

トンネル調査による実走行車両からの窒素酸化物排出特性

齊藤 伸治 石井 康一郎 上野 広行 内田 悠太
横田 久司 秋山 薫

要 旨

窒素酸化物(NO_x =一酸化窒素(NO)+二酸化窒素(NO_2))の主要発生源である自動車排出ガスに関して、実走行車両からの排出特性を明らかにするため、2011年12月15日から20日にかけて自動車専用トンネルで測定を行った。測定期間中の平日の交通量は6~7万台/日で、休日は5万台/日程度であった。トンネル内の NO と NO_2 の濃度は、平日において午前中から正午にかけてと夕方になる傾向が見られた。入口側と出口側で測定した濃度差とトンネルの諸情報を用いて排出量を算出し交通量との関係を調べたところ、大型車交通量との間に明瞭な相関が見られた。近似直線の傾きから排出係数(EF : 自動車一台あたり1 km走行した時の排出量)を推定した結果、 $EF(\text{NO})$ は2.20 g/台km、 $EF(\text{NO}_2)$ は0.40 g/台kmであった。これらの値を1998年に実施された同トンネルでの調査結果と比較したところ、 $EF(\text{NO}_x)$ は48%の減少が見られたが $EF(\text{NO})$ の減少が51%と大きく、 $EF(\text{NO}_2)$ の減少は24%だった。 $EF(\text{NO}_2)/EF(\text{NO}_x)$ 比は1998年の調査の結果では0.10であったが、本研究では0.15と増加の傾向が見られた。

キーワード：窒素酸化物(NO_x)、トンネル調査、 NO_2/NO_x 排出量比

Characteristics of nitrogen oxides from vehicle emissions:

A roadway tunnel study

SAITO Shinji, ISHII Koichiro, UENO Hiroyuki, UCHIDA Yuta
YOKOTA Hisashi, AKIYAMA Kaoru

Summary

To investigate the emission ratio of NO_2/NO_x from running vehicles, an in-situ field measurement was conducted in a roadway tunnel from 15 to 20 in December 2011. The amount of traffic was about 60,000-70,000 vehicles per day in weekday (including in Saturday) and about 50,000 vehicles per day in weekend. While the concentrations of NO and NO_2 in the tunnel were roughly constant in weekend, those in the weekday were high from 8:00 to 12:00 and from 16:00 to 18:00.

Emission factors (EF s) determined from this measurement are 2.20 g/veh km for NO and 0.40 g/veh km for NO_2 . These EF s were compared with those obtained by the same tunnel in 1998. The decrease of $EF(\text{NO}_x)$ around 48% was caused by mainly the decrease of $EF(\text{NO})$ (51%), and the decrease of $EF(\text{NO}_2)$ (24%) was smaller than $EF(\text{NO})$. As a result, the emission ratio of NO_2/NO_x ($EF(\text{NO}_2) / EF(\text{NO}_x)$) increased from 0.10 in 1998 to 0.15 in 2011.

Key Words : nitrogen oxides (NO_x), tunnel study, NO_2/NO_x emission ratio

1 はじめに

窒素酸化物($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)は環境基準が定められている NO_2 の環境濃度の低減のみならず、揮発性有機化合物とともにオゾンの光化学生成に関与することから、主要排出源であるディーゼル自動車等に対して数次にわたる単体規制がなされてきた¹⁾。これらの削減対策の効果から、近年における大気中の NO_x 濃度は減少傾向を示している。しかし、 NO_2 の減少は NO と比べて緩やかであり NO_2 と NO_x の濃度比は増加傾向にある(図 1)²⁾。

燃焼過程で排出される NO_x の大部分は NO であり、 NO_2 の排出は全体の数%~10%程度と報告されている³⁾。一方、近年のシャシダイナモ試験等では、ディーゼル車に装着された酸化触媒の影響により NO_2 の排出量が相対的に増加していることが指摘されている⁴⁾。しかし、実走行車両からの NO_x 排出量は、エンジンの型式の違い、運転条件(エンジン回転数と負荷)、整備状況の違いによって異なるため⁵⁾、 NO_x の排出実態を明らかにすることは多くの試験が必要となる。また、シャシダイナモ試験等で得られる排出係数(EF)については、 NO_x として報告されており、 NO と NO_2 の区別がなされていない。

