

道路沿道における窒素酸化物の濃度分布

小栗 彰*

Distribution of NO_x concentration along roadway

Akira OGURI

Mean values measured by the roadside monitoring station are generally used to judge status of air pollution. However, concentration of polluted air elements is changing every moment due to various factors such as aerial flow and vehicle traffic flow. Variation data of NO_x concentration are necessary to grasp actual status. In our research activities, measurement has been carried out at various points along roadway where traffic volume is high. Distribution of NO_x concentration along roadway is important for residents' health but cannot be obtained using measured data from one fixed monitoring station. In this report, measurement results of 3-dimensional NO_x distribution surrounding the Route 23 in Nagoya-City and area to satisfy the environmental standards are going to be presented.

Key Words: emission, NO_x concentration, polluted air elements, aerial flow, vehicle traffic flow

1. 緒言

沿道大気の全般的な汚染状態は、沿道に配置された単独の測定局における常時監視結果（1時間値の1日平均値）から判断することは可能である。しかしながら、この1時間内に汚染物質の濃度が様々な要因により変動するため、沿道大気の非定常な状態を明確にすることを目的に、我々は交通量が非常に多い名古屋市の国道23号線沿道においてNO_x濃度・O₃濃度・風向・風速瞬時値の時間変化を複数地点で同時計測し、同時に交通量・交通状況も観測することにより気流・交通流が及ぼす影響を調査してきた。「沿道の大気汚染状況に関する計測」⁽¹⁾において、沿道NO_x濃度は信号の切替りに同期して周期的な変動を繰り返し、国道からの距離増加に伴い濃度が減衰する傾向を示した。また第2報⁽²⁾では、NO_x濃度の距離減衰をさらに詳細に測定することにより定量的に把握し、排気ガス塊が車両間に挟まれた状態で移動する可能性にも言及した。「自動車の通行に伴う沿道の大気汚染の計測」⁽³⁾においては測定地を名古屋から福井に移し、上述の「沿道の大気汚染状況に関する計測」⁽¹⁾での傾向と同様な結果が得られることと排気ガス中のNO₂/NO_x比率が交通の流れにある程度対応することを示した。また「沿道大気汚染に及ぼす気

* 機械工学科

流・交通流の影響調査」⁽⁴⁾では気流に関するシミュレーション結果と対比させながら濃度レベルの変化に考察を加え、交通流が NO_x 濃度に及ぼす影響は渋滞の有無により変動状態が大きく異なることなどを報告した。

本研究では、これまでに蓄積した計測結果をもとに、車道から住宅地へ向かう水平方向の NO_x 濃度の分布と上空に向かう鉛直方向の分布を整理し、車道を中心とする 3 次元空間における汚染大気の拡散状態を把握することを目的とした。感覚的には道路からの距離が増大するのに伴い拡散が進むことは想像がつくのであるが、実測により得られる結果から、具体的に車道に対してどの範囲までが汚染物質濃度が大気環境基準を満足し、居住に適しているかを判断する材料になり得ると思われる。これは、車道沿いの一地点のみに配置されている単独の測定局で得られる結果では推し測ることができず、本測定手法を用いることにより初めて可能となる独自性を有していると考えられる。過去に豊田中研が実施した測定結果⁽⁵⁾が報告されているが、「ザルツマン」法を用いた平均濃度値による議論であり、常に変動する沿道の気象状態を捉えてはおらず、3 次元的な濃度分布を示していない。

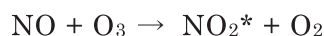
環境大気中の窒素酸化物を自動的に連続測定する方法として、「二酸化窒素に係る環境基準について」(昭和 53 年環境庁告示第 38 号)および大気汚染防止法施行規則第 18 条において、ザルツマン試薬を用いる吸光光度法またはオゾンを用いる化学発光法を用いることとされている。

なお、福井県においては、ザルツマン試薬を用いる吸光光度法およびオゾンを用いる化学発光法により大気汚染の常時監視を実施している⁽⁶⁾。

「ザルツマン」法は、N-1 ナフチルエチレンジアミン二塩酸塩、スルファニル酸および酢酸の水溶液を吸収液として、二酸化窒素が吸収され、反応して生成する亜硝酸イオンが発色する時の 545nm における吸光度を測定し、二酸化窒素濃度を求める方法である。一酸化窒素は、ザルツマン試薬とは反応しないため、硫酸酸性過マンガン酸カリウム液を満たした酸化器に通して二酸化窒素に酸化した後と同様に測定する。

本研究では化学発光(Chemiluminescence)の反応を利用する化学発光法(CLD 法)を用いた瞬時値を用いることにする。

「CLD」法⁽⁷⁾とは、サンプルガス中の窒素酸化物(NO)にオゾン(O₃)を反応させると、NO の一部が酸化されて二酸化窒素(NO₂)となる。生成した NO₂ の一部は励起状態(NO₂^{*})になっており、基底状態に移るときに光を放射する。この現象を化学発光(Chemiluminescence)という。



この反応は極めて速く、かつ、NO のみが関与し、他の共存ガスの影響もほとんど受けない。また NO が低濃度であれば、発光光量はその濃度に比例する。このようにして試料大気中の窒素酸化物(一酸化窒素+二酸化窒素)の濃度が測定できる。またこれらの測定値の差を求めることによって試料大気中の二酸化窒素濃度を測定することができる。

