

自動車用トンネル調査による排出ガス規制の評価

上野 広行 石井康一郎 星 純也 栗田 恵子* 天野 冴子
三矢 律子 木下 輝昭 中川 智史 井原真理子**

(*現東京都立産業技術研究所、**非常勤研究員)

要 旨

気象の影響を受けない自動車トンネルにおいて元素状炭素 (EC) や炭化水素類を測定することにより、ディーゼル車規制の効果を検討した。2001年3月から2003年11月の間にディーゼル車から排出される元素状炭素 (EC) の排出係数が44%程度低下しており、ディーゼル車規制の効果が確認できたと考えられる。また、炭化水素類の排出係数も減少しているものが多く、ディーゼル車規制の効果が表れていると考えられた。

キーワード：自動車排出ガス、元素状炭素、排出係数、ディーゼル車規制

Evaluation of the Diesel Vehicle Emissions Control Regulation by a Road Tunnel Study

UENO Hiroyuki, ISHII Koiciro, HOSHI Junya, KURITA Keiko*,
AMANO Saeko, MITSUYA Ritsuko, KINOSHITA Teruaki,
NAKAGAWA Tomofumi, IHARA Mariko**

*Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute,

*Associate researcher

Summary

To evaluate the effect of the Diesel Vehicle Emissions Control Regulation, a road tunnel study was performed. Inlet and outlet air in the tunnel were sampled and elemental carbon (EC) in the fine particle, Hydrocarbons, etc. were measured. The EC emission factor from the diesel vehicles was estimated to be a 44% decrease between Mar. 2001 and Nov. 2003. The emission factors of hydrocarbons were also decreased in the period. It seemed to be the effect of the regulation.

Key words : automobile exhaust gas, elemental carbon, emission factor, diesel exhaust gas regulation

1 はじめに

ディーゼル車から排出される粒子状物質についての国の規制は、新車については1994年(重量車)から開始されたが、これは欧米に比べて緩やかなものであった。また、2001年に改正したNOx・PM法では使用過程車にも規制が適用されることになったが、対策

地域内の登録車両のみが対象であり、緩和措置により規制の適用を遅らせるなど、深刻な大気汚染は必ずしも順調には改善が進まない状況であった。

そこで、東京都はディーゼル車から排出される粒子状物質を早急に削減するため、首都圏の八都県市と連携し、条例により2003年10月からディーゼル車走行

規制を実施した。これは、全国からの流入車も規制対象とし、PM排出基準を満たさないディーゼル車の都内での走行を禁止するというものである。

規制の効果は、大気汚染常時監視測定局で測定されている浮遊粒子状物質（SPM）の濃度に反映されると考えられる。実際、自動車排出ガス測定局の年平均濃度¹⁾は、2000年度の0.051g/m³から2003年度の0.039mg/m³と着実な減少傾向を示している。しかし、この減少の中には、気象状況による大気中SPM濃度の変動や、二次生成粒子など自動車以外の発生源からの粒子の影響も含まれることに注意する必要がある。

本研究では、確実に自動車排出粒子の削減効果を把握するため、自動車トンネルで調査を行った。自動車トンネルでの調査手法の有効性は既に報告している^{2)~5)}が、気象の影響をほとんど受けないこと、トンネル出口濃度と入口濃度との差を取ることでバックグラウンドの処理ができること、トンネル内を実際に走行している自動車からの総排出量を計算できることなどが挙げられる。総排出量と交通量及びトンネル延長から、自動車1台が1km走行したときの排出量（排出係数）を求めることができる。

今回の調査は条例施行直後の2003年11月9日(日)～10日(月)に行い、同じトンネルで2001年3月10日(土)～13日(火)に行った調査で得られた排出係数⁴⁾と比較することにより規制効果を明らかにすることを目的とした。

