すると同時に、エンジン出力の低下が著しいためである。

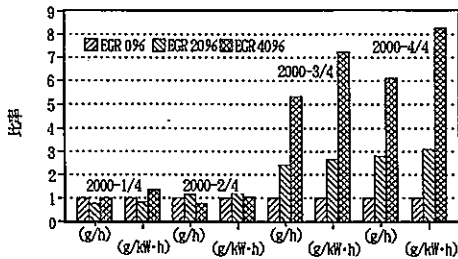


図4 PM排出量比較

イ. 排気温度

排気温度 (図5) は、EGRを掛けない状態では回転数1000と1500rpm並びに3000と3500rpmとの間で排気温度にそれ程の差はないが2000と2500rpmとの間ではトルク10kgf・m以上で約100℃の差がでていいる。EGR20%を見ると回転数1000rpmはEGR0%とほぼ同じであり、回転数の上昇にしたがいEGR20%の場合の排気温度は高くなり、3500rpmでの温度差は100～150℃程度にまでなる。EGR40%もEGR20%時と同じ傾向にあり、20%よりも20～70℃程度排気温度が高い。

排気温度が高い領域においてEGRをかける時、排気ガスの還流経路が短く、還流排気ガスが冷却されていない

いとミキシング後の吸入空気の温度を上げることとなる。この場合、容積効率が低下して出力低下につながり、また燃焼空気中の酸素質量も少なくなるため、不完全燃焼を起こしやすくなる。

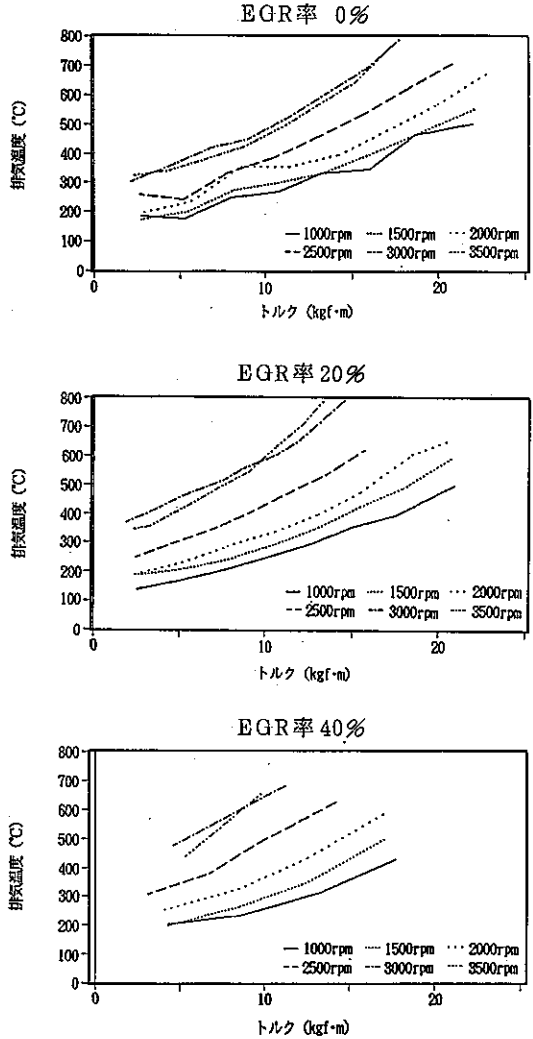


図5 排気温度

ウ. 炭化水素

EGR率の変動に伴う炭化水素の濃度変化を等濃度線図 (図6) により比較する。EGR0%では、回転数2000～3000rpmの間にHC高濃度の領域が存在し、2500rpmのトルク12kgf・mを頂点に低負荷側に向かってHC濃度が高くなっている。その他の範囲は、回転数1000rpm