そこで本研究では、都内にある自動車専用トンネルで NO と NO_2 の測定を行なうことで、実走行車両からの排出量の算出を試みた。トンネル内の 2 地点で測定を行ない、その濃度差を用いてバックグラウンド濃度を処理することで、通行する車両由来の NO_x のみを調査することができる⁵⁻¹⁰⁾。得られたデータにトンネル走行車両の交通量、走行風データ等を併せ、 EF を見積もり、過去の調査結果等との比較を行なった。

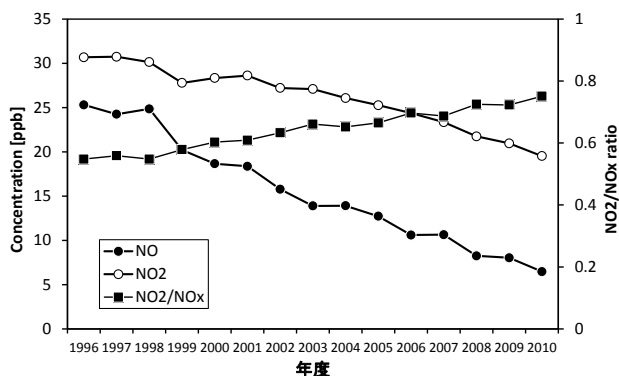


図 1 東京都における NO 、 NO_2 濃度、 NO_2/NO_x 濃度比の経年変化。大気汚染常時測定局測定結果報告(平成 22 年度年報)をもとに作成²⁾

2 調査方法

(1) トンネル概要

調査は 2011 年 12 月 15 日(木曜日)から 20 日(火曜日)にかけて行なった。対象としたトンネルは片側 3 車線の自動車専用道路トンネルである。入口側と出口側にそれぞれ換気所が設置されているが、調査期間においては、送風機、排風機とも稼働しておらず、トンネル内の空気の流れは自動車の走行風によるものであった。トンネル内の風速については、トンネル内の入口付近と出口付近の 2ヶ所で計測されている風速計データから 1 時間平均値を算出して用いた。図 2 に示すように両地点の風速はほぼ一致していた。また、風向は一貫して入口から出口方向であり、出口側における外気の流入は確認されなかった。走行量については、トンネル入口に設置された超音波方式の計測器によって得られた車数データ(大型車と普通車の二区分)を用いた。

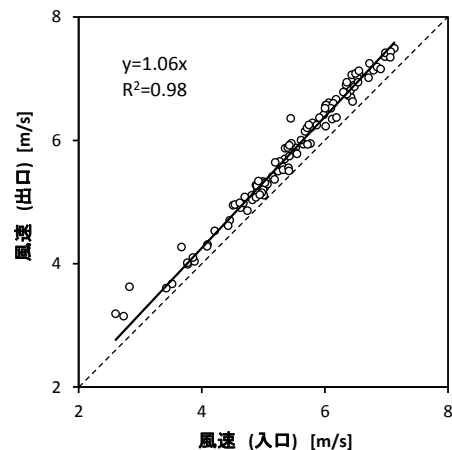


図 2 トンネル内の入口側と出口側で測定された風速

(2) 測定手法

測定に用いた NO_x 計は、HORIBA 社製 APNA-370 と Thermo Fisher Scientific 社製 Model 42i である。測定前に両測定器の併行運転を行ない、測定値が一致することを確認した。また、測定期間中においては、一日一回キャリブレーションを行った。測定器はトンネル内の入口側、出口側の 2 箇所に設置した。トンネル外の大気の影響を少なくするため、両地点ともトンネル内へ 200 m 程度入った地点とした。測定地点間の距離は約 930 m である。大気中のオゾンは NO と反応して NO_2 を生成するが、両地点とも調査期間を通してオゾン濃度はほぼゼロであったことから、 NO_2 の生成は無

