

大型ディーゼル車に装着されたDPFによる ナノ粒子の低減効果について

三好 康彦 横田 久司 古明地哲人 中川 智史 坂西 丕昌

要 旨

大型ディーゼルに装着された3種類のDPF(連続再生方式: コージェライトフィルター、強制再生方式: 無機炭化珪素製フィルター、連続再生方式: 金属製フィルター)について、装着前後で電子式低圧インパクトターを使用して粒子の個数濃度を計測し、ナノ粒子(50nm以下)について次の結果が得られた。

- (1) DPFにより、ナノ粒子の個数濃度は全般的に大きく低減されている。
- (2) フィルターの種類と走行モードによって、ナノ粒子の低減率に極めて大きな差のあることが明らかとなった。
- (3) DPFによるナノ粒子の低減効果については、ナノ粒子の測定方法の確立とともに、評価方法についてさらに検討する必要がある。

キーワード: 大型ディーゼル車、DPF、ナノ粒子、炭化珪素、コージェライト

Reduction Effects of Nano-Particles for three different types of DPF Equipped with Three Heavy-Duty Diesel Vehicles

Yasuhiko Miyoshi, Hisashi Yokota, Tetsuhito Komeiji
Tomofumi Nakagawa, Motomasa Sakanishi

Summary

We got the following results concerning with reduction rates of nano-particles on three heavy-duty diesel vehicles equipped with three different types of DPF (continuous regeneration type using cordierite filter, manual regeneration type using SiC filter, continuous regeneration type using metal filter), by using ELPI (Electrical low Pressure Impactor).

- (1) The reduction rates of nano-particles by DPF were high as a whole.
- (2) It was proved that there was a big difference of reduction rates of nano-particles depending on different types of filter and test modes.
- (3) Concerning with reduction effect of nano-particles by DPF, we need to further study evaluation method with establishing the measurement method of nano-particles.

Key Word: heavy-duty diesel, DPF, nano-particle, SiC filter, cordierite filter, metal filter

1 はじめに

平成15年10月からのディーゼル車規制の実施により、ディーゼル車から排出される粒子状物質（PM：Particulate Matter）の低減が期待されている。この規制に適合するために粒子状物質減少装置の一種としてDPFが装着されている。また、新長期排出ガス規制やその後のポスト新長期規制では、DPFは生産段階で装着される可能性が高いと考えられる。ディーゼル排出粒子は一般に100～300nmの微小粒子が大部分であるため、従来から健康に与える影響が注目されてきた。特に近年、50nm以下の極微小粒子をナノ粒子とよび、その排出挙動、健康影響が注目されている。それは、粒子数として多いナノ粒子は微小であるため、肺の深部まで達すること、健康に影響が大きいとされている表面積でみると、ナノ粒子のほうが相対的に大きくなることなどである。

こうした背景の中で、粒子数が測定可能な装置として、電子式低圧インパクター（Electrical low Pressure Impactor: 以下“ELPI”という。）が注目されている。¹⁻³⁾ この測定装置はアンダーセンサンプラーと荷電装置を組み合わせたもので、粒子濃度の時間変化やナノ粒子までも測定可能であるため、エンジン特性と粒子生成の関係、DPFの種類とナノ粒子の低減効果などの状況を明らかにすることができる。

ここでは、DPFによる個数濃度の低減効果の知見が少ないことから、ELPIを使用した測定結果から、特にナノ粒子の排出特性及びDPFによる低減効果について報告する。

2 実験

(1) DPF、酸化触媒及び車両の諸元

DPF、酸化触媒及び車両の諸元を表1に示した。以下、それぞれのDPF、酸化触媒について表1に示した記号で記述する。DPF-1は一定圧力になると、自動的に排気流路を逆の向きに切り替える方式の連続再生式DPFである。前段の酸化触媒には白金（Pt）触媒が使用され、後段のコーゼライトフィルターにもPt触媒が使用されている（図1参照）。実験には、総排気量11781ccのバス（A車）を使用した。実験中には流路の切替は行わなかった。DPF-2は、炭化珪素（SiC）製のフィルターを使用し、一定時間を経ると信号を発し、電気式ヒーターによりフィルターに捕集したPMを燃焼する方式である（図2参照）。

