

# 新長期規制適合車（ディーゼル車、ガソリン車）からの超微小粒子の排出実態

関 凌月\* 木下 輝昭\*\* 岡村 整\*\*\* 小谷野 眞司 山崎 実

(\*非常勤研究員 \*\*現・健康安全研究センター \*\*\*現・東京都水道局)

## 1 はじめに

東京都内の自動車排出ガス測定局(自排局)における浮遊粒子状物質(SPM)については、八都府市のディーゼル車規制や自動車排出ガス規制が段階的に強化されてきたことにより、その濃度は減少傾向にある<sup>1)</sup>。

近年のディーゼル車においては、エンジンの燃焼技術やDPF、触媒技術などの発展によって、排出ガス中の粒子状物質(PM)は大幅に減少している。しかし、最近では粒径がナノメートルレベルの超微小粒子(ナノ粒子)について、質量としては少ないものの、粒子数の割合ではPMの大部分を占めるとされ、人体の細胞壁を通過し血液によって身体中の様々な臓器にまで運ばれ、健康に影響を及ぼす危険性が指摘されている<sup>2-3)</sup>。このため、自動車から排出されるPMについて、従来の重量基準だけでなく、粒子の大きさや質による規制の必要性を検討することも重要であるとされている<sup>4)</sup>。

自動車から排出される $1\mu\text{m}$ 以下の粒子個数を計測できる装置としては、走査型移動度粒径測定器(SMPS)、電子式低圧インパクター(ELPI)、自排用パーティクルサイザー(EEPS)などがある。当研究所では、平成19年からEEPSを用いて、使用過程車からの超微小粒子(ナノ粒子)の排出実態を調査している。ここでは、新長期規制適合車(大型ディーゼル車、小型ガソリン車)からの超微小粒子の排出実態について報告する。

## 2 実験

### (1) 調査車両

調査対象車両は全て新長期規制適合車で、大型ディーゼル車9台(D1~D9)及び小型ガソリン車9台(G1~G9)を測定した。各車両の諸元を、それぞれ表1及び表2に示した。排出ガス対策としては、ディーゼル車は主にEGR(Exhaust Gas Recirculation: 排出ガス再循環装置)及びDPF(Diesel Particulate Filter: 連続再生式の排気微粒子除去装置)を装着している。ただし、D-5とD-9車は尿素SCR(Urea Selective Catalytic Reduction: 尿素選

択還元触媒装置)を装着した車両である。また、ガソリン車は全て三元触媒を装着している。

### (2) 調査方法

当研究所のシャシダイナモメータ(以下「C/D」という)を用いて調査を行った。測定した試験モードは、次のとおりである。

ア ディーゼル車については、大型C/D上で、東京都実走行パターン(以下「都パターン」という。)No. 1~No. 12のうち、No. 2(平均車速8.4km/h)、No. 5(同17.9km/h)でホットスタート及びビコールドスタートで測定した。また、法定モードであるJE05の調査も行った。

イ ガソリン車については、小型C/D上で、都パターンNo. 2、No. 5、No. 8(平均車速28.5km/h)、No. 10(同44.4km/h)で測定した。

なお、貨物車においては、等価慣性重量を1/2積載条件とした。

### (3) 測定方法

排出ガスは、全量希釈した後、EEPS(Engine Exhaust Particle Sizer、Model-3090 TSI社製)を用いて、粒径別の個数濃度を1秒毎に測定した。図1に同装置の測定原理<sup>5)</sup>を示す。装置内に導入された粒子は、チャージャー部でプラスに荷電し、センサー中央部にプラス電極の高電圧ロッドを設けることにより、荷電した粒子はロッドに反発して中央から外側に流れる。粒子の持つ電気移動度にしたがって外側に設置した多段の各エレクトロメーターで捕集する。粒径が小さい程、電気移動度が大であり上段のエレクトロメーターで捕集され、粒径の大きい粒子は電気移動度が小さいので下段のエレクトロメーターで捕集される。計測可能な粒径範囲は5.6~560nmで、全部で32チャンネルに分類される(表3)。エレクトロメーターで検出された電荷量は、粒子の個数濃度(個/cm<sup>3</sup>)に換算して表示される。

大型ディーゼル車、小型ガソリン車の希釈排出ガスのサンプリングは、既報<sup>6-7)</sup>と同様、大型ディーゼル車については、希釈トンネルで混合した希釈排出ガスをサンブ

リングした(図2)。また、小型ガソリン車の場合は、ディーゼル車よりPM排出量が少ないため、希釈トンネルを使わず、定流量サンプリング(CVS)装置のベンチュリ手前からサンプリングを行った(図3)。

