

ガソリン車からのナノ粒子の排出について

木下 輝昭 横田 久司 岡村 整 中川 智史 折原 岳朗

要 旨

粒径 50 nm 以下のナノ粒子による健康影響が強く懸念されているが、ガソリン車からの排出実態は把握されていない。ガソリン車から排出されるナノ粒子について、電子式低圧インパクト（ELPI）を用いて、その排出実態を把握するとともに、ディーゼル車と比較した。また、走行条件（加減速）とナノ粒子排出の相関も調査した。その結果、次のことが分かった。

- (1) 東京都実走行パターン No.5 において、ディーゼル車とガソリン車から排出される総粒子個数を比較すると、ガソリン車は平均 6.36×10^{11} 個/km、ディーゼル車は平均 5.23×10^{14} 個/km で、ガソリン車のほうが 3 桁少ないレベルであった。
- (2) ガソリン車から排出される個数を粒径別に見ると、粒径 58 nm 以下の粒子がほとんどであった。
- (3) 走行条件による個数濃度（個/cm³）変化を見ると、加速の後半で個数濃度が最大になり、加速度が大きいほど個数濃度が増加した。

キーワード：ナノ粒子、ガソリン車、排出粒子個数、走行条件

Nanoparticle Emissions from Gasoline Vehicles

KINOSHITA Teruaki, YOKOTA Hisashi, OKAMURA Hitoshi,
NAKAGAWA Tomofumi, ORIHARA Takeaki

Summary

Recently, the influence on health by nano particles (<50nm) is strongly feared. We investigated nano particles emission from in-use gasoline vehicles, by using the electronic low-pressure impactor (ELPI). Furthermore, we investigated the relation between running conditions (acceleration and deceleration) and nano particles emission.

Those results are as following.

- (1) In the Tokyo transient mode No.5, the average of the total number emissions from diesel vehicles was 5.23×10^{14} part/km, and was 6.36×10^{11} part/km from gasoline vehicles. The number from gasoline vehicles was about 1/1000 of that from diesel vehicles.
- (2) The size of the emission particles from gasoline vehicles was mostly 58nm or less.
- (3) The number emissions concentration became the maximum at the second half of acceleration. Furthermore, as acceleration became large, the number emissions concentration became high.

Key Words : nanoparticle, gasoline vehicles, number emissions, running conditions

1 はじめに

ディーゼル自動車から排出される粒子状物質（PM）は、道路沿道や都市域における大気汚染の主要な原因物質として、その排出規制が年々強化されてきた。また、都は、2003年10月よりディーゼル車規制を実施し、条例で定める粒子状物質排出基準を満たさないディーゼル車は、都内の運行を禁止した。これらの排ガス規制の強化や自動車メーカーの努力により、都内で自動車から排出されるPMの排出量は、1997年に比べて2003年には60%低減していると推計されている¹⁾。また、平成16年度浮遊粒子状物質（SPM）について、自動車排出ガス測定局では、松原橋測定局（大田区）以外の全ての測定局で、一般環境大気測定局では、初めて全ての測定局で環境基準を達成した²⁾。

しかし、最近では粒径50nm以下の粒子（ナノ粒子）の有害性が指摘されている^{3,4,5)}。ナノ粒子は、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、相対的に表面積も大きいため、呼吸器系細胞への残留による悪影響が懸念されている⁶⁾。このため、米国⁷⁾や欧州国際連合⁸⁾などにおいては、ディーゼル車から排出されるPMについて、従来の重量基準だけでなく、粒子の個数の基準による規制も検討されている。

当研究所では、大型ディーゼル車からのPMの排出については、粒径100nm前後にピーク濃度が見られることやDPFによりナノ粒子が低減されること等を既に報告^{9,10)}している。一方、ガソリン車からのPMの排出については、ディーゼル車に比較して、質量として

非常に少ないことから、排出インベントリーとしては積算されていない。しかし、Kittelsonら¹¹⁾は、ガソリン車からのナノ粒子の排出について、高速走行では $10^{14} \sim 10^{16}$ 個/kg・fuel 排出されるとしている。国内ではガソリン車からの排出実態に関する報告はほとんどないが、保有台数で約80%¹²⁾と多数を占めることから、ガソリン車についてもナノ粒子の排出実態を把握しておく必要はあると考えられる。そこで、本報では、ガソリン車から排出されるPMの個数濃度の粒径分布に着目し、ディーゼル車との比較やガソリン車における走行条件（加減速等）とナノ粒子排出の相関について基礎的な研究を行った。

