

沿道周辺における自動車排ガスの挙動に関する調査研究（第3報）

— トンネル内及び周辺における窒素酸化物の挙動について —

佐々木 誠 江川 善則*¹

山田 雅春*²

1 はじめに

近年の自動車交通量の増加に伴い、自動車から排出される窒素酸化物等による道路周辺での汚染が問題となっている。その中でもトンネル内では排ガスが蓄積されやすく、高濃度となり、坑口付近における汚染が問題となる。

このため、今年度はトンネル内外の窒素酸化物量の実態や、拡散及び拡散過程で生ずる化学反応について検討した。

2 調査期間等

2. 1 調査期間

昭和63年9月～11月

2. 2 調査地点及び概要

(1) 調査地点

千秋トンネル（秋田市）

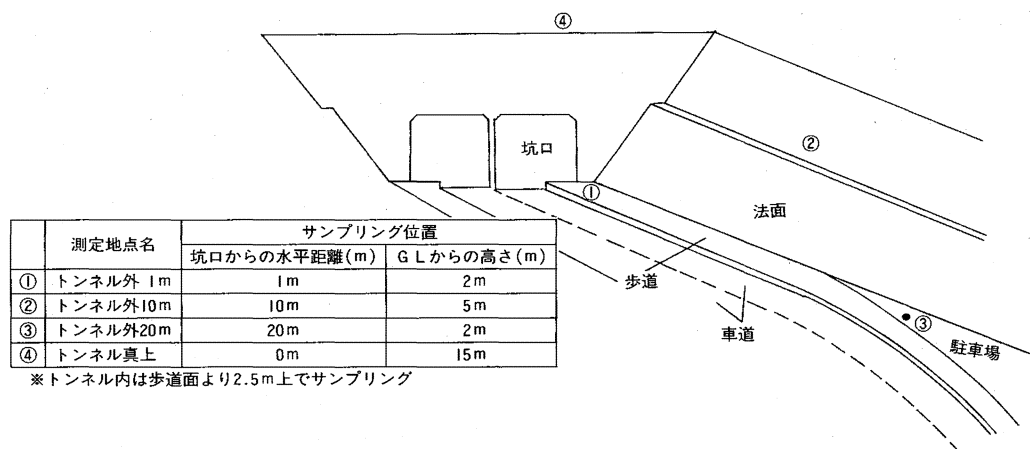
(2) トンネルの概要

- ・トンネル長189.23m、トンネル高7.3m、片側1車線で幅2.8mの歩道付
- ・トンネル内の換気のため、上下線とも平均風速30m/sジェットファン2基を設置している

なお、ジェットファンの作動条件は、CO濃度で80ppmに設定されている。

2. 3 調査方法

窒素酸化物及びオゾンの自動測定機により、トンネル内4地点（坑口からそれぞれ5m、15m、30m、50m地点）とトンネル外4地点（図1に示すように坑口から1m、10m、20m地点とトンネル真上）について7～10日間連続測定を行った。



図—1 トンネル外の測定位置

※1現在 本荘保健所

※2現在 環境技術センター水質担当

なお、使用機種等は次のとおりである。

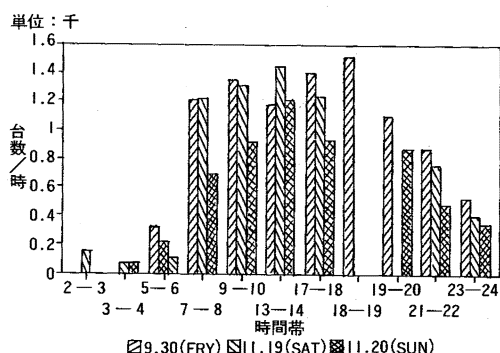
調査項目	使用機種	方法
窒素酸化物	紀本電子工業㈱ MODEL-214	吸光光度法
オゾン	ダイレック㈱ MODEL 1006-AHJ	紫外線吸収法