(4) データ処理方法

データの処理は、既報の方法<sup>7)</sup>により、粒径別の個数排出量(個/km)、粒子総個数排出量(個/km)及び全粒径の粒子個数(個/s)を、測定した粒子個数濃度(個/cm<sup>3</sup>)、希釈排出ガス量(m<sup>3</sup>)、走行時間(s)及び実走行距離(km)から求めた。それぞれの算出式を式(1)、(2)、(3)に示す。

$$E_n = \frac{\left(\sum_{t=1}^T X_{tn} / T\right) \times V_{mix} \times 10^6}{Y} \quad (1)$$

ここで、

- $E_n$  : チャンネル毎の粒子個数排出量 (個/km)
- $X_{tn}$  : 1秒毎の粒径別の粒子個数濃度 (個/cm<sup>3</sup>)
- $V_{mix}$  : 希釈排出ガス量 (m<sup>3</sup>)

- $Y$  : 実走行距離 (km)
- $T$  : 走行時間 (s)
- $n$  : チャンネル (1~32)

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (2)$$

ここで、

- $E$  : 粒子総個数排出量 (個/km)
- $n$  : チャンネル (1~32)

$$N_t = \sum_{n=1}^{32} X_{tn} \times (V_{mix} / T) \times 10^6 \quad (3)$$

ここで、

- $N_t$  : 1秒あたり全粒径の粒子個数 (個/s)
- $X_{tn}$  : 1秒毎の粒径別の粒子個数濃度 (個/cm<sup>3</sup>)
- $V_{mix}$  : 希釈排出ガス量 (m<sup>3</sup>)
- $T$  : 走行時間 (s)
- $n$  : チャンネル (1~32)

表1 ディーゼル車の諸元概要

車両	型式	用途/形状	総重量(kg)	等価慣性重量(kg)	最高出力(NkW/min)	エンジン型式	総排気量(L)	排出ガス対策
D-1	BDG-XZU414M	貨物/バン	7,135	5,605	110/3000	N04C	4.009	DPF+EGR
D-2	PDG-FK64F	貨物/バン	7,980	6,680	177/2700	6M60	7.545	DPF+EGR
D-3	ADG-FD8JLWG	貨物/バン	7,990	6,915	177/2700	J08E	7.684	DPF+EGR
D-4	PDG-FE74DV	貨物/バン	5,205	4,150	110/2700	4M50	4.899	DPF+EGR
D-5	BDG-FS54JZ	貨物/バン	24,970	18,370	279/2000	6M70	12.882	SCR+EGR
D-6	BKG-NPR85AN	貨物/バン	5,605	4,550	110/2800	4JJ1	2.999	DPF+EGR
D-7	PDG-FE72B	貨物/キャブ オーバ	5,105	4,050	96/6200	4M42	2.977	DPF+EGR
D-8	PDG-FRR34S2	貨物/バン	7,990	6,740	177/2400	6HK1	7.79	DPF+EGR
D-9	ADG-CG4ZA	貨物/バン	24,970	18,170	279/1800	GE13	13.07	SCR+EGR

表2 ガソリン車の諸元概要

車両	型式	用途/形状	総重量(kg)	等価慣性重量(kg)	最高出力(NkW/min)	エンジン型式	総排気量(L)	排出ガス対策
G-1	DBA-ZC71S	乗用/箱型	1,275	1000(1130)	66/6000	K12B	1.242	三元触媒
G-2	DBA-CL7	乗用/箱型	1,645	1500(1470)	114/6000	K20A	1.998	三元触媒
G-3	DBA-LY3P	乗用/ステーションワゴン	2,270	1940(2000)	120/6500	L3	2.26	三元触媒
G-4	CBA-PY50	乗用/箱型	1,935	1750(1810)	206/6200	VQ35	3.498	三元触媒
G-5	DBA-MH23S	乗用/箱型	1,030	875(910)	40/6500	K6A	0.658	三元触媒
G-6	DBA-DE3FS	乗用/箱型	1,265	1000(1130)	67/6000	ZJ	1.348	三元触媒
G-7	DBA-FD1	乗用/箱型	1,515	1250(1360)	103/6300	R18A	1.799	三元触媒
G-8	DBA-ACR55W	乗用/ステーションワゴン	2,210	2000(1930)	125/6000	2AZ	2.362	三元触媒
G-9	DBF-VW20	貨物/バン	1980(1945)	1500(1360)	80/6000	HR16	1.597	三元触媒