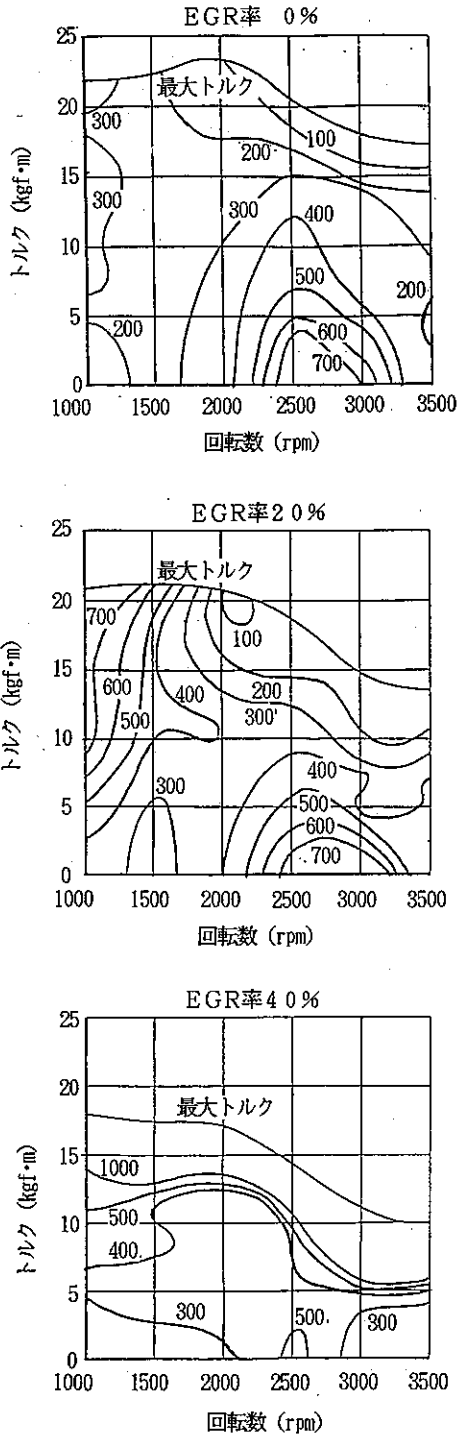


図6 炭化水素等濃度線図

付近では300~400ppmの値となっている以外は全体に低い値となっている。EGR20%になると全域で濃度が上がり、400ppmを上回る領域は回転数1000~1500rpmのトルク5~10kgf·m以上の範囲と2000~3500rpmの0~8kgf·mの範囲に広がる。特に回転数1500rpm以下でトルク10kgf·m以上の範囲での濃度変化が著しい。EGR40%では、回転数1000rpmのトルクが14kgf·mから2500rpmの10kgf·mを通り3500rpmの5kgf·m以上の領域で1000ppmを超える濃度となっていて、回転数2500rpm以上の全負荷では1000ppmを超えていた。また、回転数2500rpm以下でも全負荷では3000~4000ppmと高い濃度となった。炭化水素濃度が1000ppmを超える領域では、COの濃度も高く1~4%のとなっていることから不完全燃焼による未燃の炭化水素成分が多量に排出されているものと思われる。

炭化水素の生成は圧縮点火機関（ディーゼル機関）の場合、燃焼室壁面による火炎の冷却、燃料噴射の後だれなどによる。回転数2500~3000rpmにおける低負荷領域で炭化水素濃度が高いのは、上記の他に1回転当りの燃料流量 (g/rev) を回転数別に比較した場合に、1000, 1500, 2000rpmは同じ値であるのに対し2500, 3000rpmは流量が増えていること、さらに2500rpm以上では体積効率が6~10%程度下がっており、体積効率の低下による燃焼効率の低下等が影響していると考えられる。EGRをかけることによる炭化水素の増加は、高負荷の低回転の領域で影響を受け始め、EGR量が多くなると高回転側へと広がって行く。これは、圧縮点火機関では燃焼行程期間の制御燃焼、後燃え期間中の燃料と酸素の接触が不完全燃焼につながることから、高負荷領域では燃空比が大きく、EGRによる新気中の酸素量の減少による燃焼効率の低下が主な原因と推測される。

エ. PM中の炭素成分

PM状で排出される有機炭素、無機炭素の排出量を図7, 8に示す。有機炭素は、スタンダードな状態 (EGR0%) では、回転数1000, 1500rpmにおいては負荷の変動による排出量に大きな変化は見られないが、回転数が2000rpm以上では、低負荷と高負荷の時に有機炭素の量が増加している。また、回転数の上昇と共に増加する傾向にある。これに対し、EGRをかけた場合、低負荷時の排出量は減少している。特に3000rpm以上で大きく減少し、EGR量の増加に反比例している。一方、高負荷時の