2 実験

(1) 調査車両

調査車両としたガソリン車7台（G-a車～G-g車）、ディーゼル車4台（D-h車～D-k車）の諸元を表1-1、表1-2に示した。ガソリン車は、新短期規制（平成12、13、14年）適合車が5台（G-a車、G-c車、G-e車、G-f車、G-g車）、新長期規制（平成17年）適合車が2台（G-b車、G-d車）である。ディーゼル車は、長期規制（平成10、11年）適合車が3台（D-h車、D-i車、D-k車）、新短期規制（平成15、16年）適合車が1台（D-j車）である。排出ガス対策として、ガソリン車は三元触媒を、ディーゼル車は排ガス再循環装置（Exhaust Gas Recirculation：EGR）等を装着している。

表 1-1 調査車両の諸元（ガソリン車）

	G-a車	G-b車	G-c車	G-d車	G-e車	G-f車	G-g車
燃料	ガソリン	ハイオク	ハイオク	ガソリン	ガソリン	ガソリン	ガソリン
用途/形状	小型/乗用	乗用	乗用/箱型	乗用	貨物/バン	貨物/バン	乗用/ステーションワゴン
車両形式	UA-DY3W	CBA-GRS180	GH-203042	CBA-TC24	UB-NCP50V	TC-TRH112V	TA-MNH10W
エンジン形式	ZJ	4GR	271	QR20(E)	2NZ	1TR	1MZ
総排気量(cc)	1,340	2,491	1,790	1,998	1,298	1,998	2,994
最高出力	67kW/ 6000rpm	158kW/ 6400rpm	120kW/ 5500rpm	110kW/ 6000rpm	64kW/ 6000rpm	98kW/ 5600rpm	162kW/ 5800rpm
等価慣性重量(kg)	1,250	1,750	1,500	1,750	1,250	2,250	2,000
車両総重量(kg)	1,355	1,835	1,755	2,000	1,550	2,975	2,320
排出ガス対策	三元触媒	三元触媒	三元触媒	三元触媒	三元触媒	三元触媒	三元触媒
規制年度	平成12年規制	平成17年規制	平成12年規制	平成17年規制	平成12年規制	平成12年規制	平成12年規制

表 1-2 調査車両の諸元（ディーゼル車）

	D-h車	D-i車	D-j車	D-k車
燃料	ディーゼル	ディーゼル	ディーゼル	ディーゼル
用途/形状	貨物/バン	貨物/バン	貨物/ キャブオーバ	貨物/バン
車両形式	KK-MK26A	KK-FK61FK	KR-NPR81LR	KK-NPR72LV
エンジン形式	MD92	6M60	4HL1	4HJ1
総排気量(cc)	9,203	7,540	4,777	4,985
最高出力	165kW/ 2700rpm	177kW/ 2700rpm	100kW/ 3000rpm	114kW/ 3100rpm
等価慣性重量(kg)	6,585	6,615	4,830	4,870
車両総重量(kg)	7,960	7,990	6,385	5,925
排出ガス対策	EGR	EGR	EGR 酸化触媒	EGR
規制年度	平成10年規制	平成10年規制	平成15年規制	平成10年規制

(2) 調査方法

当所の大型シャシダイナモメータ（以下C/D）及び小型C/Dと自動車排出ガス計測システムを用いて、ディーゼル車については東京都実走行パターンNo.5で、ガソリン車については東京都実走行パターンNo.2、5、8、10及び法定試験モードである10・15モードで調査を行った。東京都実走行パターンNo.2、5、8、10の

それぞれの平均车速は8.4 km/h（走行時間：878秒）、17.9 km/h（走行時間：1,177秒）、28.5 km/h（走行時間：1,179秒）、44.4 km/h（走行時間：1,176秒）である。なお、等価慣性重量は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、粒子の個数濃度が粒径別に把握できる電子式低圧インパクター（ELEC-

