

## V-8 トンネル内排気ガス実態調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 12～平 16

担当チーム：基礎道路技術研究グループ（トンネルチーム）

研究担当者：真下 英人、石村利明

### 【要旨】

現在、道路トンネルの換気設計に用いている自動車 1 台あたりの排気ガスの排出量は平成 3～5 年度に実施した実態調査に基づき設定されている。しかし、近年の自動車排気ガス規制の実施や自動車の性能向上に伴って、自動車から排出されるガス濃度も年々減少してきており、道路トンネルの換気設計に用いている自動車 1 台あたりの排気ガスの排出量の見直しの必要性が生じている。

本研究では、供用中の道路トンネルを用いて排気ガス濃度の実態調査を複数年にわたり実施し、トンネル内の有害物質濃度の実態および自動車 1 台あたりの排気ガスの排出量の推移を明らかにした。また、これらの結果をもとに、道路トンネルの換気設計に用いる換気対象物質について検討するとともに、自動車排気ガス規制の効果を考慮した排出量の算定手法を提案した。

キーワード：道路トンネル、換気設計、自動車排気ガス、排出量、実態調査

### 1. はじめに

現在、道路トンネルの換気設計に用いている自動車 1 台あたりの排気ガスの排出量は平成 3～5 年度に実施した実態調査に基づき設定されている。しかし、近年の自動車排気ガス規制の実施や自動車の性能向上に伴って、自動車から排出されるガス濃度も年々減少してきており、道路トンネルの換気設計に用いている自動車 1 台あたりの排気ガスの排出量の見直しの必要性が生じている。このため、供用中の道路トンネルを用いて排気ガス濃度の実態調査を複数年にわたり実施した。本報告は、一連の実態調査の結果からトンネル内の有害物質濃度および自動車の排気ガスの排出量の推移を明らかにするとともに、道路トンネルの換気設計に用いる自動車排気ガスの排出量の算定方法について検討したものである。

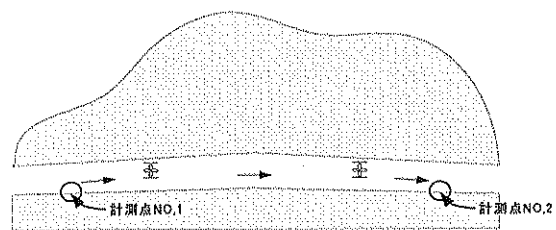


図-1 実態調査の概要

の入口側および出口側の 2ヶ所において各種の排気ガス濃度を計測するとともに、トンネル内を通過した自動車台数を大型車・小型車別に調査を行った。調査項目は、現在、換気施設設計の対象物質である煤煙、一酸化炭素(CO)のほか、窒素酸化物(NOx)、煤煙濃度に関係する微粒子(2.5 $\mu$ m以下の粒子状物質)、粗粒子(10 $\mu$ m～2.5 $\mu$ mの粒子状物質)の濃度、およびトンネル車道内風速、交通量(大型車・小型車の別)とした。なお、Aトンネルについては、2000年度に粉じん調査を実施し、微粒子・粗粒子の発生源別寄与率を調査した。

## 2. トンネル内排気ガス実態調査

### 2.1 実態調査方法

実態調査は、一般国道の 2 車線のトンネルにおいて連続 48～72 時間の排気ガス濃度等の連続測定を実施した。表-1 に実態調査を行ったトンネルの概要を示す。測定は、図-1 に示すように道路トンネルを 1 本のチューブと考えて、トンネル

表-1 実態調査トンネルの概要および調査実施年

調査トンネル	延長(m)	縦断勾配(%)	換気方法 (JF:ジェットファン)	交通方法	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
A	2,027	0.9	JF 付立坑集中排気縦流式	対面	○	○		○	
B	734	1.61	JF+送・排縦流式	一方	○				
C	881	1.3	立坑集中排気縦流式	一方			○		
D	1,833	1.3	JF 式縦流式	対面				○	
E	1,224	2.3	JF 式縦流式	対面					○

