

論文

ディーゼル黒煙除去フィルターの性能

飯田 靖雄 福岡 三郎 舟島 正直
 横田 久司 竹永 裕二 梅原 秀夫
 吉村 睦男

要 旨

都ごみ収集車に装着することを想定して、電気ヒータ着火方式の黒煙除去フィルター（以下、DPFという。）システムを試作した。同システムを、エンジンダイナモ上に設置した3.6ℓ直噴式ディーゼルエンジンの排気系に組み込み、黒煙除去効果等について、基本性能及び清掃車走行サイクルによる400時間の実用性試験を実施した。その結果、DPFによる黒煙除去効果は81%～96%と優れた性能が認められた。また、実用性についても基本性能を損なうような不具合は生じなかった。しかし、今後の課題として、DPFの再生時における黒煙の燃焼状態が不安定であったこと及びDPFに微細なクラックと溶損が生じたことなどから、さらに安定した再生方法の確立と耐熱性の高いDPFの開発が必要であることが認められた。

1 はじめに

東京など大都市地域では、浮遊粒子状物質に係る環境基準の達成状況は極めて低く、その対策が急がれている。浮遊粒子状物質の大きな発生源の一つとして、ディーゼル車が考えられており、ディーゼル黒煙（粒子状物質）に対する規制強化とその対応技術の確立が急がれている。ここでは、ディーゼルエンジンから排出される黒煙を低減するための一環として、用途が限定されている都ごみ収集車に搭載することを想定して、黒煙除去フィルターシステムを試作し、その実用性能などを検討した。

2 実 験

(1) 試作DPFシステム及び供試エンジン

試作した小型ディーゼルエンジン用のDPFシステムの諸元を表1に示す。実験に使用した直噴4サイクル、4気筒、排気量3.6ℓのディーゼルエンジンの諸元を表2に示す。

供試DPFには日本碍子（NGK）製のウォールフローモノリスタイプを使用した。フィルター容量は5ℓで、壁厚さは17ミル（1インチ/100×17=4.3ミリ）であり、1インチ当りのセル数は100である。DPFの再生（捕集した粒子状物質を燃焼し、捕集機能を回復させること）のための着火装置には、24V-2.4kWの電気ヒータを用

いた。この供給電源には12V-120Aのバッテリーを2個使用し、直列に接続した。また、バッテリーの充電はDPFシステムを車載した状態を想定し、エンジンのオルタネータを使用した。

表1 試作DPFシステム

フ イ ル タ ー	
名 称	ウォールフローモノリス NGK DHC-221
材 質	コーディライト
サ イ ズ	φ190×178
容 量 (ℓ)	5
壁 厚 さ	17ミル (4.3ミリ)
セル数/平方インチ	100
再 生 装 置	
名 称	バイパス付電気ヒーター再生方式
電気ヒーター容量	2.4kW (DC24V)
再 生 時 間	約20分
燃 焼 空 気	電動プロア
再 生 方 式	時間制御方式