なお、実験中には再生を行わなかった。実験には、総排気量7961ccの貨物車（B車）を使用した。DPF-3は、連続再生式DPFであり、前段の酸化触媒の内容は公開されていない。後段のフィルターには金属フィルターが使用されている（図3参照）。実験には、総排気量12503ccの貨物車（C車）を使用した。

DPF-1及びDPF-3は、前段に配置した酸化触媒により排気中の一酸化窒素（NO）を二酸化窒素（NO₂）に酸化させ、NO₂の酸化力を利用して、フィルターに捕集されたPMを燃焼する仕組みとなっている。

(2) 実験施設

表1 DPF及び車両の諸元

DPF 諸元	方式 (記号)	連続再生 DPF-1	強制再生 DPF-2	連続再生 DPF-3
	酸化触媒	触媒: Pt	使用していない。	触媒不明
	フィルター	コーゼライト触媒: Pt	炭化珪素	金属フィルター
車両 諸元	車両	A	B	C
	燃料	低硫黄軽油	低硫黄軽油	低硫黄軽油
	車両型式	U-LV324K	KC-FD2JGBE	U-CK450END
	エンジン型式	6QB2	JO8C	PF6
	排気量	11781cc	7961cc	12503cc
	最高出力	230ps /2250rpm	200ps /2900rpm	235ps /2100rpm
	車両総重量	14045kg	7965kg	14810kg
	規制年次	平成元年	平成6年	平成元年

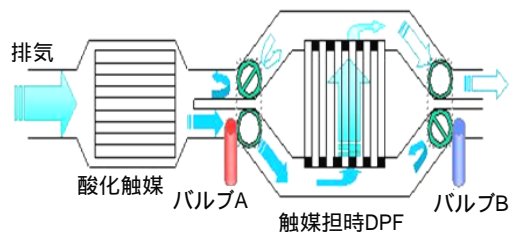


図1 DPF-1の模式図(A車)

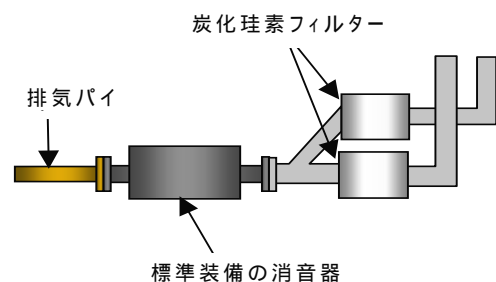


図2 DPF-2の模式図(B車)

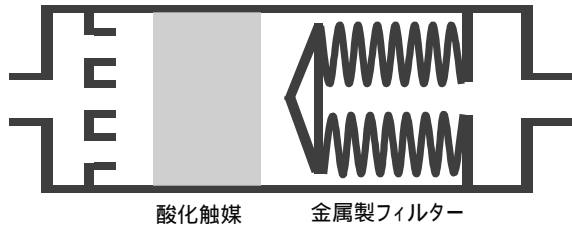


図3 DPF-3の模式図(C車)

実験には、当所の大型自動車排出ガス計測システムを使用した。大型シャシーダイナモメータは、370kWの吸収容量を持つ直流電気動力計で、直径1,061mmのシングルローラーが設置されている。排出ガス計測システムは、自動車排出ガス分析装置（MEXA-9400F、(株)堀場製作所）、CVS装置（CVS-120T、同）、全量希釈トンネル（内径609.6mm，有効長6,503.3mm，CFV流量120m³/min）、ロウポリウムサンプラー等を備えている。