表 3 EEPS で測定される粒子の粒径

チャンネル	1	2	3	4	5	6	7	8
粒径(nm)	6.04	6.98	8.06	9.31	10.8	12.4	14.3	16.5
チャンネル	9	10	11	12	13	14	15	16
粒径(nm)	19.1	22.1	25.5	29.4	34	39.2	45.3	52.3
チャンネル	17	18	19	20	21	22	23	24
粒径(nm)	60.4	69.8	80.6	93.1	107.5	124.1	143.3	165.5
チャンネル	25	26	27	28	29	30	31	32
粒径(nm)	191.1	220.7	254.8	294.3	339.8	392.4	453.2	523.3

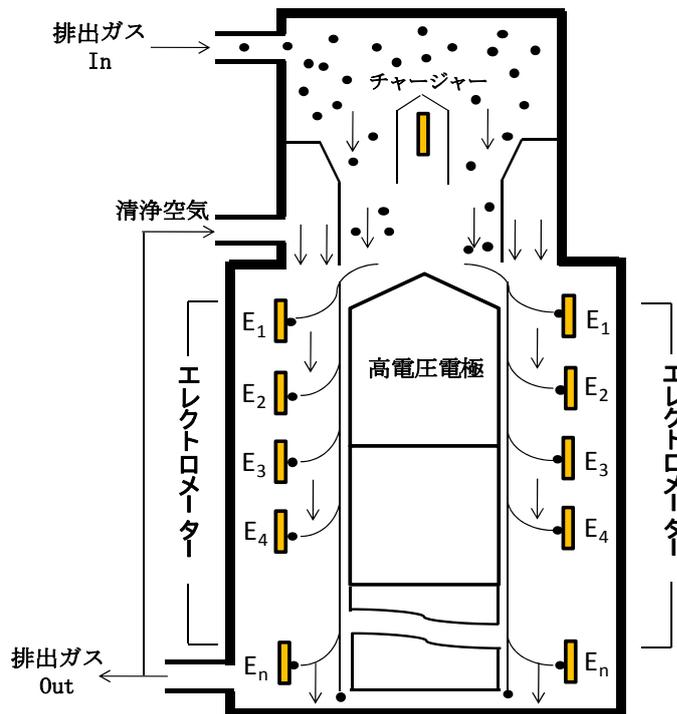


図 1 EEPS 計測の概略図 (n=1~32)

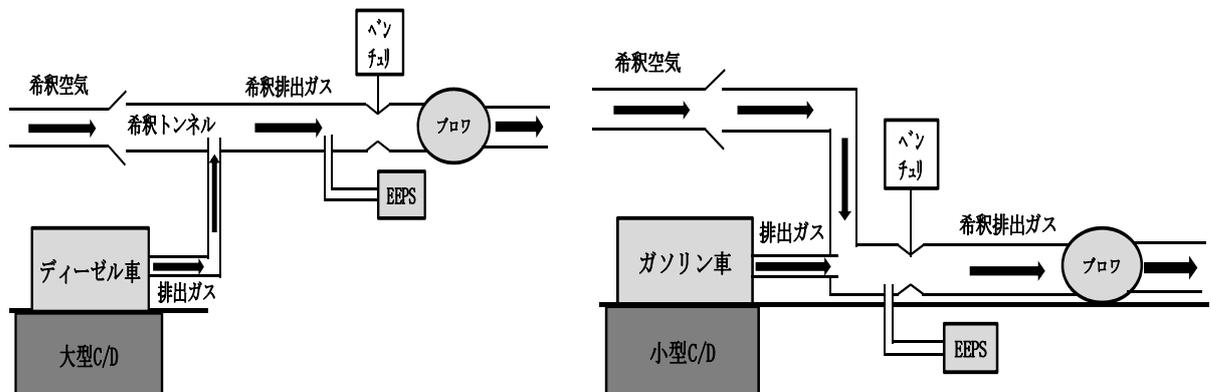


図 2 大型ディーゼル車の希釈排出ガスのサンプリング系統 図 3 小型ガソリン車の希釈排出ガスのサンプリング系統

### 3 結果

#### (1) ディーゼル車及びガソリン車からの粒子総個数排出量

都パターンNo. 5におけるディーゼル車及びガソリン車の粒子総個数排出量 $E$ (計算式(2)で定義のとおり)を、表4に示した。表4から、ディーゼル車の粒子総個数排出量 $E_{ディーゼル}$ は $1.54 \times 10^{12} \sim 3.71 \times 10^{15}$ 個/kmで、ガソリン車の $E_{ガソリン}$ は $2.43 \times 10^{11} \sim 1.04 \times 10^{13}$ 個/kmであった。それぞれの粒子総個数排出量の平均を求めると、ディーゼル車は $6.45 \times 10^{14}$ 個/km、ガソリン車は $2.67 \times 10^{12}$ 個/kmであり、ディーゼル車はガソリン車より概ね2桁多いレベルで粒子が排出されていた。