## 2.2 調査結果

### (1) トンネル内の排気ガス濃度の実態把握と換気対象物質

国内で走行されている自動車の多くは、ガソリンもしくは軽油を用いており、それらから排出される主なガス成分は煤煙およびCOのほか、NO<sub>x</sub>（一般的にはNOとNO<sub>2</sub>を総称してNO<sub>x</sub>と呼んでいる）、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）などがある。現在、トンネルの換気では、換気に及ぼす影響の程度から煤煙・COを換気設計の対象物質としているが、自動車の排気ガス規制に伴い、これらの排出量が年々減少されてきていることから、今後、他の物質を換気設計の対象物質と考える必要が生じる可能性も考えられる。

このうち、SO<sub>2</sub>については、軽油中の硫黄分を平成19年度から10ppmに制限するなど硫黄成分を大幅に低減させているため、今後、トンネル換気施設設計を行う上での対象物質にならないものと考えられる。一方、NO<sub>x</sub>については、国際的には道路トン

ネル内の濃度を規定する動きがあり、また、今後、煤煙・COの排出量の減少が見込まれることから、対象物質として考慮する必要があるかどうかの検討が必要と考えられる。

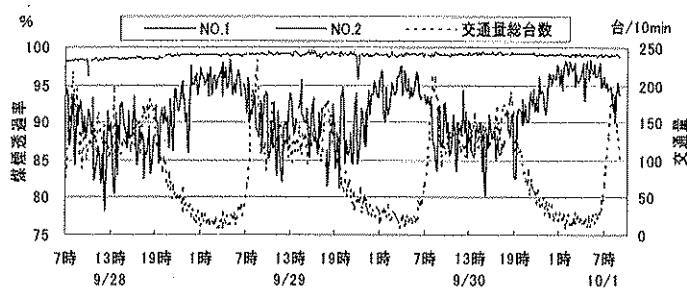
大気中に存在するNO<sub>x</sub>の中で、NO<sub>2</sub>以外は大気濃度レベルでは人体に対する影響はほとんどないとされ、自動車から排出されるNO<sub>x</sub>のうち、90～95%がNO、残りがNO<sub>2</sub>と言われている。NO<sub>2</sub>はNOの酸化により生じ、高濃度では人間、植物、材料などに悪影響を与える。また、NO<sub>x</sub>の規制値については、労働衛生上の許容濃度としてはNO<sub>2</sub>が3ppm、NOが25ppmが設定されている。一方、道路トンネル内のNO<sub>x</sub>の許容濃度として規定されている値としてはオーストリアで25ppm<sup>1)</sup>、ノルウェーで15ppm<sup>2)</sup>の例がある。

図-2にEトンネルで測定された煤煙濃度(煤煙透過率)、CO濃度、NO<sub>x</sub>濃度の10分間毎の平均値を示す。図より、煤煙、CO、NO<sub>x</sub>ともに、トンネル内の風速の風上側(NO.1)では濃度の変動は少なく、風下側(NO.2)の濃度が交通量総台数の増減とともに変化していることが分かる。他のトンネルおよび調査年度におけるトンネル内の排気ガス濃度についても、交通量と連動して変動する傾向が認められ、煤煙・COについては、現在、技術基準で設けられている設計濃度に対して全体的に低い値で、また、NO<sub>x</sub>についても最大でも約6ppm程度と低い値で推移していた。

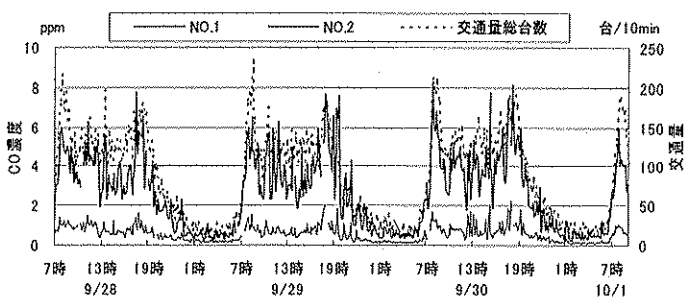
なお、交通量が極めて多い特殊な条件下のトンネルで、自然風の風向・風速によっては煤煙濃度が一時的に現在の設計濃度である40%を下回る場合があり、このような状況下では、COが40ppm、NO<sub>x</sub>が20ppm程度まで一時的に濃度が高くなることが分かった。ただし、煤煙濃度が40%の時にはCOで20ppm程度、NO<sub>x</sub>で10ppm程度であり、現在の基準で規定しているCOの設計濃度100ppmに比べて十分低く、また、NO<sub>x</sub>濃度についても海外で規定されている厳しい値(15ppm)と比べて低い濃度になっており、煤煙の設計濃度が確保されていればCO、NO<sub>x</sub>ともに問題ない濃度になっていることが明らかとなった。

