

# DPF 装着時におけるディーゼル排出微粒子の粒径分布計測に関する研究

環境エネルギー部 李 津夏, 後藤 雄一, 塚本 雄次郎, 小高 松男

## 1. はじめに

ディーゼルエンジンの粒子状物質 (PM) の規制は世界的に急速に厳しくなりつつある。2000年3月に東京都はディーゼル排出微粒子 (Diesel Exhaust Particle: DEP) の低減のため、環境審議会ですべて市内ディーゼル車へのディーゼル微粒子除去装置 (Diesel Particulate Filter: DPF) 装着義務付け案を提案した<sup>1)</sup>。米国 EPA では SPM<sub>2.5</sub> (2.5 μm 以下の微粒子に関する規制) が制定されるなど、主にナノ粒子 (nano-Particles) による SPM の大気環境汚染や人体の肺への沈着など健康に影響が社会的に注目されている<sup>2)</sup>。

しかし、現状の DPF は実用化のための性能と耐久性が必ずしも満足すべきものでなく、また、その微粒子低減効果の合理的な評価手法は、未だ確立されてはいない。このため、性急な市場導入が図られると市場に混乱を招く懸念が指摘されている<sup>3)</sup>。また、現在の DPF では極微小粒子がすり抜ける点が指摘されており、捕集率向上と DPF 装着によるエンジン背圧増加の低減が次世代 DPF の重要課題として残されている。

しかしながら、実際の過渡的運転条件において DPF 後の PM 排出量や粒径分布がどのようになっているかは、ほとんど調べられていない。特に、粒径分布については過渡的な粒径分布変化の挙動が全くと言ってよいほど明らかにされていない。

そこで本研究では、相互再生式 DPF<sup>4)</sup> を用い、PM 低減効果と共に ELPI<sup>5)</sup> (Electric Low Pressure Impactor) を使用して排出微粒子の粒径分布を測定した。それによって、DPF が排出微粒子の粒径分布に与える影響を調査した結果をここで報告する。

## 2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置の概要を図1に示す。また、実験に用いた供試機関の主要諸元を表1に示す。エンジン・ダイナモメータを用いて1994年度排出ガス規制対応のエンジン (内径×行程: 133×160mm, 最大出力 kW/rpm: 173/2100) 単体を実際の運転とほぼ同じ粒子低減効果を見るためにプログラム運転装置によって定常運転モードと過渡運転モード運転を行った。また、相互再生式 DPF を装着し、DPF 有りと無しの排出ガス測定を行った。

本研究で用いた相互再生式 DPF (以下 DPF) は、2つの SiC フィルターを持ち、1つが PM を捕集する間、他のフィルターは捕集された PM をヒーター加熱と空気投入によって燃焼させてフィルターを再生するメカニズムである<sup>4)</sup>。DPF の入口と出口の前後で温度と圧力を測定した。

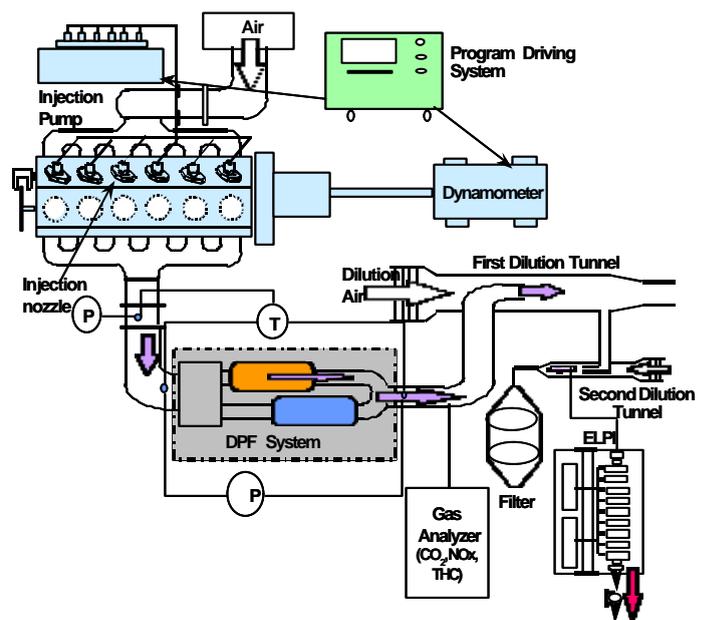


Fig.1 Experimental system

Table.1 Test engine specification

Emission Regulation	1994 Japan Domestic
Combustion System	Direct Injection
Engine Type	In-line 6-Cylinder
Bore / Stroke (mm)	133 / 160
Rated Power (kW/rpm)	173 / 2100
Max. トルク (Nm/rpm)	833 / 1300
Displacement (cm <sup>3</sup> )	13,337

