

車載型排出ガス計測装置を用いた
沿道局所 NO_x 汚染の解析

2005 年度

高田 寛

目次

目次.....	i
記号表.....	iv
第1章 緒論.....	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.1.1. 社会的背景.....	1
1.1.2. 自動車排出ガス対策.....	6
1.1.3. 窒素酸化物について.....	8
1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究.....	9
1.2.1. 計測.....	9
1.2.2. モニタリング.....	14
1.2.3. 大気モデル研究.....	15
1.3. 本研究の位置付け.....	21
1.4. 本研究の目的.....	22
1.5. 研究計画.....	23
1.6. 本論文の構成.....	24
第2章 車載型排出ガス計測装置の開発.....	26
2.1. 開発のねらい.....	27
2.2. 主要計測装置構成.....	28
2.3. NO _x および CO ₂ 排出質量算出方法.....	33
2.4. 本研究における供試車両.....	36
2.4.1. いすゞ自動車製小型貨物自動車.....	36
2.4.2. 南京自動車製小型バス.....	38
2.5. NO _x , O ₂ 濃度の最適計測位置に関する検討.....	40
2.6. CVS 排出ガス計測システムとの精度比較.....	45
2.7. 路上試験による車載型排出ガス計測装置の有効性確認.....	47
2.7.1. 走行自動車の排出ガスによる沿道 NO _x 汚染マップ.....	47
2.7.2. 車載型排出ガス計測装置による沿道局所 NO _x 汚染測定.....	50
2.8. まとめ.....	52
第3章 走行自動車による沿道局所 NO_x 汚染の実態.....	53
3.1. 試験条件.....	54
3.1.1. 試験自動車.....	54
3.1.2. 試験路.....	54
3.1.3. 走行条件.....	57

3.1.4. 計測データの解析方法.....	58
3.2. 運転者に起因する沿道局所 NOx 汚染.....	60
3.2.1. 交通の影響がほとんどない道路における運転者と NOx 排出係数.....	60
3.2.2. 市街路走行における運転者と NOx 排出係数.....	66
3.3. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の実態.....	68
3.3.1. 交通量とルート NOx 排出係数の関係.....	68
3.3.2. 沿道局所 NOx 汚染マップ.....	69
3.3.3. 小型貨物自動車における沿道局所 NOx 汚染の発生要因.....	71
3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析.....	75
3.4.1. 交差点通過時の沿道局所 NOx 汚染.....	75
3.4.2. その他の事例.....	80
3.4.3. 道路, 交通状況に起因する要因の対策と効果.....	85
3.5. 小型バスの沿道局所汚染の実態.....	87
3.5.1. 沿道局所汚染マップ.....	87
3.5.2. 小型バスにおける沿道局所 NOx 汚染の発生要因.....	89
3.6. まとめ.....	90
第4章 沿道局所 NOx 汚染の解析.....	91
4.1. 車両動態の解析.....	92
4.1.1. 車両速度と NOx 排出係数の関係.....	92
4.1.2. 沿道局所 NOx 汚染と車両動態.....	95
4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係.....	99
4.2.1. CO ₂ と NOx 排出質量の関係.....	99
4.2.2. エンジン NOx マップによる解析.....	101
4.2.3. 小型貨物自動車の過渡時の NOx 排出特性.....	105
4.2.4. 小型貨物自動車の過渡時の NOx 排出特性の解析.....	108
4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について.....	116
4.3.1. 実験条件.....	116
4.3.2. 沿道局所 NOx 汚染の実態.....	118
4.3.3. 沿道局所 NOx 汚染の解析.....	120
4.4. まとめ.....	126
第5章 沿道局所 NOx 汚染低減のための提案.....	128
5.1. 道路管理者への提案.....	129
5.2. 自動車製造者への提案.....	130
5.3. 運転者への提案.....	134
第6章 結 論.....	136

謝 辞.....	140
参考文献.....	141

記号表

量記号	名称	名称 (英語)	単位
A	前面投影面積	Frontal projection area	m^2
A/F	空燃比	Air fuel ratio	
A/F_{stoich}	空気と軽油の理論混合比	Stoichiometric ratio	
A_{CON}	エアコンON/OFF	Air conditioner ON/OFF	
A_p	アクセルポジション	Accelerator position	mm
Br	ブレーキ操作	Braking	
B_f	単位時間あたりの燃料消費量	Fuel consumption rate	g/s
C_{NOx}	NOx濃度	NOx concentration	ppm
$C_{NOx,CLD}$	CLD分析計NOx濃度	NOx concentration by CLD analyzer	ppm
$C_{NOx,Zirconia}$	ジルコニアセンサNOx濃度	NOx concentration by Zirconia sensor	ppm
C_{O_2}	O ₂ 濃度	O ₂ concentration	%
$C_{O_2,Magnetic}$	磁気式分析計O ₂ 濃度	O ₂ concentration by Magnetic analyzer	%
$C_{O_2,Zirconia}$	ジルコニアセンサO ₂ 濃度	O ₂ concentration by Zirconia sensor	%
$E_{CO_2,t}$	単位時間あたりのCO ₂ 排出質量	CO ₂ mass emissions based on time	g/s
$E_{CO_2,t,Inst}$	瞬時CO ₂ 排出質量	CO ₂ mass emissions based on time	g/s
$E_{CO_2,x}$	単位距離あたりのCO ₂ 排出質量	CO ₂ emissions factor	g/km
$E_{CO_2,x,Inst}$	瞬時CO ₂ 排出係数	Instantaneous CO ₂ emission factor	g/km
$E_{CO_2,x,RT}$	ルートCO ₂ 排出係数	Route CO ₂ emission factor	g/km
$E_{CO_2,x,ST}$	ショートトリップCO ₂ 排出係数	Short-trip CO ₂ emissions factor	g/km
$E_{NOx,t}$	単位時間あたりのNOx排出質量	NOx mass emissions based on time	g/s
$E_{NOx,t,Inst}$	瞬時NOx排出質量	NOx mass emissions based on time	g/s
$E_{NOx,x}$	単位距離あたりのNOx排出質量	NOx emissions factor	g/km
$E_{NOx,x,Inst}$	瞬時NOx排出係数	Instantaneous NOx emissions factor	g/km
$E_{NOx,x,RT}$	ルートNOx排出係数	Route NOx emissions factor	g/km
$E_{NOx,x,ST}$	ショートトリップNOx排出係数	Short trip NOx emissions factor	g/km
g	重力加速度	Gravitational constant	m/s^2
GP	ギア位置	Gear position	
H_{in}	吸気相対湿度	Intake air relative humidity	%
i	総減速比	Overall gear ratio	
M_{NO_2}	NO ₂ 分子量	Molecular weight of NO ₂	g/mol
Ne	エンジン回転数	Engine speed	rpm
P_{1atm}	標準状態での圧力 (1atm)	Pressure at standard condition	Pa

P_{air}	大気圧	Atmosphere pressure	Pa
P_{in}	吸入空気圧力	Intake air pressure	Pa
P_{in}	吸気圧力	Intake air pressure	Pa
Q_{ex}	排気流量	Exhaust gas flow rate	m ³ /s
$Q_{ex,273K,1atm}$	1気圧, 273K排気流量	Exhaust gas flow rate at 273K, 1atm	m ³ /s
Q_{in}	吸入空気流量	Intake air flow rate	m ³ /s
$Q_{in,273K,1atm}$	1気圧, 273K吸入空気流量	Intake air flow rate at 273K, 1atm	m ³ /s
$Q_{in,dry,273K,1atm}$	乾燥吸入空気流量	Dry intake air flow rate at 273K, 1atm	m ³ /s
R	走行抵抗	Running resistance	N
r_D	タイヤ半径	Tire radius	m
T_{273K}	標準状態での温度 (0)	Temperature at standard condition	K
T_{air}	大気温度	Ambient temperature	K
T_{in}	吸気温度	Intake air temperature	K
T_{water}	冷却水温度	Engine coolant temperature	K
v	車両速度	Vehicle speed	m/s
V_{Inst}	瞬時車両速度	Route average speed	m/s,km/h
V_{RT}	ルート車両速度	Route average speed	m/s,km/h
V_{ST}	ショートトリップ車両速度	Short trip average speed	m/s,km/h
W	車両質量	Vehicle weight	kg
W_{GVW}	車両総質量	Gross vehicle weight	kg
W_r	回転部相当質量	Rotation part equivalent weight	kg
X	距離	Distance	m
X_{RT}	ルート走行距離	Route distance	km
X_{ST}	ショートトリップ走行距離	Short trip distance	km
$X_{V,Position}$	車両位置	Vehicle position	° "
	車両加速度	Vehicle acceleration	m/s ²
Ne	エンジン回転数変化率	Rate of engine speed change	rpm/s
EGR	EGR率	EGR ratio	%
t	動力伝達効率	Power transmission efficiency	
$road$	道路勾配	Road gradient	°
	空気過剰率	Excess air ratio	
μ_i	空気抵抗係数	Air resistance coefficient	N·s ² /(g·m)
μ_r	転がり抵抗係数	Rolling resistance coefficient	N·s ² /(g·m)
ρ_{air}	1気圧, 273K乾燥空気密度	Dry air density at 273K, 1atm	g/m ³
ρ_{fuel}	燃料密度	Fuel density	g/m ³
τ_{engine}	エンジントルク	Engine torque	N·m

第1章 緒 論

1.1. 研究の背景

1.1.1. 社会的背景

自動車は、今やビジネスや生活等に欠くことのできないものになった。2003 年における世界の自動車保有台数は約 8 億 3,400 万台であり、そのうちの 1 割近くが日本に存在している。このような自動車交通の増加により、自動車からの窒素酸化物 (NO_x)、粒子状物質 (PM: Particulate matter) 等に起因する大気汚染が大きな問題となっている。

自動車からの排出ガス総量は 1994 年の環境庁 (当時) の調査によると、NO_x 排出総量は 55 万トン/年、PM が 6 万トン/年であり、図 1.1 および 1.2 に示すように、NO_x に関してはディーゼル自動車排出総量の 75%、ガソリン自動車排出総量の 25% を占めており、PM に関してはディーゼル車が 100% となっている⁽¹⁾。すなわち、ディーゼル自動車からの NO_x および PM の排出が大きな問題になっている。

国は環境基本法第三節第 16 条で環境基準を「大気の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染及び騒音に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準」と規定し、行政上の政策目標が設定されている。そのため、都道府県では住宅地などの一般的な生活空間における大気汚染の状況を把握するための一般大気測定局 (一般局) と、道路周辺における状況を把握するため沿道に設置される自動車排出ガス測定局 (自排局) において、大気汚染物質の環境濃度を常時監視している。

測定の結果、図 1.3 および 1.4 に示すように二酸化窒素 (NO₂) や浮遊粒子状物質 (SPM: Suspended Particulate Matter) 濃度は近年概ね横ばいで推移している。図 1.5 に示すように一般局の達成率に対し自排局での達成率が低く、沿道における自動車の寄与が大きいことを示している。特に図 1.6 に示すように「自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法」(自動車 NO_x・PM 法) 対策地域での NO₂ 濃度の環境基準達成率は依然低い状況である。また図 1.7 に示すように SPM についても自動車の寄与が大きい。

以上の状況から自動車交通に起因する大気汚染物質総量削減に向け、種々の対策が実施されているが、図 1.6 および 1.7 に示したように沿道における NO₂ や SPM の環境基準達成状況は依然低い水準となっていることは大きな問題である。

実際に、自動車排出ガスが原因と見られる沿道に居住する人の健康被害が深刻化しており、各地で大気汚染訴訟が起きている。

川崎市排ガス公害訴訟(1998年8月判決)では,排出ガス中に含まれるNO₂やSPMが呼吸器系疾患を招いたと認定し,国,公団に対して沿道50m以内の患者48人に計1億4,900万円の賠償を命じた.

尼崎公害訴訟(2000年1月判決)および名古屋南部公害訴訟(2000年11月判決)では,SPMと気管支喘息発症の因果関係を認め,ディーゼル排気微粒子(DEP)の関与がもっとも疑わしいとした.そして,今まで道路使用の公共性などを理由に認められなかった国に対する汚染物質の排出差し止めが認められるようになった.

