

自動車排出汚染物質の排出実態に関する トンネル調査—第一報—

伊 瀬 洋 昭 朝来野 国 彦 渡 辺 武 春
小野塚 春 吉 福 岡 三 郎 泉 川 碩 雄
飯 田 靖 雄 舟 島 正 直 茅 島 正 資
鈴 木 正 次 梅 原 秀 夫 石 黒 辰 吉
佐々木 裕 子
(保 健 部)

1 はじめに

自動車の走行による汚染物質の排出の実態を解明するため、シャーシダイナモメーターやエンジンダイナモメーターなどの台上試験とあわせて、供用中の自動車トンネルを利用する手法が種々試みられている。^{1), 2), 3), 4)} 筆者らはさきに中央自動車道笹子トンネルにおいて調査を実施し、多くの知見を得たが、トンネルを利用する方法は

- ① 実際に走行している、車種、規制年次、整備・使用状況などの異なる数多くの車両の平均的な排出特性を把握できる。
- ② 内燃機関以外から発生する、走行まきあげ粉じん、タイヤ摩耗粉じん、アスベスト粉じんなどの排出実態に関する知見が得られる。
- ③ 台上試験で用いる通常の希釈風洞では、捕集時に高濃度の窒素酸化物(NO_x)、高温などによる影響を受けやすい多環芳香族炭化水素やその他の変異原物質の排出実態の検討に適している。

などの点から、自動車の走行が道路沿道へ及ぼす影響を総合的に把握するうえで、有効な手段であると考えられる。

しかし、汚染物質の排出係数を正確にもとめるためには、風量の算定方法、濃度測定対照地点の選定、サンプリング方法など調査手法の基礎的事項について、なお検討すべき課題が多く残されている。

筆者らは、こうした調査手法に検討を加え、ディーゼル車の走行による汚染物質の排出係数をもとめるために、通行車両が限定され、ディーゼル車の混入率が95%ときわめて高い自動車専用トンネルを利用して、2回、調査を実施した。本報では、トンネル調査手法の基礎的事項の検討、ならびに第一回調査結果をもとに走行まきあげ粉じんなどの排出係数を試算したので

報告する。なお、各種の既知汚染物質や変異原物質の排出係数、ならびにそれらの発生源寄与については、第二報で報告する予定である。また、本調査は、当部トンネル調査プロジェクトチームで実施したものである。

2 調査方法

調査は、東京港第二航路海底トンネル(以下「トンネル」)にて、1981年6月23日から7月2日(第一回)と1982年5月24日から28日まで(第二回)の2回にわたり実施した。トンネルの概要、調査方法ならびに測定・分析方法はつぎのとおりである。

(1) トンネルの概要

調査に利用したトンネルは、江東区有明地先13号その2埋立地と中央防波堤内側埋立地を南北に結ぶ延長1085m、最急縦断勾配4%、往復分離2車線の自動車専用道路である。図1にその断面図を示す。トンネルと接続する道路はそれぞれ約300mにわたってU型擁壁を有する堀割り構造になっている。沈埋部分は延長744m、有効幅員7.5m、車道横断面積37.3 m^2 である。換気方式は局所排気付送気型半横流式(立坑排気)を採用しており、必要に応じて強制送排気ができるよう、出口側換気所に排風機2台、出口側と入口側換気所に送風機が2台ずつ配置されている。

通行する車両はごみ収集車や残土運搬車がその大半を占め、下り線には廃棄物や土を積載した車両が、上り線にはこれらの車両が空積載の状態で行っている。車両通行時間は午前7時30分から午後7時頃までで、その他の時間帯は閉鎖される。路面は原則として毎日路面清掃車によって清掃されているため、この種の道路としては路面堆積物が少ない。なお、上り線通行車両はあらかじめ自動洗車施設を通過するため、車体や