3 調査結果と考察

3.1 交通量調査結果

平日、土曜日及び日曜日における自動車及び人の交通量の時間変化は図2及び図3のとおりである。

自動車については、図に示すとおり、7時から20時までは時間当たり1,000台以上トンネルを通過しており、最大では時間当たり1,500台程である。



図一2 交通量調査 (自動車) (図中で交通量のないものは未調査時間帯である)

3.2 窒素酸化物の挙動について

(1) 窒素酸化物の日平均濃度

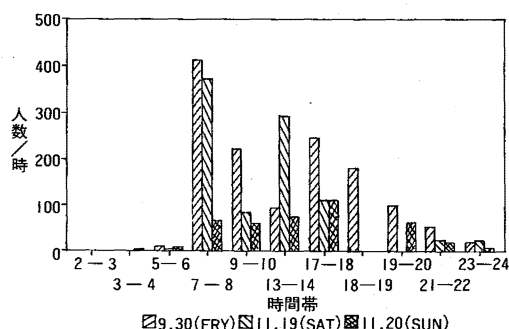
トンネル内外の各調査地点におけるNO及びNO₂の日平均濃度は表1及び表2のとおりである。

表から明らかなようにNOはトンネル内の

交通量の時間変動の様子は、各曜日ともほぼ一定であるが、日曜日は他の曜日に比べて交通量は少なくなっている。

なお、通過車輦は99%が普通車であった。

また、歩行者については、7時台にピークがみられるが、これは通勤、通学者によるものである。



図一3 交通量調査 (人) (図中で交通量のないものは未調査時間帯である)

方が明らかに高く、内部に蓄積されていることがわかる。自動車から排出される窒素酸化物は大部分がNOとして排出されるため、顕著な違いがでたものである。

参考として、自動車排ガス測定局である茨島局 (秋田市) のデータを載せているが、トンネル内及び坑口近傍では自排局より高い濃度となっている。

表一1 トンネル内各測定地点におけるNO、NO₂日平均濃度

地 点 名	50m地点	30m地点	15m地点	5 m地点
NO (ppb)	296	275	298	225
NO ₂ (ppb)	39	39	53	50

表一 2 トンネル外各測定地点におけるNO、NO₂日平均濃度

地 点 名	坑口から 10 m	坑口から 20 m	真 上	※ 茨 島
NO (ppb)	106	55	20	36
NO ₂ (ppb)	40	23	20	25

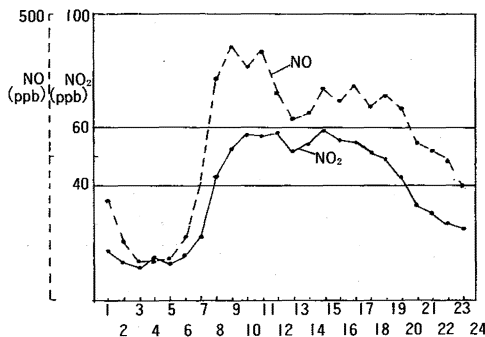
※自動車排出ガス測定局である茨島局のデータは9月から11月の月平均値である。

(2) 窒素酸化物の経時変化

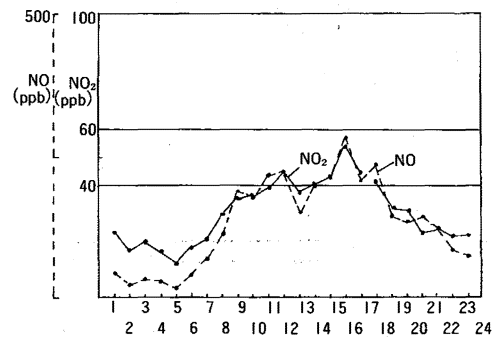
トンネル内外の窒素酸化物の経時変化のパターンは、交通量の変動パターンと一致し、交通量の多い7時頃から19時頃まで高い濃度となる。