図1に、試作DPF装置を組み付けたエンジンの実験装置を示す。エンジンからの排出ガスは、排気系に組み込まれたDPFで粒子状物質が捕捉された後、大気へ放

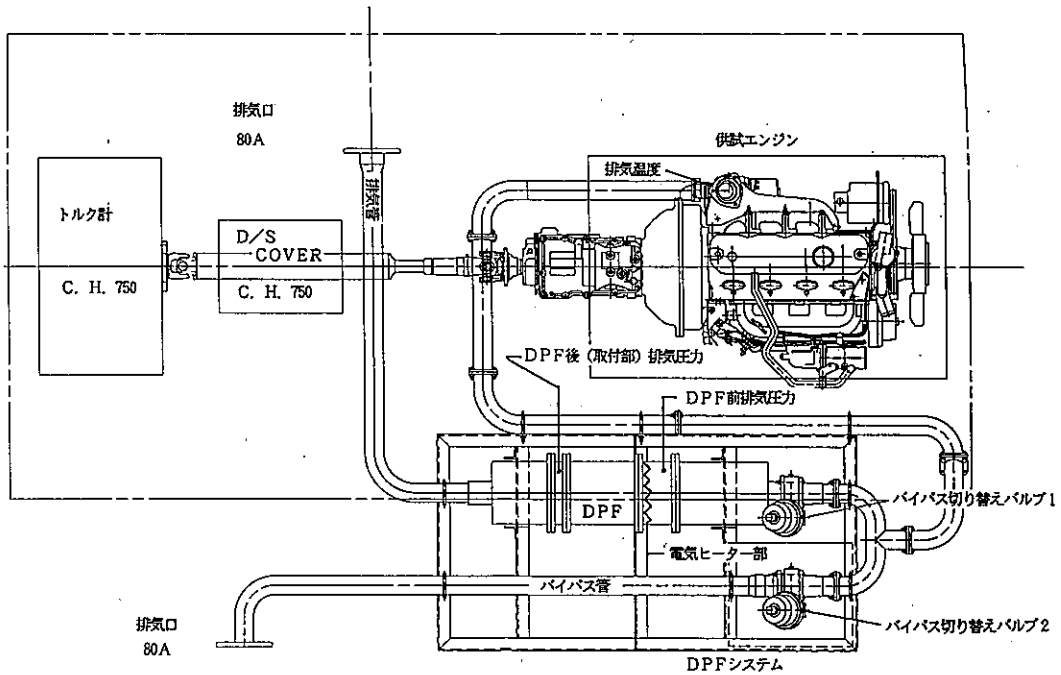


図1 供試エンジンならびに試作DPFエンジン

出される。DPF再生時の排出ガスは、バイパス切り替えバルブによって大気へ放出される構造である。このバイパスバルブはエンジンのバキュームポンプによって作動する。またDPF再生時の燃焼用空気は電動ブローにより供給する方式である。DPFシステムの捕集再生時のバルブ開閉、通電並びに電動ブロー等の作動信号はDPFコントローラにより制御されている。

実験にあたって、排出ガス温度の代表点としてエキゾーストパイプ出口部の温度を測定した。図2に、DPF内の温度測定点7箇所の位置を示す。なお、温度測定にはφ1のCAシーラ形熱電対を使って測定した。また、DPFの黒煙捕集状態、再生の状況を間接的に捉えるため、代表的な排気圧力として図1のDPF入口側、出口側の箇所での圧力を測定した。

(2) 実験方法

DPFシステムの黒煙除去効果、実用性等を評価するため、基本性能試験、実用性試験及び試験終了後のDPF分解試験を行った。

ア 基本性能試験

DPFシステムの黒煙低減効果等の基本性能について

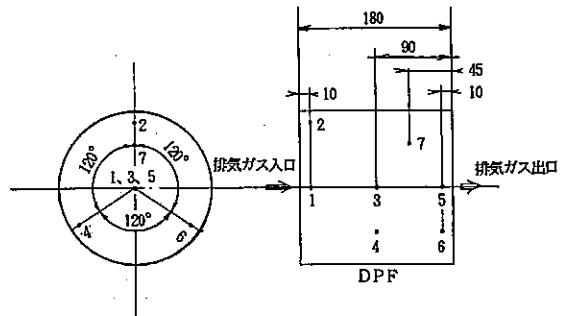


図2 DPF温度測定装置

は以下の定常運転によった。

ごみ収集車の都市内走行時の出現頻度が比較的高い、50%エンジン回転速度である、1750rpmを選び、エンジン負荷率、100、50、及び0%の3条件で、排出粒子重量、黒煙濃度及び排出ガス濃度を測定した。粒子状物質については各実験条件で、4回のろ紙採取を行った。1回の粒子の採取時間は、DPFの許容捕集重量(再生時に熱的損傷を生じないDPF容積当りの捕集重量)を超えないよう設定した。なお、予備実験により、粒子状物質の