2 調査方法

調査方法は既報^{4, 6)}と概ね同様であるが、以下に概要を記す。

(1) 対象トンネル

調査対象としたトンネルは一般道に設置された片側2車線の自動車専用トンネルで、トンネル長さは約1.26kmである。トンネルはほぼ南北方向に設置されており、北方向と南方向の走行路は隔壁によって仕切られ、空気の行き来はない構造になっている。本研究では、南から北へ向かう走行路（外回り）において調査を行った。

トンネル内の換気システムは方向別に独立しており、トンネル内に設置されたジェットファン及びトンネル出口付近に設けられた排気設備によって行われて

いる。

トンネル内は3ヶ所に超音波風向風速計が設置されており、このデータから断面風速が計算できる。

(2) 交通量

交通量は、超音波方式のトラフィックカウンターにより、車種別（大型車、小型貨物車、小型乗用車）に計測されている。

また、これとは別に、トンネル内の監視カメラにビデオを接続し、録画ビデオから車種別に交通量を計測した。計測は目視により8区分（二輪車、軽乗用車、軽貨物車、乗用車、貨客車、バス、小型貨物車、普通貨物車）に分けて行った。

(3) 測定対象成分

ディーゼル車排出粒子状物質は、直径1μm以下の微小な粒子と言われており⁷⁾、主成分は元素状炭素（EC）であると考えられる⁸⁾。また、大気中のECはほとんどがディーゼル車から排出されたものと言われて⁹⁾いる。そこで、今回の調査では、微小粒子中のECを中心に規制効果の評価を行うこととした。

この他、浮遊粉じん（TSP）、光化学関連炭化水素類、アルデヒド類、多環芳香族炭化水素類（PAHs）、窒素酸化物（NO_x）、一酸化炭素（CO）を測定した。

(4) 試料の採取・分析方法

試料採取場所はトンネル入口から約200m入った地点にある非常駐車帯（以下「トンネル入口」とする）及びトンネル出口より約400m手前のトンネル天井に設けられた排風機室内（以下「トンネル出口」とする）の2ヶ所である。

連続測定可能なNO_x、CO以外は、試料は原則として10時から18時の間に2時間ごとに採取した。

ア) 元素状炭素（EC）

アンダーセン・ローボリュウムエアサンプラーにより直径2.1μm以下（微小粒子）の粒子を2時間ごとに石英繊維ろ紙上に採取した。ろ紙の一部を、理学電気製RF-8900システムにより以下の条件で分析した。酸素存在窒素気流中で加熱し、350℃までの昇温・保持時間（5分間）内に生じた二酸化炭素（CO₂）量から計算した炭素量を有機炭素とし、その後、さらに900℃までの昇温・保持時間（5分間）内に生じたCO₂量から計算した炭素量を元素状炭素（EC）とした。

イ) 浮遊粉じん (TSP)

ハイボリュームエアサンプラーにより石英繊維ろ紙上に採取した粒子をTSPとした。試料は2時間ごとに採取し、その重量を測定した。

ウ) 光化学関連炭化水素類

ステンレス製キャニスターにより2時間毎にトンネル内空気を採取し、ガスクロマトグラフ質量分析及びガスクロマトグラフ (FID) により分析した。分析条件は表1のとおりである。

表1 炭化水素類の分析条件

条件1 (エタン、エチレン、プロパン、アセチレン)	
GC	島津GC-9A
カラム	Unipak S(100/150) 内径3mm 長さ2m
キャリアーガス	He50mL/min
昇温条件	45℃(8min)-5℃/min-100℃-25℃/min-200℃(10min)
検出器	FID
濃縮量	1L
条件2 (プロピレン~)	
試料濃縮装置	Tekmer AUTOCAN
濃縮温度	-190℃
GC/MS	島津QP5000
カラム	Aquatic 内径0.32mm 長さ60m 膜厚1.4μm
昇温条件	40℃(4min)-5℃/min-150℃-15℃/min-210℃(5min)
測定モード	SIM

