

◆ 報 文 ◆

自動車1台あたりの換気対象物質の低減を考慮した トンネル換気設計法

真下英人* 石村利明**

1. はじめに

現在、道路トンネルの換気施設設計に用いている自動車1台あたりの換気対象物質の排出量は平成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、近年の自動車排出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粒子状物質や一酸化炭素 (CO) などの有害成分の量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台あたりの換気対象物質の排出量の見直しが必要となっている。このため、供用中の道路トンネルを用いて排出ガス濃度の実態調査を複数年にわたり実施した。本報文は、一連の実態調査の結果からトンネル内の排出ガス濃度および自動車から排出される有害成分の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1台あたりの換気対象物質の排出量の算定方法について検討したものである。

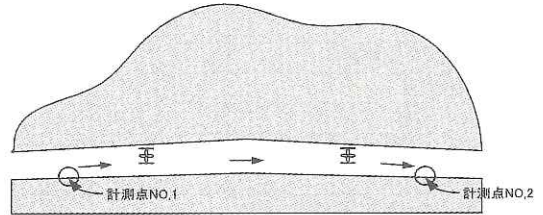


図-1 実態調査の概要

2. トンネル内排出ガス実態調査

2.1 実態調査方法

実態調査は、一般国道の2車線の道路トンネルにおいて連続48～72時間の排出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、トンネルの入口側および出口側の2ヶ所において各種の排出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視界の悪化に影響を与える煤煙、人間の生理的な影響を与える一酸化炭素 (CO) のほか、窒素酸化物 (NOx)、煤煙濃度に関係する微粒子 (2.5 μm 以下の粒子状物質)、粗粒

子 (10 μm～2.5 μm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。

自動車1台あたりの有害成分の排出量は、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 ($k_2 - k_1$) を用いて式 (2) から算出した。CO、NOx、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式 (2) により一台あたりの排出量を算出した。

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

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					○

Design Method of Road Tunnel Ventilation Considering Reduction of Exhaust Fumes from Cars.

$$K = \frac{(k2 - k1) * Q}{L * N} \quad (2)$$

ここで、 τ :透過率、 K :煤煙排出量 ($m^2/km \cdot 台$)、 $k1, k2$:トンネル内の煤煙濃度 ($1/m$)、 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。

2.2 調査結果

2.2.1 トンネル内の排出ガス濃度と換気対象物質

国内で走行し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_x (一般的にはNOとNO₂を総称してNO_xと呼んでいる)、二酸化硫黄 (SO₂) 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、自動車の排出ガス規制に伴い、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、SO₂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_x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_xの中で、NO₂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_xのうち、90~95%がNO、残りがNO₂と言われている。NO₂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_xの規制値については、労働衛生上の許容濃度としてはNO₂が3ppm、NOが25ppmが設定されている。一方、道路トンネル内のNO_x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25ppm¹⁾、ノルウエーで15ppm²⁾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_x濃度の10分間毎の平均値を示す。図より、煤煙、CO、NO_x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出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、技術基準で設定している設計濃度に対して全体的に低い値で、また、NO_x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_x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_x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_x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_x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。

2.2.2 換気設計に用いる自動車1台あたりの有害成分の排出量

(1) 排出量の算出結果

図-3に2.1で示した方法により求めた煤煙およ

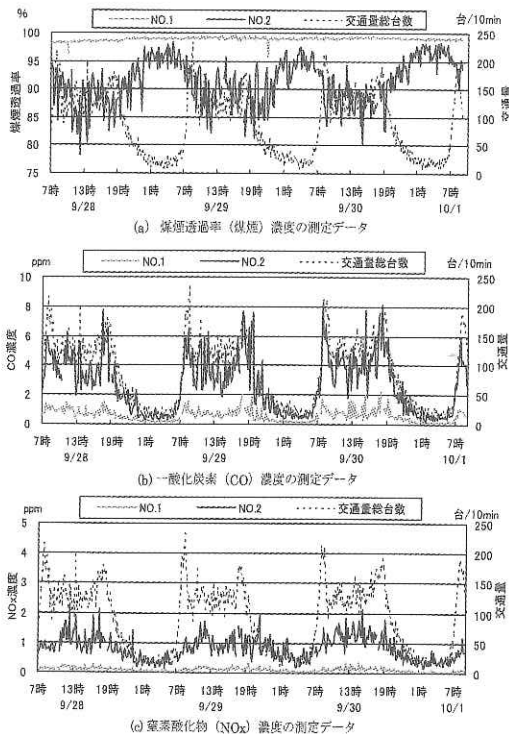
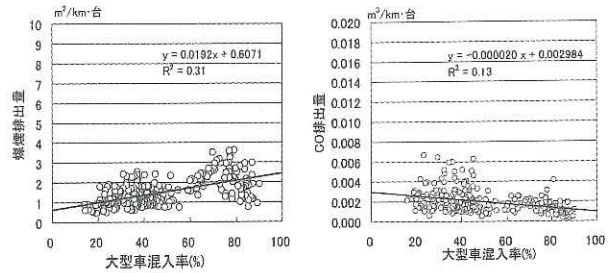


