

車載型計測装置によるディーゼル乗用車のNO_x・PM排出実態の分析*

Analysis of the NO_x and PM emission of the diesel passenger car through Real-time On-board Measurement*

森 健二**・萩田賢司***・三井達郎****

By Kenji MORI**・Kenji HAGITA***・Tatsuro MITSUI****

1. 研究の背景と目的

ディーゼル車から排出される窒素酸化物 (NO_x) と粒子状物質 (PM) は、エンジンの改良によって同時に減らすことが技術的に難しい¹⁾。そこで、交通流の管理によって両者の排出量が抑制できる可能性を検討するために、NO_xおよびPMの排出量と交通流の関連を考察した。

2. 研究の位置づけ

(1) 交通流管理と自動車排出ガス対策

速度や加速度といった自動車の走行状態と排出ガス量の間には密接な関係がある。そして、自動車の走行状態は道路条件や交通状況に依存する。そのため、排出ガスの少ない交通状況が保たれるように交通流を管理することが排出ガス量の減少に結びつく。

この「排出ガス量の少ない交通状況」は、単位距離あたりの排出量が増大する低速走行が生じない状況とされている。そのため、交通流の管理による排ガス対策としては円滑化に力点が置かれている。そして、その効果を検証するために、一部の都市では交通管制センターで大気汚染物質濃度と交通流のデータを集約し、その相関関係を分析するプロジェクト²⁾が推進されている。

しかし、濃度は気象などの交通流以外の要因にも依存することから、時間的・空間的にきめ細かな対策の評価に活用するには不向きである。そのため、濃度ではなく排出量そのものを自動車の走行状態から推定し、評価に活用する方法を確立することも必要である。

(2) 実用化された車載型計測装置の活用

自動車の排出ガスに含まれる大気汚染物質の測定技術は、排出ガス試験において必要とされてきた。こうした試験では、決められた走行モード (速度変化パターン)

に従って自動車をシャシーダイナモ上で走らせ、排出される大気汚染物質の量を評価する。

しかし、道路区間単位での排出量を評価することが目的である場合、こうした試験の結果から排出量を推定するには限界がある。また、実際に市街地を走行して得た速度パターンを台上試験に適用しても、高価な実験施設で熟練した運転者による試験を行うには手間がかかる。

木原³⁾ はディーゼルエンジンの吸気量と空気過剰率を測定することにより得られる排気ガス流量と、排気管に設置したNO_xセンサから得た濃度の積により、排出ガスに含まれるNO_x質量を得る車載型の計測装置を開発した。そして、近藤⁴⁾ は、この装置で使用されているNO_xセンサの精度が、シャシーダイナモメータで使用するセンサと同等であることを確認している。

さらに、木原⁵⁾ は、PMについてもリアルタイムで計測できる機器を開発し、これに、車速やエンジンパルスの計測機器、GPSを接続した一体型の計測装置を構築している。本研究ではこの装置と同じ規格のシステムを用いて、NO_xとPM排出量および走行状態を調査した。

3. 走行調査

(1) 計測装置と測定項目

試験車両には、平成6年規制車のディーゼル乗用車を用いた。表-1に車両諸元を示す。

表-1 試験車両諸元

項目	諸元等
メーカー / 通称名	トヨタ / タウンエース・ノア
型式 / 排気量	KD-CR50G / 2,184cc
初度登録 / 既走行距離	平成10年7月 / 約 94,000km
車両重量	1,600kg
乗車定員 / 車両総重量	8人 / 2,040kg
最高出力	67kW/4000rpm
最大トルク	194Nm/2200rpm

車載型排ガス計測装置の構成は、測定データを記録するロガー (堀場製作所製HCM-200) に、排ガス酸素濃度計、NO_x濃度計、オバシメータ、及びその他の各種センサが接続されている。ロガーには車速のパルス信号等が入力される仕組みとなっている⁵⁾。この装置によって、車両の速度、NO_xとPMの排出量が0.5秒毎の時刻とともに記録された。