表 2 ELPIで測定される各粒子の中位径

単位：nm

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

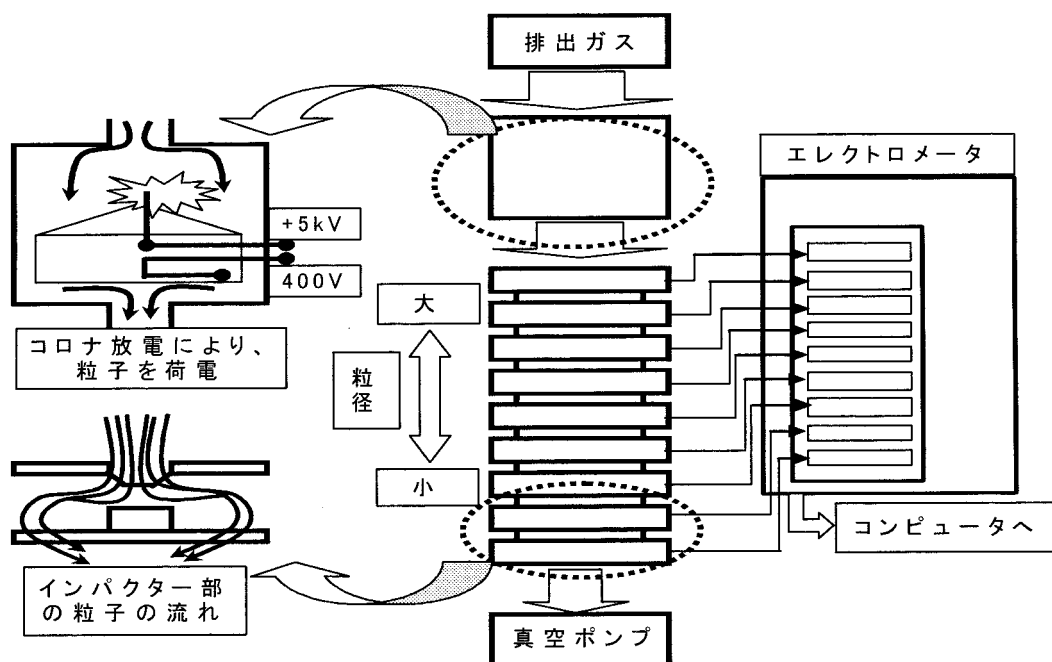


図 1 ELPIの構成図

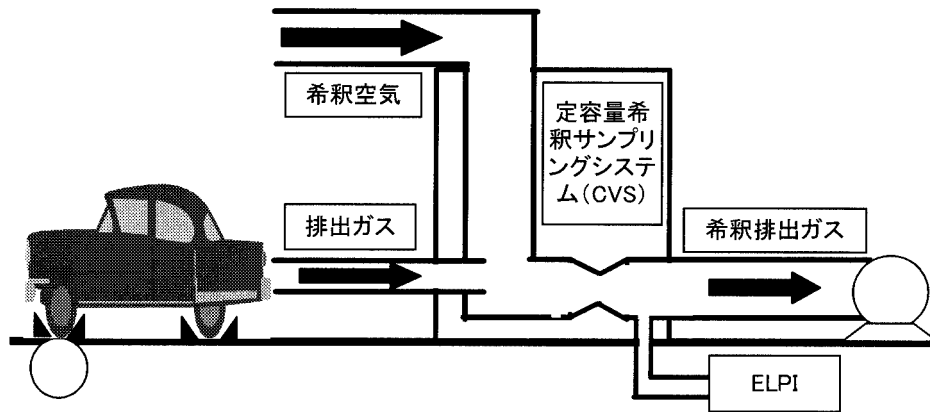


図2 粒子状物質捕集の系統（ガソリン車の場合）

TRICAL LOW PRESSURE IMPACTOR (ELPI)：型式 10LPM、DEKATI 社製）を用いて捕集し、粒径別の個数濃度を 1 秒毎に測定した。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トによって空気力学的粒径にしたがって分級され、各分級段の電荷量から粒径個数濃度（個/cm³）が求められる（図1）。ここでは、表2に示したとおり、粒径を12段に分級した。また、希釈排出ガスの採取系統図を図2に示した。