図-2 煤煙・CO・NO_xの各濃度の測定データ

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。同様な方法により求めた各有害成分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の排出量に比べて小型車・大型車の煤煙で約60%、小型車のCOで約15%、大型車のCOで約20%と全体に少なくなっていることが分かる。

物質の排出量は、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、



(a)煤煙排出量と大型車混入率 (b)CO排出量と大型車混入率

図-3 排出量と大型車混入率の関係の一例

(2) 排出量の経年的変化

現在、換気対象物質としている煤煙およびCOの各排出量について、実態調査から求めた自動車1台あたりの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。

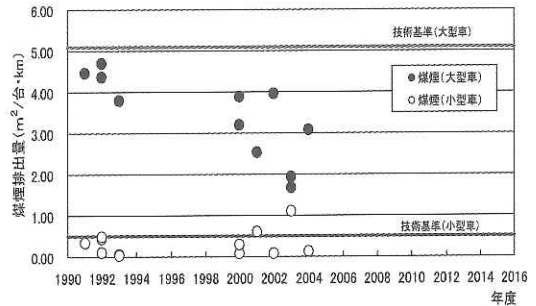


図-4 煤煙排出量の経年変化

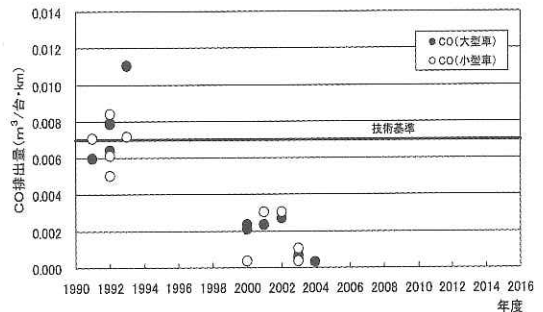


図-5 CO排出量の経年変化

表-2 排出量の算出結果一覧表

トンネル名	実施年度	煤煙 (m³/台・km)		一酸化炭素 (m³/台・km)		窒素酸化物 (m³/台・km)		微粒子 (g/台・km)		粗粒子 (g/台・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	-	-	-	-	-	-

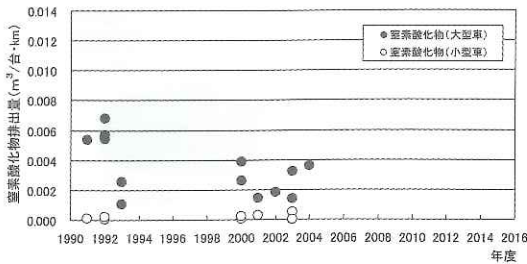


図-6 窒素酸化物排出量の経年変化

COの排出量に比べ小さいことが明らかとなった。

3. 排出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。

3.1 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出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。

3.2 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、環境影響評価に用いる自動車の排出係数を用いる際に用いた実態調査結果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。この実態調査は平成9年度に実施したものであり、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。

3.3 煤煙排出量の削減の考え方

3.3.1 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)に対する排出ガス規制はこれまで段階的に実施されている。この排出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⁵⁾。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時の粒子状物質の

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 (74.6%)	乗用車	83.5%	-	
	ディーゼル車	16.5%	-	
	貨物車類 (25.4%)	軽量	26.1%	1.25t
		中量	11.6%	1.60t
		重量	3.3%	2.15t
	ディーゼル車	軽量	9.9%	1.30t
中量		16.1%	1.70t	
重量		33.0%	2.48t	
大型車	ガソリン車	0.6%	3.00t	
	ディーゼル車	中量	0.4%	2.02t
		重量	99.0%	11.53t

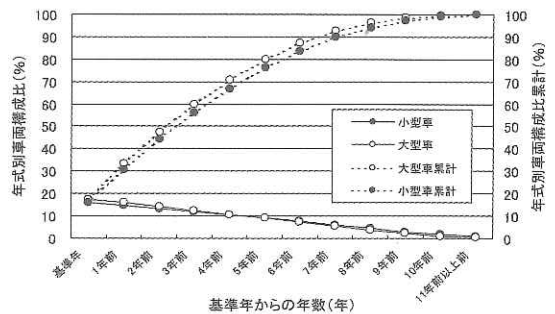


図-7 年式別車両構成比

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。

3.3.2 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(自動車排出ガス由来)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。