捕集採取時間を100%エンジン負荷率では約8分とし、50、及び0%エンジン負荷率では30分とした。この基本性能試験を行った際のDPFの再生は、前者ではその都度、後者では、許容捕集重量を超えない時期に行った。

表2 供試エンジン諸元

型 式	直噴4サイクル4気筒 NA
シリンダー径×行程	105×105
排気量 (ℓ)	3.6
圧縮比	17.5
最大出力 (PS/rpm)	105/3500
最大トルク (kg·m/rpm)	25.5/2000

イ 実用性試験

DPFシステムの実用性については、清掃車走行パターン (1サイクル, 30分, 平均車速17.33km/h)を繰り返し行う通算400時間のサイクリック運転により検討した。図3に、ごみ収集車用DPFの試験用に試作した走行パターンを示した。この運転パターンは、都ごみ収集車走行パターンを解析して得た代表的な走行パターンであり、実際の実験では、エンジンダイナモ運転用に車速や走行抵抗をエンジン回転数とトルクとに変換したパターンを使用した。

実用性試験は24時間の連続運転で実施した。この試験期間中、DPF入口側及び出口側の排気圧力との差 (差圧)、温度及び燃料消費量等を連続記録した。また、捕集再生の1サイクルの時間は、予め予備試験を行って求めた8.5時間 (17回の運転パターン) に定めた。DPFによる粒子状物質捕集量については、再生後と次の捕集サイクル後にDPFを取り外し、その重量を光学天秤を用いて測定し、その差から求めた。

実用性試験終了した後、再度、基本性能試験を行い実用性試験前の性能と比較し、黒煙除去効果等の劣化状況を調査した。

ここで、黒煙濃度の測定には反射光型の汚染度計 (ボックスモークメーター) を排出粒子の測定には、分流希釈法 (ミニトンネル法) を使い、ろ紙 (TX-47) による粒子の採取を行った。粒子の重量測定には、マイクロ電子天秤を用いた。また、試験中のエンジン出口冷却水と潤滑油の温度は80℃に、燃料温度は30℃にそれぞれ制御した。なお、実験には硫黄含有率0.18%の低硫黄軽油を使用した。

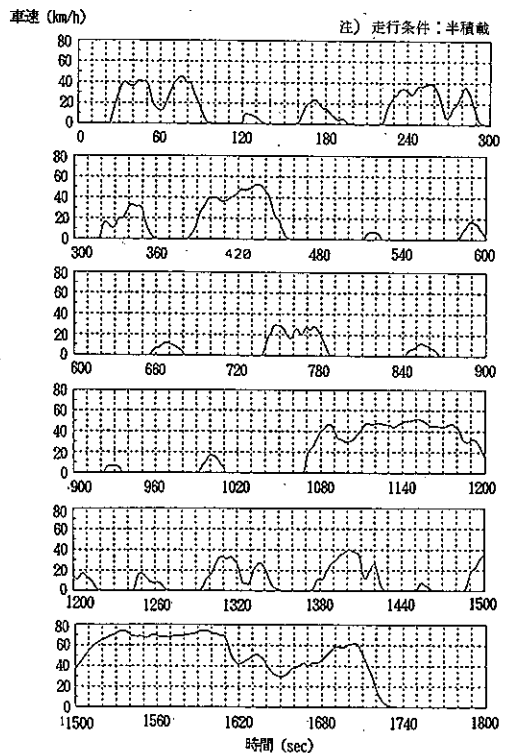


図3 ごみ収集車の代表的走行パターン

ウ 分解調査

全試験終了後、DPFを包んでいるキャニシングを切断しフィルターを取り出し、その損傷等を目視及び電子顕微鏡等で観察した。このDPFの切断に到る詳細なDPFの分解調査はDPFメーカーに依頼して行った。