以上より、現段階においては道路トンネルの換気施設設計における換気対象物質としては煤煙、COを考慮することで問題はないと判断できる。

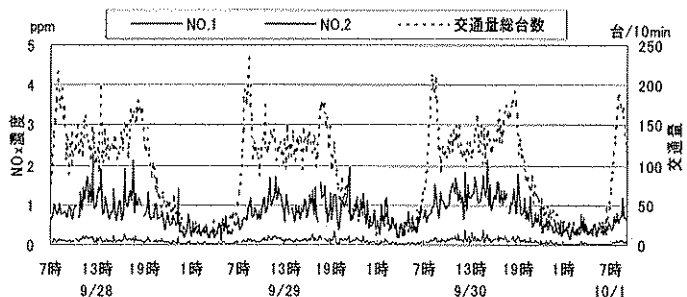
### (2) 道路トンネルの換気設計に用いる自動車排気ガスの排出量



(a) 煤煙透過率(煤煙)濃度の測定データ



(b) 一酸化炭素(CO)濃度の測定データ



(c) 窒素酸化物(NOx)濃度の測定データ

図-2 煤煙・CO・NO<sub>x</sub>の各濃度の測定データ

1) 排出量の算出方法

煤煙濃度およびCO濃度およびトンネル内風速、交通量から自動車1台あたりの排出量を算出した。解析は10分間毎の平均値(1秒毎の瞬時値の平均)を用い、これと車種別交通量等の諸元を用いて行った。

煤煙排出量の算出方法は、調査地点2地点(図-1の計測点NO.1、NO.2)それぞれの煤煙透過率計で測定した透過率を次式(1)を用いて煤煙濃度( $k_i$ )を求め、この調査地点間の煤煙濃度の差( $k_1$ 、 $k_2$ )を用いて式(2)から算出した。CO、NO<sub>x</sub>、微粒子、粗粒子の各排出量についても2地点間の濃度の差を用いた(2)式により一台あたりの排出量を算出した。

$$k_i(1/m) = -\frac{1}{L} \ln \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \frac{(k_2 - k_1) \cdot Q}{L \cdot N} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\tau$ :透過率(%),  $K$ :煤煙排出量( $m^2/km \cdot$ 台)、 $k_1$ :トンネル内の煤煙濃度(1/m)、 $k_2$ :トンネル入口の煤煙濃度(1/m)、 $Q$ :車道内流量( $m^3/10min$ )、 $L$ :地点間距離(km)、 $N$ :交通量(台/10min)とする。

2) 排出量の算出結果

図-3に上記方法により求めた煤煙およびCOの各排出量と大型車混入率の関係の一例を示す。これによって求めた一次回帰式より、大型車混入率100%が大型車、大型車混入率0%が小型車のそれぞれの排出量となる。各排気ガスの排出量の算出結果一覧を表-2に示す。表より、調査期間内で得られた平均的な排出量は、現行の技術基準で用いられている煤煙、COの排出量に比べて煤煙の小型車・大型車で約60%、COの小型車で約15%、大型車で約20%と全体に少なくなっていることが分かる。

3) 排出量の経年的変化

実態調査による自動車1台あたりの排気ガスの排出量について、現在、換気対象物質の煤煙およびCOの各排出量の経年的変化を図-4、図-5に示す。両図には1990年代前半に実施された同様の実態調査か