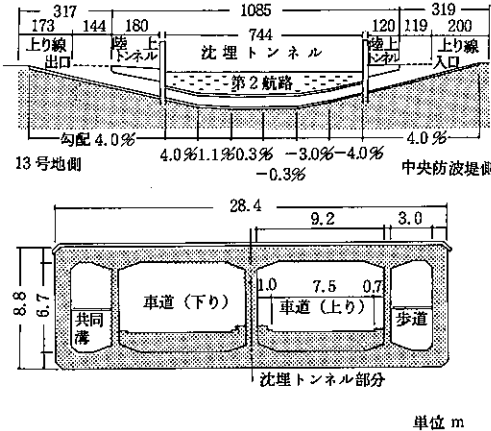


図1 東京港第2航路海底トンネル断面図

タイヤに付着した土などの汚れが比較的少ない。

(2) 調査手法

第一回調査では、上り線および下り線を利用してそれぞれ3日間ずつ、排風機を低速運転させながら行い、第二回調査では上り線を利用して、送風機、排風機いずれも停止させた状態で行った。このような換気条件のもとでは、トンネル内の風はおもに車両の走行によって生じる走行風によって進行方向へ流れる。そのため、トンネル内で発生した排気ガスやまきあげ粉じんなどは、移流中に吸着、吸収その他の反応による損失がなければ、徐々に濃度を高めながら出口方向へ移流し、出口または排風口を経て外気へ放出される。したがって、一定の距離がある2地点の比較またはトンネル内とバックグラウンドとの比較から、その濃度差を用いて通行車両の平均的な排出係数(以下「混合排出係数」)をもとめることができる。

第一回調査では、バックグラウンド濃度とトンネル内濃度を比較する方法、第二回調査では、トンネル内2地点での濃度を比較する方法により、それぞれ(1)式および(2)式を用いて混合排出係数を算出した。

$$Q = \frac{W}{L_1 \times N} \times (C_2 - C_0) \quad (1)$$

$$Q = \frac{W}{L_2 \times N} \times (C_2 - C_1) \quad (2)$$

Q ; 混合排出係数 (g/km・台)

N ; 交通量 (台/時)

W ; 風量 (m³/時)

L₁ ; 入口から測定点までの距離 (km)

上り線では 0.894 , 下り線では 0.954

L₂ ; 2測定点間の距離 (km) 0.764

C₀ ; バックグラウンド濃度 (g/m³)

C₁ ; トンネル入口側立坑下測定点濃度 (g/m³)

C₂ ; トンネル出口側立坑下測定点濃度 (g/m³)

(3) 風量算出方法

風量は、トンネル側道に設置した風速計の指示値を補正して得た風速を用いて、(3)式からもとめた。

$$W = 3600 \times w' \times S \quad \text{ただし } w' = a \times w \quad (3)$$

w' ; 風速 (m/秒)

w ; 風速計指示値 (m/秒)

S ; トンネル横断面積 (m²)

第一回調査では、図2のように約100m離れた2地点において、トンネル入口方向に向けて固定したピラミッド型微風計を、路面から1mの高さに設置し、5分間の風程を連続して測定した。このうち1地点については、壁からの距離が30cmおよび50cmの位置に、ピラミッド型微風計を2台設置して測定し、同時に、熱線風速計を用いて瞬間風速を自動計測した。第二回調査では、ダクト風速計(プロベラ型自記風速計)を路面から約1.5mの高さに設置して、10分間移動平均値を計測した。

(4) トレーサー実験方法

風速計指示値の補正および汚染物質の拡散状態の把握のため、六フッ化イオウ(SF₆)を用いてトレーサー実験を行った。まず、図2に示すように、A地点からSF₆を定流量で放出し、10分後にB~Fおよび

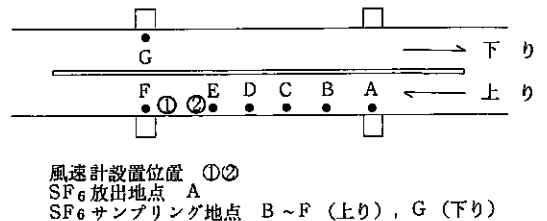


図2 風速測定およびSF₆放出・サンプリング地点

反対車線Gの計6地点でトンネル内空気を採取し、拡散状況を調べた。つぎに、A地点からSF₆を定流量で放出し、FおよびGの2地点で、15分以上の間隔で11回、空気を採取し、風量および反対車線トンネル

へ再び流入する率(再流入率)を調べた。なお、空気
の採取は20~200 mlシリンジを用い、SF₆の分析に
は、モレキュラーシーブス5A充填カラムを装着した
ECD付ガスクロマトグラフを使用した。