Table 2 Specification of DPF for Urban Bus<sup>4)</sup>

Filter Size	1.2 m <sup>2</sup>
Number of Filter	2
Filtration efficiency (soot)	91%
Trap Time of Each Filter	45 min (minimum) 4 hours (city area)
Regeneration System	Electric Heater + Exhaust Gas
Electric Power for Heating	2.8 kW
Regeneration Duration	15 min

DPF を用いる実験は、DPF の初期条件が実験結果に影響を与える。本研究では DPF 実験条件を同じにするため、エンジンの回転数と負荷率を 1260rpm・60%および 1680rpm・80%で各々20分ずつ予備運転を行った。その後、エンジン停止状態で DPF のフィルターに捕集された PM の再生を行ってから実験を行った。

PM の排出量の測定には、2 段希釈式のフルトンネルを用い、2 次希釈トンネルからフィルター捕集した。エンジンの吸気と希釈トンネル内及び実験室の雰囲気条件は温度 25±0.5℃、湿度 60±0.5%一定とした。DPF の温度および圧力の測定位置は、それぞれ入口または出口から約 150mm である。排出ガス中の微粒子の粒径個数分布は、ELPI<sup>5)</sup> (Electric Low Pressure Impactor) を用い 2 次希釈トンネルの後部オリフィス付近から測定を行った。

燃料性状は排出ガスに強く影響を与える。さらに、PM 粒子の測定にも影響があることは明白である。表 3 に本研究で使用した供試燃料の性状を示す。供試燃料の硫黄成分濃度は 35ppm である。また、実際運転と同じ運転状態を再現するために D13 (Japan Diesel 13mode)、ESC (European

Table 3 Properties of test fuel

Density ( 5 g/cm <sup>2</sup> )	0.8267	
Kinematic Viscosity (mm <sup>2</sup> /s @30 )	3.041	
Flash Point PM	71	
Distillation Profile ( )	T10	193.5
	T50	260.0
	T90	314.0
	FBP	357.5
Cetane Index	53.1	
Sulfur Content (ppm)	35	
Pour Point ( )	-45	
Residual Carbon (mass% of residue 10%)	0.01	
C.F.P.P. ( )	-46	
Total Heating Value (J/g)	45,890	

Stationary Cycle) の定常運転モードおよび UST (US Transient Cycle)、ETC (European Transient Cycle) の過渡運転モードを用いてプログラム運転を行った<sup>6)</sup>。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 DPF による PM 低減効果

図 2 にフィルターを用いた PM 質量測定法による評価結果を示す。各 PM 測定結果は 3 回の平均値である。DPF 無しの場合、加速と減速の変化が激しい過渡運転モードが定常運転モードより高く測定された。しかし、DPF を装着した場合は、いずれの運転条件でも 0.1g/kWh 以下であった。DPF 装着による PM 低減率も過渡運転モードの方が 83%以上と高いことが分かる。