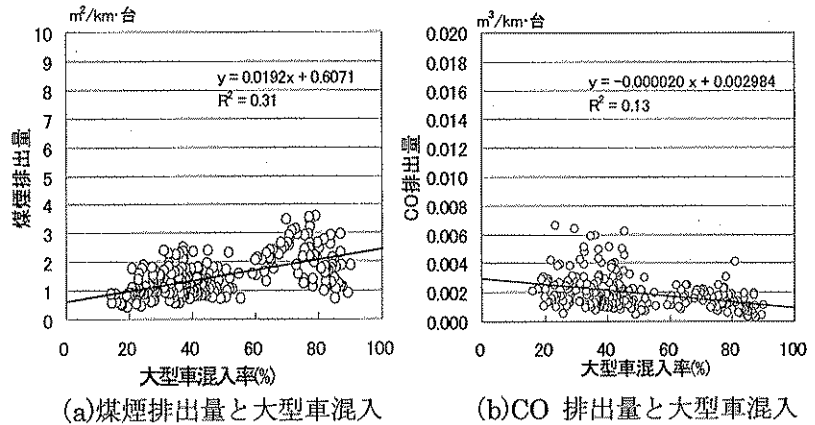


図-3 排出量と大型車混入率の関係の一例

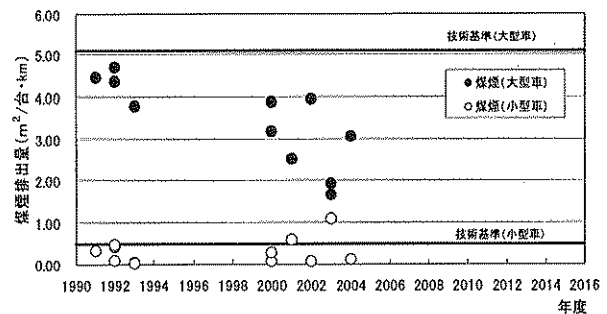


図-4 煤煙排出量の経年変化

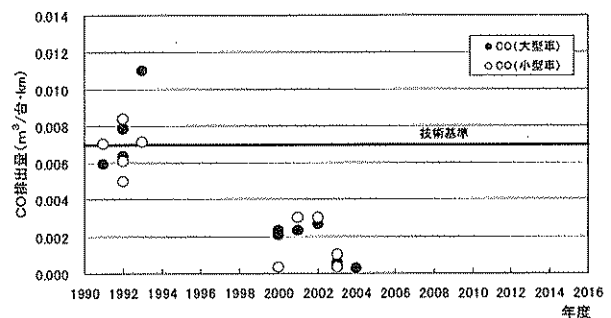


図-5 CO排出量の経年変化

表-2 排出量の算出結果一覧表

トンネル名	実施年度	煤煙 ( $m^2/台 \cdot km$ )		一酸化炭素 ( $m^3/台 \cdot km$ )		窒素酸化物 ( $m^3/台 \cdot km$ )		微粒子 ( $g/台 \cdot km$ )		粗粒子 ( $g/台 \cdot km$ )	
		小型車	大型車	小型車	大型車	小型車	大型車	小型車	大型車	小型車	大型車
Aトンネル	2000	0.075	3.195	0.00034	0.00233	0.00008	0.00259	0.0294	0.2394	0.0266	0.0146
Bトンネル	2000	0.287	3.893	-0.00027	0.00208	0.00024	0.00390	0.0027	0.0827	0.0046	0.0546
Aトンネル	2001	0.607	2.527	0.00303	0.00233	0.00029	0.00144	0.0581	0.2481	0.0268	0.0815
Cトンネル	2002	0.060	3.941	0.00302	0.00270	-0.00018	0.00183	0.0005	0.5505	0.0401	0.0501
Aトンネル	2003	1.087	1.927	0.00036	0.00066	0.000481	0.00138	-	-	-	-
Dトンネル	2003	-0.055	1.655	0.00103	0.00053	-0.000008	0.00319	0.0029	0.3129	0.0035	0.0535
Eトンネル	2004	0.128	3.078	-0.00003	0.00032	-0.000051	0.00358	0.0097	0.3694	0.0083	0.0434
排出量の平均値		0.31274	2.88801	0.00107	0.00156	0.00012	0.00256	0.01722	0.30050	0.01832	0.04962
技術基準の値		0.5	5.1	0.007	0.007	-	-	-	-	-	-
平均値/技術基準の値		0.63	0.57	0.15	0.22	-	-	-	-	-	-