(5) 試料の捕集および測定・分析方法

トンネル内での測定は、車道と並行する歩道または
共同溝に測定機器を設置して行い、路面からの高さ
1.0~1.5 mの位置に採気口を設置した。粉じんは、
ハイボリウムエアサンプラー(Hi-Vol)、ハイボ
リウムアンダーセンエアサンプラー(Hi-Volアン
ダーセン)、ローボリウムエアサンプラー(Low-
Vol)、およびβ線吸収式ダスト計(β線ダスト計)
を用いて、表1の方法で捕集した。また、NO_xは化
学発光法NO_x計を用いて測定した。

粉じん捕集ろ紙は、捕集前および捕集後に、20℃、
湿度50%で24時間恒量したのち秤量、その差から捕集
粉じん量をもとめた。Low-Vol 試料の非破壊放射
化分析は、武蔵工大原子炉を使用して行い、AlとSc
の元素含有量をもとめた。また、粉じん中の炭素の定
量は、20mmφにくり抜いたHi-Vol 試料を50℃で、
4時間真空乾燥したのち、CHN 元素分析計を用いて行
った。

(6) 車両交通調査方法

通行する車両の車種別交通量は、トンネル 進入路の道
路端にて、目視により全数を計測した。車種は、大型
6輪車、大型4輪車、中型車、小型車、およびガソ
リン車の5つに、表2に示す識別方法にしたがって分類
した。トンネル走行速度の計測にはモニターテレビを
利用し、トンネル部分1085 mの通過時間から平均速
度をもとめる方法で、抽出調査を行った。なお、車種
別の車両重量、積載量などについては、埋立地台貫ゲ
ートのデータの抽出調査によりもとめた。

3 結果および考察

(1) 車両交通調査

表1 粉じん捕集条件 (トンネル内)

捕集装置	ろ紙	捕集時間	採集量	採集方法
Hi-Vol	石英繊維ろ紙 2500 QAST	1時間毎	1180 ㏪/分	内径50mm 2mダクトホース
Hi-Vol アンダーセン	同上	8時~18時 (9時~15時)	566 ㏪/分	内径50mm 2mダクトホース
Low-Vol	インフイルム TM80	8時~16時 (8時~15時)	8 ㏪/分	47φ フィルタホルダ
β線吸収式 ダスト計	ガラス繊維 ロールフィルタ GS-25	1時間毎	20 ㏪/分	内径15mm 3mダクトホース

表2 車種分類および識別方法

車種分類	識別方法	該当車両	
ディーゼル車	大型6輪車	速度表示灯 後2軸	車両総重量8トン以上又は最大積重量5トン以上
	大型4輪車	速度表示灯	同上
中型車	ナンバープレート11 (大型車除く)	普通貨物車	車両総重量8トン未満かつ最大積重量5トン未満
	88 ……車両の大きさ		
小型車	ナンバープレート44,45	小型貨物車	
	ディーゼル車識別 バッテリーの大きさ		
ガソリン車	88 ……車両の大きさ		
	乗用車、貨物車	乗用車 貨物車……バッテリーの大きさ	乗用車 小型貨物車

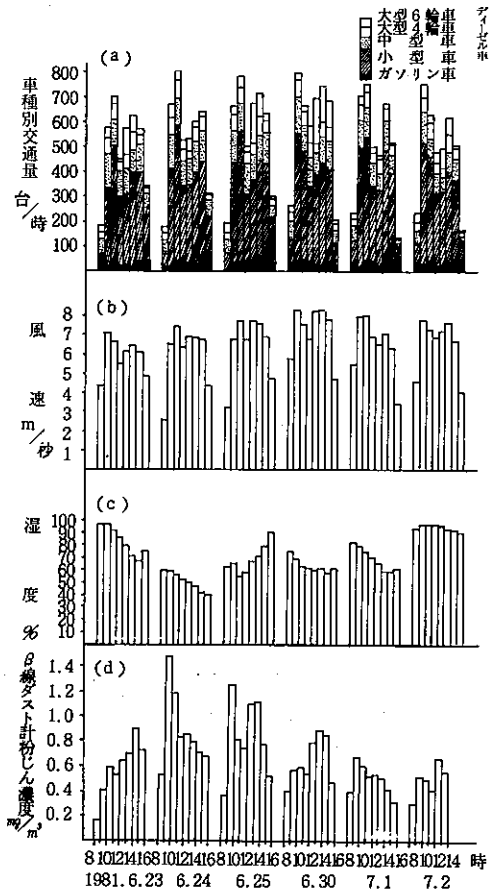


図3 車種別交通量・風速・湿度および粉じん濃度の経時変化(第一回調査)