(3) 実験方法

ア 測定モード

実験は、DPF等の装着状態及びそれらを取り外した状態（原車）で行い、相互の排出ガスについて比較した。排出ガスの測定は、東京都実走行パターン（主にNo.2、No.5、No.8、No.10）及び法定試験モードであるディーゼル13モード（以下、「D13モード」という。）の測定を中心に表2のように行った。実験時の都合により、全ての車両について必ずしも全モードは測定できなかった。なお、等価慣性重量は1/2積載条件とした。

表2 車両と測定モード

車両	測定モード
A	東京都実走行パターン No.2, No.5, No.8
B	東京都実走行パターン No.2, No.5, No.8, No.10 D13モード
C	東京都実走行パターン No.2, No.5, No.8, No.10 D13モード

表3 ELPIで測定される各粒子の中位径

stage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
中位径 (Di)	7	29	58	103	165	253	392	636	990	1610	2450	3970

イ ナノ粒子の測定方法

排出ガスは全量希釈トンネルからサンプリングして、ELPI（型式10LPM、DEKATI 社製）により、粒径別の個数濃度を測定した。装置内に導入された粒子は、先ず荷電され、続いて多段多孔低圧型カスケードインパクターによって空気力学的粒径に従って分級され、各分級段の電荷量から粒径個数分布が求められる。本装置では12段に分級することができる。12段の中位径 (Di) は表3に示した。なお、測定時の希釈排出ガスの希釈率は、A車で44～92倍、B車で53～133倍、C車で46～109倍の範囲であった。

3 結果及び考察

(1) フィルターの種類によるナノ粒子低減効果

ア 各測定モードにおけるPM排出量と低減率

PMの個数濃度を議論する前段として、排出量ベースでの低減率を確認した。DPF-1、DPF-2及びDPF-3をそれぞれ各車両に装着した場合のPM排出量と低減率を図4～6に示した。DPF-1については、東京都実走行パターン No.5で73%程度の低減率であったが、No.2とNo.8はともに80%以上を示した。DPF-2については、東京都実走行パターン No.2において低減率は80%弱であるが、

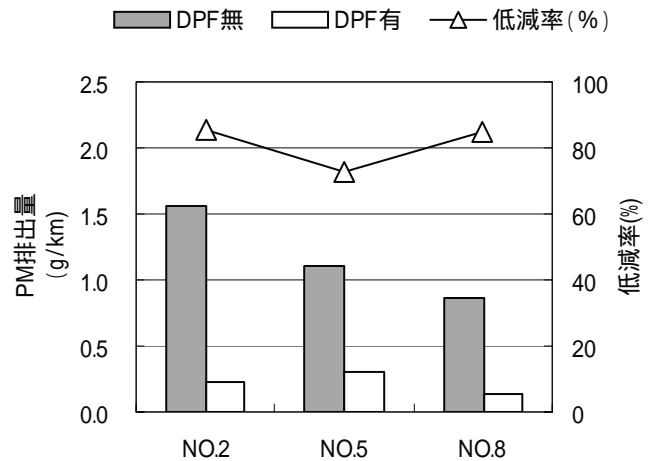


図4 各測定モードによるPMの低減状況 (DPF-1:A車)

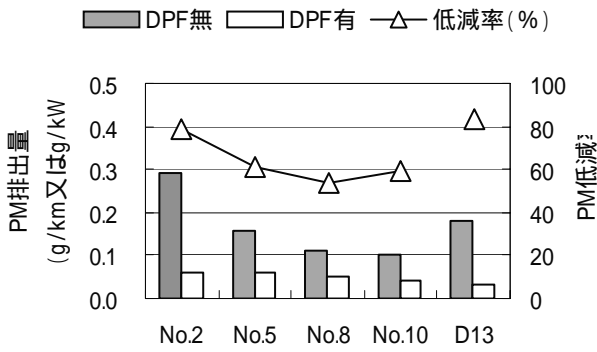


図5 各測定モードによるPMの低減状況 (DPF-2:B車)