時間経過に対する濃度瞬時値のばらつきの程度を示すことにより測定点(たとえば高さ)にお

ける変動状態が把握できる。即ち、例えば1秒毎に検出する濃度瞬時値が狭い範囲内に集中しておれば十分拡散して一定濃度に収まっており、広い範囲に広がっている場合には不安定な濃度状態が続いているといえる。1ヶ所に固定した測定局の1時間値では、その値が定常状態であるのか変動中の1点であるのか判別できず、また当然ながら濃度分布も推し測ることができない。拡散状態、濃度分布を求めるためには、本研究で採用した複数地点での瞬時値同時計測手法が必須である。移動可能な計器台車を活用した広範囲な計測を実施した理由がここにある。

2. 測定装置および方法

測定に用いた NO_x 濃度測定装置を図1に示す。装置の測定原理は前項で示した化学発光法によるもので、 NO にオゾンを反応させると NO の一部が酸化されて NO_2 になる。生成した NO_2 の一部が励起状態になっており、基底状態に移る時に発光する。その光量が濃度に比例することを利用して測定する。

図に示すように、計器台車上に濃度測定装置、データロガー、パソコンおよびこれらに電源を供給するためのバッテリー、インバータを搭載し、近傍に100V電源を確保できない地点での測定も可能にしている。

図2には、上述の NO_x 濃度測定装置を中核とするデータ処理システムを示してある。計測器からのアナログデータをデータロガーにより一定の時間間隔でサンプリングした後A/D変換してオンラインでパソコンに取り込んでて処理する。また、 NO_x 濃度の測定と並行してビデオカメラで撮影した交通流の状況から、車種ごとの通過台数を人間の目によりカウントしパソコンに入力したうえでプログラムを用いて通過台数を集計することが可能になっている。風向風速は超音波式風速計により測定した。

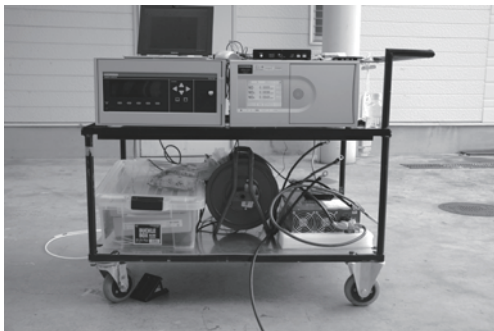


図1 測定装置(台車搭載)

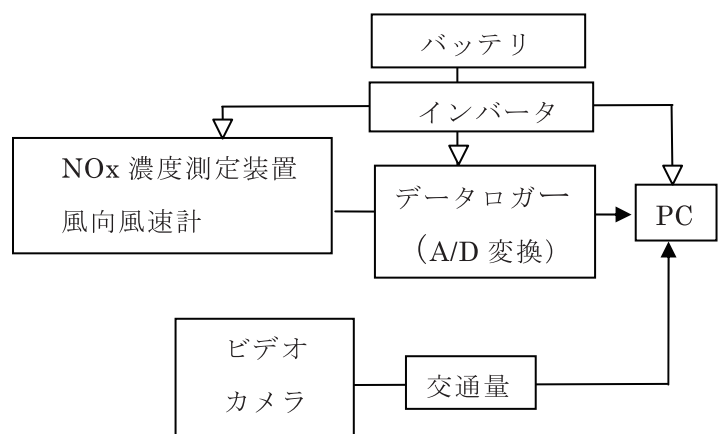


図2. データ処理の流れ

3. 測定結果

観測は、名古屋市南区元塩町を縦断する国道23号線沿道で実施した。

図3に観測地点近傍の地図を示す。

図中、各観測地点を①～⑦で示してある。

交通量は浜田交差点南側に位置する横断歩道橋上から測定した。23号線南北方向走行車両および交差する側道から流入する車両を観測、ビデオカメラに収録した。

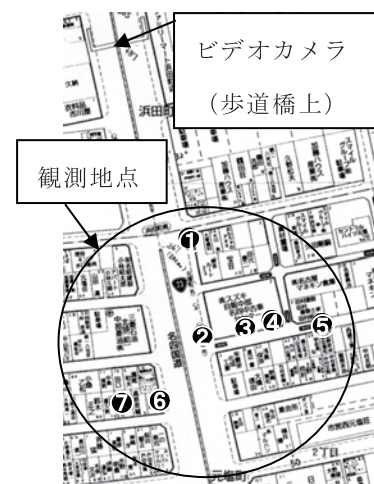


図3. 23号線沿道の観測地点
(①～⑦で表示)

3.1. NO_x 濃度の距離減衰（水平方向の濃度分布）

NO_x の水平方向の拡散状態を調査するため、地点②～⑤及び地点⑥・⑦において同時測定を行った。2008年に報告した研究紀要「沿道の大気汚染状況に関する計測（第2報）」⁽²⁾から結果の一部を引用する。観測地点の配置を図4に示す。

図5はNO_x濃度の時間経過を示す。歩道端（図4の地点②）及び地点③までは国道の影響を強く受けるのに対し、70m程度離れば排気ガスの拡散が進むことによりバックグラウンド濃度に近い状態に落ち着いている。また各々の地点におけるピーク値発生時期に注目すると、ある時間遅れを伴っており国道で整流された風の一部が側道に流れ込みながら汚染物質を移送するという計算結果⁽³⁾により説明できる。図6に各地点におけるNO_x濃度の頻度分布を示す。また、各地点における濃度減少率を平均値について表1にまとめた。ここで「減少率」は地点②での濃度に対する各地点での濃度の低下量の比で表している。70mで76%減と、国道からの間で大きな距離減衰が見られる。また、歩道幅2mで13%減衰している。国道からの距離が増大するのに伴い、濃度が減衰するとともに濃度の変動幅が減少し拡散の進んでいることがわかる。