視できると考えられる。

3 結果と考察

(1) 交通量及び走行風

測定期間中の普通車と大型車の交通量、及び大型車混入率の時間変化を図3(a)に示す。普通車と大型車を足し合わせた総交通量は12/18(日)を除く各日とも6万~7万台/日で、12/18(日)は約5万台/日であった。時間別の総交通量については、午前中の7:00~9:00頃にかけて(平日(土曜日を含む):約4000台/時、休日:約2500台/時)と午後の16:00~18:00にかけて(平日:約4000台/時、休日:約3300台/時)が最も多い時間帯であった。大型車混入率については、各日とも深夜3:00に高くなっており、平日が57~73%、休日が約41%だった。また、平日においては、9:00~11:00にかけても高くなっており、35%~45%であった。トンネル内の風速(走行風)に関しては、図3(b)に示すように概して交通量が多いほど大きくなっていったが、交通量が多いにもかかわらず風速が小さい時間帯もあった(例えば、

12/16 10:00-12:00、15:00-18:00、12/19 8:00、17:00-18:00等)。これは混雑や渋滞によって交通の流れが悪くなったことが原因として考えられる。

(2) 時間変化

ア 入口側と出口側のNO_x濃度の時間変化

トンネルの入口側と出口側で測定されたNO_x濃度の時間変化を図4に示す。NO_xの入口側濃度については、測定期間中の平均値が0.31 ppm、最小値が0.07 ppm、最大値が1.19 ppmであった。2章で述べたように、トンネル入口から200 m程度入った地点で測定していることから、大気中濃度よりも高い状態にある。また、平日(平均値:0.35 ppm)のほうが休日(0.15 ppm)よりも高濃度であった。出口側濃度については、平均値が1.49 ppm、最小値が0.47 ppm、最大値が5.84 ppmであった。平均値で比較すると、入口側濃度の約5倍である。休日においては、一日を通してほぼ一定の濃度であったが、平日では濃度が急上昇する時間が見られた。これらは前節で