(4) データ処理方法

① 実走行パターンにおける粒径別の排出個数

実走行パターンにおける粒径別の平均個数濃度（個/cm³）を求め、希釈排出ガス量（m³）、走行距離（km）を用いて、距離あたりの個数に換算し、検証を行った。計算式は以下の通りである。

$$Q_j = \sum_{i=1}^T X_{ij} / T \cdots (1)$$

ただし、 Q_j ：平均個数濃度（個/cm³）

X_{ij} ：1 秒毎の個数濃度（個/cm³）

T ：走行時間（秒）

j ：1～12 段

$$E_j = Q_j \times R \times 10^6 / Y \cdots (2)$$

ただし、 E_j ：1 kmあたりの粒子個数（個/km）

R ：希釈排出ガス量（m³）

Y ：実走行距離（km）

j ：1～12 段

参考に、CVS による平均希釈率は、ガソリン車で 4.0～17.2 倍、ディーゼル車で 60.4～100.4 倍であった。

② 走行条件（加減速）と粒子個数濃度変化

ELPI は、実走行モードの開始と同時にデータを取り始めているので、排出ガスが、排気管から ELPI に到達するまでのタイムラグが生じる。また、ELPI 内においても上段から下段に達するのにタイムラグが生じる。そこで、実走行モードの加速度及び各段の ELPI の一秒毎のデータを用いて、加速と共に粒子の数も増えるという観点から、両者の相関が高いところのタイムラグを求め、各段のデータを排気管レベルに統一した。CVS から ELPI までは 6 秒、ELPI 内は最大 3 秒であった。次に、毎秒の希釈率を以下の計算式¹³⁾に従って計算し、粒径別の個数濃度に掛けることにより、排気管レベルでの加減速と粒子個数濃度変化の検証を行った。

$$\text{希釈率} = \frac{13.4}{\text{CO}_2 + (\text{HC} + \text{CO}) \times 10^{-4}} \cdots (3)$$

$$P_j = X_j \times \text{希釈率} \cdots (4)$$

ただし、

P_j ：排気管での 1 秒毎の粒子個数濃度（個/cm³）

X_j ：CVS からの 1 秒毎の粒子個数濃度（個/cm³）

j ：1～12 段

3 結果と考察

(1) ガソリン車及びディーゼル車からの粒子個数

ガソリン車及びディーゼル車から排出される粒子個数の比較を行うため、東京都実走行パターン No. 5 における排出実態を図3に示した。

図3から、ディーゼル車及びガソリン車から排出される総個数（個/km）の平均を求めると、ディーゼル車が 5.23E+14 個/km、ガソリン車が 6.36E+11 個/km

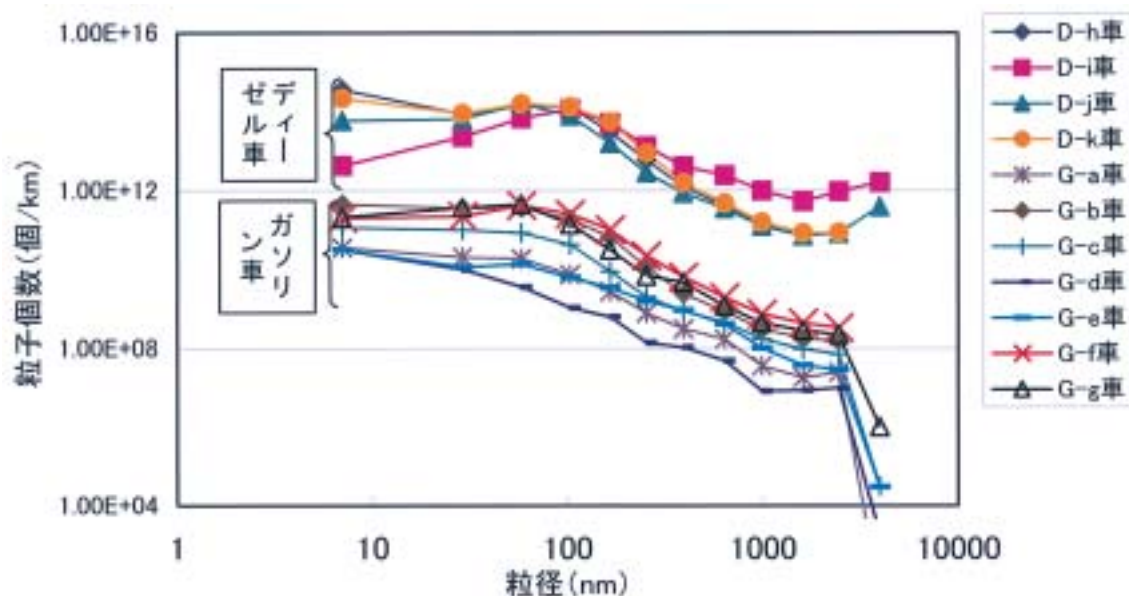


図3 ガソリン車及びディーゼル車から排出される粒径別個数（東京都実走行パターンNo.5）

で、ガソリン車のほうが3桁少ないレベルであった。また、総個数濃度（個/cm³）で見ると、ディーゼル車が平均 $2.13\text{E}+08$ 個/cm³、ガソリン車で平均 $5.48\text{E}+05$ 個/cm³であった。大気中（江東区環境科学研究所近辺）の総個数濃度と比較すると、大気は平均 $2.92\text{E}+04$ 個/cm³であり、ガソリン車に比べて1桁少ないレベルであった。