**表4 都パターン No.5 におけるディーゼル車及びガソリン車の粒子総個数排出量  $E$**

車両	$E_{ディーゼル}$ (個/km)	車両	$E_{ガソリン}$ (個/km)
D-1	$1.07 \times 10^{13}$	G-1	$9.29 \times 10^{11}$
D-2	$7.07 \times 10^{12}$	G-2	$6.01 \times 10^{11}$
D-3	$8.88 \times 10^{12}$	G-3	$9.24 \times 10^{11}$
D-4	$4.59 \times 10^{12}$	G-4	$4.65 \times 10^{12}$
D-5	$3.71 \times 10^{15}$	G-5	$7.34 \times 10^{11}$
D-6	$3.09 \times 10^{12}$	G-6	$7.18 \times 10^{11}$
D-7	$6.33 \times 10^{12}$	G-7	$4.83 \times 10^{12}$
D-8	$1.54 \times 10^{12}$	G-8	$1.04 \times 10^{13}$
D-9	$2.05 \times 10^{15}$	G-9	$2.43 \times 10^{11}$

#### (2) 粒子の粒径分布

##### ア ディーゼル車の粒径分布について

ディーゼル車(D1~D9車)から排出される粒子の粒径分布を図4に示した。横軸は粒径(nm)で、縦軸は粒子個数排出量(個/km)である。都パターンNo. 2、No. 5の走行結果から見ると、D-5、D-9車の粒子個数排出量は他の車両より概ね2桁多かった。その原因はD-5、D-9車が排気後処理装置として尿素SCRを用いており、DPFを搭載していないためと考えられる。なお、PM排出量(g/km)についても、尿素SCR装着車はDPF装着車に比べ、多い傾向にある<sup>8)</sup>。また、図4の粒径分布をみると、ほとんどのDPF装着車の粒子個数排出量は、概ね8.06nmと34nm前後でピークが現れた。一方、尿素SCR装着車であるD-5、D-9車では、それ

ぞれ、107.5nm、9.31nm及び60.4nm前後にピークがあった。

##### イ ガソリン車の粒径分布について

ガソリン車(G1~G9車)から排出される粒子の粒径分布を図5に示した。粒径分布を見ると、8.06~10.8nm及び34~80.6nm前後にピークがあった。これらの粒径分布は、ディーゼル車D-9と似ている。

#### (3) 走行条件と粒子総個数排出量

##### ア ディーゼル車の粒子総個数排出量について

大型ディーゼル車の調査では、都パターンNo. 2及びNo. 5のコールドスタートとホットスタートで測定を行った。各走行条件における粒子総個数排出量を図6に示した。ほとんどすべてのディーゼル車において、粒子総個数排出量はコールドスタートの方が多かった。コールドスタート走行では排気温度が低く、また触媒が十分に暖まっていなかったため、粒子を除去する能力が低下したと考えられた。都パターンNo. 2とNo. 5のホットスタート時の粒子総個数排出量を比較すると、No. 5の方が少なかった。

##### イ ガソリン車の粒子総個数排出量について

ガソリン車の調査では、都パターンNo. 2、No. 5、No. 8、No. 10で測定を行った。結果を図7に示した。調査したG-1~G-8車の各走行パターンにおける粒子総個数排出量は、概ね $10^{12} \sim 10^{13}$ 個/kmであった。

走行パターンと粒子総個数排出量の関係については、車両によっても異なっており、今回の調査では明確な特徴は認められなかった。

#### (4) 粒子個数と加速度及びCO<sub>2</sub>の排出量(大型ディーゼル車)

法定モードであるJE05におけるDPF装着車(D-8)、尿素SCR装着車(D-9)の粒子個数(計算式(3)を参照)と加速度及びCO<sub>2</sub>の排出量の関係を、それぞれ図8及び図9に示した。図8に示すように、D-9車では加速度が大きくなるに従い、粒子個数が増加する傾向にあった。一方、DPF装着車であるD-8では明確な傾向は見られない。また、図9に示すCO<sub>2</sub>の排出量との関係を見ると、CO<sub>2</sub>の排出量が多くなると粒子個数も多くなる傾向にある。このことは、燃料消費量の少ない走行(エコドライブ)を実施することによって、粒子の排出も抑制できることを示唆している。