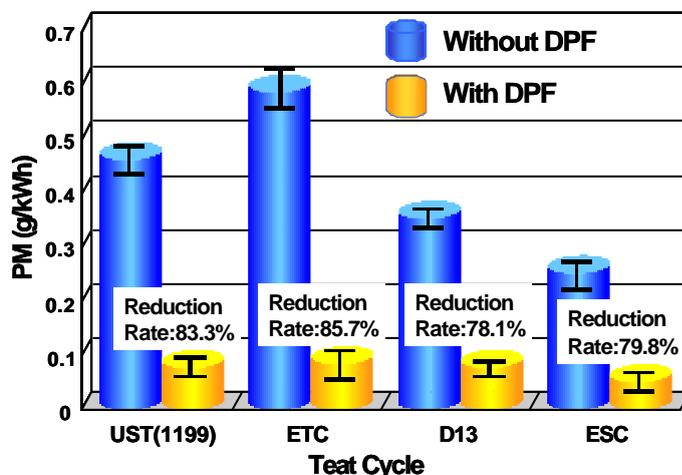


Fig.2 Effect of PM emission reduction with DPF

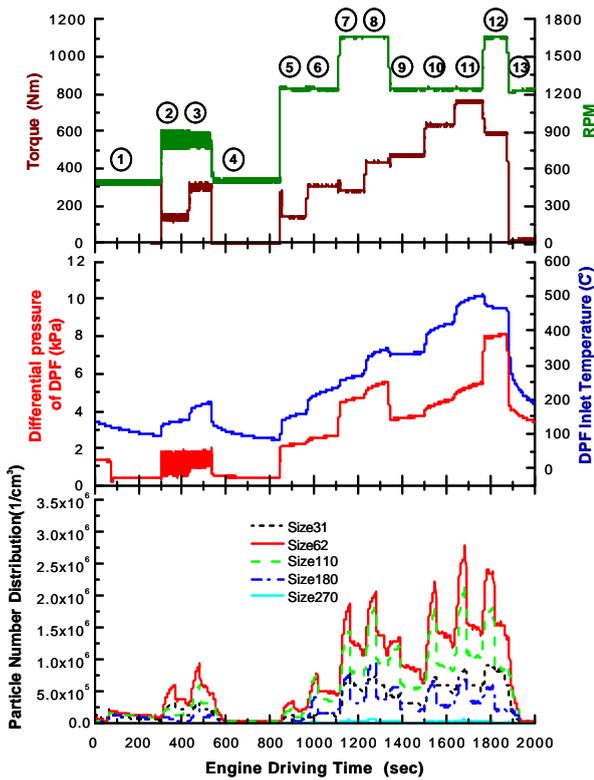


Fig.3 The variation of DPF inlet temperature and differential pressure and the variation of particle number distribution in the engine speed and torque settings for the case of Japanese diesel 13 mode cycle (D13)

### 3.2. 定常運転モードにおける粒径個数分布の測定

本研究の DPF を含め現在使用または研究されている DPF は、実験時間の経過に伴いフィルターの捕集率は向上する。しかし、DPF による圧力損失が問題となっている。その DPF の性能に関する排出ガス温度および圧力の変動と DPF をすり抜けた PM 粒子の粒径個数分布との関係を調査した。ただし、エンジンと ELPI は同期されていないため Data Sheet で最初のピークの立ち上がりを含わせて比較を行った。

図3と図4に定常運転モードの D13 モードおよび ESC モードのエンジン回転数とトルクの変化による DPF の入口ガス温度と出入口差圧を示す。また、ELPI を用い、DPF 出口後の 2 次希釈トンネル排出ガスの PM 個数分布を測定した結果を示す。凡例の Size は ELPI の 12 段階の各ステージに捕集された粒子の粒径中央値である。また粒径

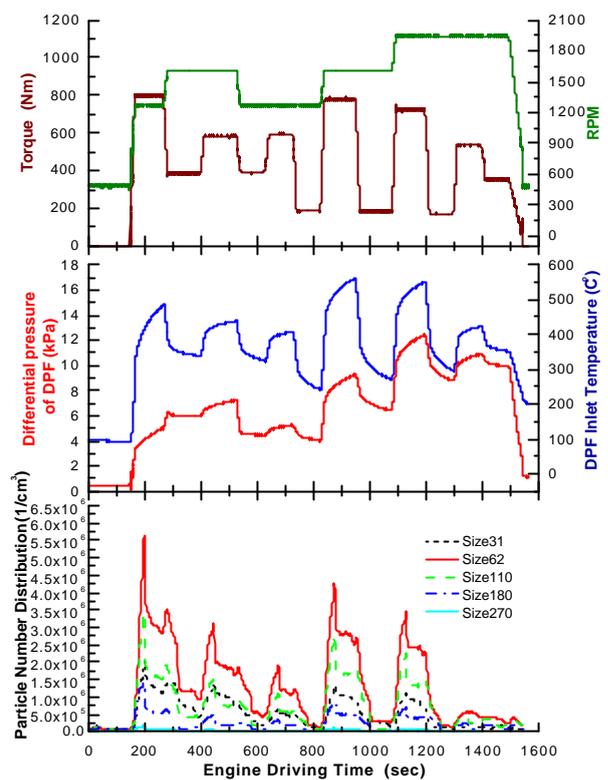


Fig. 4 The variation of DPF inlet temperature and differential pressure and the variation of particle number distribution in the engine speed and torque settings for the case of European stationary cycle (ESC)