東京大気汚染公害訴訟は,1996年5月の第1次提訴にはじまり,2000年11月の第4次提訴までの原告計505名が,国道,都道,首都高速道の管理者である国・都・公団および自動車メーカー7社を被告として,損害賠償請求,汚染物質の差し止めなどを求めた訴訟である.2002年10月の判決では,道路端から約50mまでに居住するなどにより気管支喘息を発症,悪化した7名について被告の国・都・公団に損害賠償責任を認めた(現在,国は控訴中).

このように,自動車排出ガスと沿道に居住する人の公害病との因果関係,そしてその加害責任をめぐる司法判断は定着した.沿道に居住する人の健康被害を低減するため,沿道局所における自動車排出ガスを削減することは喫緊の課題である.沿道における排出ガス汚染の理由については自動車保有台数の増加,走行量の増加等により,自動車単体の排出ガス低減の効果が相殺されていることが指摘されているが原因は特定されておらず,総量削減を目的にした自動車単体対策に加え,沿道局所汚染対策がより必要となっている.

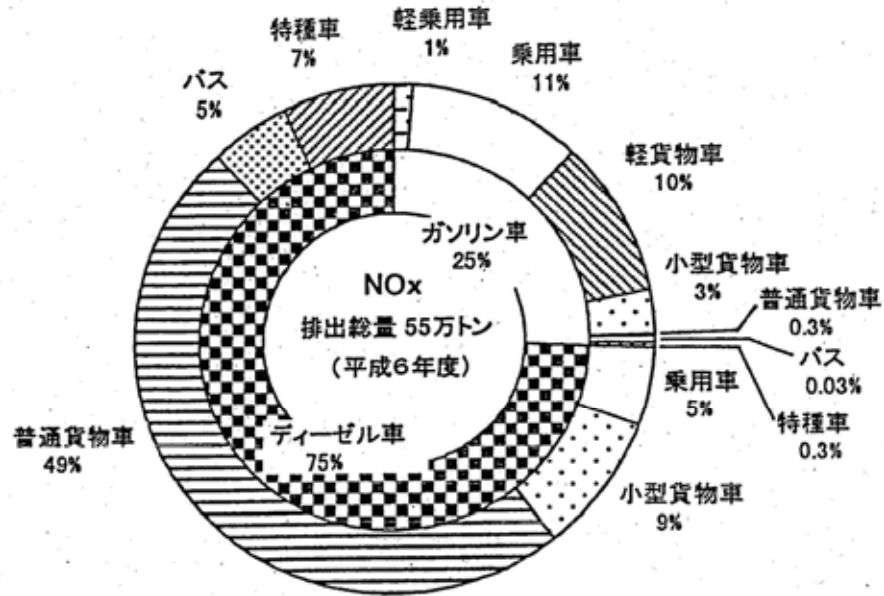


図 1.1 NOx 排出総量と車種別排出割合⁽¹⁾

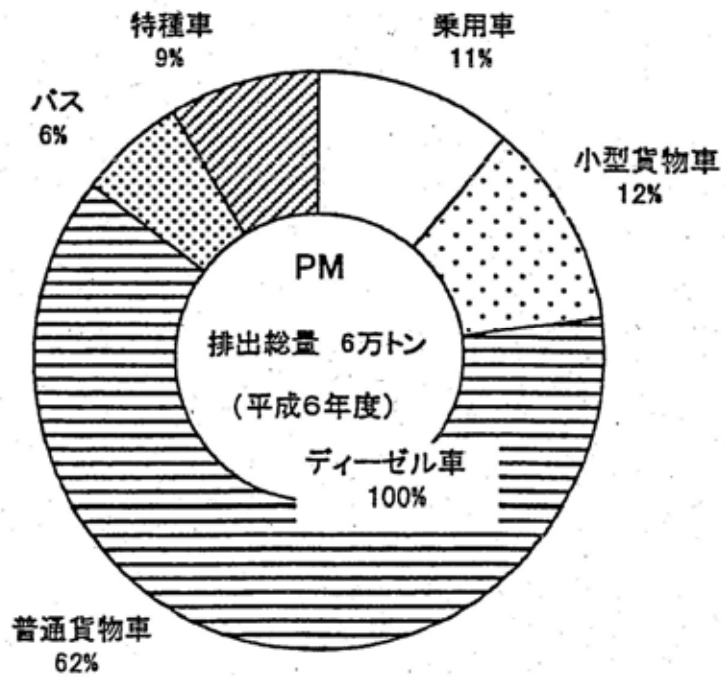


図 1.2 PM 排出総量と車種別排出割合⁽¹⁾

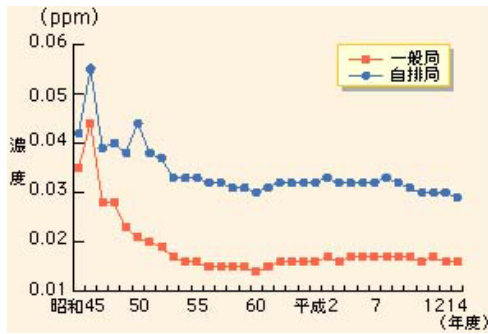


図 1.3 NO₂ 濃度の年平均値の推移⁽²⁾

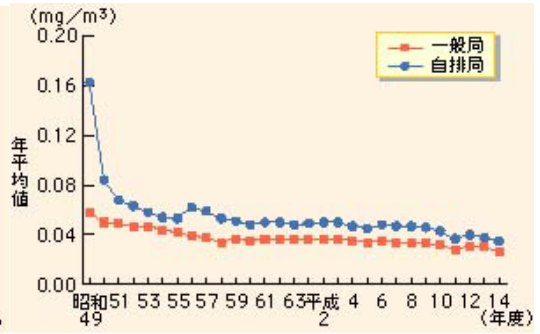


図 1.4 SPM 排出量の年平均値の推移⁽³⁾

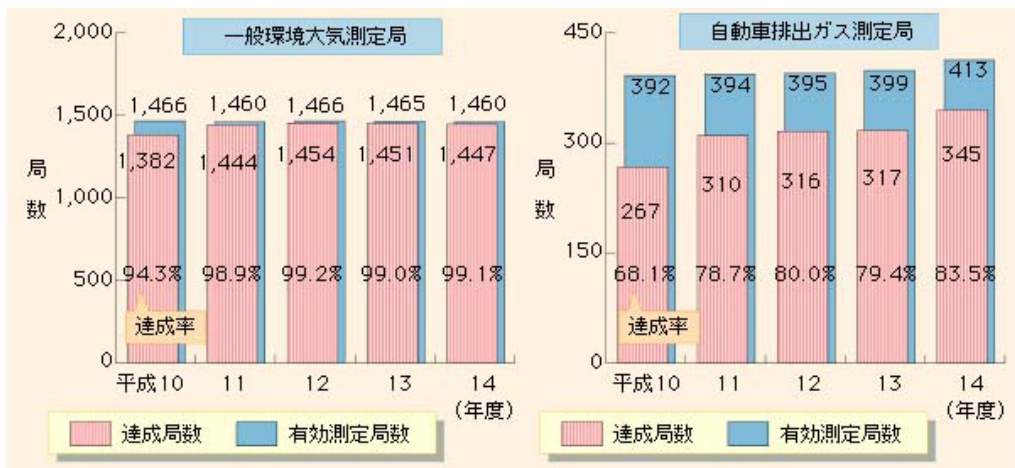


図 1.5 NO₂ の環境基準達成状況の推移⁽⁴⁾

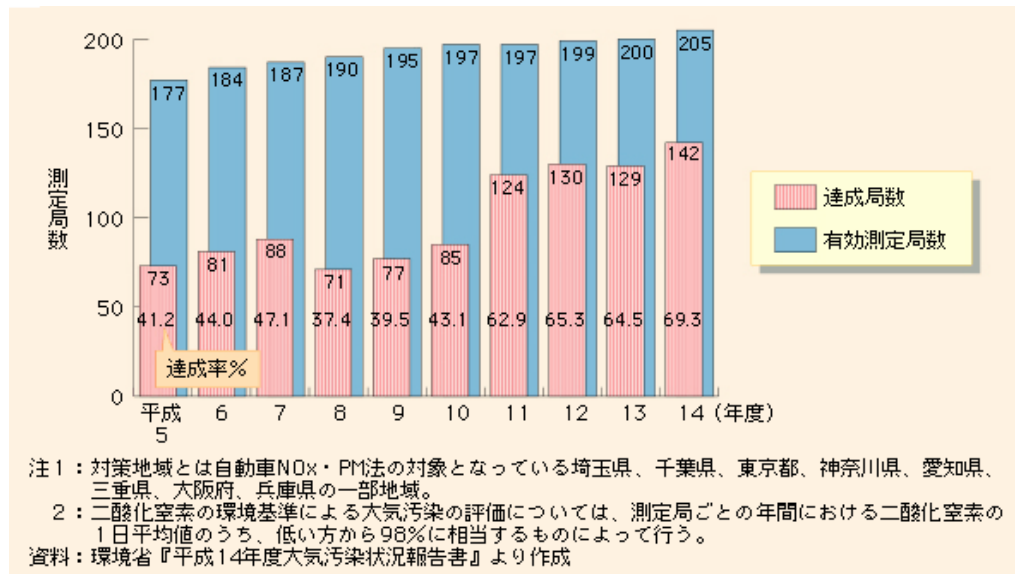


図 1.6 対策地域の自動車排出ガス測定局における NO₂ の環境基準達成状況の推移⁽⁵⁾

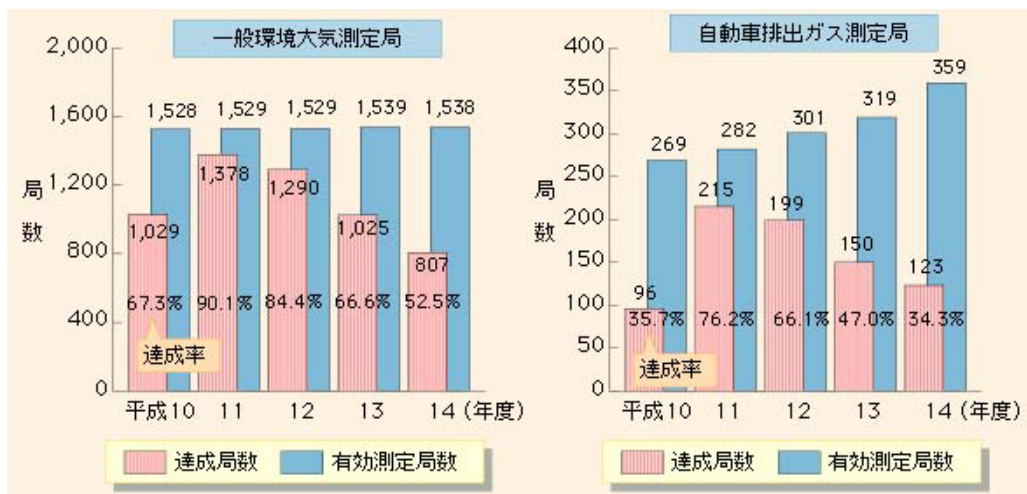


図 1.7 SPM の環境基準達成状況の推移⁽⁶⁾

1.1.2. 自動車排出ガス対策

自動車交通に起因する大気汚染物質総量削減に向け 種々の対策が実施されている。対策内容は、図 1.8 に示したように発生源対策，交通量対策，交通流対策，道路構造対策および沿道対策等であるが，これまで発生源対策が施策の中心となっている。発生源対策として，自動車単体対策（自動車あるいはエンジンの排出ガス規制強化），燃料対策（軽油中の硫黄分低減）大都市地域における自動車排出ガス対策（自動車 NO_x・PM 法による総量削減），最新規制適合車への代替および低公害車の普及が推進されている。昭和 48 年以降は，図 1.9 に示すように大気汚染防止法に基づく自動車排出ガス規制が逐次強化され，自動車あるいはエンジン単体からの大気汚染物質の排出量は大幅に削減されてきた⁷⁾。排出ガス規制の強化に伴い，排出ガス対策の技術革新も進んできた。平成 6 年の短期規制の前までは，排出ガスは濃度規制であったが，平成 6 年以降は総量規制になった。現在は，平成 17 年の新長期規制が施行されている。これまでの排出ガス対策の進展は，大きく三つの世代に分けられると考えられる。

一つは，エンジンの排出ガス対策が機械的制御による燃焼改善により行われた世代である（第 1 世代とする）。この時代は，噴射タイミング遅延による NO_x 低減が主な手法であった。この場合，PM 排出量が NO_x とトレードオフの関係にあるので，種々の最適設計による PM 低減も同時に行われた。