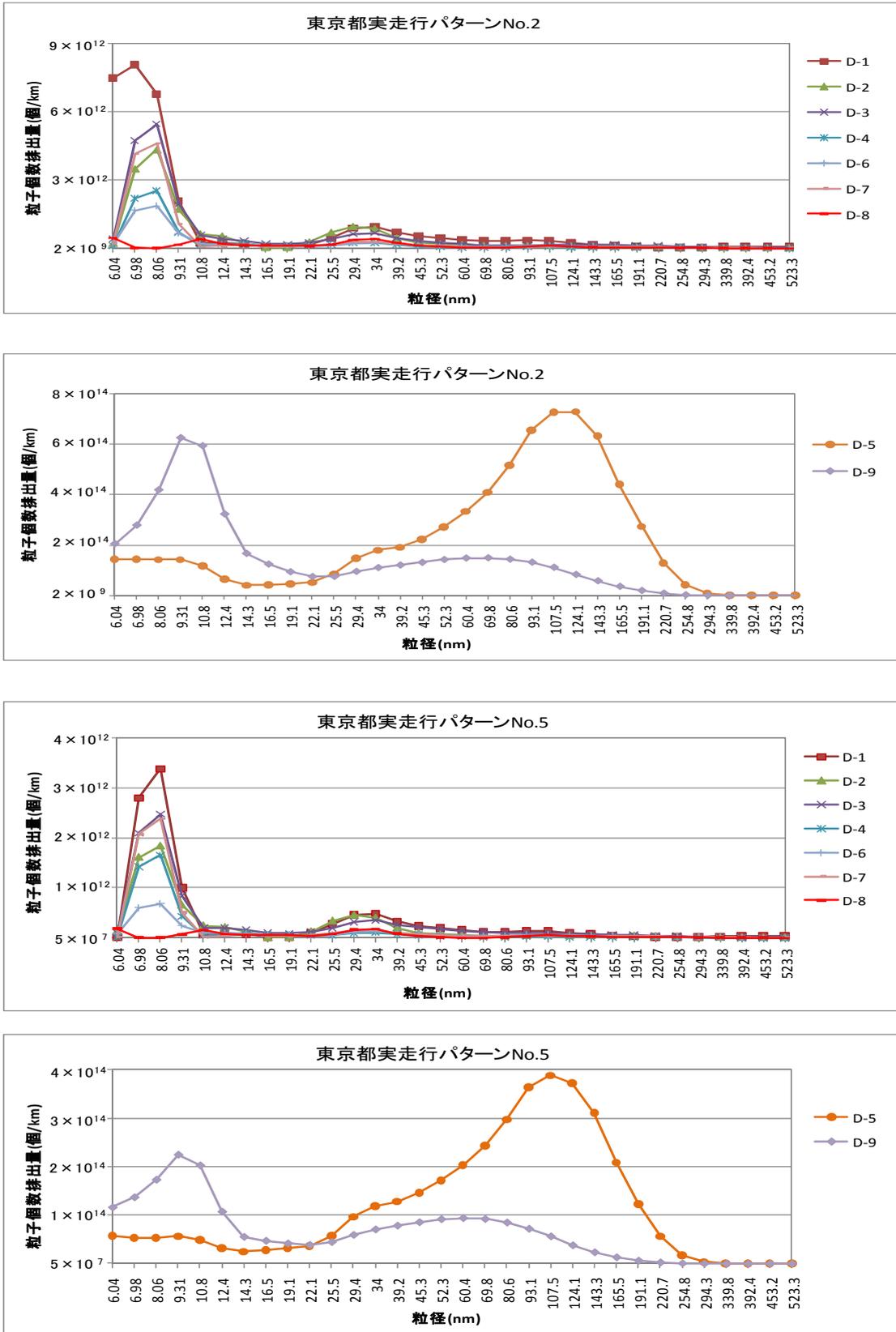


図4 ディーゼル車の粒径分布

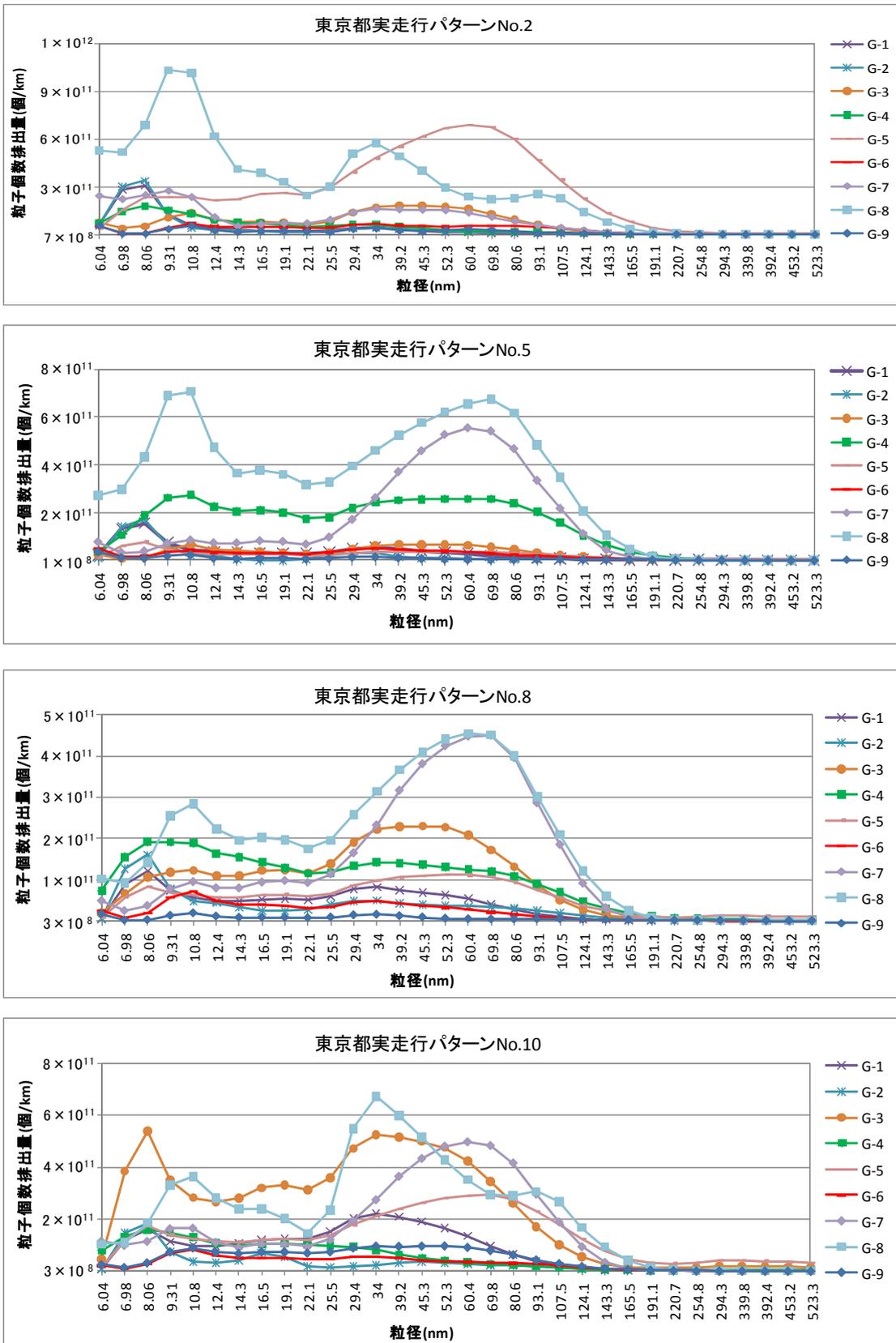


図5 ガソリン車の粒径分布

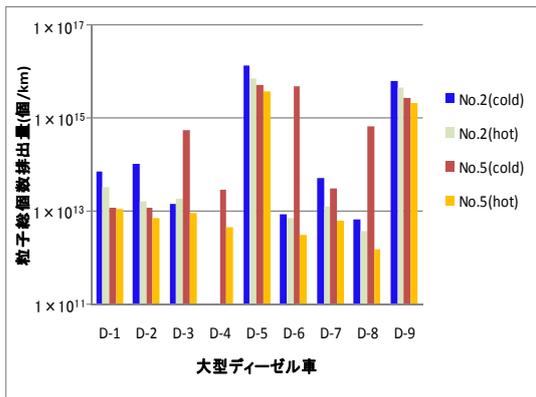


図6 各走行条件における粒子総個数排出量(大型ディーゼル車)