*キーワード：交通公害

**正員、工修、科学警察研究所交通規制研究室

***正員、科学警察研究所交通規制研究室

****正員、博(工)、科学警察研究所交通規制研究室

(千葉県柏市柏の葉 6-3-1)

TEL 04-7135-8001、FAX 04-7133-9187)

(2) 排出量と速度の計測精度

今回用いた装置で測定される排出量の精度は、NO_xが4%以内、PMで-10～+12%とされている⁵⁾。これは、10.15モード、FTP75モードの測定値をシャシーダイナモの測定値と比較して得た値である。

車速については、車両のスピードメーターに入力されている車速のパルス信号から求めている。今回の測定器は単にパルス数を数えるのではなく、パルス信号の間隔を測定する方式をとっており、これによってスピードメーターの値が忠実に再現されている。ただし、車軸の回転数を検知する方式のため、わずかなタイヤサイズの違いが測定値に影響する。その程度に関しては、シャシーダイナモ試験等を行った場合のローラーの回転速度などとの比較より、車速測定値全体に2～3%程度の誤差が生じる場合があることが経験的に知られている。また、加速度は車速の差分から求めている。

(3) 測定の遅れ時間

PM排出量は、オパシメータで測定される排ガス吸光係数と排ガス流量から計算される⁵⁾。排気ガスはポンプを接続したチューブによって車両の排気管からサンプリングされてオパシメータの測定セルへと送られるため、エンジンから排出されて測定されるまでに時間を要する。この遅れ時間はエンジン回転数等によって変動する可能性があるが、ポンプが存在するためにサンプリング流量は一定である。また、一般にディーゼル車は排ガス中の酸素濃度が低いときにスモークが増加し、排ガス吸光係数が大きくなる。そこで、酸素濃度と吸光係数の時間変化を比較したところ、測定の遅れ時間は3.5秒であると判定し補正を行った。なお、NO_xの遅れ時間は0.5秒より短いと判断し、そのままデータ整理を行った。

(4) 走行経路と調査日時

走行路線として、千葉県警察の柏交通管制サブセンターエリア内（以下、柏エリア）の国道16号（29km区間）、国道6号（12km区間）、県道8号（10km区間）を選定した。それぞれ往復を対象としたので経路としては6路線となった。調査日時は表-1に示すとおり、

表-2 経路別の調査日時一覧

(●: NO_xとPMの両方を計測 ○: NO_xのみを計測)

日	経路	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
3/17	国道 外回り										
(月)	16号 内回り										
3/18	国道 上り										
(火)	6号 下り										
3/19	県道 上り										
(水)	8号 下り										
3/20	国道 外回り										
(木)	16号 内回り										
3/21	国道 外回り										
(金)	16号 内回り										
3/26	県道 上り										
(水)	8号 下り										
3/27	国道 外回り										
(木)	16号 内回り										
3/28	国道 外回り										
(金)	16号 内回り										

平成15年3月17日～28日の土日を除く8日間とした。各経路とも様々な時間帯に調査が行えるよう計画し、各路線の片道を1トリップとして計56トリップの調査を実施した。NO_xとPM排出量は同時計測を試みたが、測定器の不調でPMが計測できたのは40トリップとなった。

(5) 調査要領

試験車には運転手と助手（経路案内、測定機器操作）が乗車した。運転手は代行運転業者から専用ドライバーを雇用した。一連の走行調査で3名の運転手が試験車両を運転した。走行にあたっては、経路の始点となる交差点は直進で進入し、経路の終点は直進で通過した。

(6) 計測データの記述例

計測データの一例として、図-1にNO_x排出率と速度の時間変化を示す。ここでの排出率とは、1分間あたりの排出量であり、0.5秒毎に得られる排出量を120倍した値である。図-1をみると、速度の上昇とともに排出率が高くなる様子が確認できる。また、減速時に排出率0の状態があるのは、エンジンブレーキにより燃料供給が停止されたためと推察される。