図4から図7は、それぞれトンネル内30m、

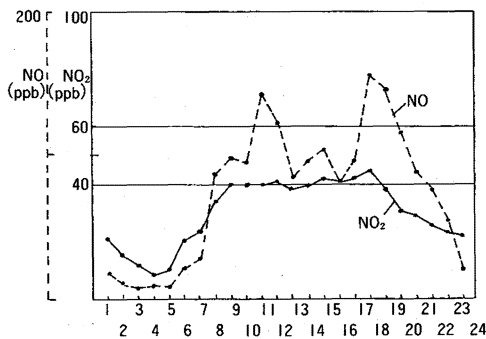
5m地点、坑口から外1m地点及びトンネル真上の測定地点における経時変化の測定期間平均を示している。トンネル内及びその近傍では、環境基準は適用されないが、参考としてNO₂の環境基準のゾーン値(40~60ppb)を図中に掲げてある。



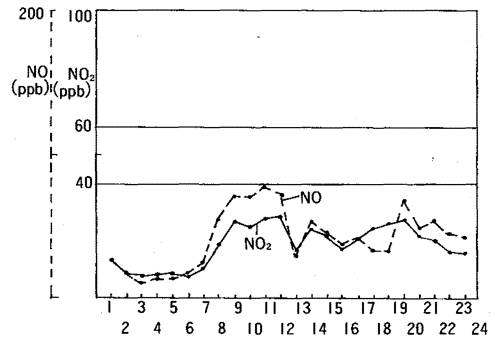
図一 4 トンネル内30m地点におけるNO₂とNOの経時変化図(測定期間平均)



図一 5 トンネル内5m地点におけるNO₂とNOの経時変化図(測定期間平均)



図一 6 トンネル外1m地点におけるNO₂とNOの経時変化図(測定期間平均)

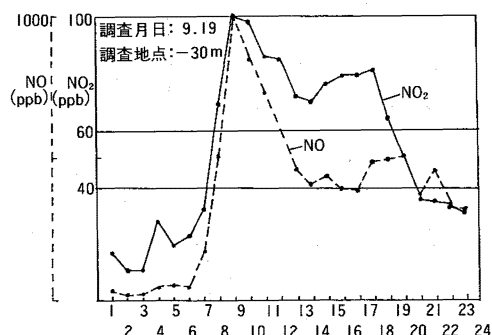


図一 7 トンネル真上におけるNO₂とNOの経時変化図(測定期間平均)

これらの図から、坑口に近づくにつれ濃度が減少し、トンネル真上では、極端に濃度が低くなっている。この傾向はNO₂に比べNOが特に大きい。

また、トンネル内では図4に示すとおり、NO₂は測定期間平均で7時から19時まで40~60ppbの濃度となっているが、測定期間内では図8に示すように相当高い濃度になる

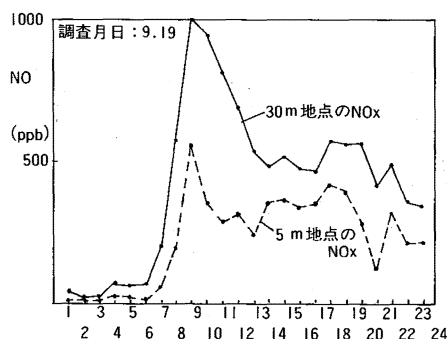
こともあり、主たる原因は、交通量の増大と考えられる。



図一八 トンネル内30m地点におけるNO₂とNOの経時変化

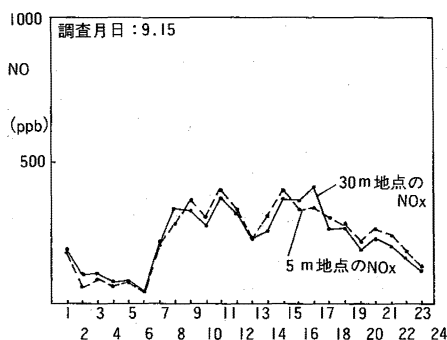
3. 4 トンネル内の拡散状況

図9及び図10は、トンネル内30m地点と5m地点の同時測定結果の経時変化であるが、図9に示すとおり、坑口付近で50%程窒素酸化物の濃度が減少することあれば、図10のようにほとんど変化のない場合もある。7日間にわたる測定期間の平均では29%程坑口付近の濃度が減少した。