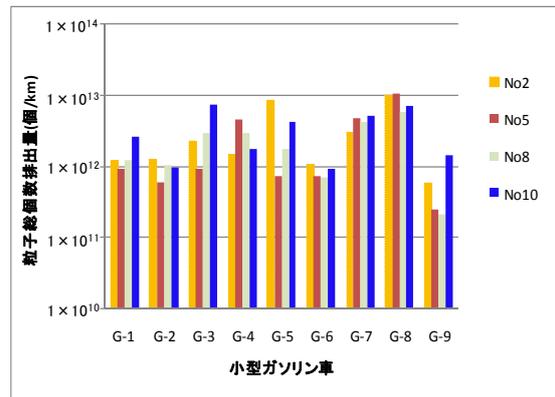


図7 各走行条件における粒子総個数排出量(小型ガソリン車)

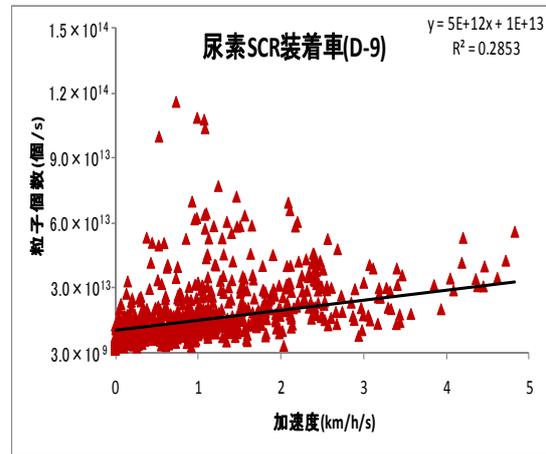
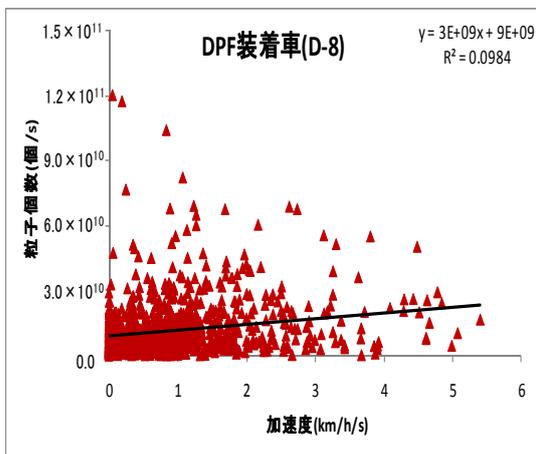


図8 JE05モードにおけるDPF装着車(D-8)及び尿素SCR装着車(D-9)の粒子個数と加速度の関係

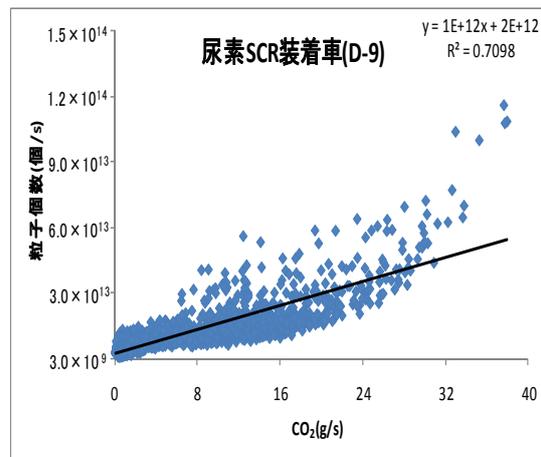
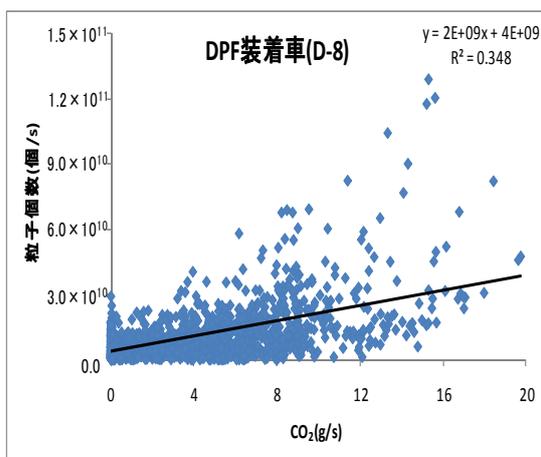


図9 JE05モードにおけるDPF装着車(D-8)及び尿素SCR装着車(D-9)の粒子個数とCO<sub>2</sub>の排出量の関係

(5) 粒子個数の経時変化(大型ディーゼル車)

図10に、ディーゼル車(D-2)の都パターンNo. 5によるホットスタート、コールドスタート時の粒子個数の経時変化を示した。図から分かるように、コールドスタート時には、スタートから180秒程度までは、ホットスタートに比べ排出される粒子の個数が明らかに多かった。