エ) アルデヒド類

既報⁴⁾と同様に、2, 4-ジニトロフェニルヒドラジン (DNPH) 含浸カートリッジにトンネル内空気を2時間通気しDNPH誘導体として捕集した。これをアセ

トニトリルで溶出し、高速液体クロマトグラフ (HPLC) により分析した。

オ) 多環芳香族炭化水素類

既報⁶⁾と同様にハイボリュームエアサンプラーにより粒子を捕集したろ紙の一部を高速溶媒抽出装置により抽出し、HPLCにより分析した。

カ) NO_x、CO

NO_xとCOは、それぞれ化学発光法及び赤外線吸収法の自動測定器により連続測定した。

3 結果及び考察

(1) トンネル内交通量

測定を行った自動車トンネルでは日曜日と月曜日では車種構成が大きく異なっている。トラフィックカウンターによる計測結果及びビデオ解析による計測結果を図1に示した。総交通量は概ね同程度であったが、トラフィックカウンターの小型乗用車はビデオ計測に比べて少なく、一部の乗用車が小型貨物車として計測されていることを示している。

また、日曜日には乗用車が多く普通貨物車が少ないが、月曜日には乗用車が減り普通貨物車が多くなるのがわかる。

2001年3月と2003年11月の車種構成を比較すると、概ね一致しており、両時期の比較を行うことは妥

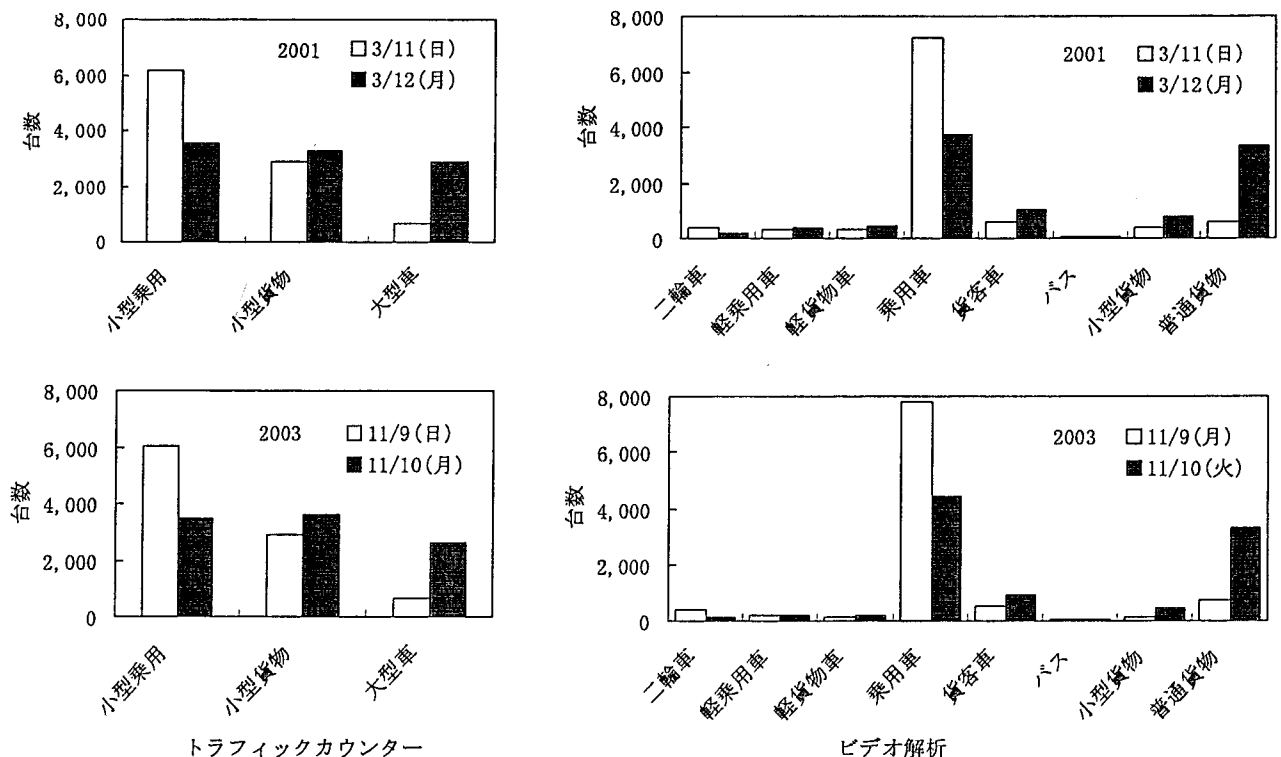


図1 トラフィックカウンター及びビデオ計測による交通量測定結果

表2 トンネル出入口のEC濃度

日付	時間	入口EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	日付	時間	入口EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	出口EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2001/3/11	日	10-12	36	2003/11/9	日	10-12	37
		12-14	31			12-14	28
		14-16	21			14-16	29
		16-18	12			16-18	28
2001/3/12	月	10-12	99	2003/11/10	月	10-12	71
		12-14	100			12-14	34
		14-16	101			14-16	54
		16-18	-			16-18	54

当と考えられる。

(2) トンネル風量

トンネル風量は既報⁴⁾と同じ手法で求めた。2時間当たりの風量は概ね80万 m^3 であった。

(3) ECによる規制効果把握

ア) トンネル内空気中の濃度

表2にトンネル内測定点での空気中のECの濃度を示した。トンネル出口の濃度は入口の濃度よりも高く、この差をとりトンネル内風量を乗ずることによりトンネル内で排出されたEC量を求めることができる。