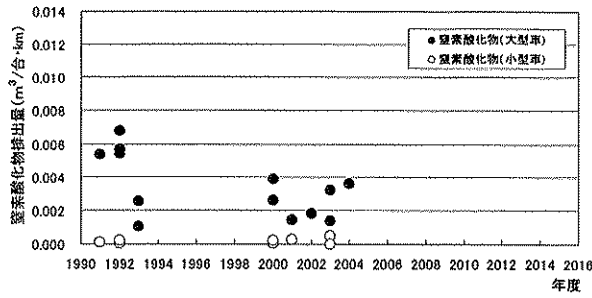


図-6 窒素酸化物排出量の経年変化

ら求めた排出量 ③および現在の換気設計に用いられている技術基準の値 ④を示す。図-4 より、小型車の煤煙排出量は、一部の値で技術基準の値を上回っているものの過去の値と比較して大きな変化は見られない。一方、大型車の煤煙排出量は、ばらつきはあるものの技術基準の値に比べて小さく、過去に実施された値から年々減少していることが分かる。また、図-5 より、CO 排出量も煤煙排出量と同様に減少傾向を示しており、小型車、大型車ともに、技術基準の値に比べて小さくなっていることが分かる。

次に、NO<sub>x</sub> および粒子状物質の微粒子・粗粒子の排出量の経年変化を図-6 に示す。図より、NO<sub>x</sub> については小型車は非常に小さく、大型車から排出される量が多いことが分かる。経年的な変化は、ばらつきはあるものの CO と同様に、年々減少している傾向が分かる。

以上より、自動車の排気ガス規制等により排気ガスの排出量は、年々減少していることが分かった。また、現行の技術基準で用いられている煤煙、CO の排出量に比べ小さいことが明らかとなった。

### 3. 排気ガス規制を考慮した排出量の将来予測

現在の換気施設の規模は、自動車 1 台あたりの煤煙、CO の排出量と交通量、トンネルの延長、断面積等の諸条件をもとに設計されており、一般的には、煤煙濃度で換気施設規模が決まることが多い。前述の調査結果から CO は現行基準の値に対して約 20%程度と大きく減少していることから、今後も煤煙濃度で決定されるものと考えられる。このことから、ここでは煤煙を対象に将来の排出量を予測した。

#### (1) 将来の煤煙排出量予測の考え方

煤煙の排出量の予測にあたっては、基準となる年度における煤煙排出量に自動車排気ガス規制に適合した各年次毎の車種構成および車両構成を考慮して今後減少が予想される自動車の粒子状物質の削減率を乗じる方法とした。

表-3 想定した車種構成比等一覧

車種構成			車種構成比	平均半積載重量	
小型車	乗用車 (74.6%)	ガソリン車	83.5%	—	
		ディーゼル車	16.5%	—	
	貨物車類 (25.4%)	ガソリン車	軽量	26.1%	1.25t
			中量	11.6%	1.60t
		ディーゼル車	軽量	3.3%	2.15t
			中量	9.9%	1.30t
大型車	ガソリン車	重量	16.1%	1.70t	
		重量	33.0%	2.48t	
	ディーゼル車	重量	0.6%	3.00t	
		重量	0.4%	2.02t	
		重量	99.0%	11.53t	