3 実験結果及び考察

(1) 試作DPFエンジンの初期性能

表3に、供試エンジンの黒煙濃度、排気温度、排気圧力、燃料消費率及び排出ガス特性を示す。また、表4に黒煙濃度、排気温度、排気圧力、燃料消費率及び排出ガス特性を示す。図4に、試作DPFを装着したエンジンの排出ガス特性を前述の供試エンジン (DPF無し) の特性と比較し、各々汚染物質毎に増減率で示す。100%負荷率における粒子状物質は、DPFシステムを装着することによって96%程低減した。負荷率が50、0%と低くなるにつれて粒子の低減する割合は低くなった。このような傾向から、DPFはディーゼルエンジンから排出

される粒子状物質中のカーボン粒子等の不溶性成分 (ISOF) に対する捕集効率は高いが、有機炭素成分等の可溶性成分 (SOF) に対する捕集効率は低いことが考えられる。

表3 供試エンジン(DPF無し)の排出ガス特性
エンジン回転数：1750rpm

負荷率 (%)	0	50	100	
黒煙濃度 (%)	0	0	23	
排気温度 (°C)	145	315	600	
DPF取付部排圧 (mmHg)	5	5	7	
燃料消費率 (ℓ/h)	2.2	6.1	12.5	
排出ガス g/h	T・HC	29.4	22.9	13.3
	CO	58.9	43.1	627.7
	NOx	67.3	235.5	383.6
	PM	8.8	7.7	104.3

表4 供試エンジン(DPF有り)の排出ガス特性
エンジン回転数：1750rpm

負荷率 (%)	0	50	100	
黒煙濃度 (%)	0	0	0	
排気温度 (°C)	150	315	590	
DPF取付部排圧 (mmHg)	45-2	67-3	88-0.13	
燃料消費率 (ℓ/h)	2.3	6.1	12.5	
排出ガス g/h	T・HC	28.5	18.0	21.5
	CO	60.8	42.4	575.1
	NOx	61.8	208.2	373.1
	PM	6.2	3.3	4.2

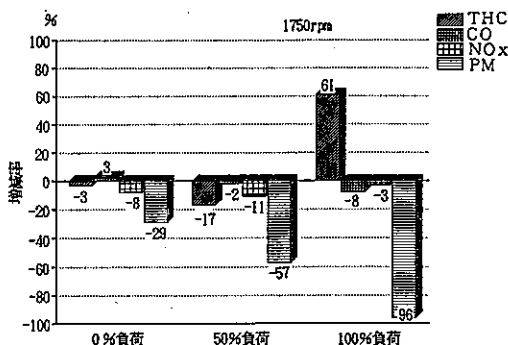


図4 試作DPFシステムの初期性能

なお、DPFの装着による影響で100%負荷率においてT・HCが増加するが、それ以外の排出ガスの増減率は小さい。

(2) 実用性試験

図5に、実用試験中のDPF入口、出口側との最高差圧の変化状況を示す。ここで、最高差圧は再生後の最初の第1回運転パターン中の最高差圧と再生前の第17回目の運転パターン中の最高差圧とを図示した。運転パターン中の最高差圧は、再生直後が低くなり、時間の経過とともに上昇し、次の再生直前に高くなる履歴が認められる。再生前の最高差圧は、DPF内の粒子状物質の燃え残りが蓄積されていくため、捕集再生サイクルを続けることによって徐々に高くなって行く傾向が示されている。