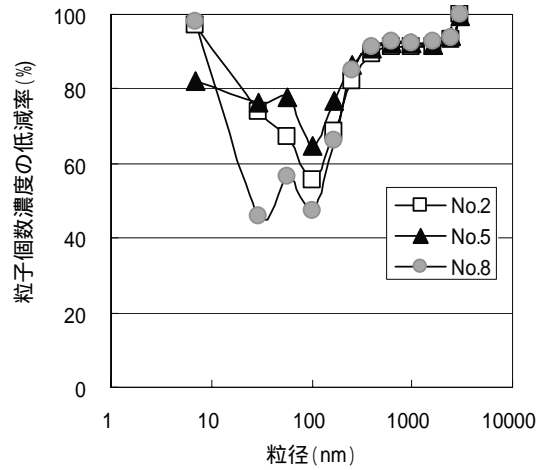


図7 DPF装着前後の個数濃度低減率(DPF-1)

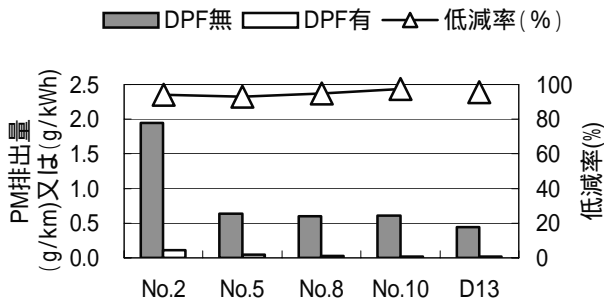


図6 各測定モードによるPMの低減状況 (DPF-3:C車)

No.5と No.8では低下しており、DPF-1とは異なる傾向を示した。なお、各車両のPM排出量がそれぞれ異なることに留意されたい。DPF-3によるPM低減率は、測定モー

ドにかかわらず、90%以上の高い値を示した。

イ 粒子個数濃度の低減率

DPF-1について個数濃度の低減率を図7に示した。計測粒径範囲内では、80%以上の低減率があり、おおむねPM排出量の低減率と同等であった。粒径100nm付近で低減率が落ち込み、谷型となっている。Lee⁴⁾らの炭化珪素の無機繊維フィルター製DPFによる結果では、同様に180nm付近で低減率が減少している。この原因については現時点では不明である。

なお、ナノ粒子の低減効果の表記方法については、排出量と同様な低減率が妥当かどうか検討が必要である。以下では、個数濃度での表記とした。

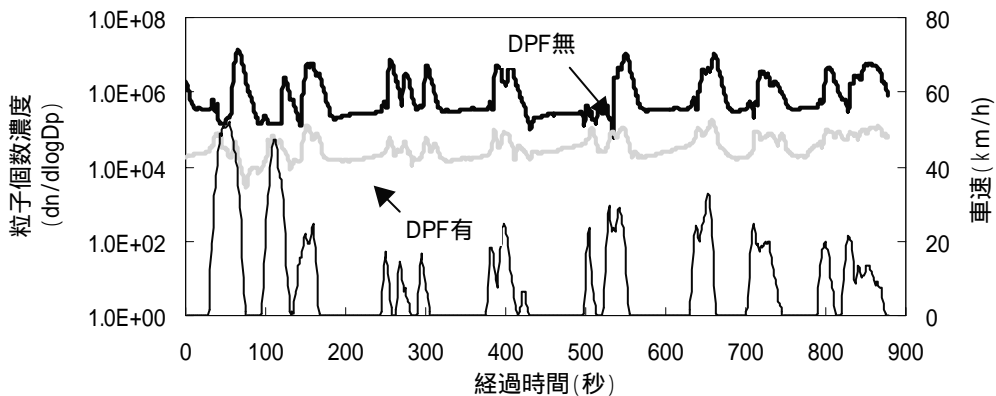


図8 東京都実走行パターンNo.2走行時の中位径7nmにおける個数濃度(DPF-1)