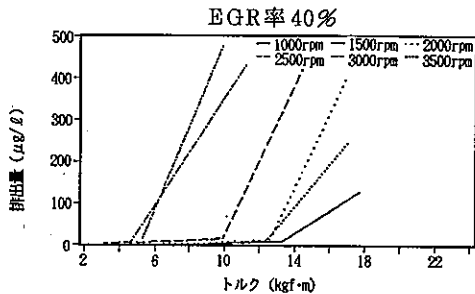
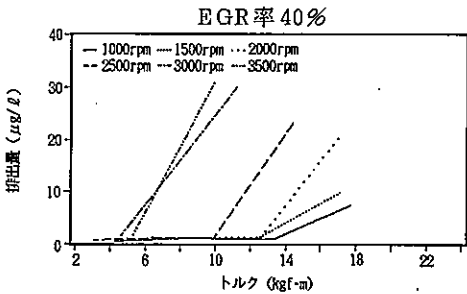
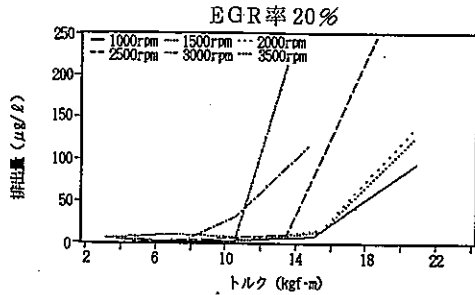
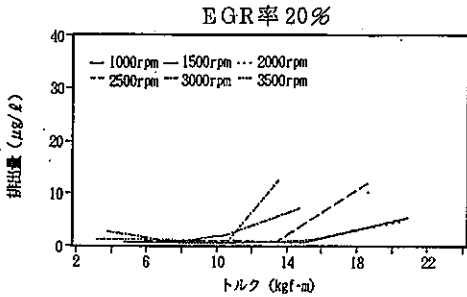
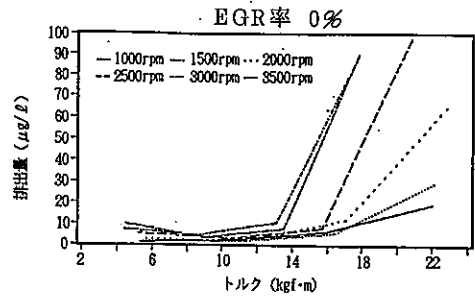
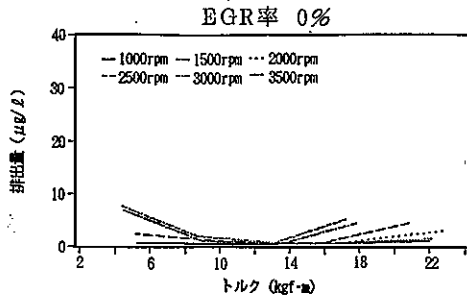


図7 有機炭素排出量

図8 無機炭素排出量

領域ではEGR量の増加に伴い排出量は大幅に増加している。

無機炭素は高負荷の領域で排出量が大きく、回転数が高くなるに従い増加している。EGRの増加に伴い高負荷領域では大幅に増加しているが、その他の領域では回転数、EGRをかけることによる大きな変化は見られない。

PM中の有機炭素と無機炭素の含有比率を図9に示す。有機炭素含有比率は低負荷から高負荷に向かって下がる傾向にあり、EGR率で比較すると、EGR量増加に対して低くなる。EGR 0%において有機炭素含有比率40%以上の領域は、トルクが4～5 kgf·m以下の回転数1300rpm

以下または2700rpm以上である。EGR20%ではトルク6 kgf·m以下の回転数1600rpm以下または2400～3000 rpmの領域に変わり、EGRなしの場合に比較すると有機炭素比率40%以上の領域が増大していることが注目される。EGR40%では有機炭素比率40%の範囲は、トルク4 kgf·m以下回転数1200rpm以下の領域だけになる。

低負荷時に有機炭素の排出量が増加するのは、先に述べた通り、低負荷時は燃焼室壁面温度が低いため、火炎の冷却が起りやすく炭化水素が排出されやすいのであるが、どのような条件でガスとして排出されるか、粒子状物質として排出されるかは解析できなかった。低負荷時のEGRによる有機炭素成分増減への影響は、燃焼室温