また、DPFの再生後の差圧が他に比べ一段と下がっ

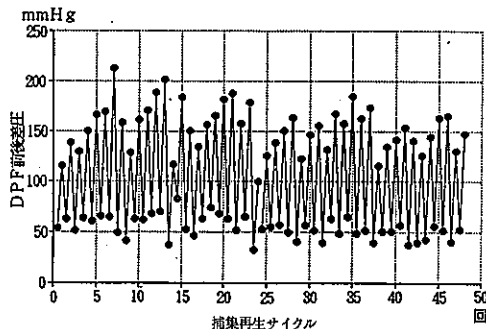


図5 実用性能中のDPF前後差圧

ているサイクルがある。これは数回の捕集再生サイクル分で蓄積された燃え残りが一挙に燃えてDPF差圧が低くなったものと考えられ、DPFはこのような履歴を繰り返していることが認められる。このことは、DPFによる捕集再生を繰り返し行っていくなかで、あるサイクルで粒子状物質が一挙に燃えて差圧が低下したその次のサイクルでは、再生時の燃焼される粒子状物質量は通常のサイクルより少なく、着火不良を起こすことが考えられる。この現象が14サイクル目に発生したと推測された。チャート記録を調べたところ、DPF前面の温度上昇率が他の再生時に比べて低く、正常な再生動作を示す空気量コントロールの信号が出ていないことがわかった。この原因を調べたところバッテリーの電圧降下があり、同バッテリーを電源とするコントローラーが正常に動作せず、結果として再生を中断する回路が働いたことがわかつ

た。14サイクル目のDPF差圧は他のサイクルに比べて低く、粒子状物質の燃え残りが一挙に燃焼した後のサイクルであったことが推測できる。従って、ここでのDPFの再生時には捕集されている粒子状物質質量が少ないため、もっと粒子状物質をため込んで着火性を良くする必要があったと思われる。そこで、続けて次の捕集運転を行い、15サイクル目の再生時に温度上昇を抑えるため、空気量を手動で調整する操作を行った。この操作は予備実験中にも実施しており経験済みであったが、DPF内の一部の温度が1000℃を超えてしまったと思われる。

図6に、実用試験中のDPF内温度の挙動を示す。DPF内温度は各温度測定点における再生時の最高温度を記載した。再生時に最も高温になり易いとされるDPF後端部から1/3付近の#7の15サイクル目の温度が1000℃以上を示している。

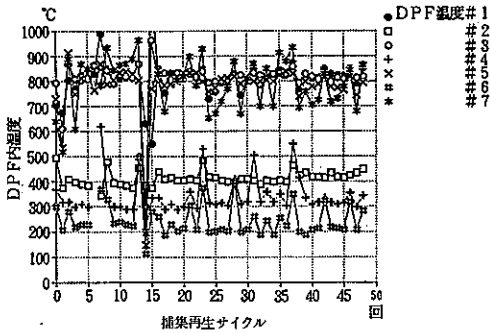


図6 実用性試験中のDPF内温度

図7に、実用性試験中の黒煙濃度を示す。黒煙濃度はエンジン回転数1700rpm、100%負荷率時のDPF再生直後の測定値である。実用性試験中の黒煙濃度の測定回数が少ないのは、実験条件が高負荷のため数多く行うことができなかったためである。実用性試験の初期の黒煙濃度は0%であったが、捕集再生18サイクル目の黒煙濃度は4%になった。この原因として、15サイクル目の異常高温によってDPFが損傷したことが考えられる。その後、黒煙濃度は再び0%に戻ったが、これは、損傷した部分が燃え残りの粒子等によって塞がれたためと考えられる。