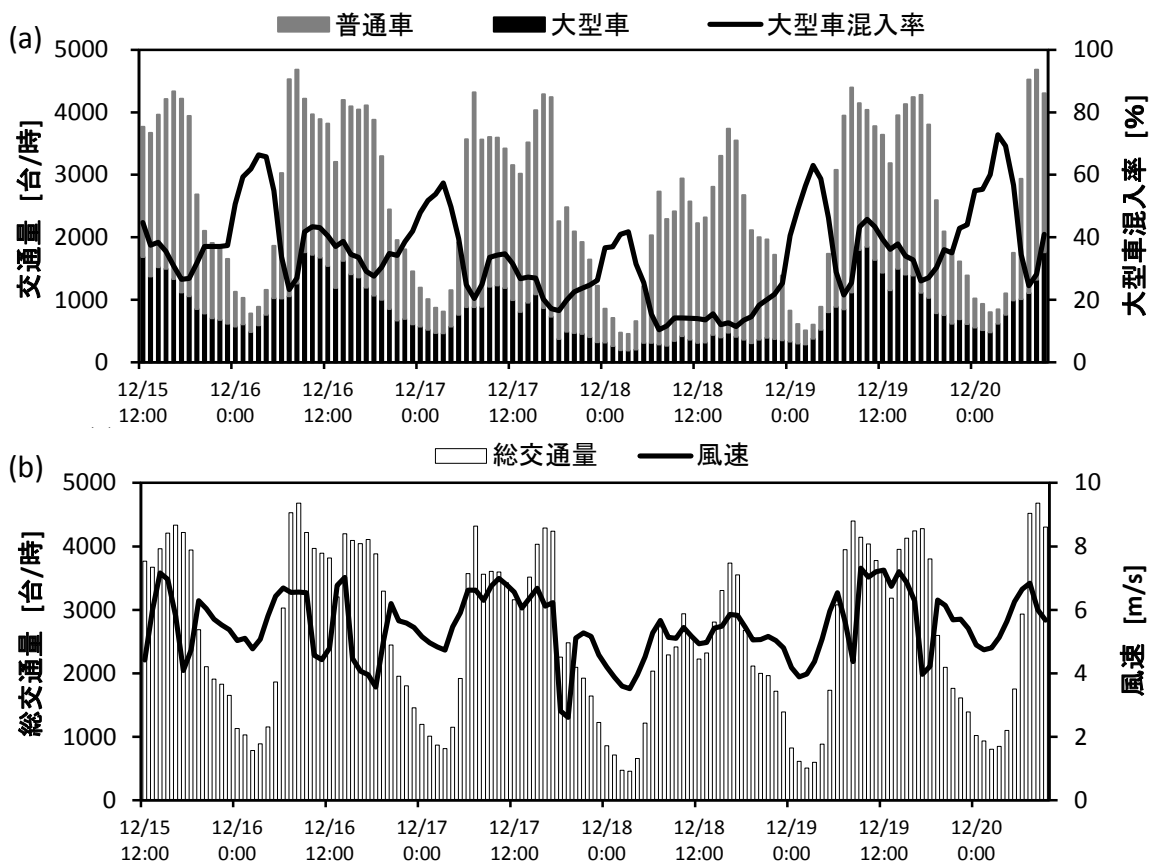


図3 (a) 測定期間中(2011年12月15日(木)~20日(火))における交通量(普通車、大型車)と大型車混入率の時間変化。
 (b) 総交通量と風速の時間変化。

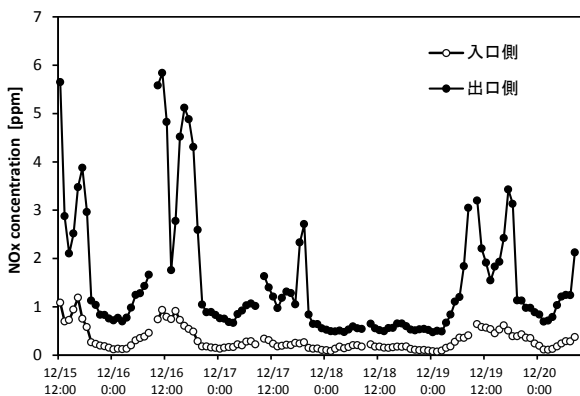


図4 トンネル内の入口側と出口側で測定されたNOx濃度の時間変化

述べた混雑や渋滞が発生したと思われる時間と対応しており、走行条件の違いや車両からの排出ガスの滞留によって生じたものと思われる。

NO、NO₂の濃度に関してもNOxと同様の傾向が見られた。NOについては、入口側の平均濃度が0.25 ppm、出口側の平均濃度が1.30 ppmであり、NO₂については、入口側の平均濃度が0.06 ppm、出口側の平均濃度が0.19 ppmであった。

イ トンネル走行車両由来のNO、NO₂濃度及びNO₂/NOx比の時間変化

トンネル内走行車両に由来する排出ガス中のNOとNO₂の濃度を2測定地点間の濃度差により求めた。

$$C = C_{ex} - C_{in} \quad (1)$$

ここで、 C_{ex} は出口側の濃度(ppm)、 C_{in} は入口側の濃度(ppm)である。式(1)により求めたC(NO)、C(NO₂)とC(NO₂)/C(NOx)比の時間変化を図5に示す。休日(12/18)については濃度変化が小さく、C(NO)の平均値は0.33 ppm(最小値: 0.27 ppm; 最大値: 0.41 ppm)、C(NO₂)の平均値は0.07 ppm(最小値: 0.06 ppm; 最大値: 0.08 ppm)であった。平日についてはC(NO)の平均値が1.23 ppm(最小値 0.32 ppm、最大値 4.49 ppm)、C(NO₂)の平均値が0.15 ppm(最小値 0.07 ppm、最大値 0.41 ppm)であった。C(NO₂)/C(NOx)比については、休日は0.14~0.19の範囲で推移していたのに対し、平日は0.07~0.18で推移しており、平日のほうが休日よりも低い傾向にあった。特に平日の混雑や渋滞が発生したと思われる時間帯には一段と低くなっている。NOとNO₂の排出比率は車速によ