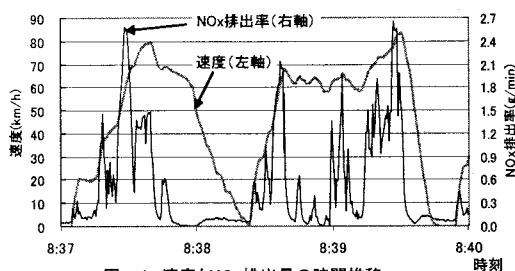


図-1 速度とNO_x排出量の時間推移
(国道6号下り, 2003/3/18, 8:37～8:40の例)

4. 速度別にみたNO_xとPMの排出量の違い

(1) 柏エリアでの速度分布と速度別排出量の分布

ここでは速度と排出量が実測されている点を生かして、柏エリアという東京近郊の都市内幹線道路での速度分布、および速度別にみた排出量分布をケーススタディ的に考察する。

図-2はNO_xとPMの両方が計測された40トリップ、走行時間にして22時間34分48秒間において、0.5秒毎の速度と排出量データに基づく速度帯ごとの時間比率と、各速度帯でのNO_xとPMの排出量が全排出量に占める割合を比較したものである。図-2をみると速度0km/h（アイドリング状態）の時間比率は21%で、その間のNO_x排出量は全排出量の8%である。同様の分析を都心部で行った近藤ら⁶⁾の研究では、アイドリングの時間比率は6割、その際のNO_x排出量が全体の4割、という例がある。それに比べると今回の調査エリア及び時間帯

における停止の割合は少ない。また、高速度領域に目を向けると、60km/h以上の時間比率は13%に過ぎないが、その間のNOx排出量は全体の32%を占めている。高速走行がNOx排出量の増加に結びつきやすいと言える。

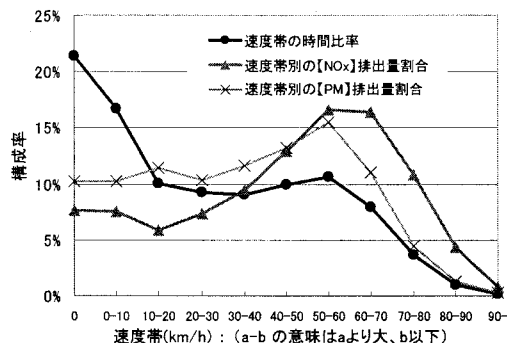


図-2 速度分布と排出量分布

一方、PMについては、アイドリング時の排出量は全排出量の10%であり、NOxの8%と比べて大きな差はない。しかし速度20km/h以下（時間比率48%）における排出量が全排出量に占める割合は、NOxが21%なのに対してPMは32%に達する。この様に、低速走行による排出量の増加傾向はNOxよりPMの方が大きいと言える。

(2) 単位時間あたりの排出量によるNOxとPMの比較

速度と時間あたり排出量との関係は、減速時でなければ高速時に排出量が多くなる傾向にあることは良く知られている。ここでは、NOxとPMの排出量を比較するにあたり、図-2でみたような速度の影響をさらに一般化した考察を試みる。表-3は、1分間あたりのNOxとPMの排出量（以下、排出率）を速度帯毎に整理した結果であり、排出率の平均値、標準偏差、25、75パー

表-3 速度帯別に整理したNOxとPM排出率のデータ

速度帯 (km/h)	データ 数	NOx排出率(g/min)				PM排出率(g/min)			
		平均	標準 偏差	25%	75%	平均	標準 偏差	25%	75%
0	34,759	0.064	0.018	0.053	0.072	0.047	0.029	0.018	0.060
0-10	27,182	0.080	0.037	0.061	0.084	0.060	0.075	0.032	0.063
10-20	16,327	0.104	0.069	0.077	0.108	0.111	0.205	0.027	0.084
20-30	15,112	0.140	0.151	0.086	0.139	0.108	0.160	0.016	0.128
30-40	14,764	0.184	0.243	0.083	0.182	0.125	0.177	0.015	0.159
40-50	16,148	0.230	0.335	0.076	0.218	0.130	0.185	0.017	0.166
50-60	17,404	0.275	0.413	0.088	0.253	0.141	0.181	0.025	0.189
60-70	13,012	0.362	0.497	0.119	0.325	0.134	0.160	0.032	0.184
70-80	5,912	0.528	0.590	0.167	0.674	0.119	0.145	0.039	0.147
80-90	1,658	0.754	0.675	0.229	1.170	0.122	0.128	0.051	0.150
90-	298	0.770	0.692	0.276	1.119	0.166	0.223	0.065	0.153