また、日曜日よりも普通貨物車が多い月曜日のほうが濃度が高く、明らかにトラック等からの排出が多いことを反映している。

イ) 排出係数

粒子状物質はガソリン車からはほとんど排出されないため、微小粒子中のECの排出係数は、ディーゼル車1台当たりの数値を求めるのが妥当である。しかし、交通量計測は車体形状に基づく車種分類をしているため、正確なディーゼル車の台数は把握できない。ここでは、ビデオ解析結果を用い、バス、普通貨物車、小型貨物車、貨客車の台数の合計をディーゼル車とした。

排出係数は下記の式により求めた。

$$EF = (C_{out} - C_{in}) \times V / T / L / 1000$$

ここで、

EF：排出係数 (mg/台km)

C_{out} ：トンネル出口における空気中濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{in} ：トンネル入口における空気中濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

V：トンネル風量 (m^3)

T：交通量 (台)

L：測定地点間長さ (km)

なお、測定データは、表2において入口・出口のデータが揃っている7データを使用した。表3に結果を

示したが、2001年3月における排出係数は74mg/台km、2003年11月における排出係数は41mg/台kmであり、EC低減率は44%程度となった。

表3 ディーゼル車の排出係数

	曜日	時間	2001	2003
排出係数 (mg/台km)	日	10-12	53	25
		12-14	86	47
		14-16	69	49
		16-18	101	37
	月	10-12	66	38
		12-14	81	55
		14-16	66	39
	平均		74	41
低減率 (%)			44	

なお、トラフィックカウンターの計測結果から、大型車台数に小型貨物車4台を大型車1台に換算して加えた台数をディーゼル車台数とし、排出係数を算出した場合のEC低減率も49%とほぼ同様であった。

東京都環境局⁹⁾が、国の排出ガス規制に条例によるディーゼル車規制の効果を加味して推計したディーゼル排出粒子の排出量は、平成12年度の約3200トンから平成15年度の約1900トンと約40%程度の低減率となっている。今回のEC低減率は概ね一致しており、ECが粒子状物質の主成分であることを考えると、計画した削減量が概ね達成されているものと考えられる。

(4) EC以外の物質

ア) トンネル内空気中濃度

炭化水素等のEC以外の物質について、今回測定したトンネル内空気中濃度を表4に示した。表4の数値は、各時間帯の濃度を日毎に平均したものである。なお、平均値の算出に使用したデータは、原則として各

