

# 連続再生式 DPF を装着したディーゼル機関における ナノ粒子排出挙動に関する研究

環境研究領域

後藤 雄一 河合 英直

## 1. まえがき

今年 10 月から開始される新短期規制、八都府県市におけるディーゼル粒子除去装置装着装置義務付けの条例発効などの動きに加えて、欧州国際連合の自動車技術基準国際フォーラムにおける粒子計測プログラム (PMP、Particle Measurement Programme) の活動などディーゼル車から排出される粒子を低減し、粒子状物質 (PM) を従来の重量基準だけでなく、個数等の新基準によっても PM の規制を検討する試みが進められている。個数粒径分布の計測により 50nm 以下の粒子 (ナノ粒子) が多量に排出される場合には、人間の呼吸器系の奥深くに入り込んで健康影響を及ぼすと懸念されている<sup>1-3)</sup>。最近の研究でナノ粒子は固体粒子よりも高沸点炭化水素などからなる蒸発性粒子が多いと言われており<sup>4)</sup>、強力な酸化触媒を利用することにより低減の可能性が考えられる。また、このような粒子は Nuclei モード粒子とも言われ、蒸発性粒子が多いことからその生成・消滅は不安定であり、そのため再現性のある粒子計測結果を得ることが難しい。今後新型車に多く使用される連続再燃焼型 DPF では、強力な酸化触媒により排気中の NO を NO<sub>2</sub> に酸化し NO<sub>2</sub> 雰囲気中で PM を燃焼させている。この酸化触媒によるナノ粒子の排出挙動と DPF 出口での PM 排出挙動を明らかにすること<sup>5)</sup>は、今後のナノ粒子を含めたディーゼル排出微粒子の低減対策を行う上で重要である。

表 1 供試エンジンの仕様

<b>Emission Regulation</b>	<b>1998 Japan Domestic</b>
<b>Combustion System</b>	<b>Direct Injection</b>
<b>Engine Type</b>	<b>Intercooler-turbo</b>
<b>Bore / Stroke (mm)</b>	<b>114 / 130</b>
<b>Rated Power (kW/rpm)</b>	<b>191 / 2700</b>
<b>Max. Torque (Nm/rpm)</b>	<b>745 / 1600</b>
<b>Displacement (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>7,961</b>

本研究では、今後の新型車に多く使用されると思われる連続再生式 DPF におけるナノ粒子の排出挙動を高い時間分解能で粒径分布を測定することにより、生成・消滅が不安定な Nuclei モード粒子の挙動を明らかにして極低濃度 PM の計測手法を検討するとともに将来の PM 低減対策の方向性の一つを明らかにする。

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2.1. 実験装置

表 1 に供試エンジンの仕様を示す。1998 年規制対応の 8 L ターボインタークーラ直接噴射式ディーゼルエンジンである。表 2 に供試 DPF (CRT) の仕様を示す。ジョンソンマッセー社製の CRT (Continuously Regenerating Trap) で Filter は Honeycomb Type である。表 3 に試験燃料の仕様を示す。Sulfur content が 35ppm の低硫黄軽油を使用した。そのため、CRT 内における Sulfate による粒子生成は少ないと考えられる。

表 4 に粒径分布の過渡的挙動を計測するために使用した First Particle Sizer (DMS500) の仕様を示す。

表 2 供試 DPF (CRT) の仕様

<b>Filter Type</b>	<b>Honeycomb</b>
<b>Regeneration System</b>	<b>Continuously Regenerating Trap</b>

表 3 試験燃料の仕様

<b>Density (5 g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>0.8267</b>	
<b>Kinematic Viscosity (mm<sup>2</sup>/s @30 )</b>	<b>3.041</b>	
<b>Flash Point (°C)</b>	<b>71</b>	
<b>Distillation Profile (°C)</b>	<b>T<sub>10</sub></b>	<b>193.5</b>
	<b>T<sub>50</sub></b>	<b>260.0</b>
	<b>T<sub>90</sub></b>	<b>314.0</b>
	<b>FBP</b>	<b>357.5</b>
<b>Cetane Index</b>	<b>53.1</b>	
<b>Sulfur Content (ppm)</b>	<b>35</b>	
<b>Pour Point (°C)</b>	<b>-45</b>	
<b>Residual Carbon (mass% of residue 10%)</b>	<b>0.01</b>	
<b>C.F.P.P. (°C)</b>	<b>-46</b>	
<b>Total Heating Value (J/g)</b>	<b>45,890</b>	