図一九 トンネル内30m地点と5m地点におけるNO_xの同時測定結果（9月19日調査）

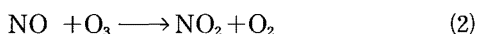
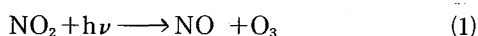
これは、自動車の走行¹⁾や換気装置による内部的な気流と坑口付近における外気の流れ^{2,3)}（坑口風）による影響と考えられるが、換気装置の稼動状況など今後とも調査が必要である。



図一〇 トンネル内30m地点と5m地点におけるNO_xの同時測定結果（9月15日調査）

3. 5 窒素酸化物の化学反応について

自動車排ガス中の窒素酸化物は、炭化水素、オゾンなどと複雑な反応を呈すると言われているが、反応速度係数の大きさから考えて、発生源の近傍では、次の2反応が卓越している⁴⁾。



(1) トンネル深部での窒素酸化物の形態について

トンネル内におけるオゾン濃度の調査により、5m及び15m地点で若干のオゾンは存在したが、30mや50m地点といったトンネル深部ではオゾンは存在しなかった。これは、トンネル外から供給されるオゾンが、トンネル内の多量のNOと(2)の反応により、坑口付近の5～15m地点でほとんど消費され、トンネル深部の30～50m地点まで供給されていないことを示す。すなわちトンネル深部では(2)の反応は起きていないことになる。

また、トンネル内には紫外線は存在せず(1)の反応も起きていない。

以上のことから、トンネル深部におけるNO及びNO₂は発生源（自動車）にのみ起因すると考えてよい。

図11は、トンネル深部の30m及び50m両地点における NO_x と NO の相関をとったものであり、

$$\text{NO} = 0.887\text{NO}_x \quad (r = 0.996) \quad (3)$$

となった。これは、自動車から排出される窒素酸化物の88.7%が NO 、11.3%が NO_2 であることを示している。

発生源の NO_2 の割合については、木村ら⁵⁾は10~20%、福岡ら⁶⁾は10~16%、鶴野ら⁷⁾は8.7%となっており、本調査の結果もこれらと良く一致している。