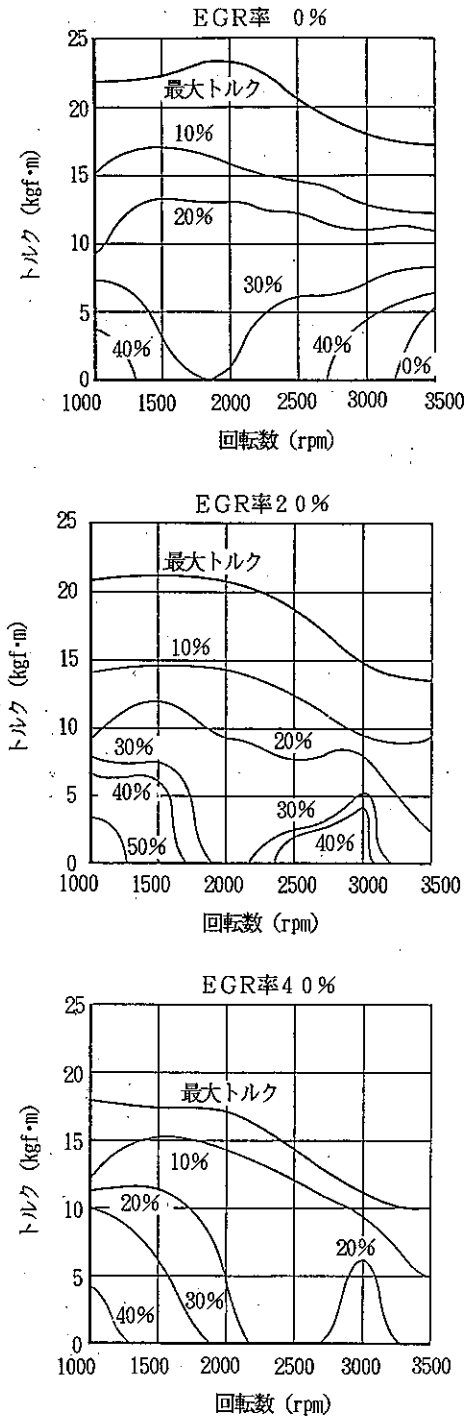


図9 有機炭素含有比率等高度線図

度の低下、空気過剰率の変化、吸入空気への粒子の混入等が考えられる。

無機炭素の生成機構は、燃焼中の高温な状態で燃料が局所的な酸素不足の状態におかれたときに脱水素反応、熱分解などによって生じた遊離炭素、もしくは重合によって生じた炭化水素の脱水素反応によって生じた遊離炭素が凝縮したものと考えられている。高負荷時は燃空比が大きくなり不完全燃焼をおこしやすくなるが、燃焼室温度が高くなるため炭化水素よりも無機炭素の排出量が増加する。また無機炭素は酸化反応が遅いことから、回転数が高くなるほど排出量が増加する。PMはEGRの有無に拘らず、新気中の酸素濃度に依存し、実質的な空気過剰率で決まると言われている。無機炭素の排出量増減はこれにあてはまっていた。

4 まとめ

直噴ディーゼルエンジンへEGRシステムを適用した場合の粒子状物質排出特性について、以下のことがわかった。

- ① EGRによる時間当りのPM排出量は、低負荷では見かけ上減少する場合がある。しかし、高負荷ではPMは増加し出力は低下する。
- ② EGRによる粒子状物質中の炭素成分への影響は、有機炭素成分は低負荷側で減少し、高負荷側で増加する。無機炭素成分は空気過剰率の小さい高負荷側で増加する。
- ③ 新規モードでEGR率0, 20, 40%で粒子状物質の排出量 (g/kW·h) を比較すると、20, 40%でそれぞれ2.8, 6.7倍となった。

PMの排出量が少ない低負荷領域では、EGR40%程度までは適用できると考えられるが、PM排出量の多い高負荷領域におけるEGRの適用は出力低下、エンジン耐久性等の面からみてさらに検討が必要である。

89.11の中央公害対策審議会答申をうけて、平成5年から粒子状物質についても重量規制が導入されることになったが、PM低減技術として開発のリードタイムが短いものはトラップオキシダイザーと思われる。現在、トラップオキシダイザーの開発のネックは再生(捕集した粒子状物質の燃焼)条件にある。今後この技術を確立するためにはエンジン使用条件に対して、排出される粒子状物質中の成分内容(SOF等)の変化と生成量の関係、燃焼条件についても検討しなければならない。

参考文献

- 1) 中央公害対策審議会答申 89.11.
- 2) 伊瀬洋昭ら：ステップ昇温による炭素成分の熱分析,
東京都環境科学研究所年報1989, p.103.
- 3) 秋山 薫ら：東京都における浮遊粒子状物質中の炭
素成分の粒径分布と発生源寄与の推定, 東京都環境科
学研究所年報1991, p.71.
- 4) 佐藤直寿ら：大型無過給直噴ディーゼルエンジンの
排出ガス及び耐久性に対するEGRの影響について,
自動車技術 44 (1990).