調査期間中における車種別交通量の経時変化を図3
(a)および図4-(a)に示す。9時から15時までの平均交
通量は、第一回調査では624台/時、第二回調査では
630台/時とほぼ同様であった。ディーゼル車の混入

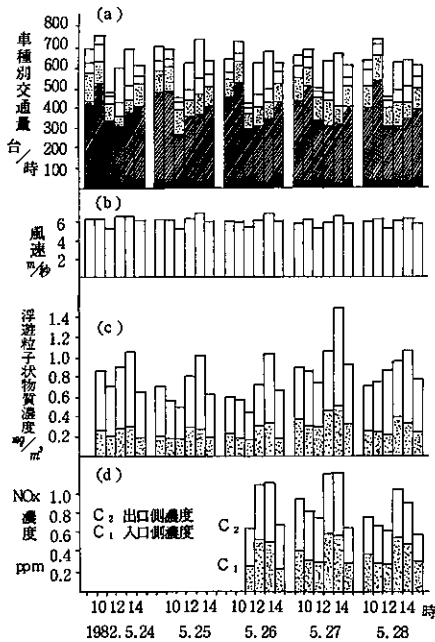


図4 車種別交通量・風速・浮遊粒子状物質濃度およびNOx濃度の変化
(第二回調査)

率は、それぞれ95.1% (n=36, σ=1.7%), 95.3% (n=30, σ=2.3%)と高率かつ変動が少なく、ディーゼル車からの汚染物質の排出実態の調査に適していることがわかった。なお、2車種分類による大型車

混入率(大型6輪車, 大型4輪車および中型車の混入率)は、16.9% (n=36, σ=5.9%), 22.2% (n=30, σ=10.4%)であった。第一回調査時にディーゼル車について、車両重量, 最大積載量, 平均積載量, 排気量, および直噴ディーゼル車比率を抽出調査した結果が表3である。また, 平均走行速度は, 上り線71km/時, 下り線68km/時であった。

(2) トレーサー実験

第二回調査時に行った実験の結果を図5に示す。流量115 ml/分で放出したSF₆は, 拡散, 希釈され, 放出地点から200 mのB地点より風下では, SF₆濃度が8.2~8.3 ppbとほぼ一定の値を示した。また, 第一回調査時に排風機を運転しながら行った予備実験では, 走行する車両上, 車道端, 排風機ダクトのいずれから採取した空気もほぼ一定の値を示した。これらの結果から, SF₆は車両走行による攪拌効果のため均一化され, 一定濃度で移流すること, 風量の算定にはF地点で採取した空気中のSF₆濃度を代表として用いることがわかった。このことから, 自動車の走行により発生した汚染物質についても, 同様に十分攪拌されながら移流するものと考えられる。

一方, 第二回調査において, 反対車線(下り線)G地点のSF₆濃度を同時に測定し, 再流入率を調べたところ平均12.6%, 変動係数28.7%であった。上り線出口からの排気が再び下り線入口から流入する原因と

表3 通行車両調査結果(ディーゼル車)

車 両		構成比 %	排気量 ℓ	直噴車 比率	車両重量 トン	最大積載量 トン	平均積載量トン		
種 類	分 類						上り	下り	
大型ダンプ	大型6輪	13.7	12~18	1.0	9.4~10.5	8~10	0	>10	
収集車	大型4輪	A	1.1	11	0.9	7.4~9.0	6~6.25	0	2.07
		B	6.4	6.6	1.0	5.3~5.5	6~6.5	0	1.48
		C	1.7	10	0.8	6.8	6.0	0	2.13
		D	2.0	6.0	0.7	4.8	5.25~5.5	0	1.73
トラック	中型	>6トン	0.4	>6.0	1.0	4.6~11.0	6~10	0	5.57
		3~6トン	9.8	30~65	0.7	2.5~4.7	3~6	0	1.57
		<3トン	15.6	<3.5	0.0	1.2~3.2	<3.0	0	1.15
収集車	小型	E	3.8	5.4	0.4	4.8	2.75~3	0	1.27
		F	32.2	3.0	0.0	3.2~3.3	1.75~2	0	0.76
		G	3.1	3.0	0.0	2.7~3.2	1.75	0	0.63
		H	10.2	3.0	0.0	2.8	1.75	0	0.58