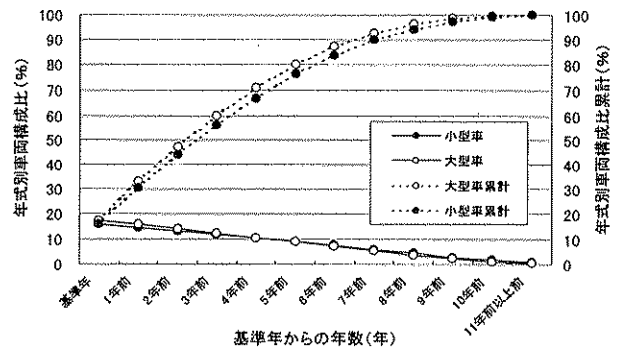


図-7 年式別車両構成比

#### (2) 車種構成および年式別車両構成

将来予測の検討にあたり、想定した車種構成比および年式別の車両構成比は、実態調査結果 ⑤による値を用いた。表-3 に車種構成比、図-7 に年式別車両構成比を示す。この実態調査は全国を対象としてナンバープレートの読み取りを行い、陸運局の登録事項等証明書より車両重量、燃料種別等を確認し、それぞれの構成比を求めている。調査箇所は全国 12 カ所 12 路線、調査台数は約 55,000 台である。

#### (3) 煤煙排出量の削減の考え方

##### 1) 自動車から排出される粒子状物質の削減率

煤煙濃度に関連する粒子状物質の自動車 (新型車) に対する排気ガス規制はこれまで段階的に実施されている。この排気ガス規制をもとに環境影響評価に用いる際の代表的な車種について各年次の排出係数が算定されている ⑥。ここでは、前述した各年度における車種構成、車両構成等から各年度における設計速度 60km/h 時の粒子状物質

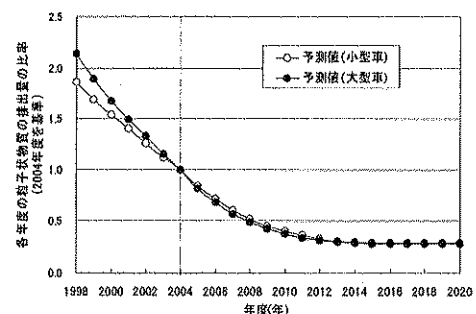


図-8 粒子状物質の排出量の削減率

の排出量を試算し、2004年度の排出量を基準とした比率として削減率を求めた。図-8に各年度の粒子状物質の排出量の削減率を示す。図より、削減率は大型車・小型車ともに2012年頃までは減少傾向にあり、その後はほぼ一定値をとり、排出量は2004年度に比べて約30%程度に減少することとなる。

## 2) 削減対象物

トンネル換気設計の対象となる煤煙は、自動車から排出される粒子状物質（排気管由来）と、トンネル外から自動車の走行によって流入したほこりや塵、タイヤ・路面の摩耗などによる粒子状物質（巻き上げ粉じん）から構成される。

Aトンネルにおいて実施した1日毎計3日間の粉じん調査による微粒子、粗粒子中の排気管由来、巻き上げ粉じん等の寄与率の結果（3日間の平均値）を図-9に示す。図より、微粒子が粒子状物質の約90%を占め、粗粒子は少ないことが分かる。また、微粒子には自動車から排出される排気管由来が約70%以上と非常に高く、次いで路面摩耗粉じん、タイヤ摩耗粉じんの順となっている。一方、粗粒子は、不明が約70%と多く、排気管由来、路面摩耗粉じんがそれぞれ約15%と少ないことが分かる。粗粒子中の排気管由来は、不明分の中に含まれる可能性はあるものの、粒子状物質中の微粒子と比べて粗粒子の割合が小さく、その量は非常に少ないことから、排気ガス規制の効果は粗粒子よりも微粒子の排気管由来に現れるものと考えられる。

以上のことから、本研究では図-10に示すように自動車による排気管由来の構成比率が高い微粒子が削減していくものと考え、将来の煤煙排出量の予測を行うこととした。図-11に将来の煤煙発生量の推定手順を示す。なお、図中の、 $\alpha$ 、 $\beta$ は微粒子、粗粒子の重量濃度（微粒子・粗粒子の排出量単位：g/km・台）から光学濃度（煤煙排出量の単位：m<sup>2</sup>/km・台）に変換する際の係数であり、各年度の調査結果をもとに求めた。