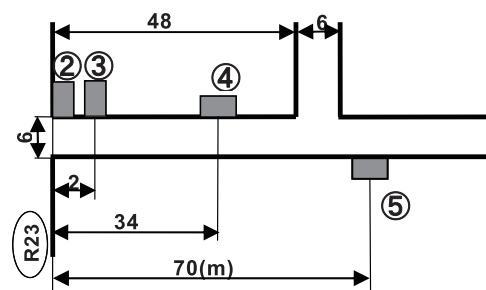


図4. 図3で示す観測地点②～⑤の配置

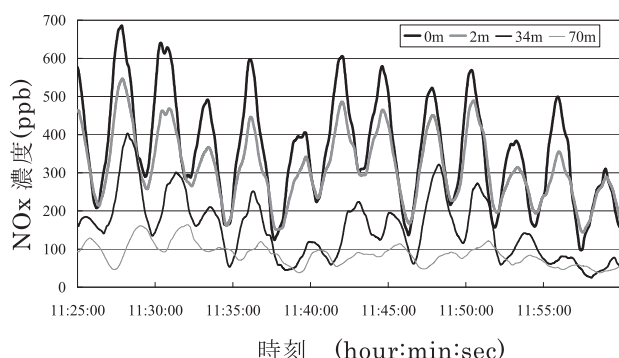


図5. 国道からの距離が0m,2m,34m,70mの地点
(地点②, ③, ④, ⑤)におけるNO_x濃度
の時間経過

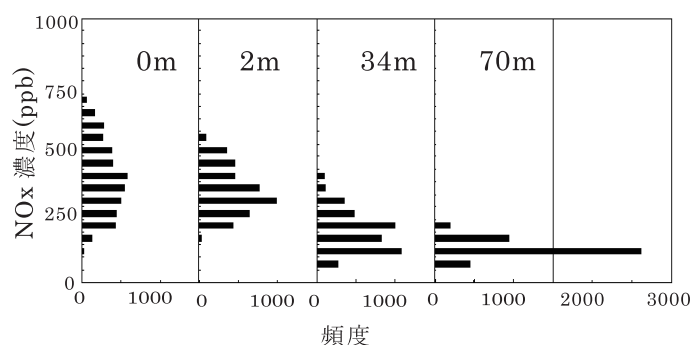
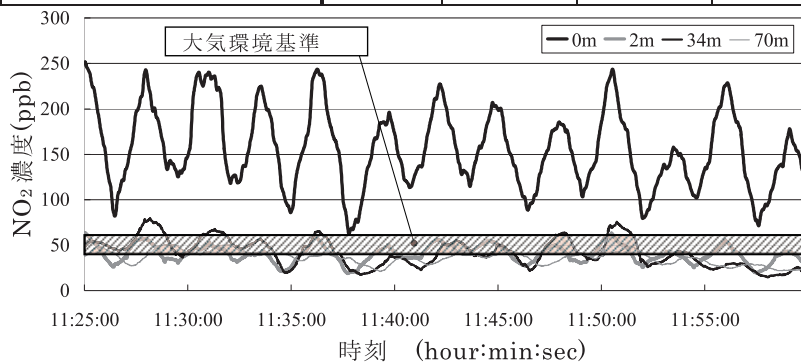


図6. 国道からの距離が0m,2m,34m,70mの地点
(地点②, ③, ④, ⑤)におけるNO_x濃度
の頻度分布

表 1. 国道からの距離が 0m,2m,34m,70m の地点における
NO_x 濃度減少率

国道からの距離(m)	0	2	34	70
平均値 (ppb)	361	314	154	86
減少率 (%) (0m 比)	0	13	57	76

また図 7 には NO₂ 濃度(=NO_x - NO)の時間経過を示した。NO₂ 濃度には大気環境基準が設けられており、図中に網掛けの領域で表わすように 40～60ppb の範囲である。この結果から沿道では基準の上限をはるかに超える濃度レベルが、距離を隔てるに伴い減少を続け、70 m まで奥まれば問題ない濃度におさまっていくことがわかる。

図 7. 国道からの距離が 0m,2m,34m,70m の地点（地点②，
③，④，⑤）における NO₂ 濃度の時間経過

次に国道西側の地点⑥，⑦において同時測定を行った。観測地点の配置を図 8 に示す。

図 9 は地点⑦における風向風速の測定結果であり、風向は矢印を用いて図中の例に沿った示し方をした。この地点周辺では、このように一般風としては西風が主体であり、この風が地点⑥，⑦における大気を国道に移送することにより NO_x 濃度は国道を通過する車両からの排気ガスの影響を受けにくいと考えられる。

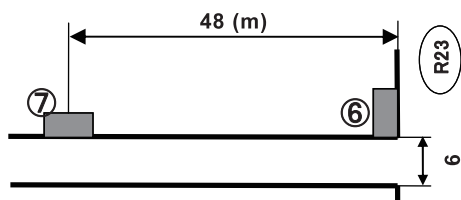


図 8. 観測地点⑥，⑦の配置

図 10 は、地点⑥，⑦における NO_x 濃度の時間経過を示しており、国道から 48m 離れた地点⑦でのレベルは平均すれば 3ppb 程度と非常に低く NO₂ 濃度が大気環境基準を満足しているのは