個数分布の測定結果が大きい 31nm から 270nm までのデータを示す。

図3に示した D13 モードでは、エンジンの回転数とトルクの変化に従って DPF の入口の排出ガス温度および差圧の変化と、粒径個数分布の変化が対応している。特に第 8 モードのようにエンジンが高負荷、高回転数に変わる時、粒径個数分布の増加幅が大きくなる。粒径個数分布の中央値は 180nm 以下が大部分で 62nm が一番多いことが分かる。図3の数字はモードナンバーを意味する。

図4の ESC の場合もエンジンの回転数とトルクの変化に従って DPF の入口の排出ガス温度と差圧の変化と粒径個数分布の変化が対応し、粒径個数分布の中央値も 180nm 以下が大部分を示す。従って、エンジンが高負荷・高回転数の場合、DPF のフィルターから 180nm 以下のウルトラファイン粒子がすり抜けやすいと推測される。

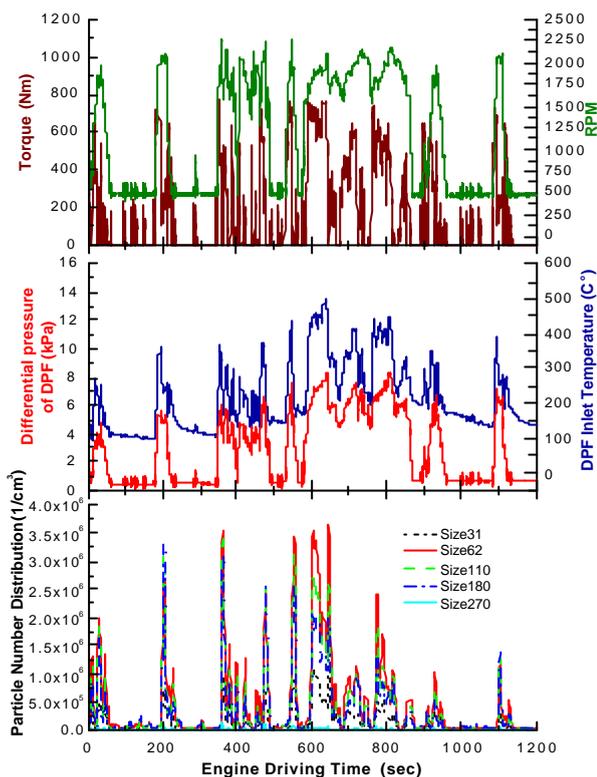


Fig.5 The variation of DPF inlet temperature and differential pressure and the variation of particle number distribution in the engine speed and torque settings for the case of US transient cycle (UST)

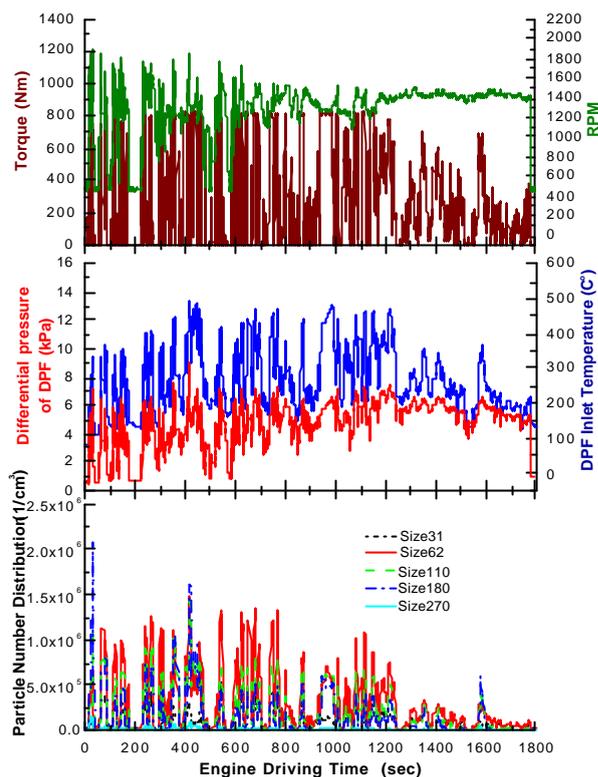


Fig.6 The variation of DPF inlet temperature and differential pressure and the variation of particle number distribution in the engine speed and torque settings for the case of European transient cycle (ETC)