ウ 過渡運転時の個数濃度の変化

DPF-1による東京都実走行パターンNo.2走行時の最小測定領域である中位径 ($D_i = 7 \text{ nm}$) の個数濃度を図8

に示した。粒子は加速時に増加し、減速時には燃料カットのため、粒子生成数は大幅に低減する。DPF装着により加速や減速に係わらず、ほぼ一様に低減している。

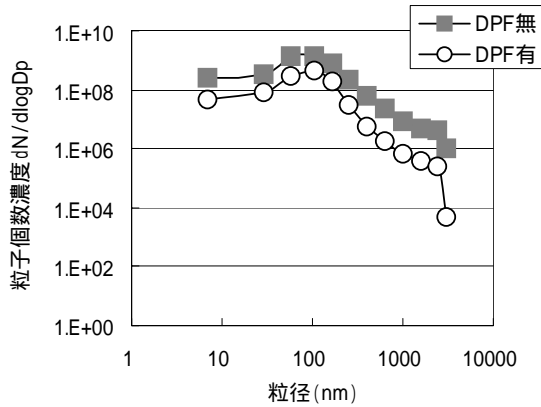


図9 東京都実走行パターンNo.5による個数濃度の変化(DPF-1)

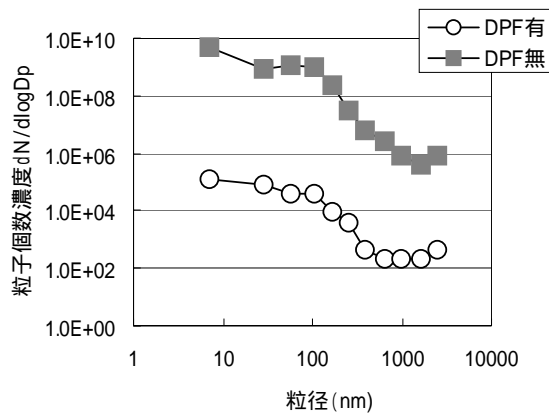


図10 東京都実走行パターンNo.5による個数濃度の変化(DPF-2)

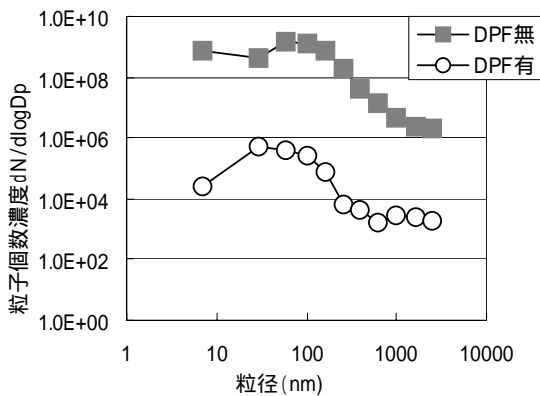


図11 東京都実走行パターンNo.5による個数濃度の変化(DPF-3)

工 DPFの種類による粒子個数濃度の変化

東京都実走行パターンNo.5を走行した場合について、DPF毎に、個数濃度の粒径分布を図9～11に示した。

* 粒子の粒径は、数nm～10⁵nmの範囲に及ぶので、

粒径分布を表示する際の横軸は対数目盛を用いるのが普通である。この場合、個数濃度をdN/dlogDpとしてプロットすれば、グラフ上のある区間(logD₁、logD₂)に挟まれた部分の面積が濃度に比例することになる。

DPF-1の場合(図9)は、全粒径についておおむね1桁程度、個数濃度が低減している。DPF-2の場合(図10)には、全粒径について3～4桁にわたってよく低減されていることが分かる。東京都実走行パターンNo.2、No.8も、No.5と同様な低減効果が認められたが、No.10では低減率は1～2桁であった。DPF-3の場合(図11)には、DPF-2と同様に3～4桁の高い低減効果を示し、特に最小測定粒径である中位径7nmの粒子で高い低減効果が認められた。東京都実走行パターンNo.2で、No.5とほぼ同程度の傾向を示したが、No.8、No.10では中位径7nmの個数濃度の低減率は2～3桁に減少した。この原因として、DPFの背圧等の影響について次項で若干の検討を行った。