速度帯a-bの意味はaより大・b以下

センタイル値を示す。排出率の算出にあたっては、0.5秒ごとの排出量を120倍することによって1分間の排出量とし、その値を速度帯毎に整理した。そして、図-3は、速度帯を横軸にとってNOx排出率の平均値と25、75パーセンタイル値を示したものである。さらに、図-4はPM排出率について同様に示したものである。

これらをみると、PMの排出率はNOxと比べると速度に対してほとんど変化しないが、NOxの排出率の平均

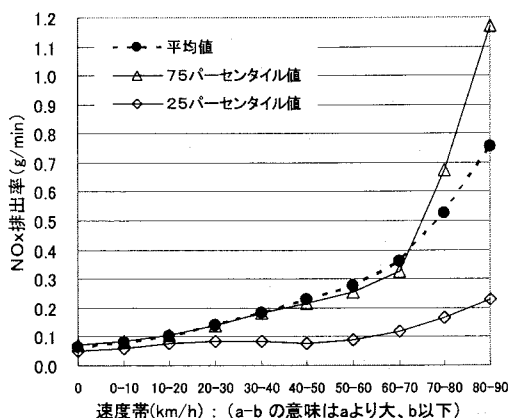


図-3 速度とNOx排出率の関係

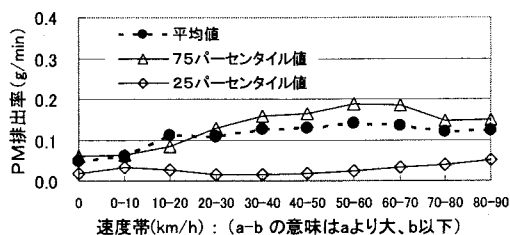


図-4 速度とPM排出率の関係

値は速度とともに高くなり、高速走行時には著しく高いことがわかる。また、NOxは高速度帯域で排出率のばらつきが大きく、高速時の排出率には速度以外の要因が関係していることが示唆される。PMについては平均値でみると50～60km/hでの排出率が高いがこの速度帯域では値のばらつきも大きく、平均値のみで速度と排出率の関係を議論することは難しい。

(3) 単位距離あたりの排出量によるNOxとPMの比較

次に表-4は、走行距離1kmあたりの排出量（以下、排出係数）を速度帯毎に整理した結果であり、排出係数の平均値、標準偏差、25、75パーセンタイル値を示す。排出係数E(g/km)は0.5秒ごとの速度v(km/h)と排出量q(g/0.5sec)から(1)式によって算出した。

$$E = q \times (1/v) \times 3600 \times 2 \cdots \cdots (1)$$

(1)式中の(1/v)は速度v(km/h)で1km走るのに要する時間(h)である。したがって、(1)式で求まる排出係数は、0.5秒毎に観測される速度と排出量の状態で1km走行した場合の排出量を意味する。表-4は、こうした算出された排出係数を速度帯毎に整理したものである。

そして、図-5は速度帯を横軸にとってNOx排出係数の平均値と25、75パーセンタイル値を示したものである。さらに、図-6はPM排出係数について同様に示したものである。

これらをみると、NOx、PMともに低速度帯での排出係数が高く、走行に時間を要することが、結果として単

位距離あたりの排出量の増加に結びつくことがわかる。図-5と図-6では速度が10km/hより大きいデータについてのみ示したが、さらに低速になると排出係数は著しく大きくなることが表-4からわかる。