表4 トンネル出入口の空气中濃度

	2003/11/9(日)		2003/11/10(月)			2003/11/9(日)		2003/11/10(月)	
	入口	出口	入口	出口		入口	出口	入口	出口
TSP (mg/m ³)	0.11	0.16	0.08	0.20	不飽和炭化水素類 (μg/m ³)				
CO (ppm)	3.2	5.2	2.5	4.4	エチレン	7.7	14.5	7.1	14.2
NO (ppm)	0.25	0.50	0.43	1.00	アセチレン	3.23	7.17	1.87	2.92
NO ₂ (ppm)	0.04	0.07	0.08	0.16	プロピレン	9.6	16.1	7.6	13.3
NO _x (ppm)	0.29	0.57	0.51	1.16	1-ブテン	4.90	7.27	3.17	4.50
飽和炭化水素類 (μg/m ³)					1,3-ブタジエン	1.37	1.94	1.05	1.40
エタン	2.99	4.48	2.39	2.99	trans-2-ブテン	2.10	3.24	1.13	1.55
プロパン	3.26	3.70	2.85	2.87	cis-2-ブテン	2.04	2.96	1.06	1.43
イソブタン	8.1	11.0	5.3	5.9	1-ペンテン	1.38	2.12	1.08	1.89
n-ブタン	14.0	17.5	8.9	9.9	trans-2-ペンテン	2.97	4.76	1.31	1.76
イソペンタン	27.6	44.1	13.7	18.0	cis-2-ペンテン	1.54	2.42	0.72	1.06
n-ペンタン	13.8	22.0	7.8	10.3	2-メチル1-1,3-ブタジエン	0.44	0.64	0.08	0.09
2,2-ジメチルブタン	1.11	2.30	0.77	0.98	2-メチル1-ペンテン	0.66	1.09	0.41	0.63
2-メチルペンタン	9.9	17.4	7.3	7.7	α-ピネン	0.17	0.24	0.13	0.16
シクロペンタン	0.64	0.92	0.35	0.47	芳香族炭化水素類 (μg/m ³)				
3-メチルペンタン	5.42	9.07	3.66	4.21	ベンゼン	8.1	13.6	5.2	8.2
n-ヘキサン	5.0	8.2	3.4	4.2	トルエン	30	48	25	30
2,4-ジメチルペンタン	0.60	1.07	0.32	0.38	エチルベンゼン	6.5	9.3	4.9	5.8
メチルシクロペンタン	2.37	4.03	1.47	1.81	m,p-キシレン	9.7	17.0	4.6	7.5
2-メチルヘキサン	1.94	3.03	1.00	1.20	o-キシレン	3.29	5.59	1.80	2.90
2,3-ジメチルペンタン	1.14	1.97	0.61	0.90	スチレン	0.62	1.17	0.45	0.74
3-メチルヘキサン	2.29	4.36	1.47	2.05	イソプロピルベンゼン	0.16	0.31	0.10	0.20
シクロヘキサン	0.90	1.09	2.35	1.40	n-プロピルベンゼン	0.30	0.57	0.23	0.42
2,2,4-トリメチルペンタン	2.08	3.58	0.87	1.26	m,p-エチルトルエン	1.58	2.72	1.14	1.92
n-ヘプタン	1.63	2.64	1.53	1.87	1,3,5-トリメチルベンゼン	0.31	0.59	0.24	0.38
メチルシクロヘキサン	0.60	0.95	0.60	0.78	o-エチルトルエン	0.32	0.59	0.27	0.48
2,3,4-トリメチルペンタン	0.71	1.18	0.32	0.48	1,2,4-トリメチルベンゼン	1.47	2.22	0.99	1.59
2-メチルヘプタン	0.75	1.30	0.51	0.71	1,2,3-トリメチルベンゼン	0.37	0.54	0.25	0.43
3-メチルヘプタン	0.76	1.21	0.43	0.60	アルデヒド類 (μg/m ³)				
n-オクタン	0.43	0.73	0.39	0.75	ホルムアルデヒド	3.3	14	4.8	25
n-ノナン	0.38	0.73	0.82	1.82	アセトアルデヒド	9.1	14	9.5	21
n-デカン	0.42	0.53	0.91	1.22	多環芳香族炭化水素類 (ng/m ³)				
ウンデカン	1.02	1.55	2.26	3.44	B(a)A	1.1	2.2	1.1	3.1
					B(b)F	1.4	2.2	1.3	1.9
					B(k)F	0.5	0.9	0.4	0.8
					B(a)P	1.5	2.8	1.1	1.9
					B(ghi)P	5.5	10.2	2.7	4.1