二つ目は，エンジンの排出ガス対策に電子制御が応用されてきた世代である（第 2 世代とする）。基本的な燃焼対策コンセプトは第 1 世代と同じであるが，電子制御により詳細な最適制御が可能となった。

三つ目は，エンジンの燃焼等による排出ガス対策に加え，燃料の低硫黄化等により可能となった後処理装置による排出ガス対策ができるようになった世代である（第 3 世代とする）。

以下に，各世代の主な排出ガス対策技術を示す。

第 1 世代 : 機械制御による対策

(例) 噴射タイミング，噴射率の最適設計，燃焼室最適設計等による排出ガス改善

第 2 世代 : 電子制御による対策

(例) 電子タイマー，可変噴射率，高圧噴射，排出ガス再循環(EGR: Exhaust Gas recirculation)等の電子制御排出ガス改善

第 3 世代 : 後処理装置による対策

(例) ディーゼルパティキュレートフィルター，尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction: 選択触媒還元) システム，NO_x 還元触媒等による排出ガス改善

重量車の平均的な寿命は 11～12 年程度であり，現在国内を走行している重量車のほとんどは第 2 世代の車両である。以降，本研究において，第 1～3 世代という場合は図 1.9 に示した排出ガス規制に対応した技術を持った車両を指すものとする。

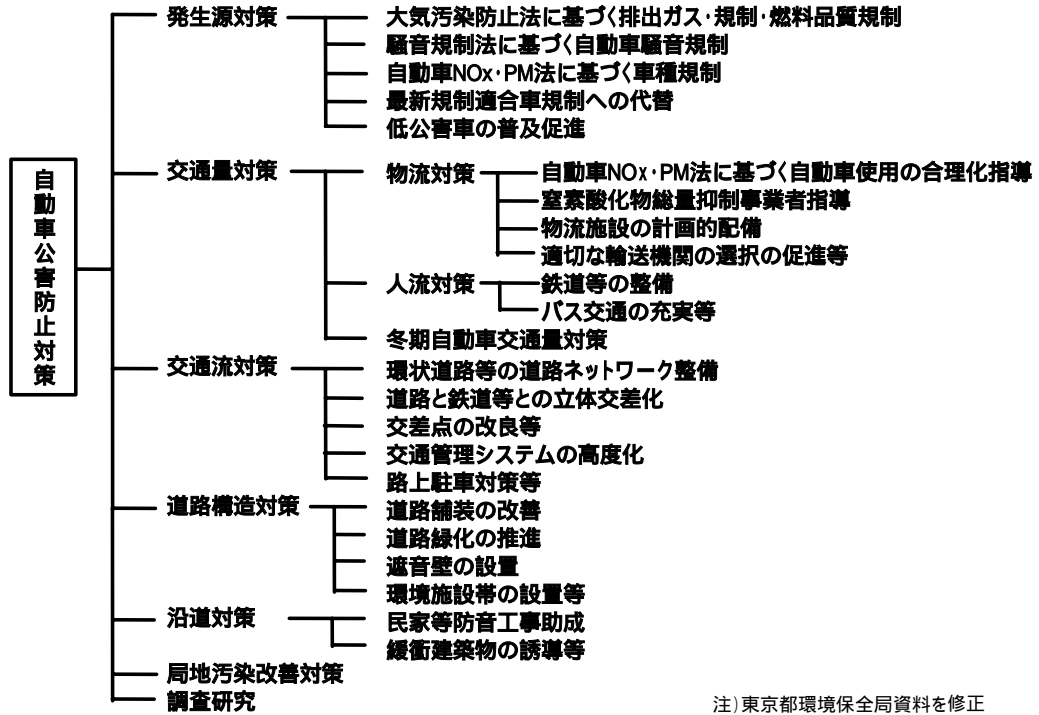
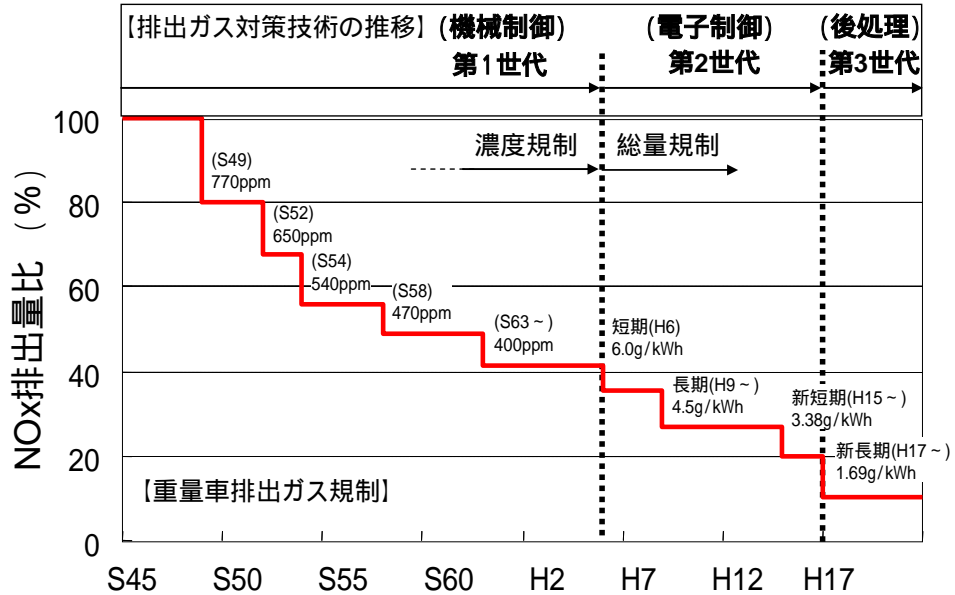


図 1.8 自動車公害防止対策の体系



注) 図中の“短期”等の表記は、排出ガス規制の通称である。
排出ガス対策前のNOx排出量を100%として表示している。

図 1.9 重畳車の排出ガス規制と排出ガス対策の技術革新推移

1.1.3. 窒素酸化物について

窒素酸化物 (Nitrogen oxide ; 略称 NO_x) は窒素の酸化物の総称である。一酸化窒素 (NO) , 二酸化窒素 (NO₂) , 亜酸化窒素 (一酸化二窒素) (N₂O) , 三酸化二窒素 (N₂O₃) , 四酸化二窒素 (N₂O₄) , 五酸化二窒素 (N₂O₅) などが含まれる。総称して、化学式の NO_x で表し、「ノックス」という。

化石燃料等が燃焼するときに発生する NO_x はほとんど NO と NO₂ である。

人体に対し NO₂ は次のような毒性がある。中性で肺から吸収されやすく、細胞内では強い酸化作用を示して細胞を傷害するので、粘膜の刺激、気管支炎、肺水腫などの原因となる^{(8),(9),(10),(11)}。そのため、特に毒性の高い NO₂ は大気汚染防止法によって環境基準 (1 時間値の 1 日平均値が 0.04ppm から 0.06ppm までのゾーン内またはそれ以下であること) が定められている。

工場や自動車から排出される NO_x 及び炭化水素類 (揮発性有機化合物) を主体とする一次汚染物質が、太陽の紫外線照射を受けて光化学反応を起こすことによって、オゾンなどの酸化性物質やアルデヒドなどの還元性物質のような二次汚染物質を生成する。二次汚染物質のほとんどがオゾンである。光化学反応により生成される酸化性物質のうち、NO₂ を除いたものを光化学オキシダントと呼ぶ。光化学オキシダントは、光化学スモッグ (光化学オキシダントが空気中に停留しスモッグ状となったもの) の原因となり、高濃度では粘膜への影響などが知られているほか、農作物などへの影響も報告されている。したがって NO_x は、光化学スモッグを引き起こす大気汚染原因物質でもある^{(8),(9),(10),(11)}。

自動車からの NO_x は、1992 年に制定 (2001 年改正) された自動車 NO_x・PM 法によって、規制されている。健康影響を考慮した大気環境基準は NO₂ について定められているが、自動車の排出基準は NO_x として基準値が決められている。

以上から、沿道に居住する人の直接的な健康影響を考慮する場合は沿道局所における NO₂ モル数を評価する必要がある。また、地域的な大気汚染問題である光化学スモッグを考慮する場合は、NO および NO₂ の和 (モル数) で評価する必要がある。

本研究では、沿道に居住する人に対する直接的な健康影響を扱うので、NO₂ モル数の直接計測が望ましいが、NO₂ の直接計測は装置が複雑かつ大型化する。そのため自動車排出ガス中の NO_x のほとんどを占める NO と NO₂ の和を計測することとした。NO_x 中の NO と NO₂ の比率は、ディーゼルエンジンでは高負荷では 1 割以下、低負荷では 2 ~ 3 割程度であることが知られているため、NO と NO₂ の和を計測すれば相対的に NO₂ の評価と同等であると考えられるためである。

1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究

大気環境問題は、対象とする圏域の大きさにより二つに大別できる。一つは、比較的広範囲を対象とするものであり、この場合は排出ガス総量が問題とされる。他方、沿道等の狭い範囲では排出ガス総量に加え、沿道局所における排出量の把握が必要である。これまで、主として広範囲の圏域に関する排出ガス汚染低減研究が行われてきたが、昨今、車載型の排出ガス計測技術の進展とともに沿道局所における排出量実態把握の研究も行われている。

これらの二つの圏域に関する研究内容は、それぞれ以下の三つに分類できる。

- ・計測（発生源における計測手法の開発）
- ・モニタリング（大気汚染物質の動態把握と評価およびメカニズムの解明）
- ・大気モデル研究（沿道、都市、広域モデルを用いた発生源と環境濃度との因果関係調査、大気環境予測および対策シナリオの検討）

以上の観点で、本研究に関連する沿道局所における自動車排出ガス削減に関する研究をまとめる。

1.2.1. 計測

（１）台上排出ガス質量計測

排出ガス規制における排出ガス質量は、エンジンダイナモあるいはシャシダイナモ上にて実施される排出ガス試験により評価される。この方法は、特殊、大型、高価であるため多くの車両について実測を行うのが困難であるが、ある自動車の代表的な排出ガス質量を評価するうえで非常に効率的な方法である。そのため、これまで長い間各国・地域において用いられており、今後とも自動車単体排出ガス質量評価の主流となるものと考えられる。しかし、この排出ガス試験は代表モードでの一定の試験条件において実施するものであり、必ずしも路上走行における種々の走行実態を再現するものではない。

図 1.10 に、乗用車、軽量貨物自動車等の排出ガス試験に用いられている 10・15 モード走行パターンを示した⁽¹²⁾。これらの排出ガス計測は、ある走行モードにおける総排出ガス質量との関係性を評価し、その走行モードを前提とした車両の排出ガス質量評価あるいはその改善を主な目的とするものであり、走行する自動車から沿道へ排出される有害物質の発生原因の再現、評価は困難である。

路上における自動車の走行環境は千差万別であり、ある一定のモードでは路上の走行状態をすべて反映するわけではないので、法定の排出ガス試験とは別に渋滞等の走行状態を考慮した種々の走行モードの研究が行われてきた⁽¹³⁾。

1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究

モード	15	10	10・15
平均車速 (km/h)	33.9	17.7	22.7
走行距離 (km)	2.17	0.664	4.17
走行時間 (sec)	231.0	135.0	660.0
アイドリング時間比率 (%)	32.47	26.67	31.36