表4 First Particle Sizer (DMS500)の仕様

Measurement principle	Aerosol electrometry
Size classification	Electrical mobility classification
Charging	Unipolar Diffusion
Sample channels	1
Time response	10-90% < 400ms
Instrument size(mm)	h=940, w=350, d=520 + pump
Electrical Supply	100-115/220-240V AC
Particle size range	5nm to 1000nm
Output spectrum elements	16 / decade
Size resolution	0.15 to 0.25 decade
Max data logging rate	10 samples / s
Analogue outputs	4(software configurable) 0-10V 47
Auxiliary analogue inputs (logged with DMS500 data)	4; -10 to +10V

粒子径により電気移動度が異なることを利用して分級する装置(DMA, Differential Mobility Analyzer)の一種であり、5~1000nmの粒径範囲の粒子を分級できる。粒径分布計測の時間応答は10-90%で400ms以下である。図1にDMS500の原理図を示す。従来のナノ粒子レベルの粒径分布を計測する装置として、ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) と SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)が普及している。ELPIは実時間で粒径分布変化を計測する装置として優れているが粒径分解能が低く30nm程度の粒径まで計測できない欠点がある。一方、DMA+粒子カウン

タ(CPC)からなるSMPSは粒径分解能が高く10nm以下まで計測可能な装置として優れているが、粒径分布を計測する時間が60秒と長く過渡的な粒径分布を計測出来ない欠点があった。DMS500は両者の短所を除き長所を併せ持つ装置である。SMPSと同じ測定原理であるが、Sheath flowの内側にSample aerosol入口を設けた点、単分散粒子出口が多数の粒子捕集電極リングに置き換えた点、CPCの代わりに直接electrometerに接続した点異なる。このようにDMAを多数円筒上に配置した装置構成とすることで実質的に多数のDMAによる同時計測が可能となる。図2にDMS500の概観図を示す。図3に実験配置図を示す。DMS500の前にDekati社製のInjector Type希釈装置を取り付けた。希釈率は約8倍である。DPF入口、DPF内の上流側にある酸化触媒出口、DPF出口の3点で粒子の捕集を行い、粒子捕集時にDPF入口、出口で排気ガス温度を熱電対により測定した。図4に実験状況図を示す。図3のView directionから撮影した写真である。

2.2. 実験方法

DPFの粒子除去性能を調べるために、定常試験と過渡試験によりDPFからの粒子排出挙動を調べた。定常試験では、エンジン排気系の暖気をするためにエンジン回転数1620rpm, トルク460Nmの中負荷・中回転数で10分程度運転をし、排気管系の温度が安定した後、一挙にIdling条件にエンジン条件を変化させ、エンジン排気系の温度低下による排出粒子の変化とDPFによるその後の粒子挙動を調べた。過渡試験では米国過渡モード(FTP)を運転した。いずれの試験においても、