(2) ガソリン車の実走行パターンと粒子個数

調査したガソリン車7台において、各実走行パターンの1kmあたりの総個数に対する粒径別の個数比率を求め、図4に示した。どの車においても、粒径58nm以下の粒子が全体の大部分を占めており、粒径58nm付近に最大ピーク濃度をもつ車もあった。また、各車とも実走行パターンによる個数比率の違いはほとんど見られなかった。次に、実走行パターン毎に各車の総個数を比較した結果を表3に示した。

表3 実走行パターンにおける総個数の比較

	単位: 個/km			
	No.2	No.5	No.8	No.10
G-a車	$6.36\text{E}+11$	$8.63\text{E}+10$	$7.47\text{E}+11$	$1.91\text{E}+12$
G-b車	$3.53\text{E}+12$	$1.44\text{E}+12$	$2.16\text{E}+12$	$4.00\text{E}+12$
G-c車	$8.36\text{E}+11$	$3.58\text{E}+11$	$5.61\text{E}+11$	$2.17\text{E}+12$
G-d車	$3.77\text{E}+11$	$4.72\text{E}+10$	$1.78\text{E}+11$	$3.46\text{E}+11$
G-e車	$4.08\text{E}+11$	$6.98\text{E}+10$	$2.49\text{E}+11$	$2.82\text{E}+11$
G-f車	$2.32\text{E}+12$	$1.23\text{E}+12$	$9.73\text{E}+11$	$2.48\text{E}+12$
G-g車	$5.08\text{E}+11$	$1.22\text{E}+12$	$1.06\text{E}+12$	$1.73\text{E}+12$

No.2では $3.77\text{E}+11 \sim 3.53\text{E}+12$ 個/km、No.5では $4.72\text{E}+10 \sim 1.44\text{E}+12$ 個/km、No.8では $1.78\text{E}+11$

$\sim 2.16\text{E}+12$ 個/km、No.10では $2.82\text{E}+11 \sim 4.00\text{E}+12$ 個/kmであった。また、どの車もNo.10の走行パターンにおいて、総個数が一番高く、走行速度が上がるほど、多くの粒子が排出していると考えられる。

Kittelsonらの報告¹¹⁾によると、ガソリン車から排出されるナノ粒子個数は、 $10^{14} \sim 10^{16}$ 個/kg・fuel（高速時における粒径10nmより小さい粒子の排出個数）としており、今回の表3の結果を燃料ベースに換算すると、 $5.3 \times 10^{11} \sim 7.0 \times 10^{13}$ 個/kg・fuelであった。走行条件、米国車と国産車の違いがあるものの、今回の結果は、Kittelsonらの報告より低いレベルとなった。

(3) 走行条件（加減速等）と個数濃度変化

東京都実走行パターンにおいて、排出個数が一番高かったG-b車を選択し、10・15モード試験を用いて、加減速とその時に排出される個数濃度との相関を検討した（図5参照）。図5には、X軸を粒子の粒径（nm）、Y軸を加減速時の経過時間（秒）、Z軸を個数濃度（個/cm³）で表わした。また、評価区間を図5の下部に示した。加速モードはア（312→320秒）、ウ（358→372秒）、オ（494→511秒）における個数濃度の変化を、減速モードはイ（335→344秒）、エ（411→428秒）、カ（614→650秒）における個数濃度変化を調べた。