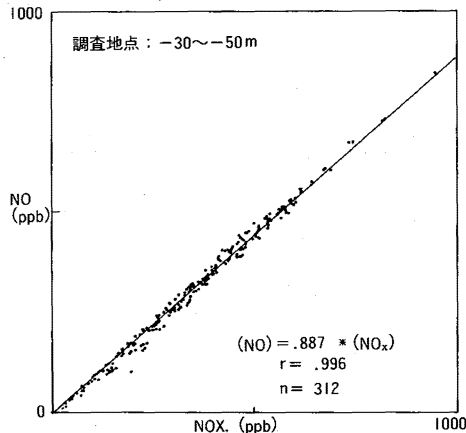


図-11 トンネル深部における NO_x と NO の相関図

(2) NO と O_3 との化学反応について

自動車から排出される NO は、大気中のオゾンとの反応により NO_2 として一般環境大気へ拡散していく。

ここでは、この NO の酸化過程について考えてみる。

① オゾンの経時変化

トンネル外1m地点、10m地点及びトンネル真上における O_3 の経時変化は図12から図14に示すとおりである。

これらの図には、トンネルから5km程離れた一般環境測定局である将軍野局のオゾンを

バックグラウンド濃度として併記してある。

将軍野局では、オキシダントを測定しているが O_x 、 O_3 、 NO_x には次式が成り立ち⁸⁾、

$$[\text{O}_3] = [\text{O}_x] - 0.06[\text{NO}_x] \quad (4)$$

将軍野局の NO_x 濃度は10~20ppbと低いので、 $[\text{O}_3] \approx [\text{O}_x]$ と考える。

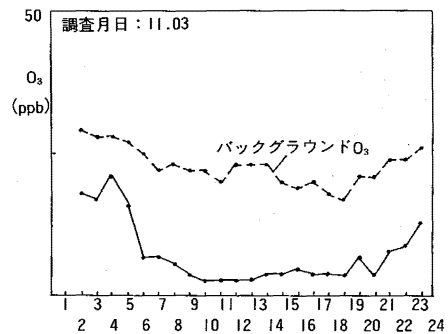


図-12 トンネル外1m地点における O_3 の経時変化

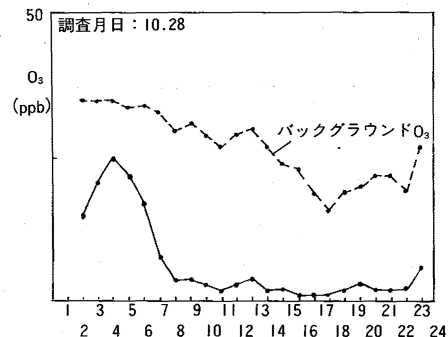


図-13 トンネル外10m地点における O_3 の経時変化

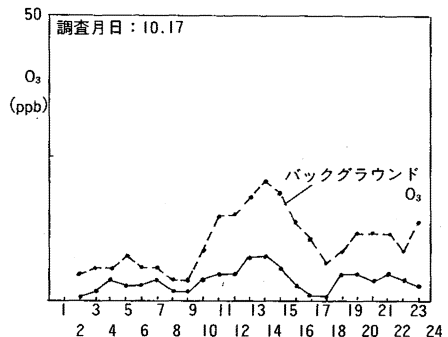


図-14 トンネル真上における O_3 の経時変化

図12及び図13に示すように、トンネル外1m地点や10m地点では、6時頃から22時頃にかけて、 O_3 が極端に少なくなっている。これは、3.2(2)で示したNOの経時変化の図から明らかなように、この時間帯は多量のNOが発生し、(2)の反応により O_3 が消費されたためである。

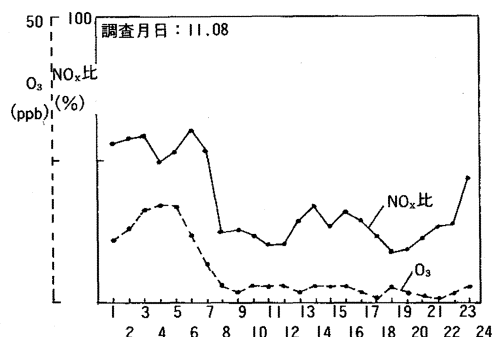
一方、トンネル真上では、拡散によりNO濃度も小さくなっているため、トンネル近傍ほど極端な O_3 の減少とはなっていない。

② NO_x 比とオゾンの経時変化について

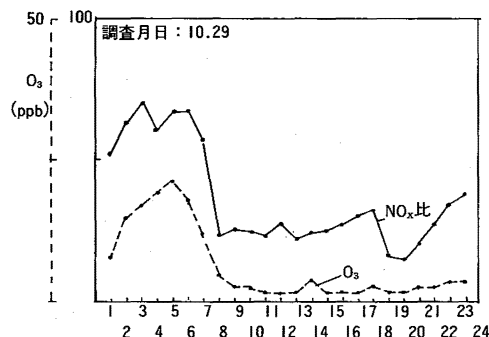
トンネル外1m地点、10m地点及びトンネル真上における NO_x 比(NO_2/NO_x)と O_3 の経時変化は図15から図17のとおりである。

トンネル外1m地点や10m地点についてみると、自動車交通量の少ない深夜から早朝にかけては、NOの量も日中に比べて極端に少なくなり、 O_3 と十分に反応するため、 NO_x 比が大きくなり、一方、日中はNOの量が多く、酸化しきれないため NO_x 比は夜間より低くなっている。

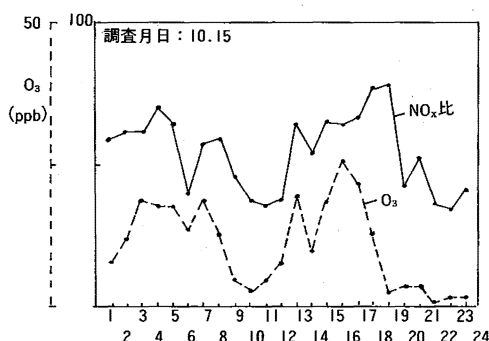
また、トンネル真上では、トンネル坑口近傍ほど昼夜の違いは見られないが、 O_3 の量が NO_x 比に大きく影響を与えている様子が見られる。