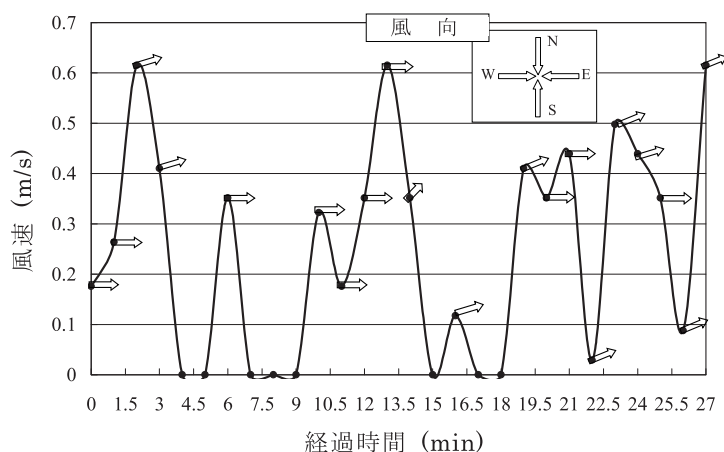
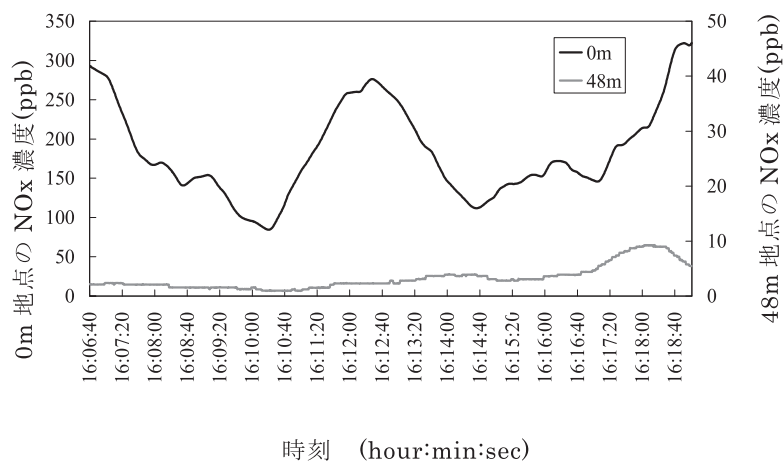


図 9. 国道からの距離 48m の地点における風向風速

図 10. 国道からの距離 0m,48m の地点における
NO_x 濃度の時間経過

明らかで、居住に問題はない。

国道沿い（地点⑥）のレベルも国道の東側（図 5）に比べて低く、西側では上述の一般風の影響により通過車両からの排気ガスが細街路に流れ込みにくくなっていると考えられる。

両地点における減少率を平均濃度について表 2 にまとめた。48m で 98% 減と大きな距離減衰が見られる。頻度分布の結果（図 11）からも NO_x が拡散している状況が明確に受け取れる。

表 2. 国道からの距離 48m 地点での

NO_x 濃度減少率

国道からの距離(m)	0	48
平均値 (ppb)	183	3.3
減少率 (%) (0m 比)	0	98

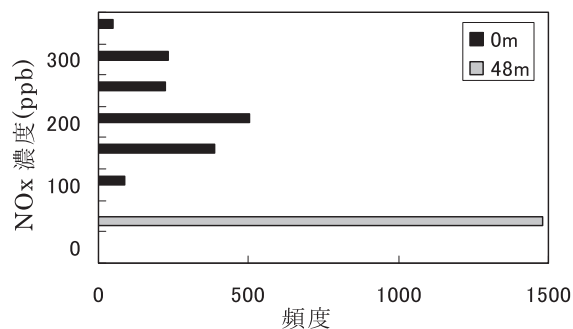


図 11. 国道からの距離 0m, 48m 地点での NO_x 濃度頻度

3.2. NO_x の上空への拡散状態（鉛直方向の濃度分布）

図 3 の地図に示すように観測地点近傍には歩道橋が設置されている。ここでは、沿道および歩道橋上において大気のスAMPLING 高さを数水準変化させて鉛直方向の濃度分布を測定した。

3.2.1 高さ 2m-4.5m

まず沿道の地点①（図 3）において、国道と 2 階建ての店舗に挟まれた歩道上に計測器を配置して地表からの高さ 2m と 4.5m の位置での NO_x 濃度を同時測定した。図 12 に示すように濃度にほとんど差は見られず、建物の高さ付近に存在すると考えられる境界層よりも低い領域では上空に向かう汚染物質の拡散はないと考えられる⁽⁸⁾。

図 13 は同程度の高さでありながら全く異なる傾向を示し、4m 上空での NO_x 濃度は 2m の地点に比べて大きく減衰している。図 12 と比較する意味で示したこの結果は福井市の片側一車線の県道沿いで得られたものである。測定地点の近傍では高い建物が密集しておらず、開放された空間となっているため、ストリートキャニオンと呼ばれる上述のような閉じられた空間とは異なる環境にあり、通常考えられるような拡散が進む様相が表れている。