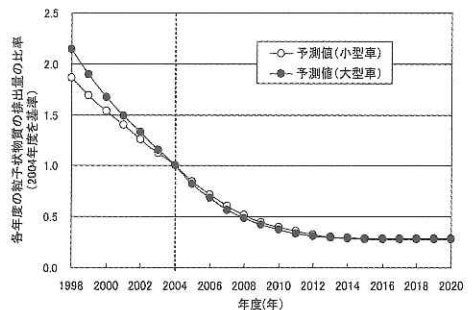


図-8 粒子状物質の排出量の削減率

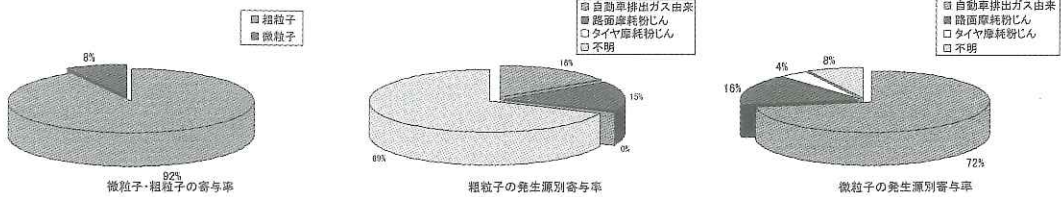


図-9 Aトンネルにおける粒子状物質の発生源別寄与率

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、粗粒子中の自動車排出ガス由来、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自動車排出ガス由来が約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、自動車排出ガス由来、路面摩耗粉じんがそれぞれ約15%と少ないことが分かる。粗粒子中の自動車排出ガス由来は、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自動車排出ガス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自動車排出ガス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に将来の煤煙排出量の推定手順を示す。なお、図中の、 α 、 β は微粒子、粗粒子の重量濃度(微粒子・粗粒子の排出量単位: $g/km \cdot 台$)から光学濃度(煤煙排出量の単位: $m^2/km \cdot 台$)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。

3.4 煤煙排出量の将来予測結果

上記に示した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 $0.2m^2/km \cdot 台$ 、大型車で約 $2m^2/km \cdot 台$ 程度まで減少することが明らかとなった。

3.5 NOx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NOxの考慮は必要ないことを前述したが、ここで

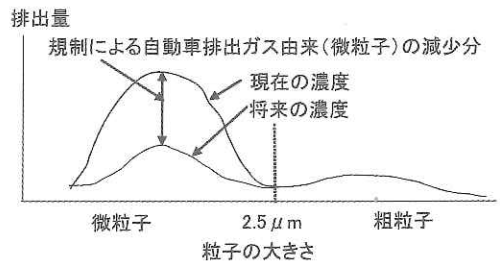


図-10 煤煙構成物質の減少のイメージ

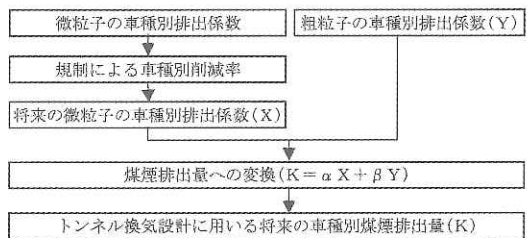


図-11 将来の煤煙排出量の推定手順

表-4 2004年度の粒子状物質の排出量

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

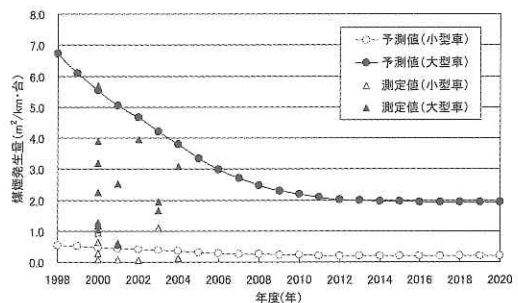


図-12 煤煙排出量の予測値

は、NOx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ら、煤煙濃度に対する必要換気量との比較を行った。

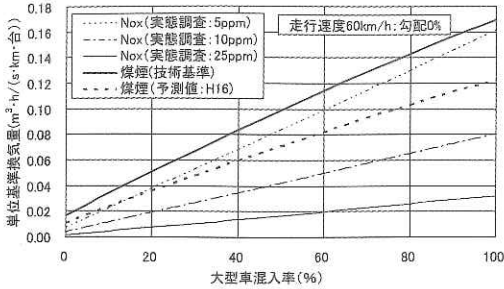


図-13 煤煙およびNO_xによる基準換気量の比較

試算の前提条件は、NO_xの排出量を実態調査の値（小型車で約0.1l/km・台、大型車で約2.6l/km・台）を用いて、トンネルの内空断面積60m²、走行速度60km/h、縦断勾配0%の条件下で算定した。NO_x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_xの許容濃度5ppm、煤煙予測値、NO_xの許容濃度10、25ppmの順となっている。

NO_x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_xの排出量ともに排出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みれば、煤煙がNO_x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。

4. まとめ

本研究は、供用中の道路トンネルにおいて排出ガス濃度の実態調査を複数年にわたり実施し、自動車から排出される有害成分の量の推移、道路トンネルの換気施設設計に用いる自動車1台あたりの換気対象物質の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、自動車排出ガス規制等に

より換気施設設計で用いている自動車1台あたりの換気対象物質の排出量は、年々減少していることが明らかとなった。

- 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の排出量に比べて小型車・大型車の煤煙で約60%、小型車のCOで約15%、大型車のCO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) 排出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自動車排出ガス由来に相当する約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_xの許容濃度の設定値によってはNO_x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_x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。

今後は、道路トンネルの換気施設設計に用いる自動車1台あたりの換気対象物質の排出量の早急な見直しを行う予定である。

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

真下英人*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム首席研究員、工博
Dr. Hideto MASHIMO

石村利明**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム主任研究員
Toshiaki ISHIMURA