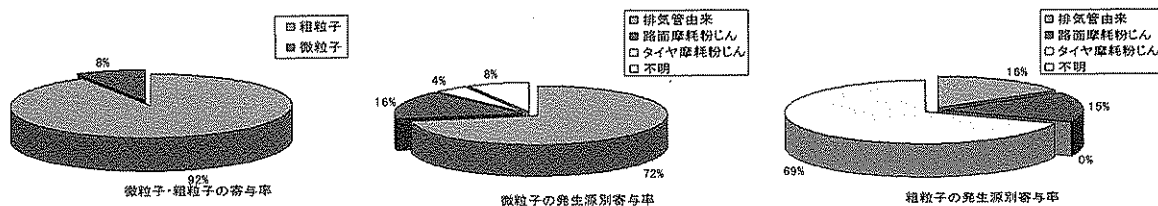


図-9 Aトンネルにおける粒子状物質の発生源別寄与率

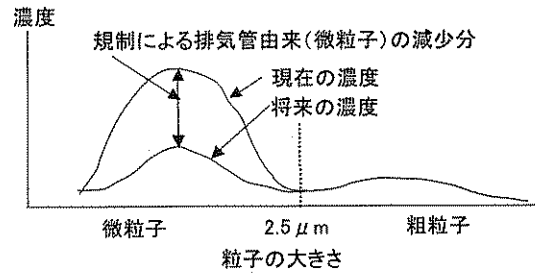


図-10 煤煙構成物質の減少のイメージ

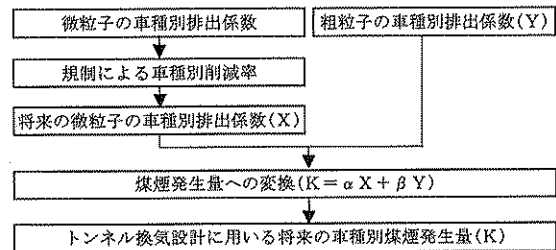


図-11 将来の煤煙発生量の推定手順

表-4 2004年度の粒子状物質の排出量

微粒子 (g/台・km)		粗粒子 (g/台・km)	
大型車	小型車	大型車	小型車
0.292	0.025	0.048	0.015

## (4) 煤煙排出量の将来予測結果

上記の方法によって各年度における煤煙排出量の予測を行う。予測値を求める際に使用した基準となる2004年度における微粒子・粗粒子の排出量は、一連の調査結果から特異値を除いた平均値を用いることとし表-4の値を用いた。図-12に煤煙排出量の予測結果を示す。図より、本予測手法を適用した場合の煤煙排出量は、2012年頃まで減少傾向があり、最終的には小型車で約0.2m<sup>2</sup>/km・台、大型車で約2m<sup>2</sup>/km・台程度まで減少することが明らかとなった。

## (5) NO<sub>x</sub>による必要換気量の試算

現段階では、道路トンネルの換気施設の設計にNO<sub>x</sub>の考慮は必要ないことを前述したが、ここでは、NO<sub>x</sub>の許容濃度を仮定したときの必要換気量の試算を行い検証した。なお、現在の換気施設の規模が一般に煤煙濃度で決定されていることが多いことか