図一15 トンネル外1m地点における NO_x 比と O_3 の経時変化



図一16 トンネル外10m地点における NO_x 比と O_3 の経時変化



図一17 トンネル真上における NO_x 比と O_3 の経時変化

(3) 夜間におけるNOと O_3 の化学反応について

(2)①及び②に述べたとおり、夜間はNOと O_3 の反応が十分起きている。

今、トンネルからの窒素酸化物が拡散混合する過程において、NOと NO_x の比率の変化は(2)の反応にのみ起因すると仮定すれば、バックグラウンドからの O_3 の供給が比率の変化をもたらす。

トンネル周辺において、 NO_2 のバックグラウンド濃度が無視できる程小さいと仮定すれば、(2)の反応から化学量論的に(5)式が成り立つ。

$$[NO_{2(OBS)}] = [NO_{2(S)}] + \{[O_{3(B)}] - [O_{3(OBS)}]\} \quad (5)$$

3. 5(1)により、発生源由来の NO_2 は

$$[\text{NO}_{2(\text{S})}] = 0.113 [\text{NO}_x] \quad (6)$$

である。

よって、

$$[\text{NO}_{2(\text{CALC})}] = 0.113 [\text{NO}_x] + \{[\text{O}_{3(\text{B})}] - [\text{O}_{3(\text{OBS})}]\} \quad (7)$$

となる。

ここに、[] : 各物質の濃度 (ppb)

CALC : 計算値

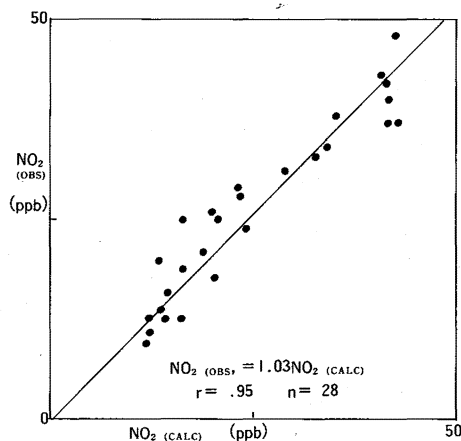
OBS : 実測値

S : 発生源由来

B : バックグラウンド

19時から6時までの夜間のデータのうち、 $\text{O}_{3(\text{B})}$ と $\text{O}_{3(\text{OBS})}$ の差が10ppb以上のものについて、 $\text{NO}_{2(\text{OBS})}$ と $\text{NO}_{2(\text{CALC})}$ の相関をとったものが図18から図20である。