(注) 1981年6月30日の通行車両に関する抽出調査結果その他の資料にもとづき作成

しては、トンネル出入口が掘割り構造で、上下車線の隔壁が掘割りの中途で切れていることなどが考えられる。また、出口からの排気の拡散は、風向、風速などの気象条件に大きく左右され、その結果、変動係数を高めていると思われる。

このような汚染物質の再流入は、強制排気をせずに排気が全量トンネル出口から排出されるような換気条件のもとで、バックグラウンド濃度とトンネル内濃度を比較する調査手法を用いる場合には、無視できないことがわかった。その点で第2回調査のようにトンネル内2地点の濃度差を用いる調査手法は、再流入の有無にかかわらず利用できる点でより良い方法と思われる。

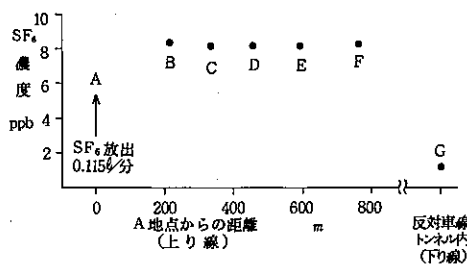


図5 SF₆トレーサー実験結果

(3) 風量の算定および交通量との関係

車両が風速測定点付近を通過する際、複雑な風の乱れを生じ、熱線風速計の瞬間値は大きな変動を示した。そこで、ピラム型微風計の5分間風程値を用いて、風速計設置位置の検討を行ったところ、車道側では壁側に比べ14.8%高い値を示した。しかし、これらの風程値の比の変動係数が3.8%、主測定点と車道側との比の変動係数が2.1%と小さいことから、一定の位置に設置した同一の風速計を用いれば、(3)式から風量を算定できることがわかった。トレーサー実験の結果、補正係数は第一回調査では1.29、第二回調査では1.07ともとめられた。

図6に、強制換気をしないときの風速の変化を示す。閉鎖時には0~1.5 m/秒であった風速が、車両の通行開始とともに増大し、4~7 m/秒に達することがわかる。第二回調査における交通量と風速の関係を図7に示す。相関係数は0.908であった。

さきを実施した笹子トンネルでの調査では、車種別交通量などから、風量を推定したが、車種別交通量と



図6 トンネル内風速経時変化 (1982年5月27日)

風速の関係について知見を得るため、今回の第2回調査結果を用いて、風速を目的変数に、形状の異なる4車種の台数を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、(4)式が得られ、決定係数は0.904であった。

$$w' = 4.95 X_1 + 6.36 X_2 + 2.18 X_3 + 2.01 X_4 + 3.72 \quad (4)$$

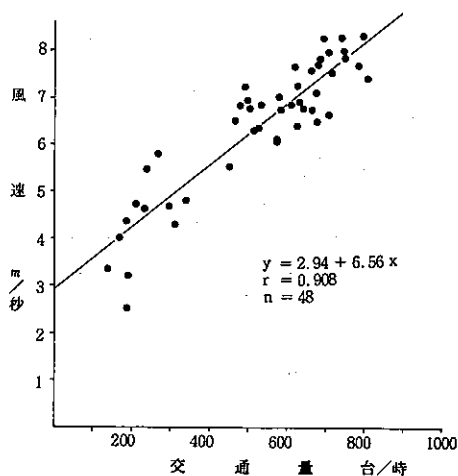


図7 交通量と風速の関係(第1回調査)

w' ; 風速 (m/秒)
 X_1 ; 大型6輪車台数
 X_2 ; 大型4輪車台数
 X_3 ; 中型・小型台数
 X_4 ; ガソリン車台数 (千台/時)
 R^2 ; 0.904 $n = 30$