また、PMの排出係数は速度の増加に伴い減少するが、NOxの排出係数は速度に対してU字型を呈し、30～60km/hの速度帯における排出係数が小さいことがわかる。

表-4 速度帯別に整理したNOx排出係数のデータ

速度帯 (km/h)	データ 数	NOx排出係数(g/km)				PM排出係数(g/km)			
		平均	標準 偏差	パーセンタイル値		平均	標準 偏差	パーセンタイル値	
				25%	75%			25%	75%
0	34,759	-	-	-	-	-	-	-	-
0-10	27,182	8.329	17.736	0.716	7.407	7.438	17.295	0.321	6.450
10-20	16,327	0.428	0.273	0.302	0.474	0.459	0.855	0.105	0.345
20-30	15,112	0.339	0.355	0.206	0.339	0.264	0.400	0.040	0.311
30-40	14,764	0.316	0.412	0.144	0.312	0.216	0.308	0.026	0.276
40-50	16,148	0.306	0.441	0.103	0.290	0.173	0.247	0.022	0.220
50-60	17,404	0.300	0.451	0.096	0.275	0.154	0.200	0.027	0.205
60-70	13,012	0.336	0.461	0.112	0.301	0.125	0.150	0.030	0.171
70-80	5,912	0.425	0.475	0.134	0.541	0.096	0.118	0.031	0.118
80-90	1,658	0.541	0.484	0.162	0.839	0.087	0.092	0.036	0.108
90-	296	0.498	0.446	0.175	0.716	0.107	0.140	0.042	0.099

速度帯a-bの意味はaより大・b以下

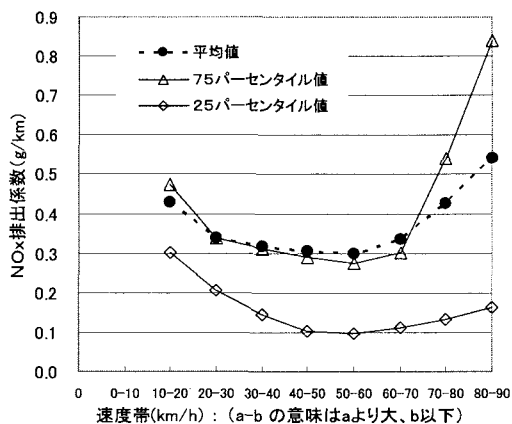


図-5 速度とNOx排出係数の関係

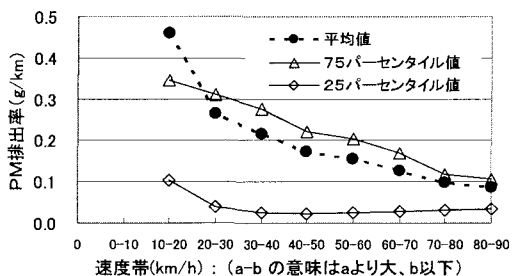


図-6 速度とPM排出係数の関係

5. 排出率が高くなる走行状態の比較

(1) 0.5秒毎のデータによる分析

これまではNOxとPMの排出量の特徴を個別にみてきた。ここでは、両者が同時に計測されている点を生かして、NOxとPMの排出量の関係を考察する。図-7は本調査の中で、国道16号外回りの5トリップ分のデータ

を用いて、0.5秒毎のNOx排出率を横軸に、PM排出率を縦軸にプロットしたものである。これをみると、両者の関係から、PMのみが高い状態、NOxのみが高い状態、そしてわずかではあるがNOxとPMともに高くなる状態が確認できる。この結果は、NOxとPMでは排出率が高

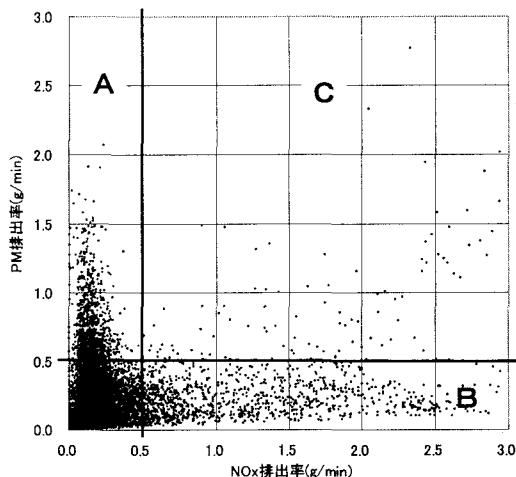


図-7 NOxとPMの排出率の関係(国道16号外回り)