図18は、トンネル外10m地点、図19はトンネル外1m地点、図20はトンネル真上の結果であるが各地点とも実測値と計算値は良い一致をみている。



図一18 トンネル外10m地点における
 $\text{NO}_{2(\text{CALC})}$ と $\text{NO}_{2(\text{OBS})}$

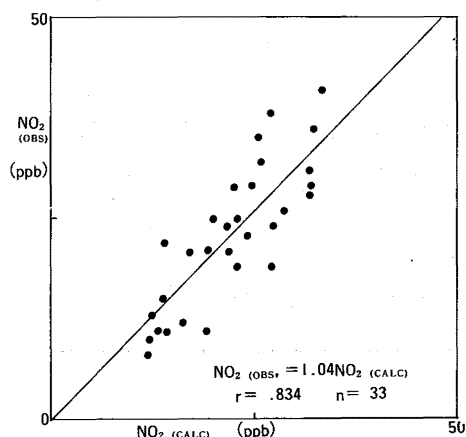
(4) 昼間における窒素酸化物の化学反応について

昼間は、(1)の反応も併発しており、(2)の反

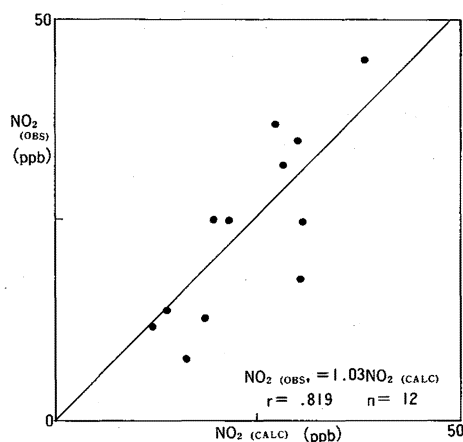
応により生成した NO_2 を NO にもどすことになり、 NO_2 濃度は多少減少することとなる。

(1)の反応速度定数は紫外線強度に依存するが、小玉ら⁹⁾が調査した秋田市内の紫外線強度の結果によれば、紫外線強度は11時から13時にかけピークをもつ経時変化となり、反応速度定数の評価が難しい。

また、昼間は排出される窒素酸化物量も夜間に比べて極端に多いことから、 NO_2 のバックグラウンド濃度も大きくなる。



図一19 トンネル外1m地点における
 $\text{NO}_{2(\text{CALC})}$ と $\text{NO}_{2(\text{OBS})}$



図一20 トンネル真上における $\text{NO}_{2(\text{CALC})}$ と
 $\text{NO}_{2(\text{OBS})}$

このように、昼間のデータについては、(1)の反応速度定数や NO_2 バックグラウンド濃度が時間により変化するため、(3)で述べたような画一的な取り扱いよりは、1時間もしくはそれ以下のタイムスケールでの取り扱いが必要となり、今後とも検討が必要である。

4 ま と め

トンネル内外の窒素酸化物及びオゾンの挙動調査を検討し、以下の結論を得た。

(1) トンネル内では自動車排ガスが滞留しやすく、NOは特に高濃度となりやすい。また、トンネル外については、坑口から遠ざかるにつれ拡散により濃度が小さくなり、法面等の構造物のないトンネル真上では極端に濃度が小さくなる。この傾向はNOが著しい。

(2) トンネル内の調査結果から、自動車排ガス中の窒素酸化物のうち、11.3%を NO_2 が、88.7%をNOが占めていることがわかった。

(3) オゾンの調査結果から、周囲からの O_3 の供給量よりもNOが多量に排出される昼間は、夜間に比べて NO_2 への転換率が低くなる。

(4) 夜間における化学反応として、 $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ のみを考慮した場合、 NO_2 実測濃度はバックグラウンドオゾン濃度と発生源に占める NO_2 の比率(11.3%)によって予測しうる。

(5) 昼間における窒素酸化物の挙動については、今回行った調査に加え、より短時間なスケールでの空間分布の調査等を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 伊瀬 洋昭ほか：自動車排出汚染物質の排出実態に関するトンネル調査、東京都公害研究所年報，3～10 (1983)
- 2) 真下 英人ほか：トンネル坑口付近における拡散の有限要素法による数値解析、第25回大気汚染学会講演要旨集，P 660 (1984)
- 3) 田中 秀穂ほか：坑口周辺における自動車排出ガスの拡散、第20回大気汚染学会講演要旨集，P 302 (1979)
- 4) 横山 長之ほか：道路近傍におけるNOの酸化反応モデル、公害，21，(2)，65～70 (1986)
- 5) 木村富士男ほか：定常近似法によるNO、 NO_2 の反応拡散モデル、大気汚染学会誌，23(1)，41～51 (1988)
- 6) 福岡 三郎ほか：自動車トンネルにおける NO_x 連続測定結果について、東京都環境科学研究所年報，59～62 (1989)
- 7) 鶴野伊津志ほか：夜間の都市域における NO_2 高濃度発現メカニズム、大気汚染学会誌，24(2)，130～143 (1989)
- 8) 全国都市清掃会議：ごみ焼却施設環境アセスメントマニュアル、厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課監修，P 95 (1986)
- 9) 小玉 幹生ほか：沿道周辺における自動車排ガスの挙動に関する調査研究、秋田県環境技術センター年報，15，72～78 (1987)