図8に、実用性試験中の燃料消費率を示す。捕集再生サイクルが増えるにつれて燃料消費率が増加している傾

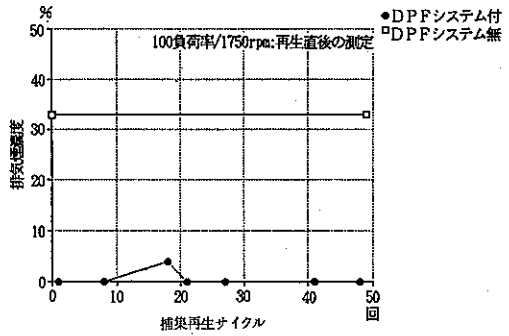


図7 実用性試験中の排気煙濃度

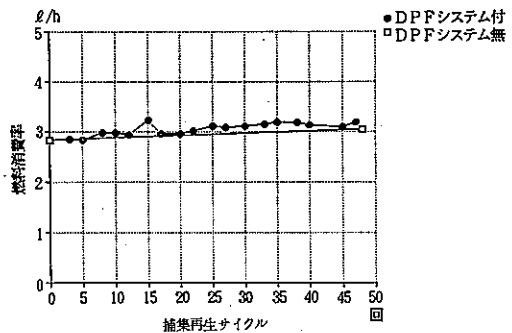


図8 実用性試験中の燃料消費率

向が認められるが、これは試験中のアイドル回転数が試験開始後、徐々に上昇し、試験終了時には約1500rpm程上昇したためと考えられる。このエンジン回転数の増加は、アクセルリンクの接合部の当り面の変動によると思われるが、DPF無しの燃料消費量と比較することを考慮して試験途中でのアイドル回転数の調整は行わなかった。

DPFシステムを取り付けた場合の実用性試験時のDPFの装着による平均燃費率の悪化は約4%程度であった。

図9に、実用性試験中DPFに捕集された粒子状物質重量を示す。粒子状物質のサイクル毎に捕集される重量の変動はさほど大きく無く、平均値は約23gであった。

(3) 実用性試験終了後の基本性能

表5に、実用性試験後の供試エンジン (DPF無し) の排出ガス特性を、実用試験時の排出ガスの測定は1週間に1回の割合で実施し、燃料消費率は1日毎の平均値を求めたものである。

図10に、実用性試験後の供試エンジンに対する試作

DPF付エンジンの性能比較を示す。初期性能と同様にDPFの装着により100%負荷率におけるT・HCが増加した。しかし、T・HC以外の排出ガスにはさほど大きな変化はなかった。DPFシステムを装着することによって100%負荷率時の粒子状物質は約81%低減した。負荷率が50、0%と低くなるにつれて粒子状物質の低減率は低くなった。

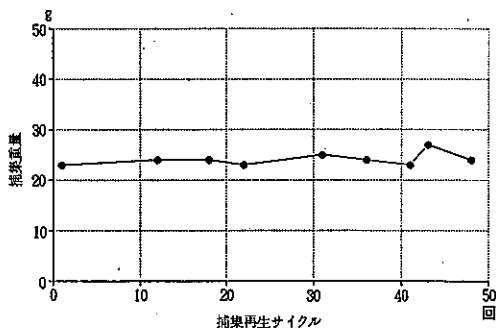


図9 実用性試験中の捕集粒子状物質の重量

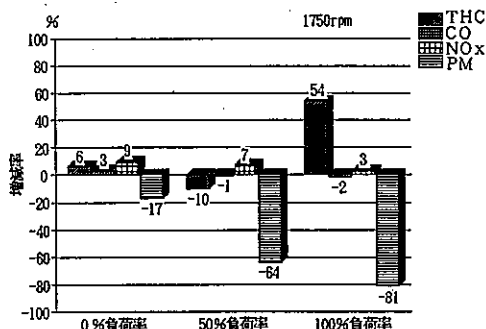


図10 実用性試験後の性能比較

表5 耐久試験後(DPF無し)の排出ガス特性
エンジン回転数：1750rpm

負荷率 (%)	0	50	100	
黒煙濃度 (%)	0	0	33	
排気温度 (°C)	150	320	600	
DPF取付部排圧 (mmHg)	5	5	7	
燃料消費率 (ℓ/h)	2.3	6.2	12.5	
排出ガス g/h	T・HC	29.8	21.1	12.0
	CO	53.4	38.7	391.3
	NOx	56.5	208.6	359.4
	PM	7.7	6.6	87.4