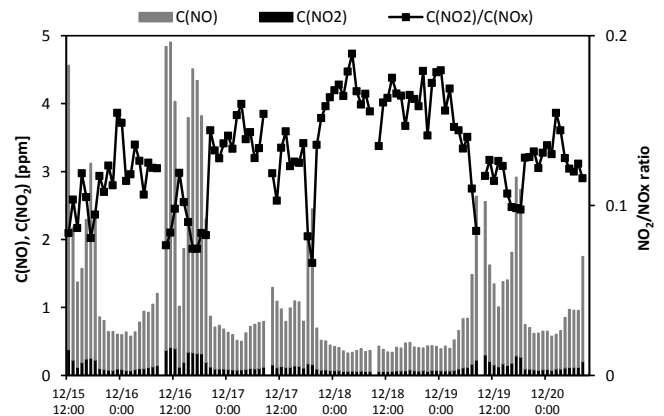


図5 トンネル走行車両由来のNO、NO₂濃度とNO₂/NOx比の時間変化

って異なることが報告されている¹¹⁾。本研究では車速が計測されていないが、走行条件の違いが排出比率に影響を与えたと思われる。

(3) 排出量と排出係数

NOとNO₂の排出量(E)を次式により求めた。

$$E = C \times \bar{w} \times S / L \quad (2)$$

ここで、Cは式(1)より求まる2地点間の濃度差、 \bar{w} は平均風速、Sはトンネル断面積、Lは測定地点間距離(0.93 km)であり、Eは一時間、1 kmあたりの排出量(g/時 km)である。Eと交通量との関係を調べたところ、普通車交通量とは明瞭な関係が見られなかったが、大型車交通量との間には良い相関が見られた(図6)。近似直線の傾きからそれぞれの排出係数(EF)(g/台 km)を求めると、EF(NO)は2.20 g/台 km、EF(NO₂)は0.40 g/台 kmであり、EF(NOx)は2.60 g/台 kmとなった。1998年に同一のトンネルで調査した結果⁹⁾を用いて、大型車交通量とE(NO)、E(NO₂)との関係からEFを求めたところ、EF(NO)は4.49 g/台 km、EF(NO₂)は0.49 g/台 kmであり、EF(NOx)は4.98 g/台 kmとなった(図7)。1998年と比較して、EF(NOx)については48%の減少が見られ、その内EF(NO)は51%の減少であったが、EF(NO₂)は24%の減少とNOよりも小さかった。EF(NOx)に占めるEF(NO₂)の割合は、1998年の調査の結果では0.10であったが、今回の調査では0.15となった。