物質2日間に測定した8データを用いたが、光化学関連炭化水素については11月9日14~16時、11月10日16~18時、多環芳香族炭化水素については11月10日16~18時のデータが欠測となっている。

表4を見るとほとんどの物質が入口よりも出口のほうが濃度が高く、自動車起源の物質であることがわかる。

また、NO_x、ノナン、デカン、ウンデカン、アルデヒド類は日曜日より月曜日の方が濃度が高く、トラック等のディーゼル車から多く排出されていることを示している。一方、その他の炭化水素は日曜日の方が濃度が高い場合が多く、乗用車等のガソリン車から多く排出されていることが示唆される。

イ) 排出係数

EC以外の測定対象物質については、ディーゼル車のみから排出されているかどうか明らかではない(TSPも粗大粒子である巻上げ粉じんを含む可能性がある)。そのため排出係数は既報⁴⁾のように、各成分

のトンネル内での排出量をQとし、ガソリン車の台数(N₁)、ディーゼル車の台数(N₂)を説明変数とする重回帰式

$$Q = EF_1 \times N_1 \times L + EF_2 \times N_2 \times L$$

EF₁: ガソリン車1台当たりの排出係数

EF₂: ディーゼル車1台当たりの排出係数

によりガソリン車とディーゼル車に分けて推定した。

ここで、

$$Q = (C_{out} - C_{in}) \times V$$

である。ディーゼル車はビデオ計測のバス、普通貨物車、小型貨物車、貨客車の合計台数とし、二輪車を含み残りをガソリン車とした。

結果を表5に示した。2003年の結果は、ディーゼル車の重回帰係数がマイナスになる場合が多く、ディーゼル車からの排出量は小さくなっている可能性が示唆された。また、排出係数が算出されたものでも、2001年よりも小さくなっており、炭化水素類についてもディーゼル車規制の効果が現れていると考えられ

表5 車種別排出係数

	2001 ¹⁾		2003 ²⁾	
	ガソリン車	ディーゼル車	ガソリン車	ディーゼル車
TSP(g/台km)	0.06	0.18	0.01	0.11
CO(g/台km)			0.96	0.86
NOx(g/台km)			0.0184	1.0
飽和炭化水素(mg/台km)				
イソブタン	2.7	3.9	1.3	-
ブタン	3.5	2.0	1.7	-
イソペンタン	4.8	2.1	7.8	-
n-ペンタン	4.8	2.5	4.0	-
2,2-ジメチルブタン	0.46	0.17	0.53	-
n-ヘキサン	2.9	1.4	1.5	-
メチルシクロペンタン	1.0	0.55	0.76	-
3-メチルヘキサン	1.5	0.45	0.99	-
2,2,4-トリメチルペンタン	1.4	-	0.71	-
3-メチルヘプタン	0.34	0.35	0.23	-
ノナン	-	3.0	0.00	1.0
不飽和炭化水素(mg/台km)				
プロピレン	2.4	11	2.9	3.2
1-ブテン	2.7	4.4	1.2	0.24
1,3-ブタジエン	1.7	0.37	0.28	0.10
1-ペンテン	0.49	1.5	0.30	0.56
t-2-ペンテン	0.91	0.02	0.84	-
芳香族炭化水素(mg/台km)				
ベンゼン	4.4	4.2	2.8	0.45
トルエン	14	5.5	7.3	-
エチルベンゼン	3.0	0.76	1.4	-
m,p-キシレン	8.1	1.9	3.7	-
スチレン	0.66	0.07	0.30	0.01
o-キシレン	2.8	0.97	1.2	-
n-プロピルベンゼン	0.31	0.44	0.13	0.08
1,3,5-トリメチルベンゼン	0.61	0.99	0.15	-
1,2,4-トリメチルベンゼン	2.7	4.2	0.35	0.27
アルデヒド(mg/台km)				
ホルムアルデヒド	0.15	14	1.9	20
アセトアルデヒド	-	7.7	0.7	11
多環芳香族炭化水素(μg/台km)				
B(a)A			0.27	1.8
B(b)F			0.41	0.22
B(k)F			0.16	0.20
B(a)P			0.71	0.12
B(ghi)P			2.3	-