4 まとめ

本調査では、EEPS装置を用いて、新長期規制適合車(ディーゼル車、ガソリン車)から排出される超微小粒子の粒子個数の実態調査を行った。調査した結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 大型ディーゼル車及び小型ガソリン車から排出される超微小粒子の粒子総個数排出量を比べると、小型ガソリン車は概ね2桁少ないレベルである。
- (2) DPF装着車と尿素SCR装着車では、尿素SCR装着車の粒子総個数排出量のほうが概ね2桁程度多かった。また、粒径分布は車両により異なる特徴を示し、DPF装着車では概ね8.06nmと34nm前後でピークが現れ、尿素SCR装着車及びガソリン車では、概ね8.06～10.8nm及び34～80.6nm前後にピークが現れた。
- (3) 尿素SCR装着車では、加速度が大きいほど粒子個数も増加する傾向にあった。また、排出される粒子の個数はCO<sub>2</sub>の排出量と比較的良好な相関関係を表した。
- (4) ディーゼル車は、コールドスタート時はホットスタートに比べ、粒子総個数排出量が増加する傾向にある。

5 おわりに

本調査では、新長期規制適合車(ディーゼル車、ガソリン車)からの超微小粒子の排出実態について調査した。今

回は、ディーゼル車とガソリン車、それぞれ9台について計測を行ったが、今後は、ポスト新長期規制適合車を含め、調査台数を増やすとともに、燃料(バイオ燃料等)や負荷(急加速、積載重量等)などの影響についても調査したいと考えている。

また、粒子個数の計測方法、計測条件等については、測定精度、安定性、再現性等に大きく係ることから、最新の計測方法等の動向などを注視しながら、調査を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 東京都環境局：大気汚染対策 東京の環境2009
- 2) 国立環境研究所：大気中微小粒子状物質 (PM2.5)・ディーゼル排気粒子 (DEP) 等の大気中粒子状物質の動態解明と影響評価プロジェクト (終了報告) (平成13年～17年度) 2006
- 3) 鈴木明：大気中超微小粒子 (ナノ粒子) と心疾患 国立環境研究所ニュース 第27巻第1号 2008年4月
- 4) 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第九次報告) 中央環境審議会 2008年1月
- 5) 東京ダイレクト：EEPSを用いた沿道におけるナノ粒子計測例1 TOKYO DYLEC社内レポートNo.25 2004
- 6) 秋山薫ら：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、p151-160
- 7) 木下輝昭ら：ガソリン車からのナノ粒子の排出について 東京都環境科学研究所年報2005、p82-90
- 8) 小谷野真司ら：新長期規制適合ディーゼル重量車のNO<sub>x</sub>等の排出特性について 東京都環境科学研究所年報2009、p101-106

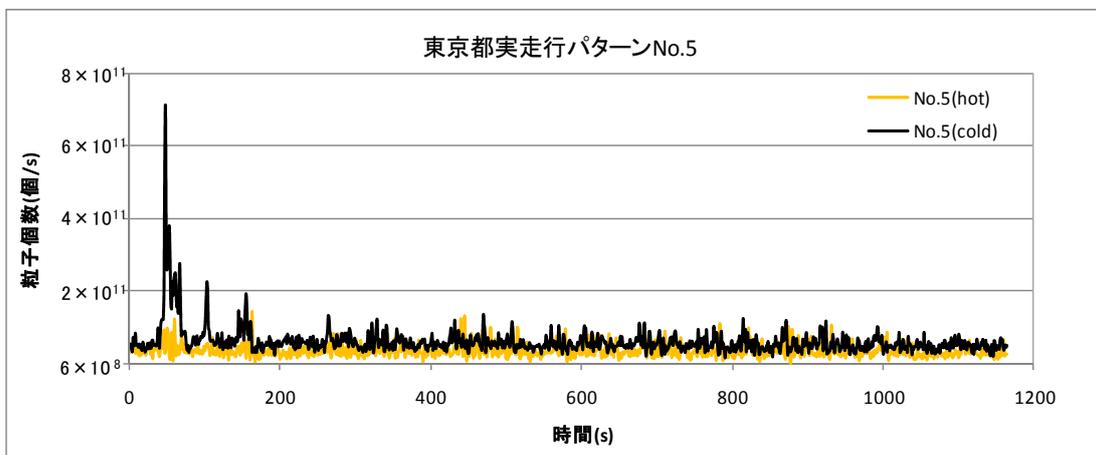


図10 ホットスタート、コールドスタートにおけるディーゼル車(D-2)の粒子個数の経時変化