次に通常時と混雑・渋滞時の2つの交通状況での解析を試みた。今回の調査では車速データが得られていないため、実測された総交通量と風速の関係(図3)、及び、

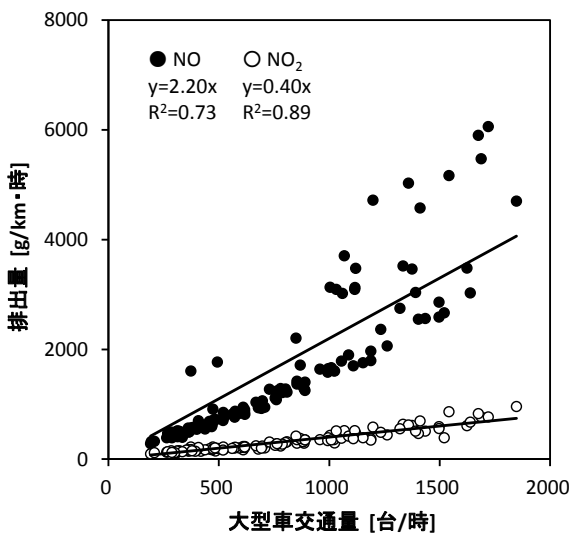


図6 大型車交通量とNO、NO₂の排出量との関係

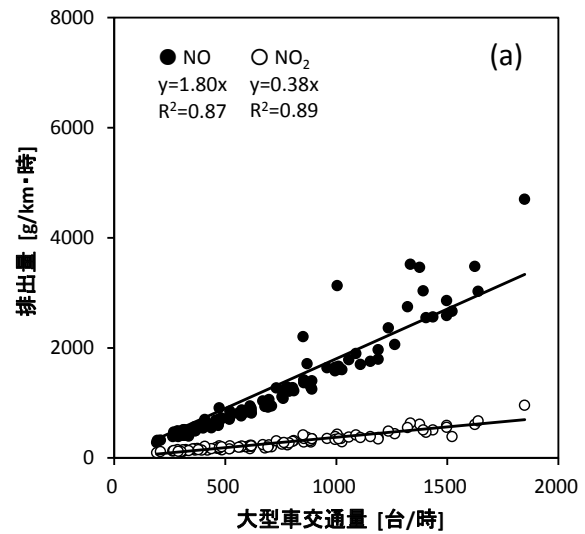


図8 大型車交通量とNO、NO₂排出量との関係
(a) 通常時、(b) 混雑・渋滞時

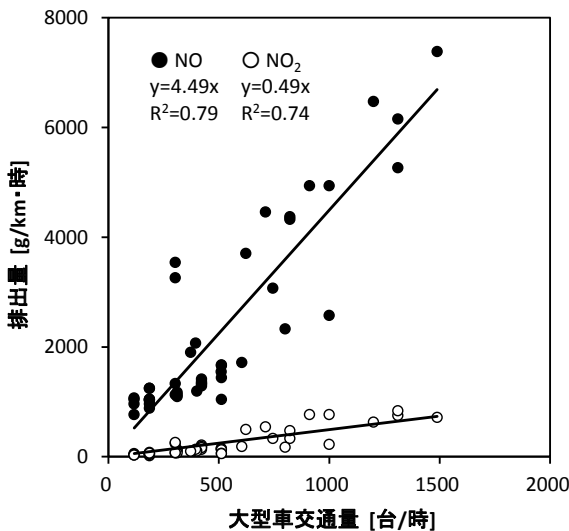
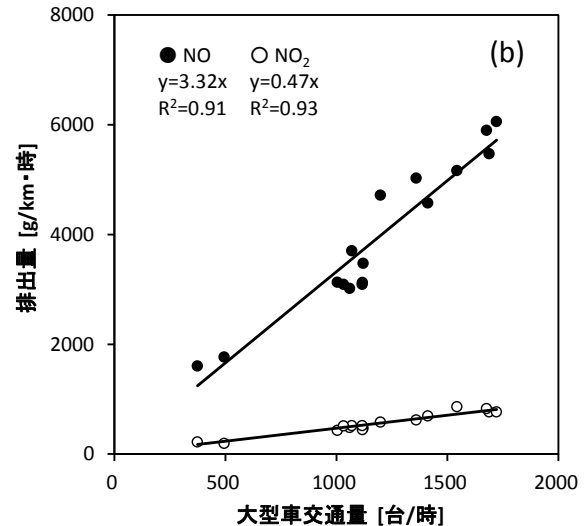