(4)式の回帰係数から、1台あたりの走行風への寄与は、大型4輪車>大型6輪車>中型・小型車>ガソリン車の順に小さくなることがわかる。大型6輪車は、すべて空積載ダンプ車であるため、大型収集車のよう

な架装車両が多い大型4輪車の寄与の方が大きくなるものと思われる。ただし、(4)式は交通量419~760台/時、平均71km/時などの条件下で得られたものであることに留意する必要がある。

(5) 汚染物質のトンネル内濃度

粉じんのトンネル内濃度を表4に示す。また、β線ダスト計粉じん濃度とNO_x濃度の経時変化を図3-(d)および図4-(c)、(d)に示す。粉じん濃度が、Hi-Vol > Low-Vol > Hi-Vol アンダーセン > β線ダスト計と、装置によって異なるが、これは、採気口での吸引面速度の違いおよび吸引管などの壁面付着損失の違いにより、粒径の大きい粉じんの捕集効率がそれぞれ異なるためである。

表4 トンネル内粉じん濃度 (第一回調査)

項目	平均濃度 μg/m ³	変動係数%	濃度範囲 μg/m ³	平均濃度環境濃度
Hi-vol 粉じん	1077	63.0	288~254	13.2
Hi-vol アンダーセン粉じん	>7 μ	250	54~65	13.2
	3.3~7	168	330~72	18.9
	2.0~3.3	84	131~58	11.7
	1.1~2.0	54	81~42	5.7
<1.1	229	263~201	12.1	
β線ダスト計 粉じん	660	39.4	1469~166	—
Low-vol 粉じん	892	47.6	1740~450	—

(6) 粉じん混合排出係数

(1)式および(2)式を用いて算出した混合排出係数を表5に示す。粉じん混合排出係数の変動係数を比較すると、Hi-Vol粉じんのように粗大粒子を多く含むものほど、その混合排出係数の変動係数が大きい傾向がみられる。Hi-Vol粉じんの混合排出係数と大型車混入率の関係は図8のように、必ずしもよい相関がみられず、特に第一回調査ではバラツキが大きい。

そこで、調査期間中、降雨のため外気の湿度が大きく変化し、路面の湿り具合が日によって異なった第一回調査の結果について、粉じんの混合排出係数と湿度の関係を検討した。Hi-Vol粉じん、粒径別粉じんの混合排出係数と湿度との関係を図9~10に示す。Hi-Vol粉じんでは、湿度が高くなると急激に混合排出係数が減少すること、粒径別粉じんでは、粒径の大きいものほど減少傾向が著しく、2μ以下の粉じんでは湿度の影響をほとんど受けないことがわかった。湿度と

表5 粉じん混合排出係数

項目	混合排出係数 mg/Km台	変動係数 %	n	範囲 mg/Km・台	
第一回調査	Hi-Vol 粉じん	1881	61.1	33	4292-494
	Hi-Vol アンダーセン粉じん総量	1378	31.4	6	2147-870
	7.0 μ以下	944	17.3	6	1243-745
	3.3 μ以下	651	5.7	6	698-608
	2.0 μ以下	503	8.4	6	559-435
	1.1 μ以下	407	11.5	6	461-336
	Low-Vol 粉じん	1421	47.2	6	2749-722
第二回調査	β線ダスト計粉じん	1097	31.8	35	1785-579
	Hi-Vol 粉じん	1950	44.7	29	4480-800
	浮遊粒子状物質 (10 μカット付) (β線ダスト計)	950	27.7	29	1743-599

の相関関係は表6に示すとおりであり、湿度70%における粉じんの混合排出係数は、回帰式から、Hi-Vol粉じん 1936 mg/km台、7~3.3 μ粉じん 257 mg/km台、3.3 μ~2.0 μ粉じん 129 mg/km台、2.0 μ以下の粉じん 432 mg/km台と求められた。