(2) D13モードによる低減効果の検討

D13モードは、表4に示すエンジン回転数とエンジン負荷を一定の条件で運転する定常試験法である。運転モードによる低減率について、比較検討を行った。

表4 D13モードの運転条件

運転モード	最高出力に対する回転数比	エンジン負荷率
1	アイドリング	0%
2	40%	20%
3	40%	40%
4	アイドリング	0%
5	60%	20%
6	60%	40%
7	80%	40%
8	60%	60%
9	80%	60%
10	60%	80%
11	60%	95%
12	80%	80%
13	60%	5%

DPF-2について、第5モードと第11モードにおける個数濃度変化を図12、13に示した。なお、第1から第10運転モードまでは同程度の低減率を示した。第5運転モードでは、全粒径領域で低減率はおおむね2桁程度であるが、第11運転モードでは、最小測定粒径である中位径7nmにおいて、DPDを装着した場合に逆に増加していた。

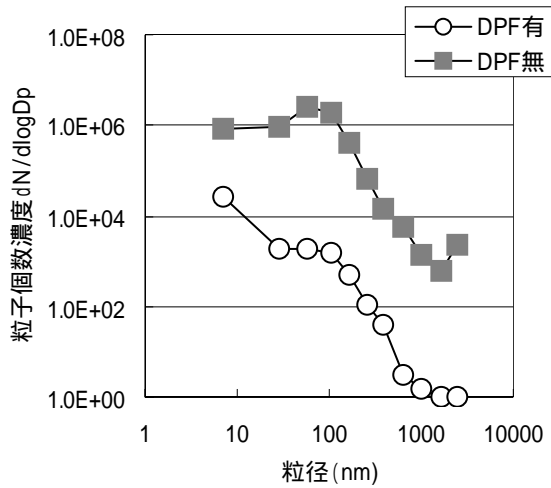


図12 D13モードの第5モードによる個数濃度 (DPF-2)

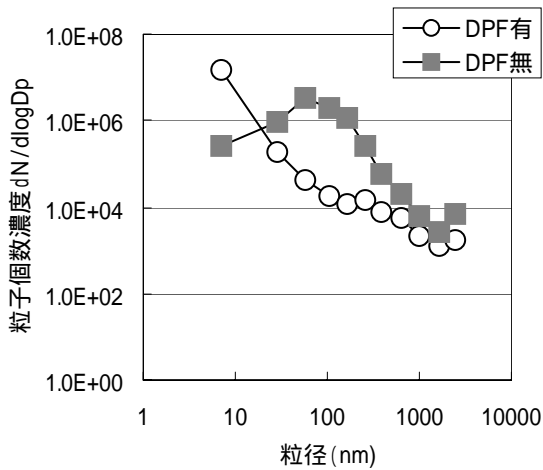


図13 D13モードの第11モードによる個数濃度 (DPF-2)

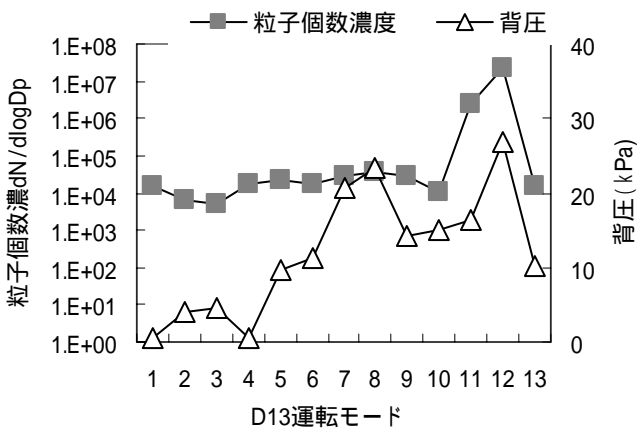


図14 D13モードにおける中位径7nmの粒子個数濃度と背圧の関係 (DPF-2)