図7 1998年に測定された大型車交通量とNO、NO₂の排出量との関係。石井ら(1999)⁹⁾を元に作成



道路管理会社から提供を受けたトンネル区間を含む路線に関する通行所要時間の過去の統計データに基づき、12/15 12:00、17:00-18:00、12/16 10:00-12:00、15:00-18:00、12/17 18:00-19:00、12/19 8:00、17:00-18:00を混雑・渋滞の発生した時間とした。通常時の $EF(NO)$ は図8(a)に示すように1.80 g/台 km、 $EF(NO_2)$ は0.38 g/台 kmとなり、 $EF(NO_2)/EF(NO_x)$ は0.17であった。一方、混雑・渋滞時の $EF(NO)$ は図8(b)に示すように3.32 g/台 km、 $EF(NO_2)$ は0.47 g/台 kmとなり、 $EF(NO_2)/EF(NO_x)$ は0.12となった。通常時と比べ、混雑・渋滞時には $EF(NO)$ の増加が大きかった。シャシダイナモ試験等から算出される普通貨物車の排出係数(平成22年度、幹線道路)では、

車速60km/時で $EF(NO_x)$ が2.15 g/台 km、車速10 km/時で $EF(NO_x)$ が3.82 g/台 kmと報告されている¹¹⁾。本研究で得られた $EF(NO_x)$ は、通常時に2.10 g/台 km、混雑・渋滞時に3.79 g/台 kmであり、報告値と整合した結果となった。

4 まとめ

2011年12月15日から20日にかけて自動車専用トンネルで窒素酸化物(NO_x)の排出量調査を行った。測定期間中の平日(土曜日を含む)の交通量は6~7万台/日で、休日は約5万台/日程度であった。トンネル内のNO、NO₂濃度は、平日において午前中から正午にかけての時間帯と夕

方に高い傾向にあった。得られたデータから一時間ごとの排出量を算出し、交通量との関係を調べたところ、大型車交通量との間に明瞭な相関が見られた。近似直線の傾きから大型車の排出係数(EF)を推定した結果、EF(NO)は2.20 g/台km、EF(NO₂)は0.40 g/台kmとなり、EF(NO_x)は2.60 g/台kmとなった。1998年に同じトンネルで調査した結果と比較すると、EF(NO_x)は48%の減少が見られたが、EF(NO)の減少が51%であったのに対し、EF(NO₂)の減少は24%程度だった。EF(NO_x)に占めるEF(NO₂)の割合は、1998年の調査では0.10であったが、今回の調査では0.15となった。また、交通状況の違いに基づいてデータを選別し、排出係数(EF)を推定したところ、通常走行時のEF(NO)は1.80 g/台km、EF(NO₂)は0.38 g/台kmとなったのに対し、混雑・渋滞時のEF(NO)は3.32 g/台km、EF(NO₂)は0.47 g/台kmとなり、走行条件の違いを反映した排出係数が得られた。

参考文献

- 1) 中央環境審議会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第十次答申)(2010)
- 2) 東京都環境局：大気汚染常時測定局測定結果報告，平成22年度年報 (2011)
- 3) 日本熱エネルギー技術協会編：熱管理技術講義，丸善，pp.111-113(1975)
- 4) 木下輝昭ら：大型ディーゼル車への酸化触媒装着によるNO₂排出量比率の変化について，東京都環境科学研究所年報，pp.29-33 (2007)
- 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，pp. 47-74 (2002)
- 6) 石井康一郎ら：自動車用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)
- 7) 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) - 粒子状物質中の金属および炭素成分を中心として -，東京都環境科学研究所年報，pp.15-23 (2001)
- 8) 星純也ら：自動車トンネルを利用した排出ガス調査(III) - 一般道トンネルを利用した調査結果 -，東京都環境科学研究所年報，pp.12-19 (2002)
- 9) 上野広行ら：自動車用トンネル調査による排出ガス規制の評価，東京都環境科学研究所年報，pp.24-32 (2004)
- 10) 石井康一郎ら：発生源におけるNO₂/NO_x比率調査(その1)，東京都環境科学研究所年報，pp.162-165 (2011)
- 11) 東京都環境局：平成17年度及び平成22年度における都内自動車排出ガス量算出調査委託報告書 (2007)