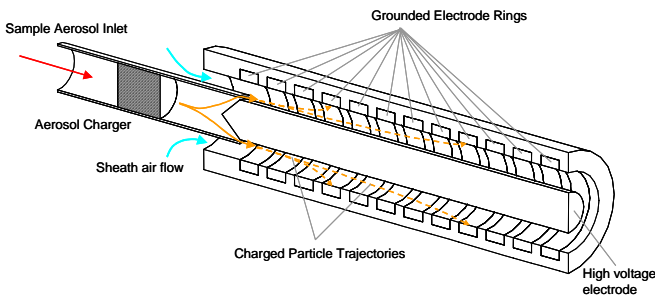


図1 DMS500の原理図



図2 DMS500の概観

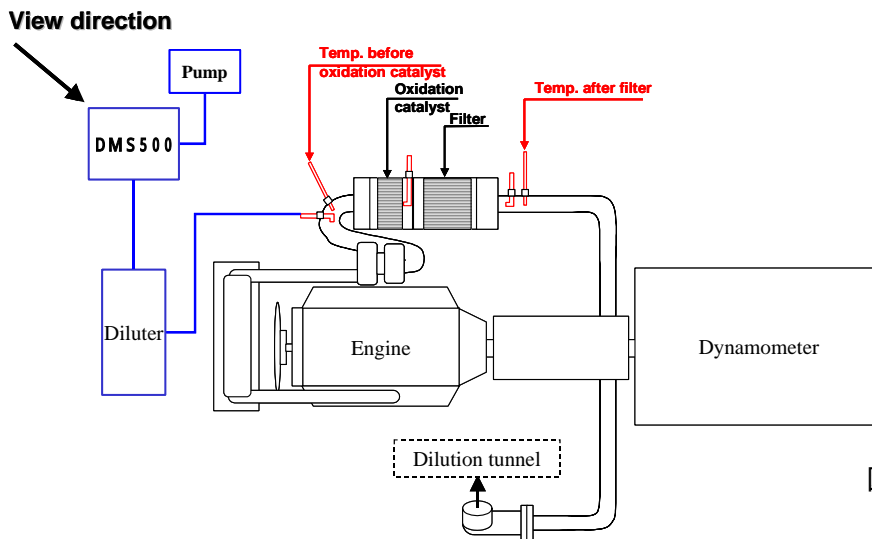


図3 実験配置図



図4 実験状況図

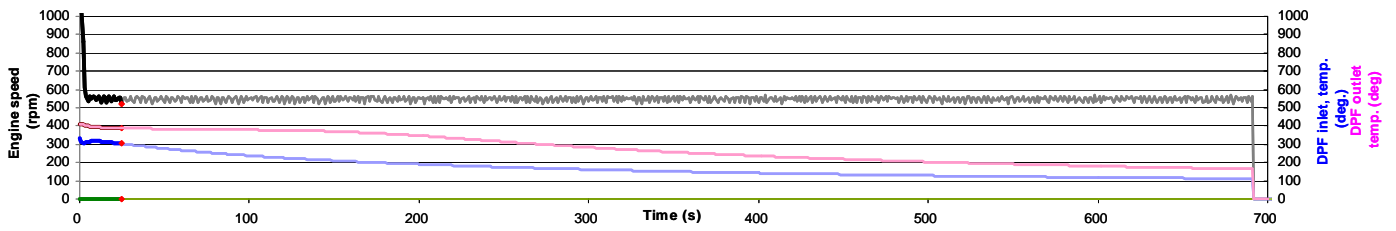


図5 定常条件における排気系の温度変化

DPF 入口、DPF 内酸化触媒出口、DPF 出口の三箇所において粒子捕集を行い、高速に粒径分布計測が可能なDMS500(表4)を使用して過渡的な粒径分布変化を測定した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1. 定常試験(中回転・中負荷 Idling)

図5に定常条件における排気系の温度変化を示す。図中左端でエンジン回転数1620rpmから一挙にアイドル回転数約550rpmに落とし、約700秒間計測した。DPF入口温度は300強から100強まで冷却するのに対しDPF出口温度は400から200弱の温度まで冷却する。DPF出口の温度が高いのは、DPF内のセラミックスフィルタの熱容量が大きくすぐにはDPFが温度を

保ち、DPFに入ってくる排気ガスを加熱するためである。200秒後にはDPF入口温度が200以下に低下し、550秒後にはDPF出口温度も200以下に低下する。図6にDPF入口、DPF内酸化触媒出口及びDPF出口における粒径分布変化を示す。アイドル回転数に落ちた直後には、DPF入口及びDPF内酸化触媒出口においてAccumulationモード粒子といわれる100nm近くの粒子によるピークが認められるが、Nucleiモード粒子といわれる50nm以下の粒子によるピークは認められない。200sec後におけるDPF入口では排気温度が約200まで低下しNucleiモード粒子が生成されている。また、DPF内酸化触媒出口においても、酸化触媒が活性化しないためNucleiモード粒子はDPF入口のNucleiモード粒子に比べ低減していない。DPF出口で