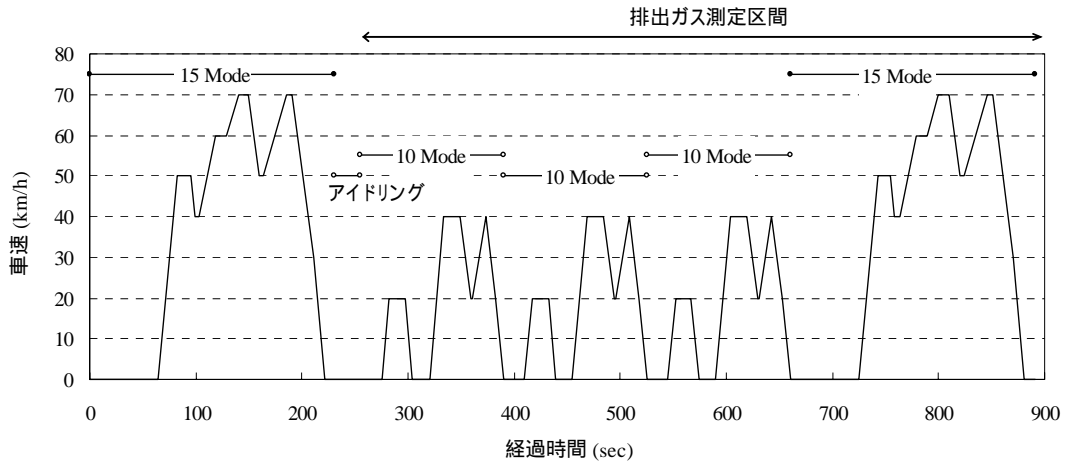


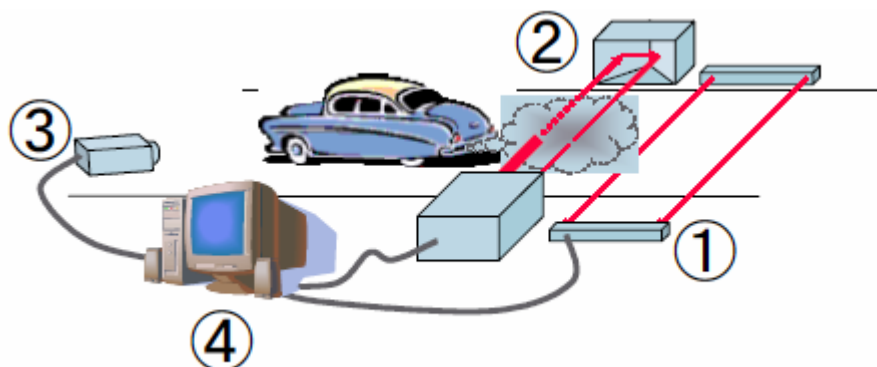
図 1.10 10・15 モード走行パターン

(2) 沿道大気汚染計測

最近では、レーザーレーダー技術を用いることにより、ディーゼル微粒子等の大気中浮遊粒子や NO_x、硫酸酸化物の三次元分布を測定することが可能であり、沿道の大気汚染分布の測定が行われている。

大気改善のための自動車・燃料等の技術開発プログラム(JCAP : Japan Clean Air Program)では、大気シミュレーションで用いる自動車排出ガスの推計精度の向上のため、沿道の排出ガスを把握することを目的に、レーザーレーダー技術を用いたリモートセンシング装置 (RSD : Remote sensing device) の適用可能性について検討しており、RSD を用いたリアルワールドの計測において排出ガス濃度分布が把握できる可能性があることを報告している。JCAP で行われているリモートセンシング法を用いた実走行車両の排気計測例を図 1.11 に示す⁽¹⁴⁾。

この方法は、自動車の走行状態と沿道局所への汚染がある定点で計測可能となり、どのような自動車がどのような走行動態を示したときにどのくらいの汚染が発生するか定点評価するのに効果的である。また、故障等の原因で排出ガスが異常に高い状態になっている高汚染車の検出にも有効である。



速度・加速度計測器

被計測車両の運転状態の把握

過度の加減速による不正確な分析結果の除外

排出ガス計測器

CO, CO₂, HC 赤外線 (IR: Infra red) を用いて計測

NO, PM 紫外線 (UV: Ultra violet) を用いて計測

ナンバープレート画像記録装置

ナンバープレートから被計測車両の車種, 対応規制, 車両総重量 (GVW: Gross vehicle weight), 使用燃料等の情報を取得, 排出ガス結果の解析に使用

データ処理装置

速度, 加速度, 排出ガス計測値, 車両の画像をリアルタイムで記録

ナンバープレート情報は別途入力

図 1.11 RSD の構成概要⁽¹⁴⁾

(3) 車載型排出ガス計測

自動車の有害排出ガス質量の測定は, 主にエンジンダイナモおよびシャシダイナモ上にて一定の運転モードのもとに行われているが, 試験設備は特殊, 大型, 高価であるため多くの車両について実測を行うのは現実的に困難である。また, シャシダイナモ上では大気条件等は, ある標準条件に設定するため実際の走行条件における排出ガス質量を完全にはシミュレートできないなどの問題がある。これを補完, 代替する手法として, 車載型の排出ガス計測システムの構築に関する研究が行われてきた。

交通安全公害研究所 (現 (独) 交通安全環境研究所) の吉田らは, 走行するディーゼル自動車から排出される NO_x 排出量予測手法の開発のために, 大型ディーゼル車にトルク計および非分散形赤外吸収式 (NDIR: Non Dispersive Infra Red) NO 分析

1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究

計を搭載し路上走行試験を行っている^{(15),(16),(17)}。東京都環境科学研究所の横田らは、路上への自動車排出ガス質量の実態を調査することを目的とし、図 1.12 に示すように大型ディーゼル車に NDIR 分析計または化学発光式分析計 (CLD : Chemiluminescence detector) を搭載し、NO_x 排出濃度を測定した。さらに層流式流量計により吸入空気量を計測することで、NO_x 排出質量を算出できる計測システムを構築した^{(18),(19),(20),(21)}。このシステムでは、車両速度、エンジン回転数等も同時に測定している。

米国環境保護庁 (EPA : U.S. Environmental Protection Agency) の D. Bruce Harris らは、同様のシステムを用いてさらに O₂ 濃度、CO₂ 濃度、CO 濃度、THC (Total Hydrocarbon) 濃度を計測している⁽²²⁾。

米国 College of Engineering-Center for Environmental Research and Technology (CE-CERT) の Joseph M. Norbeck らの研究⁽²³⁾では、図 1.13 に示すように大型トレーラーに定容量希釈排出ガスサンプリングシステム (以下 CVS 排出ガス計測システムとする。CVS : Constant volume sampler) を搭載し、CO、CO₂、O₂、NO_x、THC、CH₄、PM 排出量を測定している。また、車両動態に加え、全地球方位システム (GPS : Global Positioning System) を用いた車両位置情報の測定も同時に行っている。

堀場製作所の木原らは、NO_x 排出濃度の測定にジルコニア式 NO_x センサを用い、吸入空気量の測定にカルマン式流量計を用いることで小型車にも搭載可能な、コンパクトな車載型計測システムを構築した^{(24),(25)}。また、水素炎イオン化検出法 (FID : Flame Ionization Detector) を用いた THC 排出量の計測や、透過式スモークメータを用いて排出ガスの不透過率の測定により、路上走行における粒子状物質排出量の試算も行っている⁽²⁶⁾。

North Carolina State University の H. Christopher Frey らの研究⁽²⁷⁾では、20 台以上の乗用車に車載型の排出ガス測定システムを装着し、路上走行における NO、HC、CO の測定を行い車両ごとの走行モードと排出ガス質量の関係を求めている。また、沿道における集中的な排出ガス汚染である、いわゆるホットスポットの研究に有効であることを示している。

以上まとめると、従来の車載型排出ガス計測装置を用いた研究は、より実態を反映した台上試験モードの構築や路上における排出ガス実態把握を目的にしたものが中心に行われてきた。

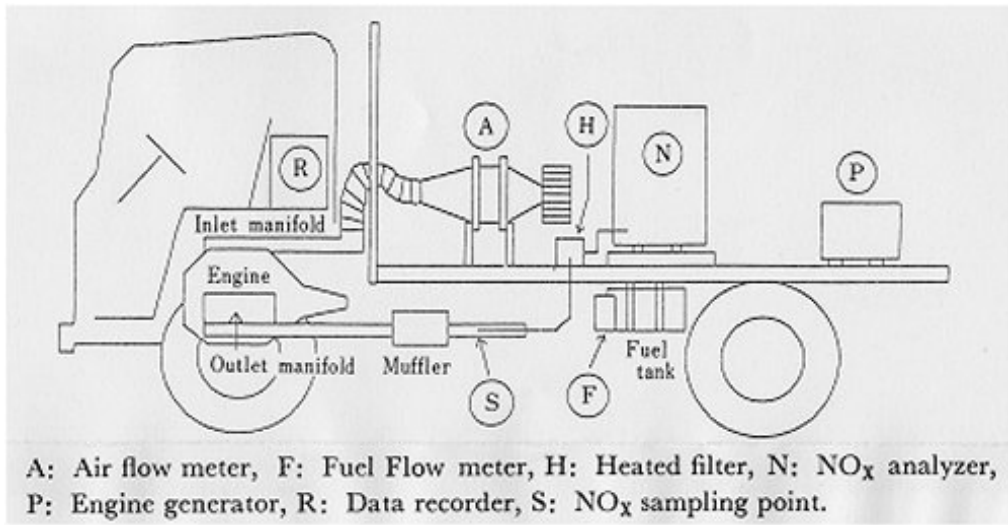


図 1.12 NO_x 分析計，層流式流量計を使用した車載型排ガス計測システム⁽¹⁸⁾

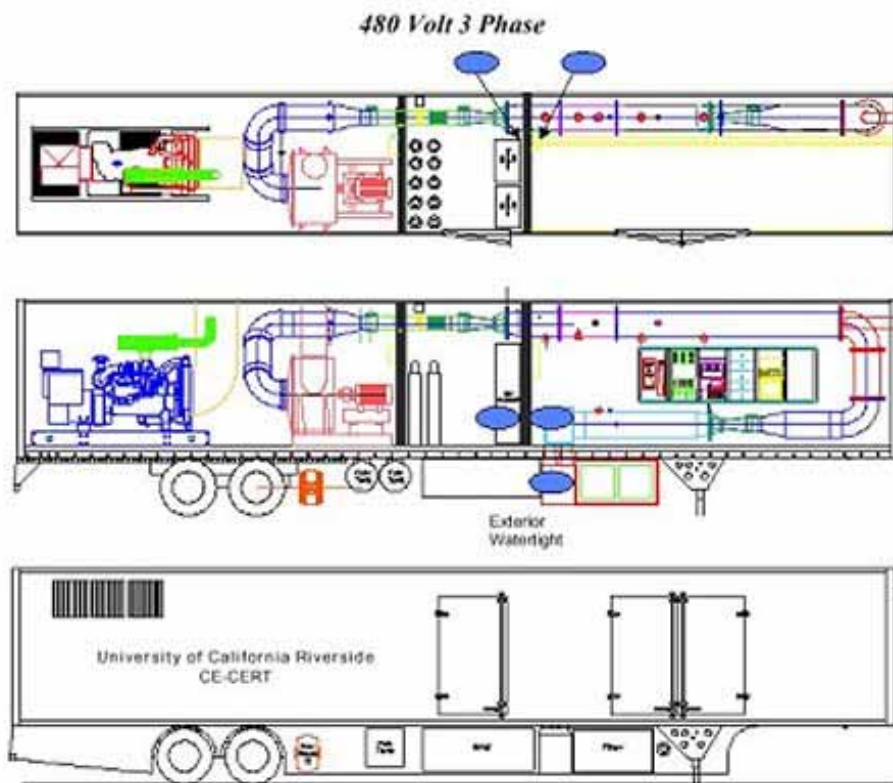


図 1.13 車載型排ガス計測システム（CVS 排出ガス計測システムを使用）⁽²³⁾

1.2.2. モニタリング

環境基準では、NO₂、SPM の一日の平均値はそれぞれ 0.06ppm、0.10mg/m³以下と定められており、沿道の局所汚染状況を把握するために全国に自排局が設置され大気汚染の常時監視が行われている。この計測法は、特定場所の長期間における有害排出ガス量の経時変化を把握するために有効であり、2003 年度で全国 426 箇所の沿道で計測が行われている。

JCAP 大気モデルワーキンググループ⁽²⁸⁾では、図 1.14 に示すように広域都市圏の大気質とともに、都市圏幹線道路沿線の大気質のメカニズム解明および改善方策検討のツール提供のため予測シミュレーションを行っており、モデル検証のための沿道大気観測フィールド実験を実施している。実験は、シミュレーションモデル対象地域にてトレーサガス（六フッ化硫黄）による拡散およびサンプリングにより行っている。