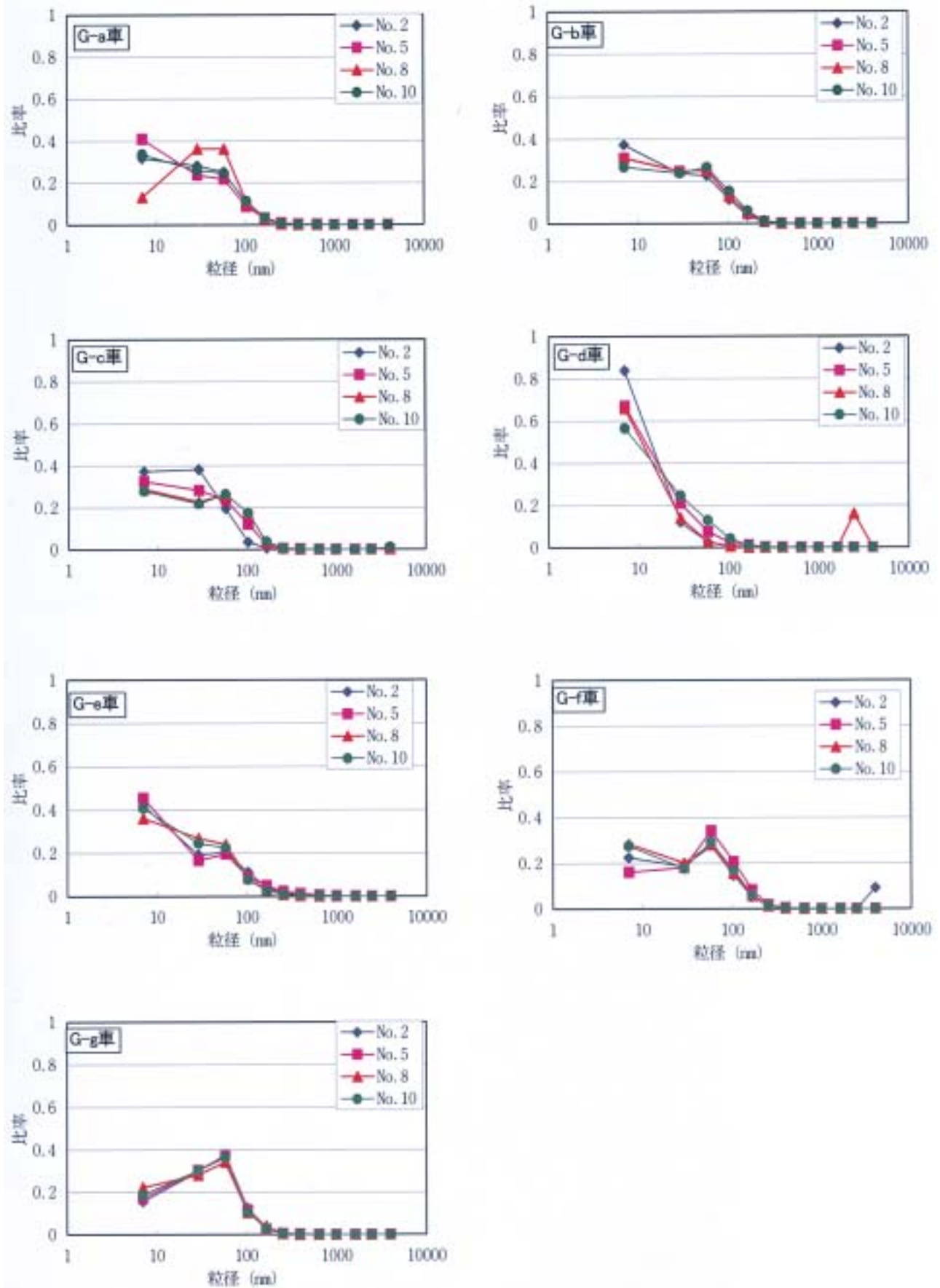


図4 東京都実走行パターンと粒径別の個数比率

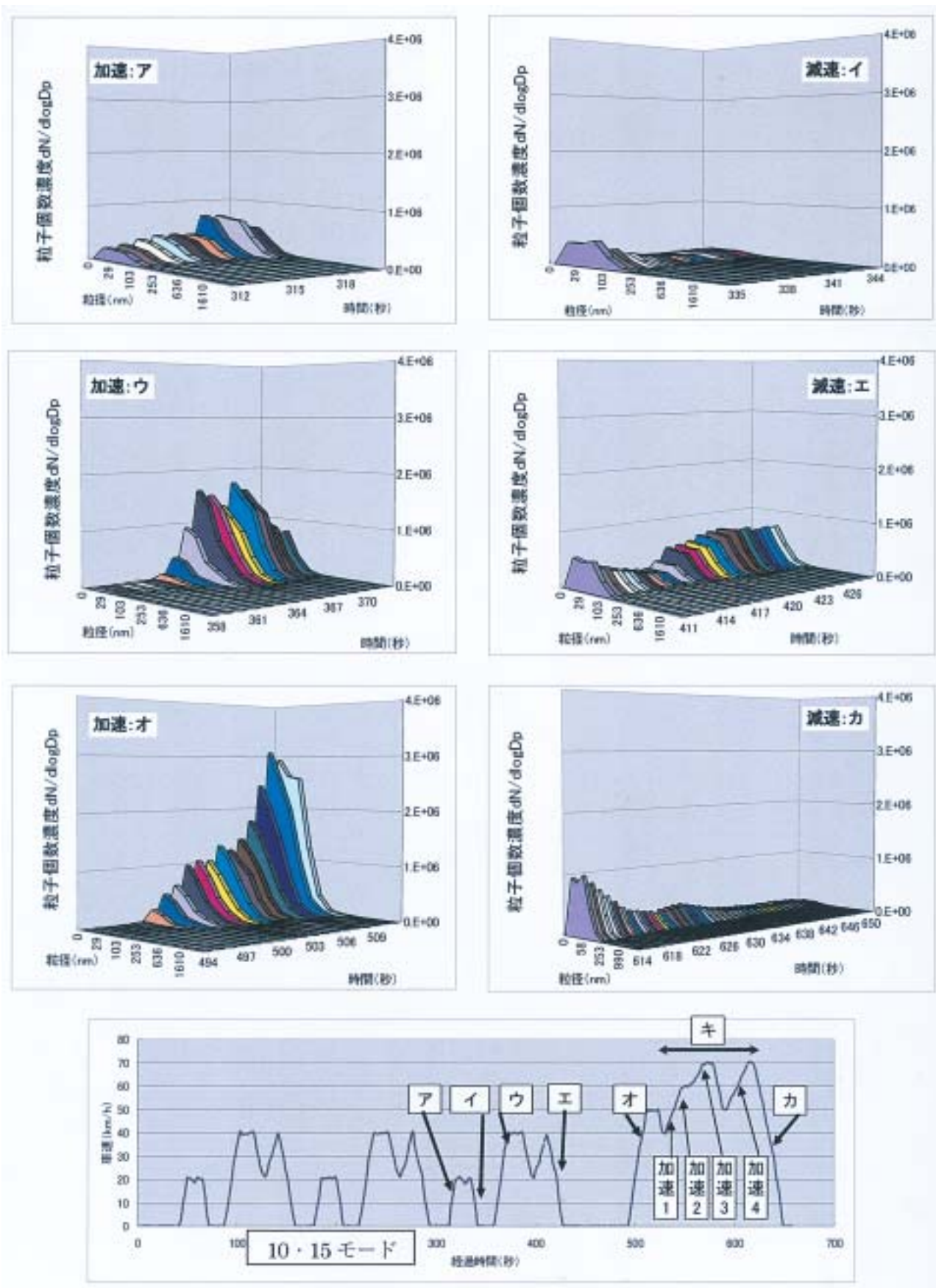


図5 10・15モードの加減速における個数濃度分布（B車）

ディーゼル車においては、アイドリング状態から加速が始まると、ピーク濃度が約 10 nm から 60 nm 近傍にシフトし、減速すると、また 10 nm に戻るという報告がある^{14, 15)}。7、29、58 nm の粒子について加速時を見てみると、ディーゼル車のようなピーク濃度のシフトについては見られないものの、加速初期から個数濃度が徐々に増加し、加速の後半で最大になっていた。ア、ウ、オの加速度（車速/時間）と個数濃度の関係をみると、アでは 20 km/h に達するのに 8 秒、ウでは 40 km/h に達するのに 14 秒、オでは 50 km/h に達するのに 17 秒かかっており、加速度が一番大きいオの個数

濃度が一番高かった。また、減速時には、イ、エ、力ともに個数濃度は減少していた。

最後に、加減速の連続変化（図 5 のキ）における個数濃度分布を図 6 に示した。図 5 と同様に、7、29、58 nm の粒子について、加速では個数濃度は増加し、減速では減少していた。特徴的なのは、40 km/h から 70 km/h に加速する時、加速 1（40 → 50 km/h）が 8 秒、加速 2（50 → 60 km/h）が 10 秒、加速 3（60 → 70 km/h）が 14 秒、加速 4（50 → 70 km/h）が 19 秒かかっていて、加速度が大きい加速 1、4 で個数濃度が高かった。