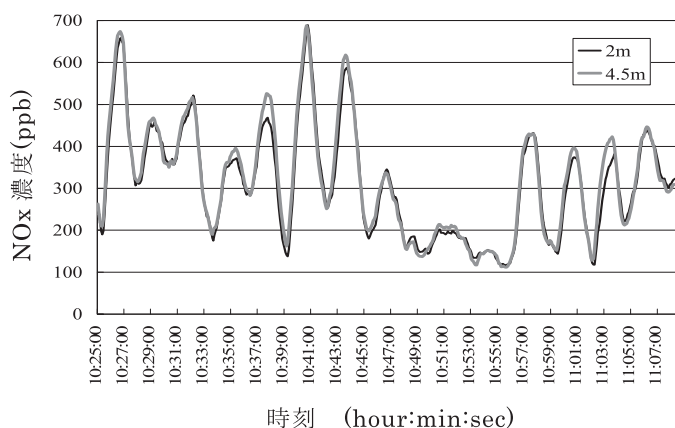


図 12. NO_x 濃度の変化（高さ 2m-4.5m 比較）

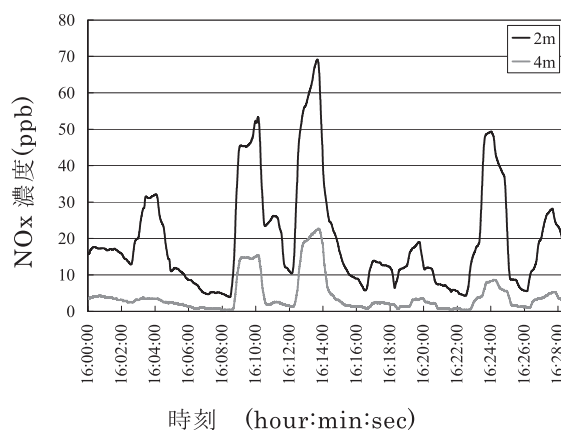


図 13. NO_x 濃度の変化（高さ 2m-4m 比較）

図 13 に対応する濃度減衰の状況を表 3 にまとめた。高さ 2m に対して平均値で 80%の低下が見られ、図 14 に示す頻度分布からも濃度の変動幅が減少し拡散している状態が表れている。

表 3. NO_x 濃度減少率（高さ 2m-4m 比較）

地表からの高さ(m)	2	4
平均値 (ppb)	20	4
減少率 (%) (2m 比)	0	80

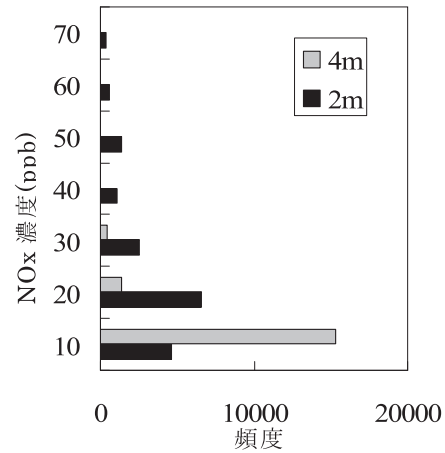


図 14. NO_x 濃度の頻度分布（高さ 2m-4m 比較）

3.2.2 高さ 2m-5.5m

次に同じ地点①において、高さを 5.5m に上げて 2m の位置での NO_x 濃度と比較した結果を図 15 に示す。表 4 にまとめたとおり高さ 2m に対して平均値で 25%の低下が見られるが、図 16 の濃度頻度分布では両地点における濃度の変動幅に大きな差はなく拡散が進んでいるとは言いがたい。この高さでも 4.5m の場合と同様に周辺を取り囲む建物の影響を受けていると考えられる。

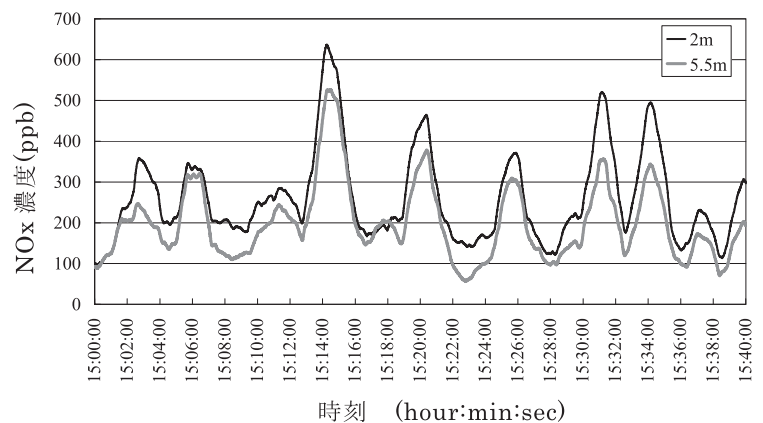
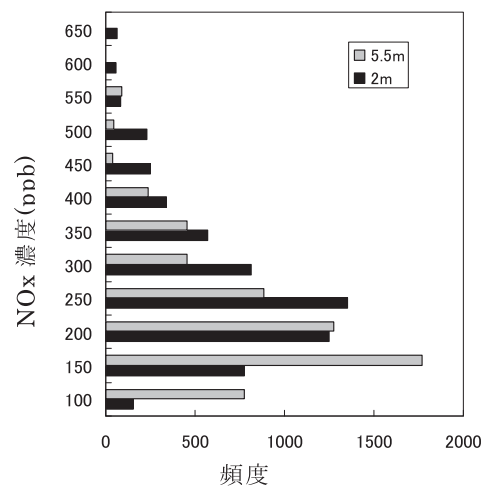


図 15. NO_x 濃度の変化（高さ 2m-5.5m 比較）

表 4. NO_x 濃度減少率（高さ 2m-5.5m 比較）

地表からの高さ(m)	2	5.5
平均値 (ppb)	252	190
減少率 (%) (2m 比)	0	25



3.2.3 高さ 2m-8m

さらに高い地点での状態を把握するために、図 16. NO_x 濃度の頻度分布（高さ 2m-5.5m 比較）測定装置を歩道橋上に移動させ、地表から 2m の地点の測定には中央分離帯に向けて橋上から下方にサンプリングチューブをアルミ棒で固定させた状態で設置した。上空に向けては、これまで

同様に設定した高さに固定した．図 17 に測定状況を示す．

この状態で地表から 8m の位置における NO_x 濃度を測定した．この場合，2m でのサンプリング位置は常に車両が通過する車道に挟まれた最も汚染が厳しいと考えられる中央分離帯の直上である．NO_x 濃度の比較結果を図 18 に示す．2m 地点におけるピーク値は 1ppm をはるかに超える濃度に到達しているのに対し，8m 地点では平均で 79% 低下，100ppb 程度まで大幅に減衰している（表 5）．