### 3.3. 過度運転モードにおける粒径個数分布の測定

図5と図6に過渡運転であるUSTモードとETCモード運転中のエンジンの回転数とトルクと、DPFの入口の排出ガス温度と差圧の変化および粒径個数分布の変化を示す。

図5のUSTの場合、急加減速と急負荷変動に伴いDPFの入口の排出ガス温度と差圧の変化とPM粒径個数分布の変化が対応することが分かる。また粒径個数分布の中央値は180nm以下が大部分である。しかし、定常運転モードに比べ瞬間的に急激な加速と負荷変動が起こる時、粒径個数分布の中央値の110nmと180nmが多くなったことが分かる。

図6のETCの場合もエンジン回転数とトルクの設定に伴いDPFの入口の排出ガス温度と差圧の変化およびPM粒径個数分布の変化は対応してい

る。また、粒径個数分布の中央値も180nm以下が大部分を示している。一方、PM粒径個数分布はエンジン回転数と負荷の変動が激しいモードの前半部では、USTと同様に62nmと共に110nmと180nmの粒子も多く測定される。しかし、USTモードに比べエンジン回転数の変化が緩慢なモードの後半部は、PM粒径個数の分布がむしろ定常運転モードに似ている。

その理由は、DPF内に捕集されたPM粒子が急激な加速と負荷変動によるDPF流入ガスの圧力と温度の急上昇によって、定常運転モードに比べて大きな粒径がすり抜けてしまうためと推測される。

### 3.4. DPFによる粒径個数分布の変化

希釈トンネル装置を用いて自動車から排出されるPMを計測する場合、希釈ガス中における燃

料中の硫黄分によるサルフェートの生成や炭素粒子表面のHC化合物の吸着など、PM粒子以外の微細粒子の生成が報告されている<sup>7,8,9)</sup>。また、希釈トンネルの希釈倍率には限界があり、滞留時間が長く比較的高濃度条件下で計測となる。

本研究では、希釈トンネルの希釈率について上記の問題点を解決するために2次希釈トンネルを設置、最低約50倍以上の希釈率でPM測定を行った。また、サルフェートの影響を少なくするために硫黄分が35ppmの低硫黄燃料を使用した。

図7にDPFのフィルターの違いによるPM捕集メカニズムを示す。すなわち、一般的なHoneycomb型のフィルターは壁面に開いた穴に対してPM粒子のSizeが大きければ捕集し、小さければ通過してしまう特性がある。一方、本研究に用いたDPFの繊維フィルターは、PM粒子がフィルター繊維に衝突することで捕集されるため、フィルター繊維とPM粒子の衝突確率がDPFの捕集効率となり、捕集する粒子径とはあまり関係が無い<sup>4)</sup>。

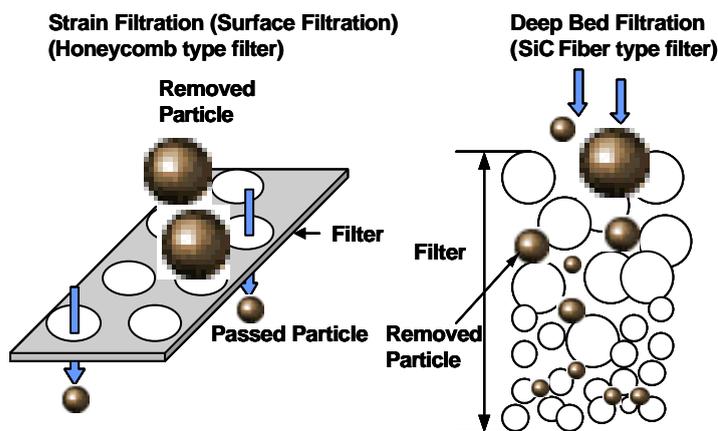


Fig.7 Filtration mechanism of DPF filter<sup>4)</sup>

図8にDPFを装着した場合、過渡運転モードのUSTおよびETCと定常運転モードのD13およびESCについて各ステージに捕集された総粒径個数分布を示す。個数分布の測定結果が大きい順番の31nmから420nmのみを示す。縦軸の総粒径個数分布は対数である。