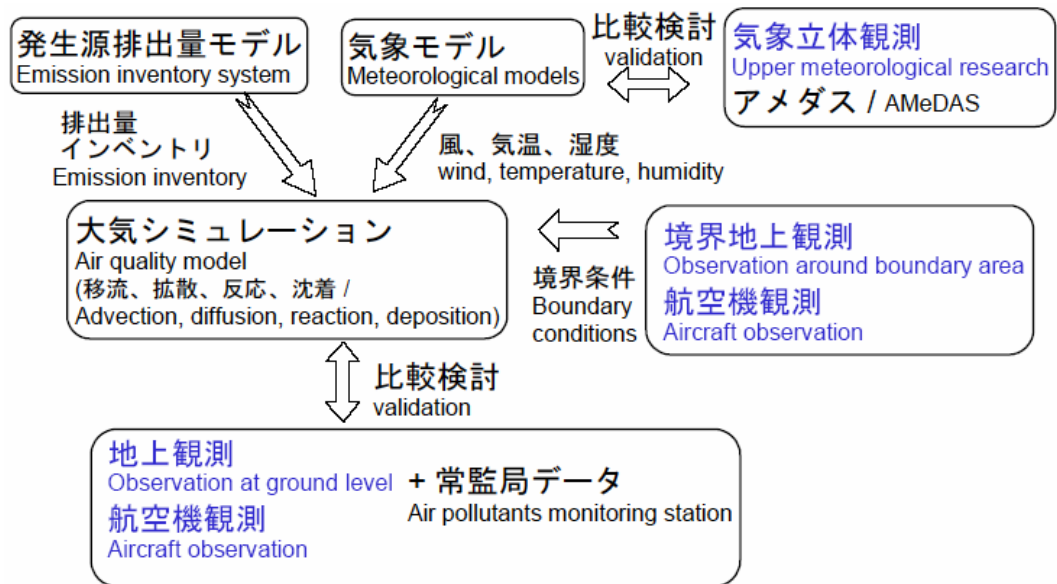


図 1.14 大気シミュレーションと各観測の位置付け⁽²⁸⁾

1.2.3. 大気モデル研究

広域あるいは沿道の大気質生成メカニズム，種々の大気質改善方策を合理的に検討できるツールの提供を目的とし，多くの大気モデル研究が行われている．これまで行われてきた代表的な大気モデル研究の全体概要を図 1.15 に示した⁽²⁹⁾．大きくは，気象モデル，マルチスケール大気質予測モデルおよび沿道大気質予測モデルから成り立っている．これらのモデルの予測精度を向上させるためには実態に近い排出ガスデータを提供することが重要なポイントである．

このうち，特に走行する自動車に関わるモデル研究として，自動車の排出ガス量推計モデル，沿道大気質予測モデルおよび交通流モデルを中心に従来の代表的研究をまとめる．

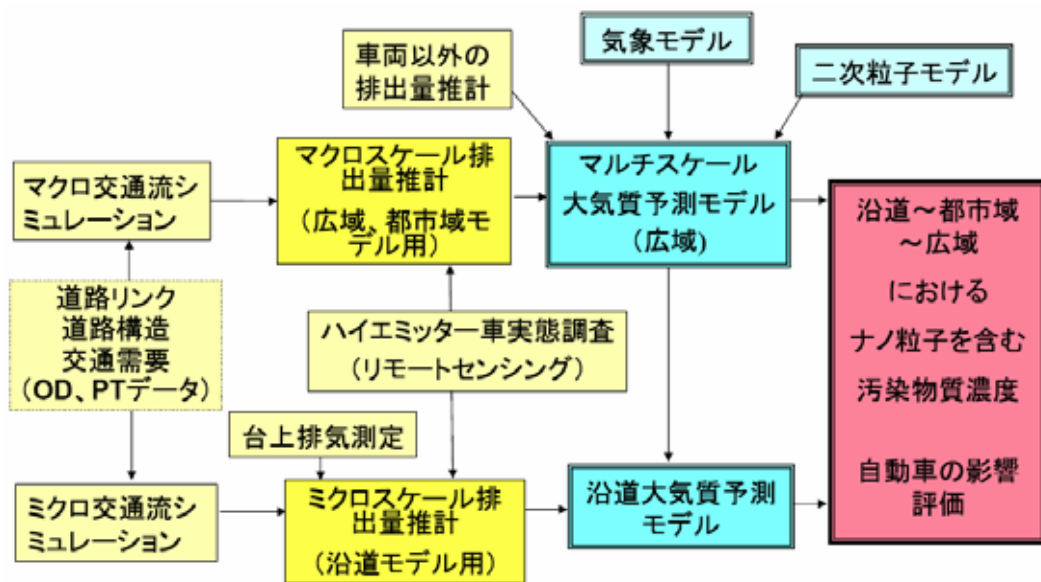


図 1.15 大気モデル研究の全体概要⁽²⁹⁾

(1) 排出ガス質量推計モデル

排出ガス質量を推計し定量的に明らかにすることは，大気汚染の改善を図るための諸対策検討に必要不可欠である．

NO_x 排出量を推計する方法として，車両速度と排出ガス質量の関係を求め，ある車両動態における速度から排出ガス質量を推計することが行われている⁽³⁰⁾．これまで広域汚染の推計に対するニーズが多かったため，この方法は主に排出ガス総量の推計の推定のために用いられてきた．車両速度は，車両の走行により得られる最も代表的かつ簡便な状態変数であり，車種ごとの車両速度に対する代表排出ガス特性を事前に把握しておけば，非常に簡単に走行時の排出ガス質量が推計できる．ただし，車両速度に対する代表排出ガス特性は，車種ごとにシャシダイナモにおける種々のモードの排

1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究

出ガス試験を行い、車両速度と排出ガス質量の関係を事前に把握する必要があり、そのために大きな労力が発生するという欠点がある。

環境庁（当時）は自動車排出ガス原単位および総量に関する検討会を設置（座長：秋元肇 東京大学教授）し、排出原単位（自動車 1 台が 1km 走行するときの排出ガス質量）、自動車 1 台当たり年間排出質量（自動車 1 台の年間の排出ガス質量）、自動車排出ガス総質量（国内全自動車の年間排出ガス総質量）を試算した⁽³⁰⁾。この方法は、車両速度を基本とし排出ガス総質量を推計するものである。具体的には、全国の排出ガス規制対象車について、コールドスタート、登坂走行、エアコン作動状態等を除く通常走行時の排出ガスを想定し、(式 1.1) に示す方法で試算を行った。

$$\begin{aligned}
 \text{自動車排出} &= \text{速度区分別の} \times \text{速度区分別の} \times \text{1台当たりの} \times \text{自動車保有} \\
 \text{ガス総量} &= \text{排出原単位} \times \text{走行割合} \times \text{年間走行量} \times \text{台数} \\
 \text{(t/年)} &= \text{(g/台km)} \times \text{(台)} \times \text{(km/年)} \times \text{(台)} \\
 &= \text{排出原単位} \times \text{1台当たりの} \times \text{自動車保有} \\
 &= \text{(g/台km)} \times \text{年間走行量} \times \text{台数} \\
 &= \text{(g/台km)} \times \text{(km/年)} \times \text{(台)}
 \end{aligned}
 \tag{式 1.1}$$

速度区分別の排出原単位

環境庁、地方自治体および国立試験研究機関が使用過程車を使ってシャシダイナモ試験を行い、約 6,700 の実走行データを基に車種別に推計した。

速度区分別の走行割合

建設省「平成 6 年度道路交通センサス（全国道路交通情勢調査）」と運輸省「自動車輸送統計年報（平成 6 年度分）」を基に車種別に算出した。

1 台当たりの年間走行量

運輸省「自動車輸送統計年報（平成 6 年度分）」に基づき、車種別に設定した。

自動車保有台数

(財)自動車検査登録協会「自検協統計 自動車保有車両数 - No.21 - 平成 6 年 3 月末現在」に基づき、車種別に設定した。

試算結果として以下のことが示された。

- ・普通貨物車（うちディーゼル車 98%）は、保有台数では自動車全体の 4%に過ぎないものの、NOx 排出量では 49%を占めている。
- ・ディーゼル車の保有台数は自動車全体の 18%であるにもかかわらず、NOx 排出量では 75%を占めている。(図 1.1)

(2) 沿道大気予測モデル

慶應義塾大学の川嶋らは、沿道の大気環境および交通量の測定を行い、さらにドイツ PTV 社のミクロ交通シミュレータを用いた沿道 NO_x 量予測を行っている^{(31),(32),(33)}。この交通シミュレータに通過車両台数、車種構成、分岐率、信号制御を設定することで、対象地域全体の NO_x 排出量を算出することができる。なお、気流や拡散の影響は考慮していない。この交通シミュレータを用いて、信号制御の最適化による沿道大気汚染削減の可能性を示した。

九州大学の森野らは、信号交差点から発進する車群先頭車の挙動モデルを基礎に追従車発進挙動モデルを提案している。さらに、NO_x 濃度はエンジン出力と比例関係にあるとして排出ガスモデルを作り、これにエンジン運転状態を組み合わせることにより交差点付近の窒素酸化物濃度分布予測を行っている⁽³⁴⁾。

筑波大学の金山らは、個別車両の速度・加速度の挙動とそれに対応した排出ガス原単位から 1 秒単位の排出ガス量を算出し、対象区間・対象時間に通行する車両の排出量を総和することで沿道局所における環境負荷を推計している⁽³⁵⁾。

(財)石油産業活性化センターの小林らは、2002 年より 5 ヶ年計画で実施されている JCAP において、大気質予測モデル、自動車排出量推計モデル、気象予測モデル、自動車以外の排出量データ、気象データをもとに、大気環境の予測を行うモデルの開発を行っている^{(36),(37),(38),(39),(40)}。予測対象の範囲により、都市域大気への予測を行う「広域モデル」と、沿道における排気排出量の分布を推計するための「沿道モデル」に分類できる。「沿道モデル」では、図 1.15 に示すように、リアルワールドでの排出量推計の精度向上のため、オンボード計測によるミクロ排出量モデルの構築を行い、さらにリモートセンシング装置による高汚染車の実態調査なども進めている。

JCAP では更なる精度向上を目的として、車両加速度を加味した検討が行われている。車両加速度は、車両速度を時間で微分したものであり、基本的には車両からあらたな情報を取り出す必要がないので、排出ガス推計精度を効率的に向上させることができる。図 1.16 に示すように、加速度を考慮した過渡排出マップを用いて、排出ガス総質量の推計を行っている。過渡排出ガスマップは、シャシダイナモ上にてエンジン過渡排出ガス試験を行い求めている。

研究の結果、沿道におけるホットスポットにおいては、直近道路からの排出の寄与が大きいことを示している⁽²⁹⁾。

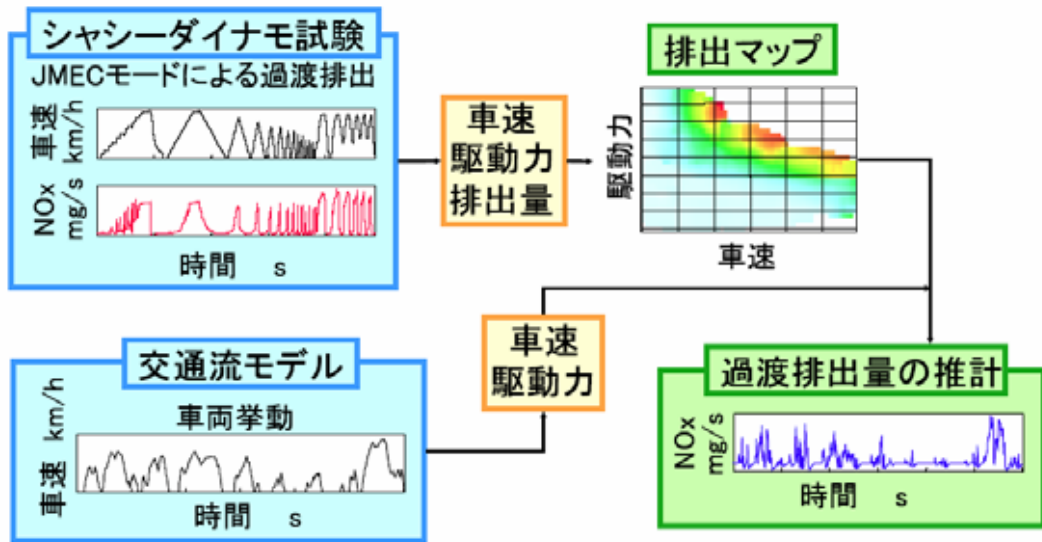


図 1.16 JCAP モデルの過渡排出質量推計手法⁽²⁹⁾

その他の方法として、吉田らは大型ディーゼル車のNOx排出量の予測を目的とし、大型ディーゼル車のシャシダイナモ排出ガス試験より、NOx排出量予測式の作成を行っている。NOx排出係数は燃料消費量と相関が大きいことを見出し、車両速度および燃料消費率の関数を導き、NOx排出量を求めている⁽¹⁷⁾。