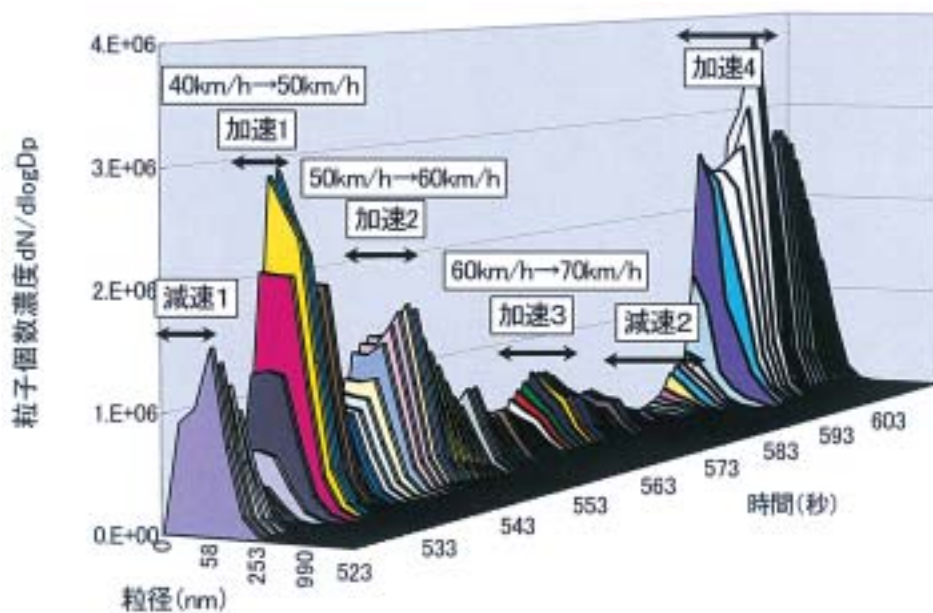


図 6 運転時（40 km/h ～ 70 km/h）の加減速による個数濃度分布

4 まとめ

今回、PM の排出量が少ないとされているガソリン車について、粒径別粒子個数濃度の排出実態を把握するため、調査を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) ディーゼル車とガソリン車から排出される個数（個/km）を比較すると、ガソリン車のほうがディーゼル車に比べて 3 桁少ないレベルであった。
- (2) ガソリン車から排出される個数を粒径別にみると、粒径 58 nm 以下の粒子がほとんどであった。
- (3) 走行条件（加減速）による個数濃度変化をみると、加速の後半時で個数濃度が最大になり、加速度が大きいほど個数濃度が増加した。

今後、今回の調査対象としていない筒内噴射型エン

ジン等についても調査を行う予定である。

参考文献

- 1) 東京都環境白書 2004
- 2) 東京都環境局：平成 16 年度浮遊粒子状物質及び二酸化窒素に係る環境基準達成状況（2005 年 6 月）
- 3) M.Krzyzanowski (WHO), Health risks of particulate matter air pollution, an overview for the 41st session of GRPE
- 4) P.Gehr et.al. Surfactant-ultrafine particle interactions: what we can learn from PM10 studies, Phil. Trans, R. Soc. Lond, A (2000) 358
- 5) Y.Ishihara (Tokyo Women's Medical University), Health effects of ambient particles

- including diesel particles Workshop on diesel DPF, 2003 Tokyo
- 6) ディーゼル排気微粒子リスク評価検討会平成 13 年度報告書（環境省 2002 年 3 月）
- 7) 米 国：Development an alternate PM Measurement Method in 2007 Diesel Particulate Measurement Research at CRC (Coordinating Research Council)
- 8) 欧州：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）
- 9) 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、p153-106
- 10) 三好康彦ら：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、東京都環境科学研究所年報 2003 p105-111
- 11) kittelson ら：9th DEER Conference 2003
- 12) (財)自動車検査登録協力会「自動車保有車両数」
- 13) 新型自動車審査関係基準集の新型自動車の試験方法（TRAIAS）
- 14) 岡山紳一郎（日産自動車）：沿道を模擬した排出ガス中のナノ粒子測定法研究、(社)日本自動車工業会 排出ガス燃費部会 未規制物質分科会 2005 年 6 月
- 15) 久保修一：自動車排出の DEP、ナノ粒子に関する研究の現状と課題 p33-43 大気環境学会 特別講演（2004 年 7 月）