PM捕集後すり抜けた粒子の粒径個数分布は、いずれの運転モードでも粒径中央値で62nmが一番多く、次に110nm, 180nm, 31nm, 270nm, 420nmの順である。これはエンジンの回転数、トルクなどの運転条件やDPFの入口ガス温度および出入

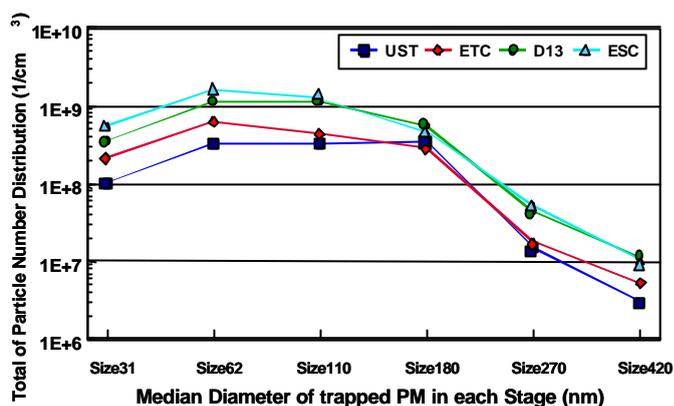


Fig.8 Total particle number distribution in different cycle mode with ELPI

口差圧などの変化がDPFをすり抜ける粒子の粒径個数分布には影響を与えないためと考えられる。

図9にDPF無しと装着の場合、2次希釈トンネルから測定した全運転モードについて総粒径個数分布とDPFによる低減率を示す。

本研究で用いた排出ガス1994年規制型のエンジンはDPF無しの場合、D13とESCという定常運転モードでは粒径個数分布の中央値の110nmが一番多く、62nm, 180nm, 31nmの順に分布している。しかし、USTとETCの過渡運転モードでは、粒径個数分布の中央値の62nmが一番多いことが分かる。Kittelson<sup>10)</sup>によるとPM粒子の凝集体の平均的な等価直径は100nmであり、凝集体を構成する要素すす粒子の直径は30~50nmであると報告している。

このことから、過渡運転モードは運転初期から急激な負荷と回転数の変化により排出ガスが400以上の高温ガスになる場合が多くなり、要素すす粒子が定常運転モードより凝集しにくくなるため粒径個数分布では中央値62nmの微細粒子が一番多くなると推測される。

また、DPF装着による粒径個数分布の低減率は、過渡運転モードの場合、粒径個数分布の中央値の180nm以外は約80%以上の低減率を見せている。しかし、定常運転モードの場合、微小粒径から大きい粒径になるほど低減率が増加する。