また、走行する自動車の排出ガス量を算出する方法として、エンジンの出力と排出ガス量の関係式を求める手法がある。

早稲田大学の本田らは交差点を例に渋滞状況と排出ガス量の関係性を求めている。まず、交差点を通過する車両の速度と加速度から走行抵抗を算出し、その走行抵抗と速度から出力を求める。次にシャシダイナモ上における排出ガスモード試験時の単位時間当たりのNOx排出量と出力の関係式を近似して排出ガス量を求めている⁽⁴¹⁾。

これらの予測モデルは、広域汚染および沿道汚染を精度良く再現させ、種々の対策を効率的に提案するためのツールとすることが目的である。精度良いシミュレーションの構築のため、広域汚染あるいは沿道局所汚染実態を簡便かつ高精度に計測し、データ提供することが重要である。

(3) 交通流モデル

交通流の円滑化によって、燃料消費率の改善および排出ガス量低減を試みる研究が行われている。

日産自動車の大口らは、図 1.17 に示すように走行パターンを「ある停止状態から発進して走行を開始する時点から次に停止して再度発進するまで」に分割し、これをショートトリップ(ST)とした。さらに、ST の中で走行開始から停止までの平均速度を走行速度、走行開始から再度発進するまでの平均速度を旅行速度と定義した。

そして、自動車の燃料消費と道路交通環境の関係を分析し、実用燃費を規定する要因は停止時間、走行速度、車速変動という3つの要素であることを明らかにし、実用燃費をモデル化した^{(42),(43),(44),(45)}。さらに、このモデルを交通流シミュレーションと組み合わせることで、新規道路建設、信号制御改善、交通規制実施等の施策による燃料消費改善効果を検証している^{(46),(47)}。

このモデル研究は、自動車の走行動態を精度良く予測するためのパラメータに関するものである。

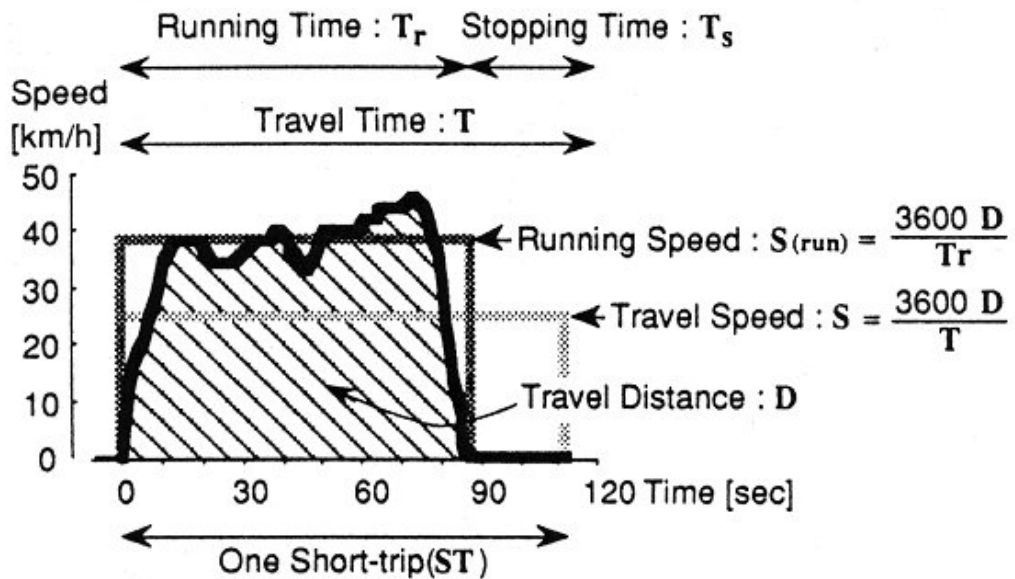


図 1.17 ショートトリップ，走行速度，旅行速度の定義⁽⁴²⁾

1.2. 沿道における自動車排出ガス削減に関わる従来の研究

日本大学の景山らは、交通事故解析や ITS 評価を目的とした交通流解析を行うために、道路環境、車両の運動特性、ドライバ特性、車両相互間の運動を考慮したトラフィックシミュレータを開発した^{(48),(49),(50)}。車両モデルには前後方向運動、横方向運動、ヨーイング運動の3自由度平面を考慮した2輪モデルを利用し、ドライバモデルとして危険感モデルを利用した。危険感モデルとは、ドライバが車両を運転する際に道路の端、カーブの曲率、他車両や障害物から受ける危険感を用いて、目標コースの決定や各操作量を決める運転モデルである。具体的には、道路環境下に存在する危険感を重ね合わせたとき、その値が最小となる位置を目標コースとし、操舵量を決定している(図 1.18)。さらに、各地点の危険感と許容値の差からアクセルおよびブレーキ操作量を決定する。

このモデル研究は、自動車からの排出ガスによる沿道局所汚染の解明を目的としたものではないが、走行する自動車の運動を精度良く予測するための研究であり、走行動態要因にまで踏み込むものである。このような交通流モデルに対して沿道排出ガス汚染の要因を考慮した排出ガスパラメータを組み合わせたモデルの構築が望まれる。

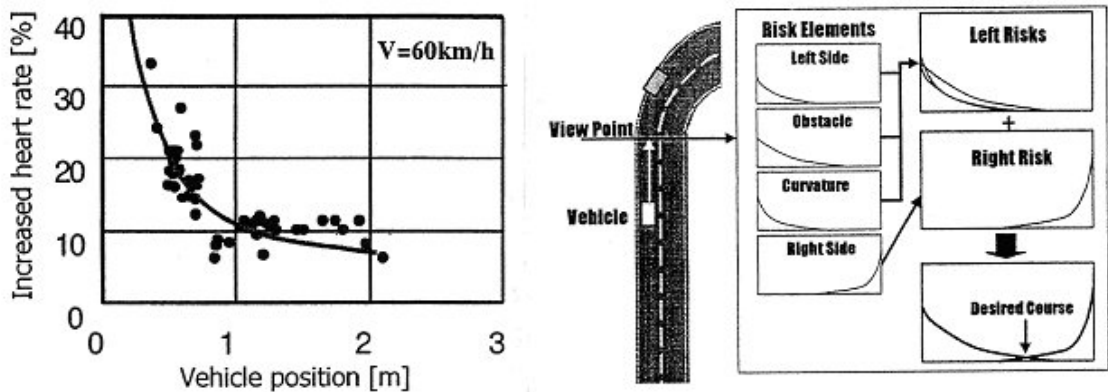


図 1.18 危険感を用いたドライバモデル⁽⁴⁹⁾

1.3. 本研究の位置付け

自動車排出ガス汚染低減のため、発生源対策、交通量および交通流対策などの排出ガス総量削減施策が行なわれているが、都市域における自動車排出ガスによる沿道局所汚染は依然深刻な状況にある。排出ガス総量削減対策に加え、沿道局所におけるホットスポットと呼ばれる集中的な自動車排出ガス汚染を削減することが喫緊の課題である。

ある沿道局所における排出ガス量は、通過する車両の排出ガス属性（車両固有の排出ガス特性）通過時の運転状況に起因する排出ガス質量および時間当たりの車両台数等に大きく影響を受ける。そのため、ホットスポットは通過する個々の車両の排出ガス質量の積分の結果生じることになる。従って、沿道におけるNO_x局所汚染を評価するためには、まず1台の自動車の沿道局所汚染メカニズムを明らかにする必要がある。

道路交通システムは、道路インフラ（道路構造、信号、交通標識など）、自動車および道路使用者（自動車、自転車などの運転者および歩行者）の要素から構成されており、典型的な環境 - 機械 - 人間系の一つである。

自動車の運転者は時々刻々変化する道路インフラ、交通状況等の情報を自ら知覚、処理、判断し、自動車の運転を行う。それによりエンジンから走行に必要な所定の動力が出力され、運転者の意図に沿った走行が行なわれるとともに、結果として路上に種々の有害ガスが排出される。従って、1台の自動車が路上に有害ガスを排出する要因には、道路インフラ、交通状況等の運転者の運転操作に影響を与える情報およびそれらの情報に基づく運転者の運転操作、さらに車両およびエンジン仕様等に関わる排出ガス性能レベルが深く関わり合っている。沿道局所における排出ガス汚染のメカニズムを解明するためには、道路インフラ、交通状況等の要因および運転者の運転操作に関する情報を把握しつつ、車両動態、エンジン挙動および排出ガス質量を同時に計測、分析することが必要である。

昨今、路上における自動車排出ガス質量計測に関する研究は緒につき始めたが、大型、高価なシャシダイナモ試験を補完する排出ガス試験法の開発、沿道における排出実態把握および自動車排出ガスモデルによる排出量推計が主な目的であり、道路インフラ、交通状況等の要因、運転者の運転操作に関する要因を路上で計測し、車両動態、エンジン挙動および排出ガス質量との関係性を評価、解析した例は少ない。従って、本研究では路上において走行する個々の自動車からの排出ガスの実態を調査することにより、沿道局所における排出ガス汚染の解析を行う。

1.4. 本研究の目的

沿道局所排出ガス汚染の解明のためには、個々の自動車の沿道局所汚染メカニズムを明らかにする必要がある。1 台の車両が走行したときの、道路インフラ、交通状況等の情報、それらの情報に基づく運転者の運転操作、ならびに車両動態、エンジン挙動および有害排出ガス質量を同時に評価することが必要である。そのため、本研究では沿道局所汚染に影響する情報が測定可能な車載型排出ガス計測システムを構築し、そのシステムを搭載したディーゼル自動車でも路上走行試験を行う。有害排出ガスとして、NO_x に注目する。

沿道のどのような場所に何が原因で集中的な NO_x 汚染が発生するか排出ガス対策世代の異なる二台の自動車で、それぞれの車両が使用されている状況下における排出ガス質量を実態調査することにより、走行する自動車による沿道への集中的な NO_x 汚染の要因を解析する。以上から、道路管理者、自動車製造者および運転者に対する沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案を行うことを目的とする。

1.5. 研究計画

本研究では、道路インフラ、交通状況等の情報、運転者の運転操作、車両動態、エンジン挙動ならびに NO_x 排出質量および CO₂ 排出質量を同時に測定できる車載型排出ガス計測システムを構築し、ディーゼル自動車に装着する。シャシダイナモ上において車載型排出ガス計測システムにおける排出ガス計測の精度を検証する。

次に、排出ガス対策世代の異なる二台の自動車に車載型排出ガス計測システムを搭載し、それぞれの車両が使われている状況における路上走行実験を行い、沿道局所 NO_x 汚染の実態を調査する。

道路インフラ、交通状況等の要因ならびに車両動態およびエンジン挙動の観点で、それぞれの走行条件における沿道の集中的な NO_x 汚染に影響する要因を解析する。以上から、道路管理者、自動車製造者および運転者に対する沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案を行う。研究計画のフローを図 1.19 に示した。