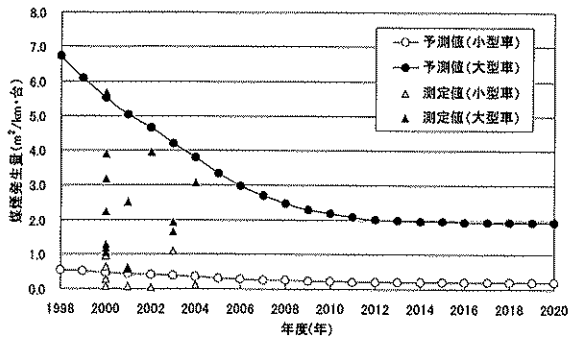


図-12 煤煙排出量の予測値

ら、煤煙濃度に対する必要換気量との比較を行った。試算の前提条件は、NO<sub>x</sub>の排出量を実態調査の値(小型車で約0.1 t/km・台、大型車で約2.6 t/km・台)を用いて、トンネルの内空断面積 60m<sup>2</sup>、走行速度 60km/h、縦断勾配 0% の条件下で算定した。NO<sub>x</sub>の許容濃度は 5,10,25ppm の 3種類を仮定した。図-13 に単位基準換気量(トンネル延長 1km あたり交通量 1 台/1 時間あたりの必要換気量)の算定結果を示す。図より、現行の排出量を用いた時の煤煙濃度(40%)に対する単位基準換気量がいずれの大型車混入率においても最大となることが分かる。次いで NO<sub>x</sub> の許容濃度 5ppm、煤煙予測値、NO<sub>x</sub> の許容濃度 10、25ppm の順となっている。

NO<sub>x</sub>の許容濃度が 10ppm 以上であれば、いずれの大型車混入率においても煤煙排出量の単位基準換気量を上回ることではなく、煤煙の許容濃度で決まる換気設備を設置することで所要のトンネル内環境は確保されることが検証された。

今後、煤煙、NO<sub>x</sub>の排出量ともに排気ガス規制によりさらなる減少が予想されるが、環境影響評価で用いるそれぞれの削減率で見れば、煤煙が NO<sub>x</sub> に比べて削減率が若干大きいものの同様な削減率で減少することから、今後も上記の結果が大きく変動することはないものと考えられる。ただし、今後においても規制の効果によるそれぞれの排出量の減少傾向を把握し、確認していくことが必要である。

## 5. まとめ

本研究は、供用中の道路トンネルにおいて排気ガス濃度の実態調査を複数年にわたり実施し、自動車の排気ガスの排出量の推移、道路トンネルの換気設計に用いる排出量について検討を行った。

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 自動車の性能向上、排気ガス規制等により排気ガスの排出量は、年々減少していることが明らか

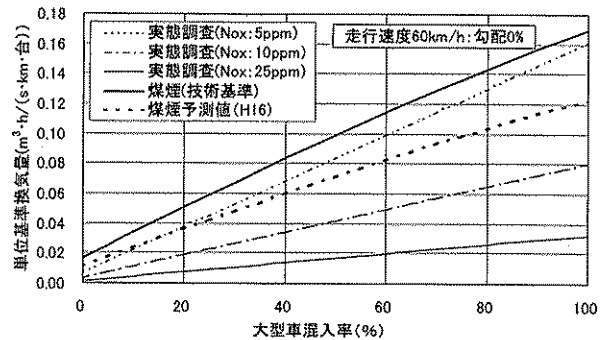


図-13 煤煙および NO<sub>x</sub> による基準換気量の比較

かとなった。

- 2) 調査期間内で得られた平均的な排出量は、現行の技術基準で用いられている煤煙、CO の排出量に比べて煤煙の小型車・大型車で約 60%、CO の小型車で約 15%、大型車で約 20%と全体に少なくなっていることが明らかとなった。
- 3) 排気ガス規制を考慮した煤煙排出量の予測方法として、粒子状物質の寄与率をもとに微粒子分の排気管由来に相当する約 70%が今後減少するとして、環境影響評価で用いる各年度の排出量と車種構成比等から算出される各年度の削減率を乗じる方法を提案した。
- 4) 将来的に NO<sub>x</sub> の許容濃度の設定値によっては NO<sub>x</sub> が換気対象物質となる可能性があるが、現段階においては NO<sub>x</sub> を換気対象物質として扱う必要性はないことが分かった。

## 【参考文献】

- 1) Forschungsgesellschaft für das Verkehrs und Strassenwesen
- 2) NORWEGIAN DESIGN GUIDE ROAD TUNNEL, Public Road Administration, Norway, 1990
- 3) 建設省土木研究所：トンネル換気設計に用いる煤煙の自動車 1 台あたりの発生原単位と補正係数に関する研究報告書、建設省土木研究所共同研究報告書第 114 号、平成 7 年 3 月
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準(換気編)・同解説、平成 13 年 10 月
- 5) 国土交通省国土技術政策研究所：自動車排出係数の算定根拠：国土交通省国土技術政策総合研究所資料第 141 号、2003 年 12 月