図 19 の濃度頻度分布を見ても 8m 地点における濃度の変動幅が非常に狭まっており，NO_x の拡散が進んでいることが明確に表れている．2 階建てが主体の建物の高さ付近に存在すると考えられる境界層よりも高い領域での現象をとらえている．

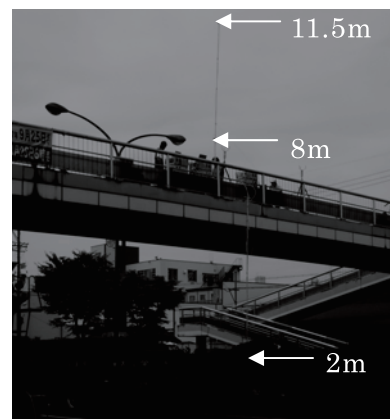


図 17. 高い地点での測定状況

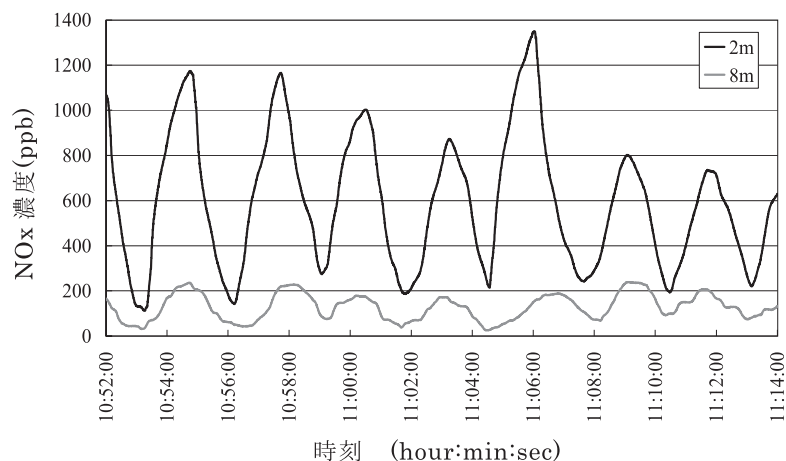


図 18. NO_x 濃度の変化（高さ 2m-8m 比較）

表 5. NO_x 濃度減少率（高さ 2m-8m 比較）

地表からの高さ(m)	2	8
平均値 (ppb)	605	125
減少率 (%) (2m 比)	0	79

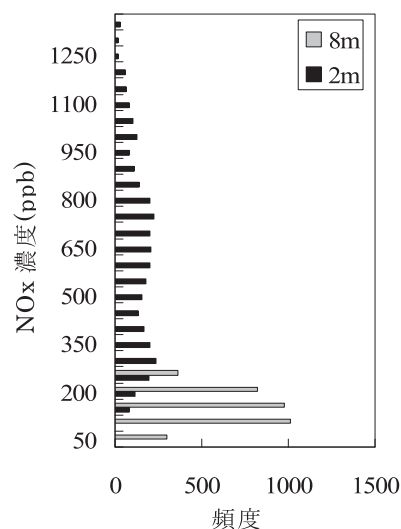


図 19. NO_x 濃度の頻度分布（高さ 2m-8m 比較）

3.2.4 高さ 2m-11.5m

さらに上空の地表からの高さ 11.5m の地点での測定結果を図 20 に示す．同時に測定した高さ 2m および 8m での結果も合わせて表示した．この時間帯では交通量，特に大型トラックの通過台数が一時的に減少し（図 21 の○印．前後の時間帯も含めて交通量の変化および車種の内訳を載せた．凡例の LDT は小型トラック，HDT は大型トラックを示す．），中央分離帯直上における 2m 地点における濃度のピーク値が 200

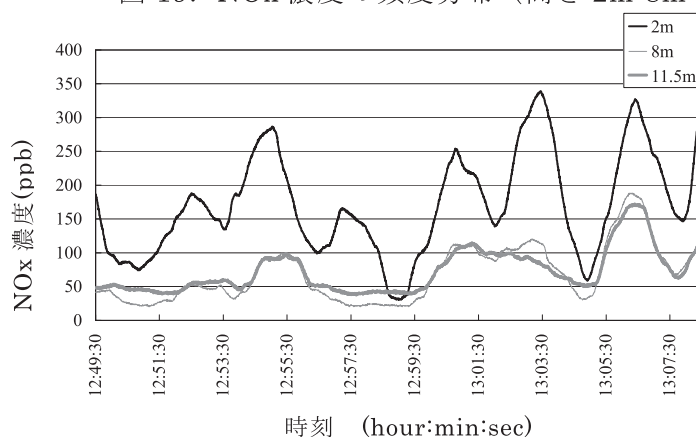


図 20. NO_x 濃度の変化（高さ 2m-8m-11.5m 比較）

ppb 以下に留まる場合もあるが、濃度の減少割合を比較すると表 6 に示すように高さ 11.5m の地点でのレベルは 8m でのレベルと大きな差は見られず、また図 22 の濃度の頻度分布を見ても 11.5m 地点における濃度の変動幅は 8m 地点のレベルと大差なく、拡散状態は 8m 程度の高さ以上ではさらに進行する状況は観測されていない。