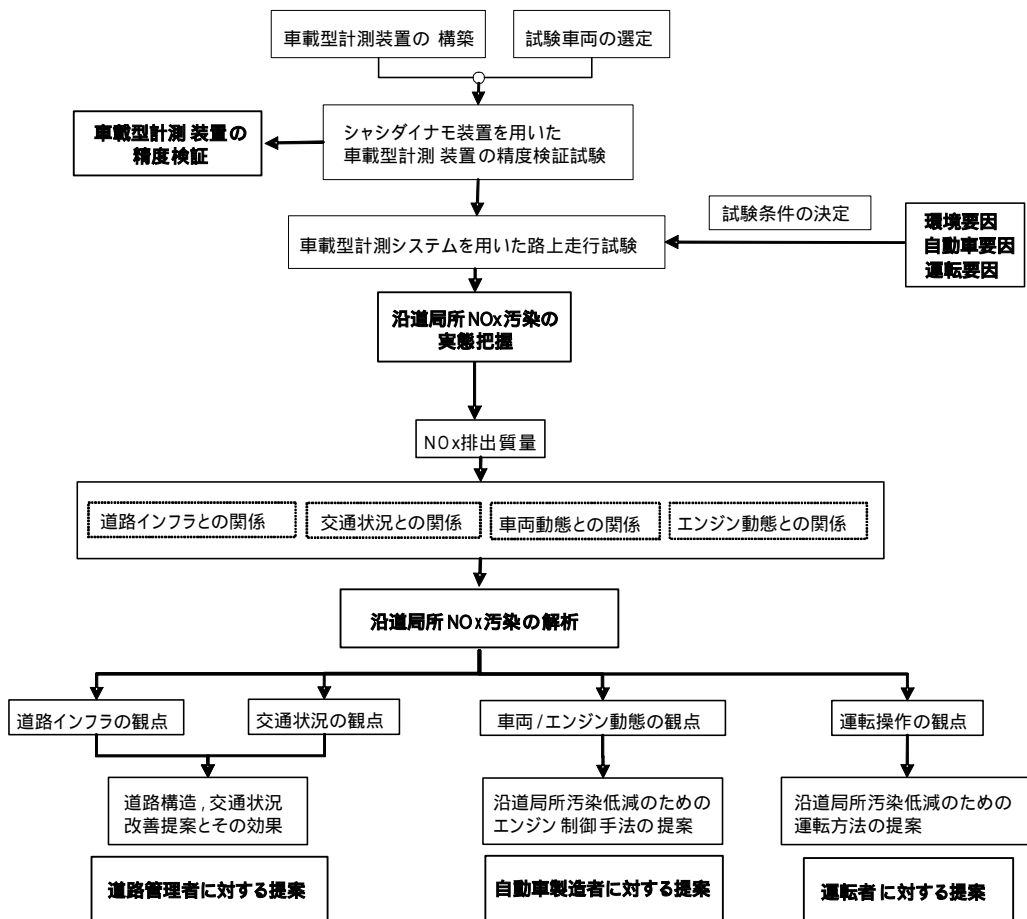


図 1.19 研究計画のフロー

1.6. 本論文の構成

本論文の構成と各章の概要を以下に示す。

第1章 緒論

本研究の社会的な背景となる自動車交通に起因する排出ガス汚染の現状，特に沿道局所汚染が喫緊の課題であることを示す．主要な排出ガス対策手法の体系および自動車の排出ガス規制の経緯をまとめ，重要な大気汚染物質であり，本研究で対象とする排出ガスである窒素酸化物について説明する．次に，他の研究者が行ってきた研究のうち，本研究と深く結びついている沿道における自動車排出ガス汚染改善に関係するものを計測，モニタリング，大気モデル研究の三つに分類して説明する．

最後に本研究の位置付けを説明し，目的を述べこの目的を達成するために立てた研究計画のフローを示す．

第2章 車載型排出ガス計測装置の開発

本章では，車載型排出ガス装置開発のねらい，装置の構成，排出ガス質量算出手法および実験に用いた EGR システム付き小型貨物自動車および EGR システム無し小型バスの仕様について述べる．

次にシャシダイナモ上にて実施した車載型排出ガス計測装置の精度検証試験の結果をまとめる．

第3章 走行自動車による沿道局所 NO_x 汚染の実態

運転者と NO_x 排出質量の関係を調査する．

次に，第2世代の排出ガス対策技術を持った小型貨物自動車および第1世代の排出ガス対策技術を持った小型バスに関する市街路走行試験の実験結果を述べる．沿道局所への集中的な NO_x 汚染が発生した走行における VTR 画像から解析した道路インフラ，交通状況およびその時の車両動態を解析し，その発生実態をまとめる．

第4章 沿道局所 NO_x 汚染の解析

小型貨物自動車および小型バスについて，沿道局所 NO_x 汚染が発生する代表的な走行パターンにおける，車両速度に対する NO_x 排出係数履歴およびエンジン NO_x マップ上での運転履歴を調べ，それぞれの自動車の沿道局所における NO_x の集中的な汚染の原因を解明する．特に EGR 付き小型貨物自動車の過渡状態と定常状態における排出ガス質量の差およびその原因について明らかにする．

第5章 沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案

本研究で得られた知見から，道路管理者，自動車製造者および運転者に対する沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案を行う．

道路管理者に対しては，道路構造，交通状況の観点での対策を示す．

自動車製造者に対しては，EGR の活用および EGR 率を適正に保つエンジン設計等の必要性について述べる．

運転者に対しては，沿道局所への集中的な NO_x 汚染を少なくするための運転方法を示す．

第6章 結 論

本研究で得られた知見をまとめる．

第 2 章 車載型排出ガス計測装置の開発

本章では、車載型排出ガス計測装置開発のねらい、装置の構成および自動車への装着状況、排出ガス算出式ならびに実験に用いた EGR システム付き小型貨物自動車および EGR システム無し小型バスの仕様について述べる。

次にシャシダイナモ上にて実施した車載型排出ガス計測装置の精度検証試験の結果をまとめる。

2.1. 開発のねらい

路上走行する自動車からの排出ガス質量は、時々刻々変化する道路インフラ、交通状況等の情報およびそれらの情報に基づく運転者の運転操作、さらに車両およびエンジン仕様等に関わる排出ガス性能レベルが深く関わり合っている。従って、走行する自動車による沿道局所 NO_x 汚染を解析するためには、これらの情報ならびに自動車の走行動態、NO_x 排出質量を時々刻々計測する必要がある。

自動車による大気汚染低減研究の一環として、自動車排出ガス質量評価を目的として車載型装置による排出ガス計測の試みが行なわれてきたが、これまで開発された車載型排出ガス計測装置は特殊、大型、高価で複雑なものが多かった。本研究においては複数の車両に装着することから、簡便かつ汎用性があり、路上走行における沿道局所 NO_x 汚染に与える要因を精度よく計測できるものが必要である。

本研究の目的を達成するため、車載型排出ガス計測システム開発のねらいを以下のように設定した。

- (1) 道路インフラ、交通状況等の情報、それらの情報に基づく運転者の運転操作、ならびに車両動態、エンジン挙動、NO_x 排出質量および CO₂ 排出質量を同時に測定できること
- (2) 沿道局所排出ガス質量の測定が可能であること(単位距離あたりの排出ガス質量の計測が可能であること)
- (3) 路上走行時の過渡現象の評価が可能な応答性を有すること
- (4) 様々な車種への容易な取り付けを可能とするために、脱着が簡便で小型、軽量であること

以下に、本研究において構築、使用した車載型排出ガス計測システムの構成および計測方法について述べる。

2.2. 主要計測装置構成

本研究の目的を達成するためには、沿道局所 NOx 汚染の要因ごとの知見を得る必要がある。そのため、車載型排出ガス計測装置では、GPS による走行中の車両の地図上位置、大気圧計測による高度、VTR による道路インフラ、交通状況、運転操作、走行動態、エンジン挙動ならびに単位距離あたり NOx、CO₂ 排出質量 (g/km) 等の沿道局所汚染に影響する各要因の測定が可能であることとし、0.5 秒ごとの計測を行った。詳細な計測あるいは算出項目を表 2.1 に示す。

表 2.1 計測項目 数字：計測項目 その他：算出項目

項目		計測あるいは評価項目	単位
環境要因	大気状態	大気温度 大気圧力	K %
	道路インフラ 交通状況	VTR (信号, 幅員, 標識など) VTR (混合交通状況, 障害物, 車間距離など)	Pa
運転要因	運転操作	運転者視野 (VTR) ステアリング操作 (VTR) ギヤポジション ブレーキ操作 (ブレーキ ON/OFF) アクセル操作 (アクセル位置)	mm
	運転ルート	GPS 車両位置	N, W
走行動態	車両動態	走行経過時間	s
		走行距離	m
		車両速度	m/s
	エンジン挙動	車両加速度	m/s ²
		GPS 車両位置	N, W
		エンジン回転数	rpm
		吸気温度	K
		吸気湿度	%
		吸気圧力	kPa
		吸入空気量	m ³ /s
		燃料消費量	g/s
		EGR 率	%
		エンジントルク	N-m
	冷却水温度	K	
	排出ガス質量	エアコン ON/OFF	
		NOx 排出濃度	ppm
		単位時間当たり NOx 排出質量	g/s
		単位距離あたり NOx 排出質量	g/km
		O ₂ 濃度	ppm
単位時間当たり CO ₂ 排出質量		g/s	
単位距離あたり CO ₂ 排出質量	g/km		

注) 数字は、図 2.1 のセンサ等の位置番号と同じである

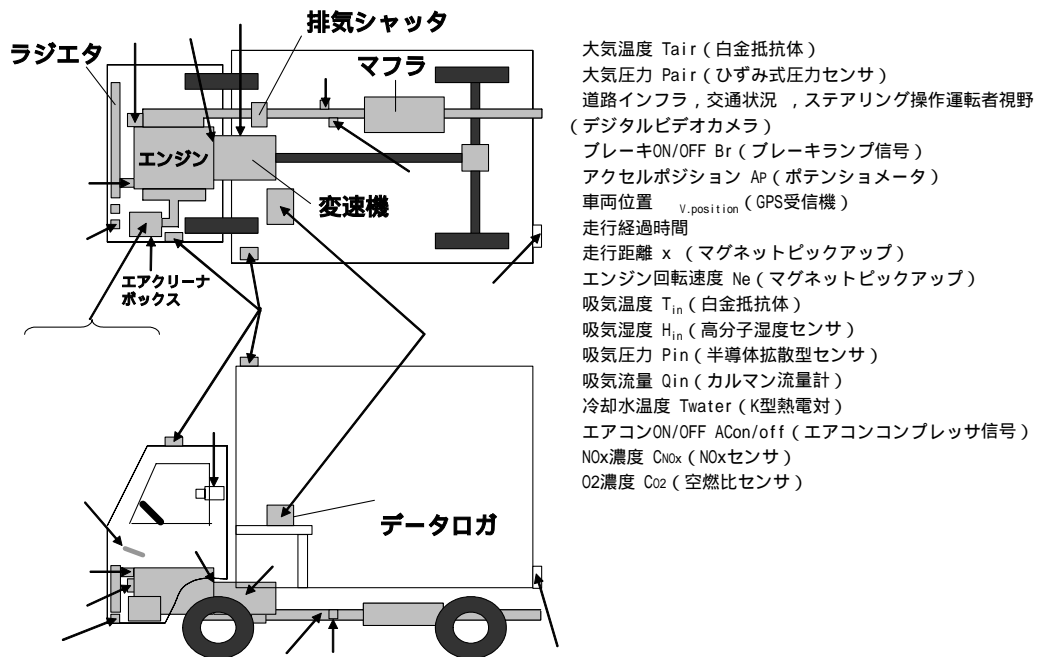


図 2.1 車載型排出ガス計測システム構成

各センサは、図 2.1 に示す車両位置に取り付けた。

本研究における車載型排出ガス計測装置の中において、排出ガス計測は沿道への排出ガス質量を評価するため非常に重要である。そのための主要計測項目は、車両速度、排出ガス質量流量（吸気量+燃料流量）および NO_x 濃度である。

NO_x 濃度、 O_2 濃度、吸入空気量および車両速度は、電圧で出力され時々刻々計測システムに送られる。計測システムは 0.1 秒ごとの測定が可能であるが、本研究ではデータロガの記憶容量を考慮して計測間隔 t は 0.5 秒に設定した。

車両速度は、スピードメータドリブンギヤからのパルス信号（車両のスピードメータと共用）を FV コンバータにより電圧に変換して計測した。

排出ガス質量流量の測定は、一般的には CVS 装置が用いられているが、装置が大型化する欠点があり、車両に容易に装着することが困難である。車載装置による排出ガス質量計測としてマスフローメータによる直接測定法が試みられているが、過去の研究例では排気管径の約 10 倍程度のストレート部分が必要となり、実車搭載に関して大きな障害となる^{(51),(52),(53)}。そのため本研究では、吸気流量および排出ガス中の O_2 濃度から計算した燃料流量の和を総排出ガス質量とし、別途計測した NO_x 濃度から NO_x 排出質量流量を求める方法を採用した⁽⁵⁴⁾。排出ガス質量流量は、排出ガス体積

流量を算出し排出ガスの温度、圧力による補正を行うことで質量換算した吸気量は、小型軽量でエンジンルーム内のエアクリーナ内部に装着可能なカルマン流量計を用いて計測した。