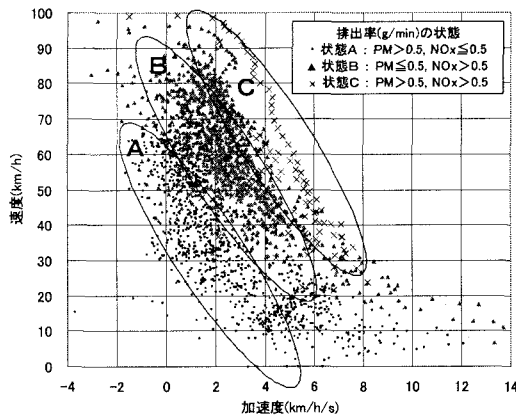


図-8 加速度と速度の関係(国道16号外回り)

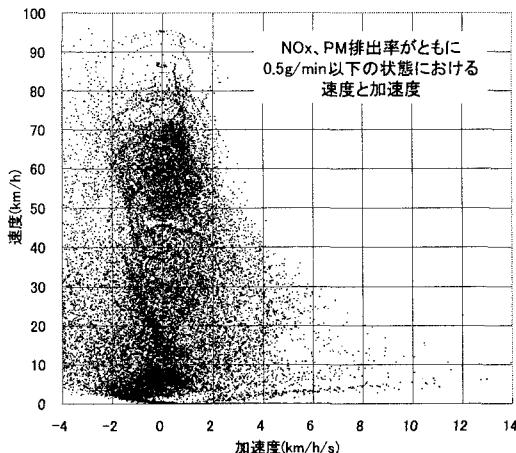


図-9 速度と加速度の関係(2)・国道16号外回り

くなる原因が異なることを示唆している。

この原因が車両の速度や加速度によるものかを定量的に分析するために、0.5g/minを境に排出率の高低を分け、①PM排出率のみが高い状態A、②NO_x排出率のみが高い状態B、③さらに両方とも高い状態C、の3つの状態を定義した。そして、0.5秒毎に得られた車両の速度と加速度の関係を、状態ABC別にみた結果を図-8に示す。図では状態別に布置されるおよその領域を楕円形で囲っている。これを見ると、3つの領域は速度-加速度平面上で概ね識別できることがわかる。NO_x排出率だけが高い状態Bが布置される領域は、低速度かつ高加速度領域を除けばPM排出率だけが高い状態Aの領域より高速度かつ高加速度である。このことから、NO_xの排出率を下げるための速度抑制を行った場合、PMの排出率が高くなることが懸念される。PMには、低速度であっても加速度が高いと排出率が高くなる傾向があるために、NO_x排出率の抑制をねらいとした高速走行抑止のみをもってPM抑制のための対策とするべきではない。なおNO_xとPMの両方の排出率が高いCの状態は、速度と加速度がさらに高い領域に布置されており、領域Cほどの高速度・高加速度状態を生じさせないための交通流制御や運転者教育は意義があると言える。

さらに、NO_xとPMの排出率がともに0.5g/min以下(ABCのいずれでもない)であった状態の速度と加速度の関係を図-9に示す。図-8と比べると全体的に速度と加速度の低い領域にデータが布置されていることがわかる。図-8と図-9の比較より、NO_xとPMの片方または両方が高くなることの原因として速度と加速度の状態が関係していることが確認できる。