(7) まきあげ粉じんの混合排出係数

湿度の影響を受ける粒径の大きい粉じんの発生源寄与を検討するため、Low-Vol粉じん中のAlとScの含有率を指標に、まきあげ粉じんの寄与を調べた。AlとScの混合排出係数およびAlとScを指標にしたまきあげ粉じんの混合排出係数の湿度との関係を図11に示す。まきあげ粉じんの混合排出係数は、まきあげられる路面堆積粒子のAl、Sc含有率が都内土壤中平均含有率である6.7%、10 ppmと等しいと仮定して算出したものである。湿度の上昇による減少傾向は、

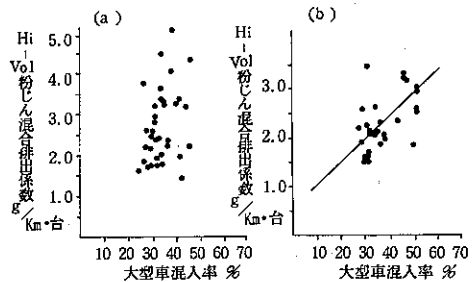


図8 Hi-Vol粉じん混合排出係数と大型車混入率の関係 (a) 第一回調査 (b) 第二回調査

表6 粉じん混合排出係数と湿度の関係

項目	一次回帰式	相関係数	湿度70%における混合排出係数
Hi-Vol 粉じん	$y=5369-49.04x$	-0.638	1936
Hi-Vol アンダーセン 粉じん総量	$y=2718-21.69x$	-0.881	1200
> 7.0 μ	$y=1292-13.00x$	-0.798	382
7.0~3.3	$y=774-7.38x$	-0.873	257
3.3~2.0	$y=261-1.89x$	-0.789	129
< 2.0	$y=391+0.58x$	0.174	432

(註) 上り線, 下り線の結果を合せた。(第一回調査)
 y ; 粉じん混合排出係数 (mg/km台), x=湿度(%)

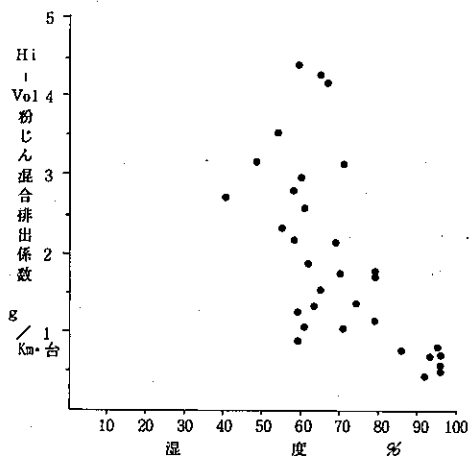


図9 Hi-Vol 粉じん混合排出係数と湿度の関係

さきに検討した粒径の大きい粉じんの減少傾向とよい一致を示している。またLow-Vol 粉じんに占めるまきあげ粉じんの比率は、図12に示すような湿度依存性をもつことがわかった。湿度60~70%の範囲で得られたまきあげ粉じん混合排出係数の平均値は590 mg/km台であった。