第12運転モードも同様な現象を示した。このような逆転現象は他⁵⁾でも報告されている。第11運転モードと第12運転モードは、エンジン回転数、エンジン負荷が高く(表4参照)排出ガス量が他よりも多いため、比較的高い背圧(図14)が生じている。そのため、フィルターに捕集されている中位粒径7nmの粒子が通り抜けてしまったか、フィルターのサイズとの関係で凝集した粒子が壊れ、より小さな炭素粒子になり、DPFを通過したのではないかと予想されるが、DPF-3の同じ第11運転モードでは、このような現象は現れておらず(図15)、推測の域をでない。

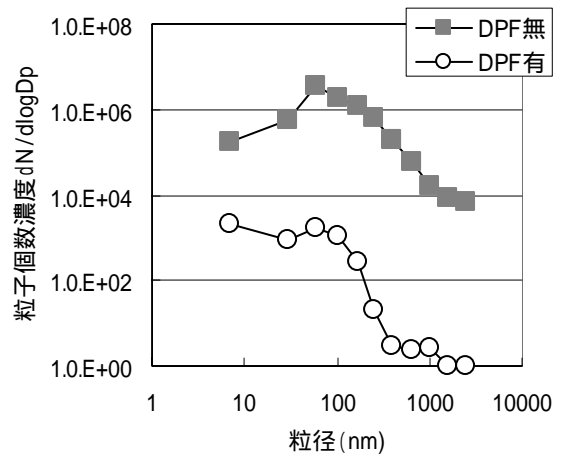


図15 D13モードの第11モードによる個数濃度 (DPF-3)

4 まとめ

(1) フィルターの種類による粒子の個数濃度低減効果

ナノ粒子の個数濃度の低減率は、DPF-1で低減率80%以上と高いが粒径100nm付近で落ち込み谷形となっていた。DPF-2では、東京都実走行パターンNo.5で3~4桁にわたって高い低減率であった。DPF-3ではDPF-2と同様に高い低減率であった。

(2) 東京都実走行パターンとD13モードの相違

ナノ粒子の個数濃度では、DPF-2においてD13モードの第11及び第12試験モードで粒子の個数濃度の逆転現象が見られた。東京都実走行パターンではこのような現象は見られなかった。

(3) フィルターによる低減効果の特徴

PM排出量の低減率は、DPFのフィルター種類等により、60~90%程度の差異が見られる。これに対し、ナノ粒子

の個数濃度による低減率では、%オーダから4～5桁の開きがあった。フィルターによってナノ粒子の低減率に極めて大きな差のあることが明らかとなった。

DPFによるナノ粒子の低減効果については、ナノ粒子の測定方法の確立とともに、評価方法についてさらに検討する必要がある。

本調査の実施に当たっては、環境局自動車公害対策部計画課の多大な協力を得て実施した。紙上を借りて感謝します。

参考文献

- 1) 秋山ら：ディーゼル排出粒子の粒径特性について、東京都環境科学研究所年報2002、pp.153-160 (2002)
- 2) ディーゼル排気粒子リスク評価検討会：ディーゼル排気微粒子リスク評価検討会、平成13年度報告、平成14年3月5日 (2002)
- 3) 中島ら：ディーゼルエンジンから排出される微粒子の流形分布、第42回大気環境学会年会講演要旨集、pp.597 (2001)
- 4) Jin-ha LEE, Yuichi Goto and Matsuo Odaka : Measurement of the Diesel Exhaust Particle Reduction Effect and Particle Size Distribution in a Transient Cycle Mode with an Installed Diesel Particulate Filter (DPF), SAE 2002-01-1005 (2002)
- 5) BRITTA A, HOLYMEN and ALBERTO AYAKA : Ultrafine PM Emission from Natural Gas, Oxidation-Catalyst Diesel, and Particle-Trap Diesel Heavy-Duty Transit Buses, Environ. Sci. Technol、36, 5041-5050 (2002)