(2) 5秒毎のデータによる分析

図7～9の分析は0.5秒毎の短い時間単位のデータに基づいて行った。しかし、厳密には車両の状態によって測定の違い時間が異なる可能性もあるので、同様の分析を比較的長い5秒単位でも行うこととした。すなわち、0.5秒ごとの速度、加速度、NO_x・PM排出量から、それぞれ連続した5秒間の平均値を用いて、NO_xとPMの排出率の相関を検討した。その結果を図-10に示す。これより、5秒単位のデータでみても、PM排出率のみが高い状態とNO_x排出率のみが高い状態、そしてわずかながらNO_xとPMともに高くなる状態が確認できる。

さらに、PM排出率のみが0.5g/minより高い状態A、同じくNO_x排出率のみが高い状態B、そして両方とも高い状態C、の3つの状態別に速度と加速度の関係をみた結果を図-11に示す。図-11より、NO_x排出率のみが高い状態BはPMのみが高い状態Aより速度、加速度が高い右上の領域に布置されていることや、さらに右上の領域には両排出量ともに高い状態Cが布置されるとい

った、図-8と同様の傾向が確認できる。

そして、図-12にはABCのいずれでもない状態での速度と加速度の関係を示す。図-12のデータは図-11と比べると全体的に速度と加速度の低い領域に布置されており、NO_xとPMの片方または両方が高くなる原因には、やはり速度と加速度が関係していると言える。

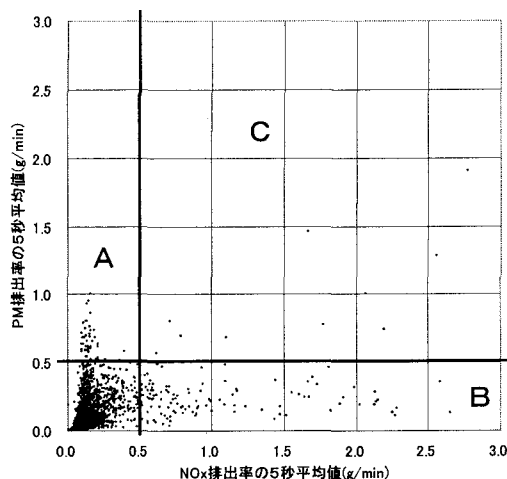


図-10 NO_xとPMの排出率の関係(3)(国道16号外回り)

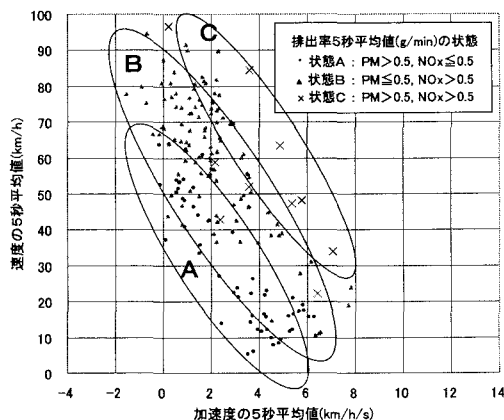


図-11 加速度と速度の関係(2)(国道16号外回り)

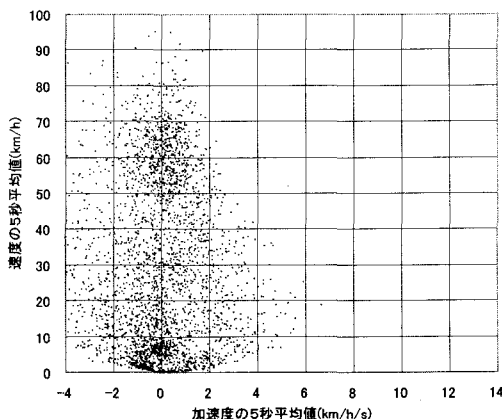


図-12 加速度と速度の関係(4)(国道16号外回り)

6. 結論と今後の課題

(1) 結論

本研究では、ディーゼル乗用車から排出されるNO_xとPMの排出特性の違いを考察するために、千葉県北西部の柏エリアにおいて、車載型の排ガス計測装置を用いて、車両の走行挙動とNO_xおよびPM排出量の調査を行った。今回の調査で得られた実測値を拠り所にする事で、交通状況と排ガス量の関係がより詳細に分析できるようになったと考える。得られた結果をまとめると以下の通りである。