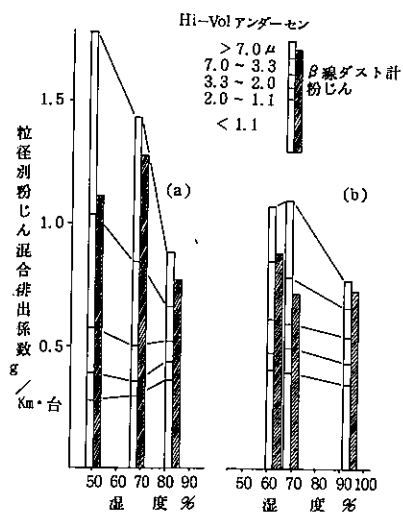


図10 粒径別粉じん混合排出係数と湿度の関係

(a) 上り線 1981年6月23日~25日

(b) 下り線 1981年6月30日~7月2日

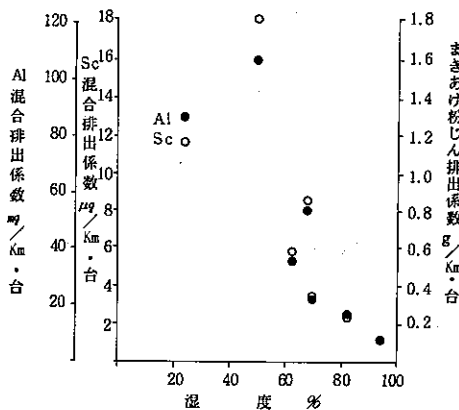


図11 Al, Scおよびまきあげ粉じん排出係数

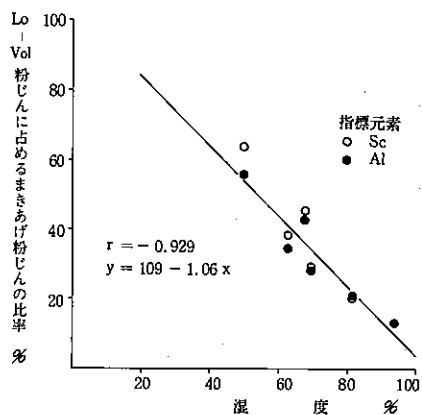


図12 まきあげ粉じん比率と湿度の関係

まきあげ粉じんの排出係数については、J・Schakenbachら⁵⁾が舗装道路での値として0.43g/VMT (0.27 g/Km台)を得ている。しかし、まきあげ粉じんの発生は、路面堆積物の量、組成、含水率などの路面状況、車両走行速度などによって異なるため、単純に比較できない。今後さらに様々な路面状況下での調査が必要と思われる。

(8) 粉じん炭素成分

粉じん炭素成分は、おもにディーゼル車からの黒煙やタイヤ摩耗粉じんに由来するものと考えられるが、第一回調査での炭素成分混合排出係数と大型車混入率の関係は図13のとおりであった。炭素成分混合排出係数は、大型車混入率が増えるとともに増加する傾向がみられ、図8-(a)に示したHi-Vol粉じん混合排出係数と比べてバラツキが小さい。炭素成分混合排出係数の平均値は427 mg/km台で、Hi-Vol粉じん混合排出係数の22.7%にあたる。

舟島⁶⁾は大型ディーゼル車(直噴車)の台上試験によって、80km/時定速走行時の粒子状物質排出係数として276 mg/km台を得ているが、その80%が炭素成分であるとしても、今回の調査で得られた炭素成分混合排出係数はその2倍近い値である。排気管以外からの炭素成分混合排出係数は、タイヤの摩耗粉じんおよびその路面堆積物のまきあげなどが考えられるが、この点については今後、粉じん中タイヤ成分の分析によって解明する予定である。

本調査の実施にあたりご協力いただいた東京港東部埋立地管理事務所ならびに東京都特定清掃事業事務所深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木忠男ほか；高速道路における自動車排ガスの排出係数，自動車技術会学術講演前刷集 782，719 (1978)。
- 2) Pierson, W.R. et.al.; Sulfate Emissions from Vehicles on the Road, A. P. C. A. 28, 2 (1978)。
- 3) 伊瀬洋昭ら；粒子状物質等汚染物質の発生源寄与に関する調査，東京都公害研究所年報 (1981)。
- 4) T. Y. Chang et. al.; Tunnel Air Quality and Vehicle Emissions, Atmospheric Environment 15, 6, 1011 (1981)。
- 5) J. Schakenbach et. al.; A Particulate Matter study for the Metropolitan Baltimore Interstate Air Quality Control Region, Geomet Report, No. EF-710 (1978)。
- 6) 舟島正直ら；大型ディーゼル車からの汚染物質排出実態，東京都公害研究所年報 (1982)。

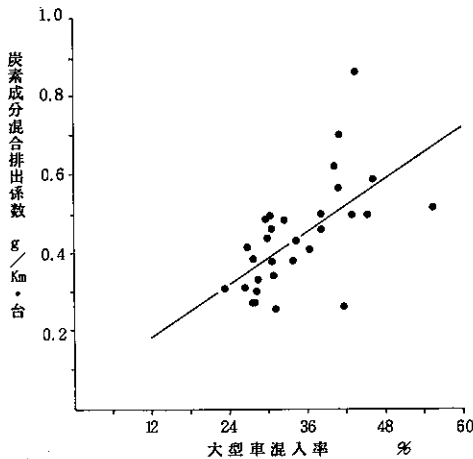


図13 炭素成分混合排出係数と大型車混入率の関係