表 6. NO_x 濃度減少率（高さ 2m・8m・11.5m 比較）

地表からの高さ(m)	2	8	11.5
平均値 (ppb)	186	64	61
減少率 (%) (2m 比)	0	66	67

以上、NO_x 濃度の水平方向および鉛直方向に対する分布に関する調査結果を示してきたが、それぞれの方向に向けての濃度低減率を 3 次元空間でまとめると図 23 で表される。図の y 軸（奥行き方向）は国道の中央を 0m とする距離で示してある。水平方向は東側（図の手前方向）では徐々に減衰し、西側では国道端付近まで低濃度の領域が広がっていると考えられる。鉛直方向には、5.5m より上空で国道の幅に沿って拡散している。そして 8m 以上では、その拡散が一定のレベルに収まっている。

水平方向の分布に関して、国道から東へ 2m 奥まった地点における風向・風速の測定結果の一例を図 24 に示す。風向は図の上方向を北とする示し方をしている。この結果から国道から細街路に侵入した風が NO_x を運んでいることがわかる⁽⁴⁾。

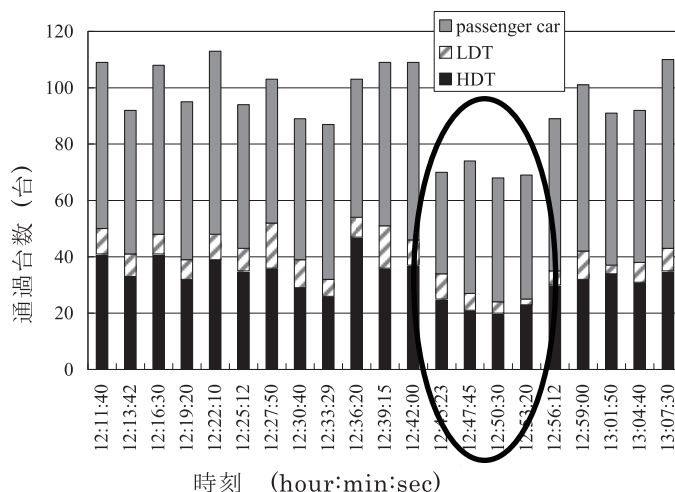
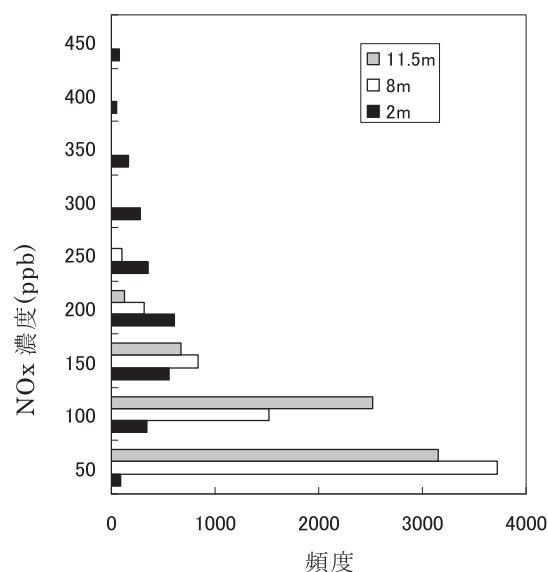
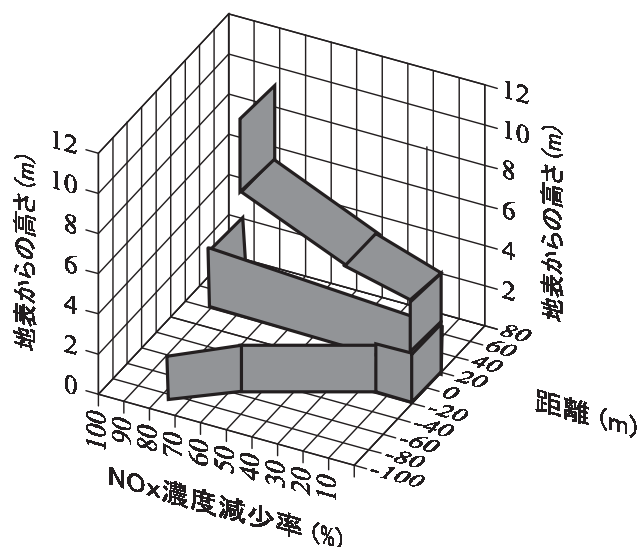


図 21. 交通量の変化

図 22. NO_x 濃度の頻度分布

(高さ 2m・8m・11.5m 比較)

図 23. 国道からの距離、高さに対する NO_x 濃度の 3 次元分布

高さ方向の風向・風速は風速計の設置位置に物理的な制約があるため、上記のそれぞれの高さに対応したデータを得ることができず、地表から 8m の高さに相当する歩道橋上での結果のみ得られた。

図 25 に風向・風速の時間経過を示す。風向は 360° が北に相当する。このように、風向はほぼ 180° つまり南を指す時間帯が多い。それに対して、風速は 5m/s を示す時間帯もあり風の影響が無視できない。

4. まとめ

NO_x 濃度の時間変化を複数地点で同時計測、あわせて交通量も観測した。これらの結果をもとに、道路から住宅地への水平方向および上空への鉛直方向への拡散状態を把握した。また、健康に問題のない居住領域を NO_2 濃度の大気環境基準に対するレベルから明らかにした。

- 1) 国道西側は一般風としての西風により車道を通過する車両からの排気ガスは侵入せず、常に低濃度で推移している。ここでは沿道と 48m 隔てた測定点における結果のみを示すに留まったが、 NO_2 濃度が大気環境基準を下回るレベルにおさまリ、居住には問題ない領域が沿道付近まで存在すると考えられる。
- 2) 一方、東側では歩道端及び 2m 奥まった地点までは国道の影響を強く受けるのに対し、徐々に濃度低下していく傾向を示し 70m 離れた地点では排気ガスの拡散が進むことによりバックグラウンド濃度に近い状態に落ち着いている。また各々の地点におけるピーク値発生時期に注目すると、ある時間遅れを伴っており国道で整流された風の一部が側道に流れ込みながら汚染物質を移送するという計算結果^③により説明できる。沿道の NO_2 濃度は環境基準を超えるレベルで推移しているが、70m 程度の距離を隔てれば大きな距離減衰が認められ、住宅地ではほぼ基準内におさまる。