#### 4. まとめ

ディーゼル微粒子除去装置(DPF)による排出微粒子の低減効果および粒径個数分布を評価するために相互再生式DPFを用いエンジン単体を

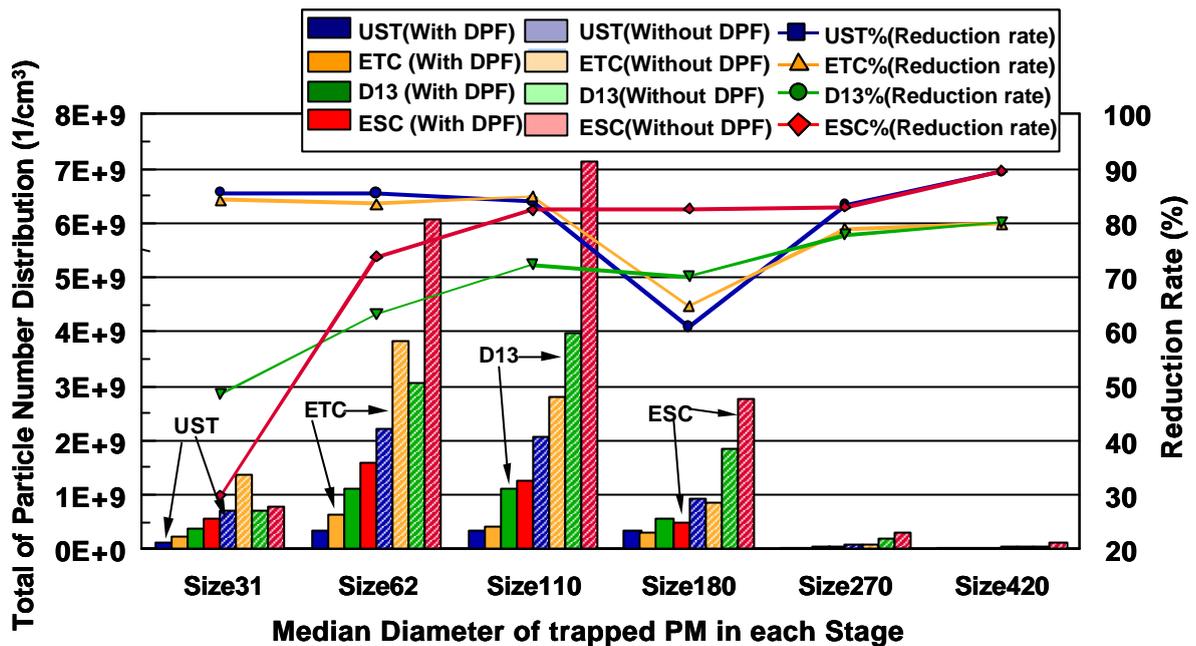


Fig.9 Effect of total particle number reduction with DPF

実際の運転とほぼ同じ過渡運転モードの UST (US Transient Cycle) および ETC (European Transient Cycle) と定常運転モードの D13 (Japan Diesel 13mode) および ESC (European Stationary Cycle) の実験を行った。2 次希釈トンネルから PM 排出量は質量測定で PM 粒子の粒径個数分布は ELPI を用いて測定した。その結果を以下に示す。

- 1) PM 排出量の質量測定の結果, DPF によって過渡運転モードの UST は 83.3%, ETC は 85.7% 低減する。しかし, 定常運転モードの D13 は 78.1%, ESC は 79.8% 低減する。
- 2) 全ての運転モードにおいて, エンジン回転数やトルクの変化に伴い DPF の入口ガス温度と入出口差圧も変化する。また, それらの変化に対応して, 粒径個数分布も変化する。
- 3) 粒径個数分布を測定した結果, DPF を装着した場合, いずれの運転モードでも粒径個数分布では中央値 62nm の粒子が一番多く, 全粒径個数分布では Size180nm 以下の微細粒子が大部分を占めている。

しかし, DPF 無しの場合, 過渡運転モード (UST, ETC) は粒径個数分布の中央値の 62nm が一番多い反面, 定常運転モードの D13 と ESC は 110nm が一番多い。

- 4) DPF による粒径個数分布別の低減率は, 過渡運転モードでは中央値 180nm の粒子以外は 85% 程度である。一方, 定常運転モードでは中央値 31nm の粒子は 50% 以下の低減率であるが, 粒径が大きくなるに従い低減率が増加し 110nm 以上からは 70% 以上である。

本研究は DPF 装置による粒子個数分布の影響について調査したが, さらに詳細な研究のために DPF の出入口での同時粒子測定が必要である。

### 5. 参考文献

- 1) 日本経済新聞, 2000 年 1 月 31 日
- 2) Paul Richards, et al., International Congress & Exposition, 1999,3
- 3) DECSE Program Report
- 4) 菅野隆登志, 日本機械学会講習会, No.01-24-5
- 5) Yujiro Tsukamoto et al., SAE Papers, 2000-01-1138
- 6) Paul Degobert, Automobiles and Pollution, SAE International, pp101-161
- 7) Kirby J. et al., SAE 960131, 1996
- 8) Vuk et al., SAE Trans. Section 1, No76031, 1976
- 9) Clerc et al. SAE 821218 1982
- 10) Abdul-Khalek I.S., Kittelson D.B. et al., SAE 982599, 1998