表6 耐久試験後(DPF無し)の排出ガス特性
エンジン回転数：1750rpm

負荷率 (%)	0	50	100	
黒煙濃度 (%)	0	0	0	
排気温度 (°C)	150	325	600	
DPF取付部排圧 (mmHg)	45-2	70-3	64-0.1	
燃料消費率 (ℓ/h)	2.3	6.2	12.5	
排出ガス g/h	T・HC	31.5	20.8	18.4
	CO	51.9	38.5	384.0
	NOx	61.7	222.9	371.8
	PM	6.4	2.4	16.9

図11に、実用性試験前後の粒子状物質の低減率を示す。50%負荷率時を除いて、実用性試験後の低減率は試験前に比べて低くなった。

(4) 分解調査

写真1に、試験終了後のDPFを示す。目視による調査では、DPF表面にはクラックや溶損等の損傷は認められなかった。しかし、排出ガス出口側の一部に黒煙の付着が見られ、DPF内部の損傷による粒子状物質の漏洩が考えられた。写真2に、DPFメーカーが行ったDPF断面部の調査結果を示す。これにより排出ガス出口側に微細なクラックと一部溶損が認められた。

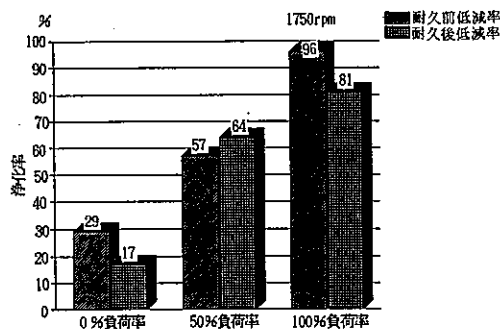


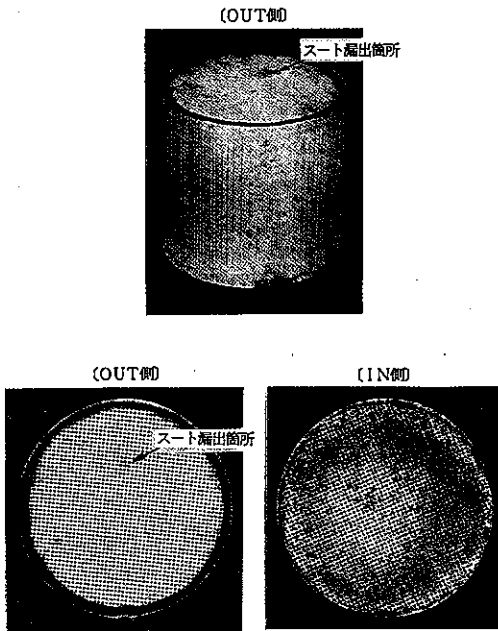
図11 実用性試験前後におけるPM低減率

4 おわりに

試作DPFシステムの試験結果をまとめると以下のとおりである。

(1) DPFによるディーゼル黒煙の低減効果は81%から96%と高く、特にエンジンの高負荷運転時に排出され

写真1 外部状態



る黒煙の低減効果は大きい。

(2) DPFの装着による排出ガスに及ぼす影響は少なく、燃料消費率についても約4%程度の上昇であった。

(3) DPF再生時の黒煙の燃焼状態が不安定であり、実用試験時のDPF差圧の変動が大きかった。しかし、40時間の実用性試験の範囲内では、DPFの基本性能を損なうような大きな不具合は生じなかった。

(4) 但し、DPF再生用の空気供給電動プロアがバッテリーの電圧降下により正常に作動しなかった時があり、これが原因でDPFの再生不良が発生しDPFに微細な溶損が生じた。

(5) 今後の課題として、DPFシステムの実車への装着にあたっては、さらに安定した再生方法の確立と耐熱性の高いDPFの開発が必要であることを認めた。

なお、本研究の実施にあたり、DPFシステムの試作組立、測定等は(財)日本自動車研究所に委託して行った。実験を担当された関係各位に感謝するものである。

参考文献

- 1) (財)日本自動車研究所：ディーゼル排出ガス低減手法に関する研究報告書(東京都環境科学研究所委託)、(1990)。

写真2 内部状態