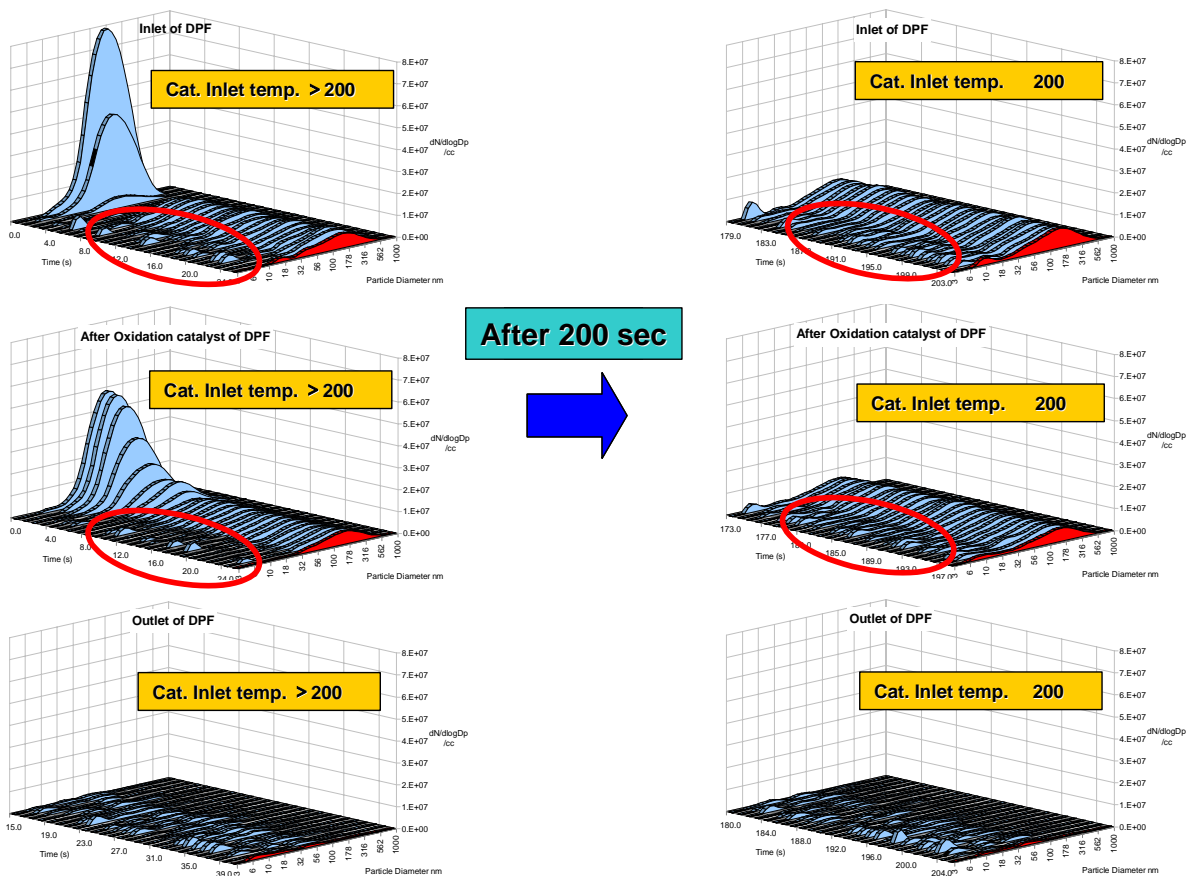


図6 DPF 入口、DPF 内酸化触媒出口及びDPF 出口における粒径分布変化

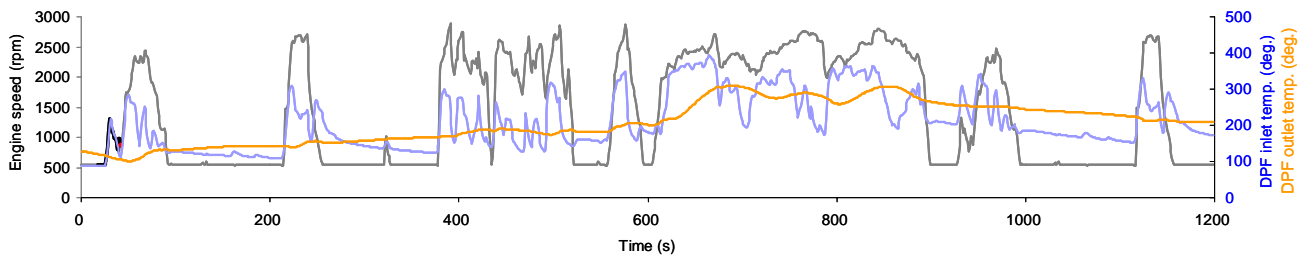


図7 過渡条件における排気系の温度変化

はAccumulationモード粒子もNucleiモード粒子についても低減しているが、Nucleiモード粒子については一部排出されている。

### 3.2. 過渡試験 (FTPモード)

図7に過渡条件における排気系の温度変化を示す。FTPモード試験のエンジン回転数は50秒前後( )と950秒前後( )で同じパターンであるが、DPF入口における排気ガス温度が では上昇しており、ほとんどが200以上である。また、DPF入口排気ガス温度はターボ排気出口から約1mのところまで計測しているため、エンジンの過渡応答に対応して激しい温度変化を示している。一方、DPF出口排気ガス温度はDPF内

セラミックフィルターの大きな熱容量のためにDPF入口排気ガス温度に比べ温度変化は緩慢で、 のパターンでは200以下であるのに対し のパターンでは常に200を超えている。図8にDPF入口、DPF内酸化触媒出口及びDPF出口における との粒径分布変化を示す。IのパターンではDPF入口でNucleiモード粒子が生成されており、DPF内酸化触媒出口においてもNucleiモード粒子が認められる。また、 のパターンでDPF出口ではDPF入口が $10^7$ レベルであるのに対しDPF出口では $10^5$ レベルと1/100以下に粒子数濃度が低減されており、特にAccumulationモード粒子について顕著である。 のパターンではDPF入口における