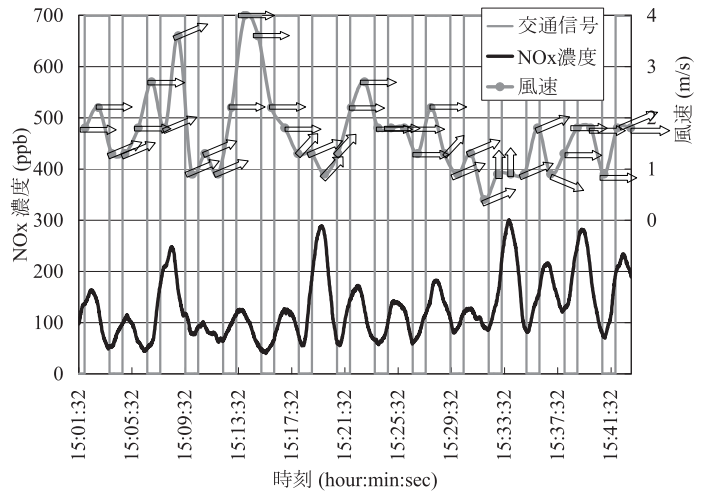


図 24. 国道からの距離 2m における
風向・風速の時間経過

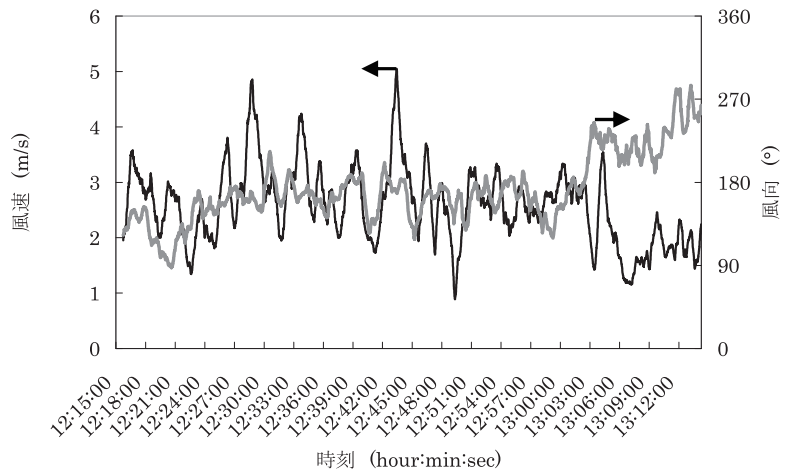


図 25. 地表からの高さ 8m における
風向・風速の時間経過

- 3) 鉛直方向の濃度分布は、建物高さ付近まで存在すると考えられる境界層以下の領域内では上空に向かう汚染物質の拡散は見られない。また測定地点の近傍では高い建物が密集しておらず、開放された空間となっているためにストリートキャニオンと呼ばれる上述のような閉じられた空間とは異なる環境における、通常考えられるような拡散が進む測定結果も併せて示した。この地域では、8m の高さで拡散を始め 11.5m 上空でも濃度低下のレベルは変わらないという結果が得られたが、より正確な分布状態の把握には数水準の高さ方向で風向・風速を測定し風の影響まで考慮する必要がある。
- 4) 車道を中心とする 3 次元空間における NO_x 濃度の拡散状態を把握した。得られた結果から、車道に対してどの範囲までが汚染物質濃度が大気環境基準を満足し、居住に適しているかを判断した。すなわち、水平方向は東側では徐々に減衰し、西側では国道端付近まで低濃度の領域が広がっていると考えられる。鉛直方向には、5.5m より上空で国道の幅に沿って拡散している。そして 8m 以上では、その拡散が一定のレベルに収まっている。これは、車道沿いの一地点のみに配置されている測定局で得られる結果では推し測ることができず、本測定方法を用いることにより初めて可能となったものである。

5. 謝辞

本研究は、トヨタ自動車株式会社殿からの研究委託により実施したものである。研究費用の面でのご援助はもとより、準備、測定、観測結果の解析まで多面的なご指導、ご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 小栗 彰：沿道の大气汚染状況に関する計測，福井工業大学研究紀要 第 37 号 2007
- (2) 小栗 彰：沿道の大气汚染状況に関する計測（第 2 報），福井工業大学研究紀要 第 38 号 2008
- (3) 小栗 彰：自動車の通行に伴う沿道の大气汚染の計測，福井工業大学研究紀要 第 39 号 2009
- (4) 小栗 彰：沿道大气汚染に及ぼす気流・交通流の影響調査，福井工業大学研究紀要 第 40 号 2010
- (5) 三浦 米吉：幹線道路沿道における NO_x 挙動，豊田中央研究所 R&D レビュー 1997
- (6) <http://www.erc.pref.fukui.jp/erc/measure/m-nox.html>
- (7) 堀場製作所：大気汚染監視用窒素酸化物濃度測定装置 APNA-370 オペレーションマニュアル
- (8) 林 ほか：自動車排ガスの沿道拡散シミュレーション，自動車技術会学術講演会前刷集, 20065796 (2006)

(平成 23 年 3 月 31 日受理)