① NO_xとPMでは排出量が多くなりやすい速度帯が異なり、NO_xはPMに比べて高速度領域での排出量が多く、PMは低速度領域での排出量が多い。

② 単位時間あたりの排出量は、NO_xは速度が高くなるにつれて排出量が顕著に増加するが、PMは速度による変化は少ない。単位距離あたりの排出量でみるとNO_x、PMともに20km/h以下の低速状態での排出係数が高く、渋滞緩和が両者の低減に有効なことが追認された。また、NO_xの排出係数と速度の関係をみると、排出量を抑制するには60km/h以上の高速走行を抑止することが望ましい。

③ しかし、NO_xの排出量だけが低い状態を改善するために速度抑制をした場合、PMの増加を招く恐れがある。それでも、NO_x、PMともに多くなるほどの高速走行を抑止することの意義はあるといえる。

(2) 今後の課題

排ガス対策の中で交通流対策は、時間的・空間的にきめ細かな対応ができるという点で期待されている。対

策にあたっては排ガス量をどれだけ正確に捕捉できるかが鍵となる。

今回使用した計測装置によって、排出ガス量を直接測定できるとはいえ、こうした測定方法のみによってエリア全体の排出ガス量を知り得るわけではない。そこで、車両感知器で交通量や渋滞長を計測・推定するのと同じ様に、排ガス量も車両感知器によって推定されることが望ましい。

今後は、旅行時間や停止回数等の現在の車両感知器で知り得る程度の交通指標によって、排ガス量がどの程度正確に把握できるかを検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 例えば、川名英之：ディーゼル車公害、緑風出版、2001.
- 2) 警察庁交通局：道路交通の現状と対策、pp.69-71、2002.
- 3) 木原信隆、塚本時弘：車載型分析システムによるNO_x排出量のリアルタイム計測、自動車技術会2000年秋季大会 前刷集No. 23-00、pp.13-16、2000.
- 4) 近藤美則、小林伸治、森口祐一、田邊凖：車載型計測機器による走行動態調査と走行動態の燃費及び排出ガスに及ぼす影響の解析、自動車技術会2002年秋季大会 前刷集No. 99-02、pp.13-16、2002.
- 5) N.Kihara, T.Tsukamoto : Real-time On-Board Measurement of Mass Emissions of NO_x, THC and Particulate Matters from Diesel Vehicles, The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling in Internal Combustion Engines, pp.71-76,2001.
- 6) 近藤美則、小林伸治、森口祐一：同一経路における走行動態および排ガス排出実態の変化に関する研究、自動車技術会2003年秋季大会前刷集No. 99-03、pp.9-12、2003.

車載型計測装置によるディーゼル乗用車のNO_x・PM排出実態の分析*

森 健二***萩田賢司***三井達郎****

ディーゼル乗用車に車載型の排ガス計測装置を搭載し、速度と加速度およびNO_xとPM排出量の測定を行った。その結果、NO_xとPMでは排出量の多い速度帯が異なり、NO_xはPMに比べて高速度領域での排出量が多く、PMは低速度領域での排出量が多かった。また、速度が高く、かつ加速度が大きいと、NO_xとPMの排出量がいずれも高くなる状態が出現するため、こうした走行を防止することによって両者の排出量を減らすことが可能であることが示唆された。一方、NO_xの排出量だけが低い状態を改善しようと速度抑制を試みると、PMの排出量の増加に結びつく場合があることが確認された。

Analysis of the NO_x and PM emission of the diesel passenger car through Real-time On-board Measurement*

By Kenji MORI***Kenji HAGITA***Tatsuro MITSUI****

In this paper, we measured the mass emission of NO_x and PM at the same time, which exhausted from a diesel passenger vehicle. The car was equipped with on-board system, and amount of emission gas, speed, and acceleration were measured. Consequently, in the condition where the speed and acceleration of a car were high, exhaust amount of both NO_x and PM increased. Furthermore, there were conditions of the run only with the high amount of Nox and conditions of the run only with the high amount of PM.