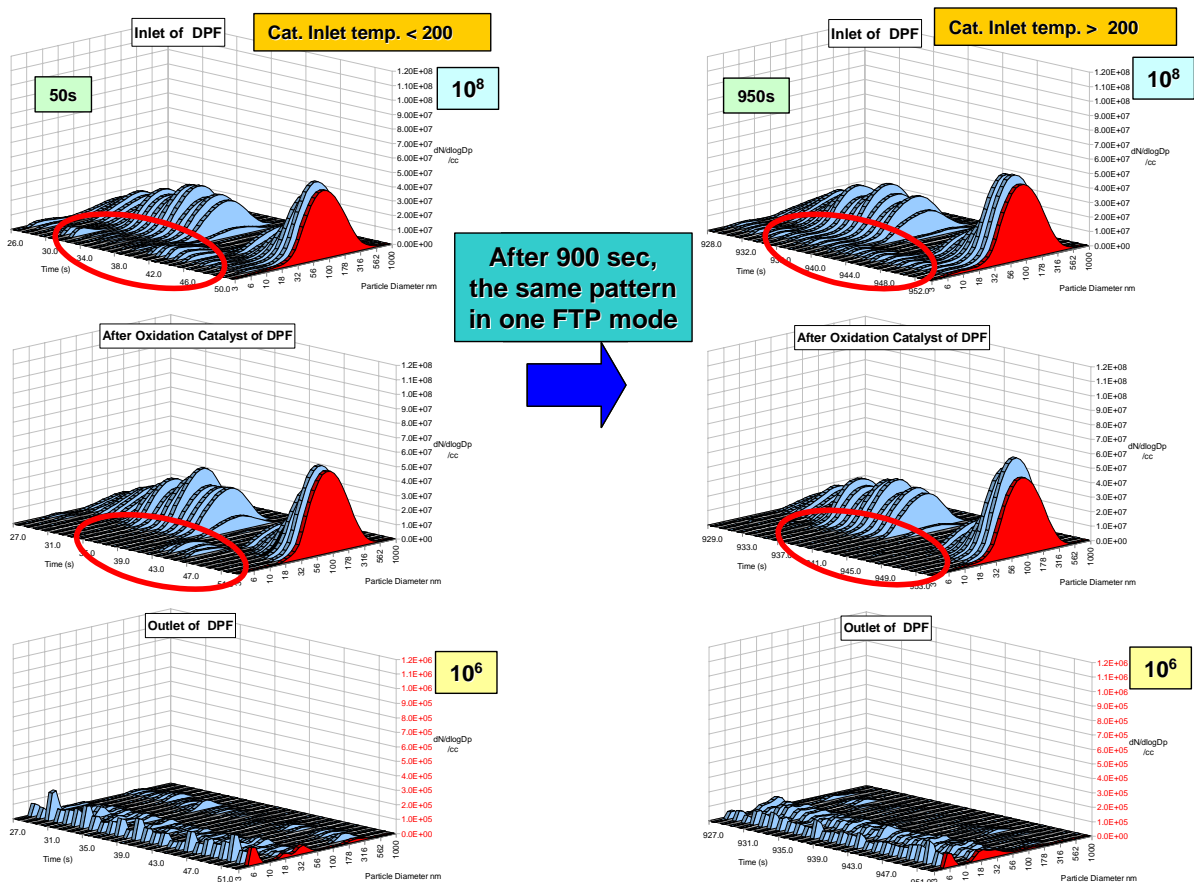


図8 DPF入口、DPF内酸化触媒出口及びDPF出口における粒径分布変化

排気ガス温度が 200 に達しておらず、酸化触媒が十分に活性化していないため酸化触媒後でも Nuclei モード粒子が観察されたと思われる。 のパターンにおいても DPF 入口で Nuclei モード粒子が生成されているが、DPF 内酸化触媒出口においては Nuclei モード粒子が認められない。 のパターンでは排気ガス温度が 200 以上になり酸化触媒が活性化して Nuclei モード粒子が低減されたと考えられる。 のパターンの DPF 出口は、1 の場合と同様に 1/100 以下に粒子数濃度が低減されており、特に Accumulation モード粒子について顕著である傾向は同じである。

#### 4. まとめ

今後の新型車に多く使用されられると思われる連続再生式 DPF におけるナノ粒子の排出挙動を高い時間分解能で粒径分布を測定することにより、以下のことが明らかとなった。

- (1) 排気ガス中粒子の Nuclei モード粒子と Accumulation モード粒子の生成・消滅挙動が高時間分解能で粒径分布を計測できる装置を使用して計測し、実時間で連続的な粒径分布の挙動が明らかとなった。
- (2) DPF 中の酸化触媒により排気ガス温度が 200 以上の温度であれば、Nuclei モード粒子の低減が図れるが、200 以下ではほとんど低減が認められないことが分かった。
- (3) DPF により 1/100 以下に粒子数濃度が低減されて、特に Accumulation モード粒子について顕著である。

#### 参考文献

- 1) M.Krzyzanowski(WHO), Health risks of particulate matter air pollution, an overview for the 41<sup>st</sup> session of GRPE
- 2) P.Gehr et.al. Surfactant-ultrafine particle interactions: what we can learn from PM10 studies, Phil. Trans, R. Soc. Lond, A (2000)358
- 3) Y.Ishihara(Tokyo Women's Medical University), Health effects of ambient particles including diesel particles, Workshop on diesel DPF, 2003 Tokyo
- 4) T.V.Johnson, Diesel Emission Control in Review –The last 12 Months, SAE paper No.2003-01-0039, 2003.

5) Y.Goto, T. Kawai, Dilution Process of Fine Particles by means of Thermodiluter, 7<sup>th</sup> ETH Conference on Combustion Generated Particles, Zurich, 18-20 Aug. 2003