※交通量はビデオ計測の結果を用いた。
 ※重回帰式でディーゼル車の係数がマイナスになった場合は、ガソリン車の単回帰係数から排出係数を求めた。

る。このことは、ディーゼル車規制の対策のひとつとして採用されている酸化触媒の装着が粒子状物質のみならず炭化水素類の酸化処理としても有効である¹¹⁾、¹²⁾ことから妥当といえる。ただし、アルデヒド類については排出係数が若干増加しており、酸化触媒による炭化水素類の酸化が必ずしも完全でない可能性を示唆している。

4 おわりに

気象の影響を受けない自動車トンネルで調査を行うことにより、2001年3月から2003年11月の間にECの排出係数が44%程度低下していた。都内の自動車排出ガス測定局のSPM年平均濃度が2000年度から2003年度にかけて23%程度¹⁾の減少を示していることと比較すると、自動車排出粒子の低減率をより直接的に把握できたと考えられる。

ただし、この結果は規制開始後1ヶ月時点の1ヶ所のデータに基づくものであることから、データ数を増やし、より代表性の高いものにすることが必要と考えられる。

文献

- 1) 東京都環境局：平成15年度大気汚染状況の測定結果について(2004)
- 2) 石井康一郎ら：自動車トンネルを利用した排出ガス調査(I)，東京都環境科学研究所年報，pp.40-45(1999)
- 3) 石井康一郎ら：自動車トンネルを利用した排出ガス調査(II)，東京都環境科学研究所年報1999，pp.40-45(1999)
- 4) 星純也ら：自動車トンネルを利用した排出ガス調査(III)，東京都環境科学研究所年報，pp.40-45(1999)
- 5) 桜井健郎ら：高速道路トンネル交通車両からの揮発性有機化合物の排出係数，大気環境学会誌，37(1)，pp.47-74(2002)
- 6) 星純也ら：自動車トンネルにおける自動車起源化合物の測定(4)，環境化学討論会講演要旨集，pp.734-735(2003)
- 7) Kittelson, D.B.: Engines and Nanoparticles, J. Aerosol Sci.,29(5/6), pp.575-588(1998)
- 8) Yokota, H. et.al.: Emissions of Organic Carbon from 'In-Use' Diesel Vehicles. エアロゾル研究，18(1) pp.40-46(2003)
- 9) 東京都：ディーゼル車排出ガスと花粉症の関連に関する調査委員会報告書 別冊ディーゼル車排出ガス関連環境調査(2003)
- 10) 東京都：東京都自動車排出窒素酸化物及び自動車排出粒子状物質総量削減計画，p6(2003)
- 11) 横田久司ら：連続再生式DPFの排出ガス低減効果等について，エアロゾル研究，18(3)，pp.185-194(2003)
- 12) 村上雅彦ら：自動車排出ガス中の炭化水素類の排出実態及びリスク評価試算，東京都環境科学研究所年報2003，pp.97-104(2003)