NO_x濃度はジルコニア型 NO_x センサ、燃料流量計算に用いる空燃比算出のための O₂濃度はジルコニア型 O₂ センサを用いて計測した。

計測に用いた主要センサの計測誤差を表 2.2 に示したが、それぞれのセンサの単体誤差は、実用範囲で最大約 5%以内である。

表 2.2 主要センサの計測誤差

	Vehicle speed V / km/h	NO _x C _{NOx} ppm	Intake air flow Q _{in} m ³ /s	Excess air ratio
Measurement accuracy	± 3.0 %	100ppm: ± 23% 500ppm: ± 5.5% 1000ppm: ± 2.9%	± 2.9%	Within ± 3.3%
Response time	Negligible	0.5 s	0.04 s	0.05 s

図 2.2 ジルコニア型 NO_x センサ (左) およびジルコニア型 O₂ センサ (右)

図 2.3 NOx センサおよび O₂ センサ取り付け状況

図 2.4 カルマン流量計およびエアクリーナ内取り付け状況

図 2.2 にジルコニア型 NO_x センサ，ジルコニア型 O₂ センサを示す．

これらのセンサを排気管に取り付けた．図 2.3 は車台下から見たセンサ取り付け状況である．センサの取り付けは非常にシンプルである．図 2.4 にカルマン流量計およびその取り付け状況を示す．カルマン流量計は，可能な限りエンジンの近くに取り付けるためエアクリーナボックス内とした．

本車載型排出ガス計測装置は，中華人民共和国北京市における小型バスの路上排出ガス試験にも用いた．小型であるため図 2.5 に示すように持ち運びが容易である．

このように，本車載型排出ガス計測装置は種々の自動車へ容易に搭載が可能であり，路上走行での排出ガス計測が簡単にできる．



図 2.5 主要計測装置は三つのケースで北京市へ移動



図 2.6 北京市清華大学における小型バスへの装置取り付けの風景

2.3. NOx および CO₂ 排出質量算出方法

車載型排出ガス計測システムにおける NOx 排出質量算出方法および沿道局所 NOx 汚染の定量化手法の概要を図 2.7 および 2.8 に示した。

ジルコニアセンサからの O₂ 濃度 (C_{O_2}) より算出した燃料消費量 (B_t) とカルマン流量計で測定した吸入空気量 (Q_{in}) との和を排出ガス質量流量 (Q_{ex}) とした。これにジルコニアセンサから測定した NOx 濃度 (C_{NO_x}) を乗じることで、単位時間当たりの NOx 排出質量 ($E_{NO_x,t}$) を求めた。

沿道局所 NOx 汚染の評価は、単位距離当たりの NOx 排出質量 ($E_{NO_x,x}$) で行った。 $E_{NO_x,x}$ は、単位時間当たりの NOx 排出質量 ($E_{NO_x,t}$) を車両速度 (V) で除したものである。

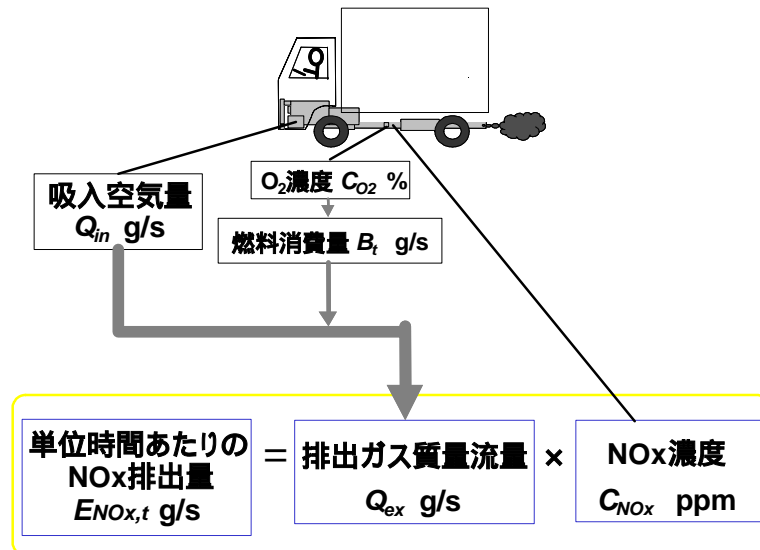


図 2.7 車載型計測システムの算出原理

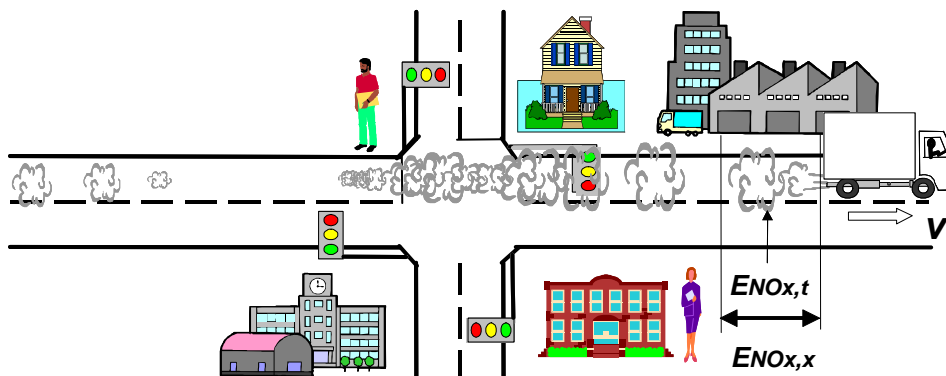


図 2.8 沿道局所 NOx 汚染の評価手法

以下に、車載型排出ガス計測装置における NOx および CO₂ 排出質量計測の基本式を説明する。

ある時間 t における単位時間あたりの NOx 排出質量は、(式 2-1)に示すように排出ガス体積流量にジルコニアセンサで計測した NOx 体積濃度を乗じ、さらの NO₂ 分子量を乗じて求めた。ディーゼルエンジンからの窒素酸化物は、運転条件によっても異なるが多く（7～9割程度）は NO で排出される。残りの 1～3割程度が NO₂ である。人体に対し直接的に害を及ぼすのは NO₂ であり、沿道局所汚染の評価からは NO₂ の排出質量の評価が妥当であるが、排出ガス中の NO と NO₂ の割合は大きくは変わらないことから、本研究では、ジルコニアセンサにより NO と NO₂ の濃度の和を計測し、それを NO₂ 濃度とみなし、この計算式で得られた数値を NOx 排出質量とする。

排出ガス体積流量は、(式 2-2)に示す吸気体積流量と排出ガス中の O₂ 濃度から計算した燃料流量の和により求めた。吸気流量の計測は、カルマン流量計を用いた。この吸気流量を、同時に測定した吸気温度、湿度および流量計内圧力を用いて乾燥重量に換算し、さらに空気過剰率測定値と理論空燃比から(式 2-3)に示すとおり燃料質量流量を算出することができる。以上の(式 2-1)～(式 2-3)から時間当たりの NOx 排出質量を求めた。距離あたりの NOx 排出質量は、(式 2-4)に示したように、時間当たりの NOx 排出質量を車両速度で除して求めた。

$$E_{NOx,t} = Q_{ex,t} \times C_{NOx,t} \times 10^{-6} \times \frac{273.15}{293.15} \times M_{NO2} \quad (\text{式 2-1})$$

$$Q_{ex,t} = Q_{inair,t} + 0.749 \times Bt \quad (\text{式 2-2})$$

$$Bt = \frac{Q_{inairdry,t} \times \rho_{air}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoich}} \times \frac{1}{\lambda} \quad (\text{式 2-3})$$

$$E_{NOx,x} = E_{NOx,t} \times \frac{1}{V} \quad (\text{式 2-4})$$

(式 2-1)から(式 2-4)で用いた記号の意味を以下に示す。

$E_{NOx,t}$:	g/s	時間当たりの NOx 排出質量
$Q_{ex,t}$:	m ³ /s	排出ガス体積流量
$C_{NOx,t}$:	ppm	NOx 体積濃度
M_{NO2} :	g/mol	NO ₂ 分子量
$Q_{inair,t}$:	m ³ /s	吸気体積流量 (273K, 1 気圧)
Bt :	g/s	燃料質量流量
$Q_{inairdry,t}$:	m ³ /s	乾燥吸気体積流量 (273K, 1 気圧)
ρ_{air} :	g/m ³	乾燥空気密度 (273K, 1 気圧)

2.3. NOx および CO₂ 排出質量算出方法

$(A/F)_{stoich}$:	-	理論空燃比
λ :	-	空気過剰率
$E_{NOx, x}$:	g/m	距離あたりのNOx 排出質量 ($v=0$ のときは停車時の積算量とする)
V :	m/s	車両速度
燃料消費質量から発生ガス (体積) への換算係数 : 0.749 m ³ /kg		

次に CO₂ 排出質量の算出方法について説明する .

燃料の水素/炭素比を 1.82 とし ,燃料が完全燃焼するとして計算した燃料単位質量あたりの CO₂ 排出質量 (CO₂ 排出原単位) を燃料消費量に乗じて , 単位時間当たりの CO₂ 排出質量を算出した . 単位距離あたりの CO₂ 排出質量は , 単位時間当たりの CO₂ 排出量に車両滞在時間に乗じて求めることができる .

$$E_{CO_2, x} = \frac{E_{CO_2, t}}{V} \quad (\text{式 2-5})$$

$$E_{CO_2, t} = B_t \times EF_{CO_2} \quad (\text{式 2-6})$$

(式 2-5)および(式 2-6)で用いた記号の意味を以下に示す .

$E_{CO_2, t}$:	g/s	単位時間当たりの CO ₂ 排出質量
$E_{CO_2, x}$:	g/m	単位距離当たりの CO ₂ 排出質量
EF_{CO_2} :	g-CO ₂ /g-fuel	CO ₂ 排出原単位 3.161

2.4. 本研究における供試車両

ディーゼル車が98%を占める普通貨物自動車は、保有台数では自動車全体の4%に過ぎないものの総NO_x排出質量では49%に達するといわれている。大都市においては多頻度小口配送需要が増大しており、貨物自動車からの有害排出ガスは大気汚染の大きな原因の一つとなっている。そこで、本研究では、国内の最大積載量別走行台数の32%を占める2トンクラスのディーゼル貨物自動車の中から、シェアのもっとも大きいいすゞELFを試験車両として選定した。この車両は1.1.2で述べた第2世代の排出ガス対策技術を持った車両であり、EGRシステムが装着されている。さらに車両の排出ガス対策世代の違いと沿道局所NO_x汚染の関係を調査するためEGRシステムの装着されていない小型バス一台を選定した。この車両は、第1世代に相当する車両である。ここでは、これらの供試車両の仕様を述べる。

2.4.1. いすゞ自動車製小型貨物自動車

都市内配送に用いられる1998年排出ガス規制（平成9年長期規制）適合の小型貨物自動車1台を国内における典型的な市街路における沿道局所NO_x汚染を調べるための試験自動車として選定した。この車両は、最高出力81kWの直列4気筒無過給直噴OHCディーゼルエンジンが搭載されている小型貨物自動車である。車両初度登録年月は2000年3月で、本研究開始時の積算走行距離は約5,000kmである。本研究においてはこの試験車両を“車両1”とする。車両1の概観を図2.9、主要諸元を表2.3に示す。



図 2.9 車両1 概観

ディーゼル車の排出ガス規制は今後非常に厳しくなることが予定されており、その有効な対策の一つとして EGR の採用が必須になるものと考えられる。

この車両には排出ガス対策のため図 2.10 に示す EGR 装置が装着されている。排出ガスは排気管から EGR バルブを介して吸気に戻る。排出ガス圧力の低い低負荷における EGR 率を高めるために吸気シャッタが取り付けられている。EGR バルブおよび吸気シャッタの開閉は、エンジンコントロールモジュール (ECM) に入力された EGR バルブ位置、吸気シャッタ位置、アクセル位置、エンジン回転数およびエンジン冷却水信号により制御される。

本論文における EGR 率は以下のように定義して算出した。

エンジン冷機状態では EGR は作動しないので、冷機状態における吸入空気量を EGR 無しの吸入空気量とし、エンジン回転数との相関式を作成した。相関式から得られた EGR 無しの吸入空気量と EGR 時の吸入空気流量との差を EGR 無しの吸入空気量で除し EGR 率として定義した。

$$EGR \text{ 率} = (Q_0 - Q_{EGR}) / Q_0 \times 100 \text{ (\%)} \quad (\text{式 2-7})$$

Q_0 : EGR 制御が無い時のあるエンジン回転数における吸気量 (m³/s)

Q_{EGR} : EGR 制御が行われている時のあるエンジン回転数における吸気量 (m³/s)

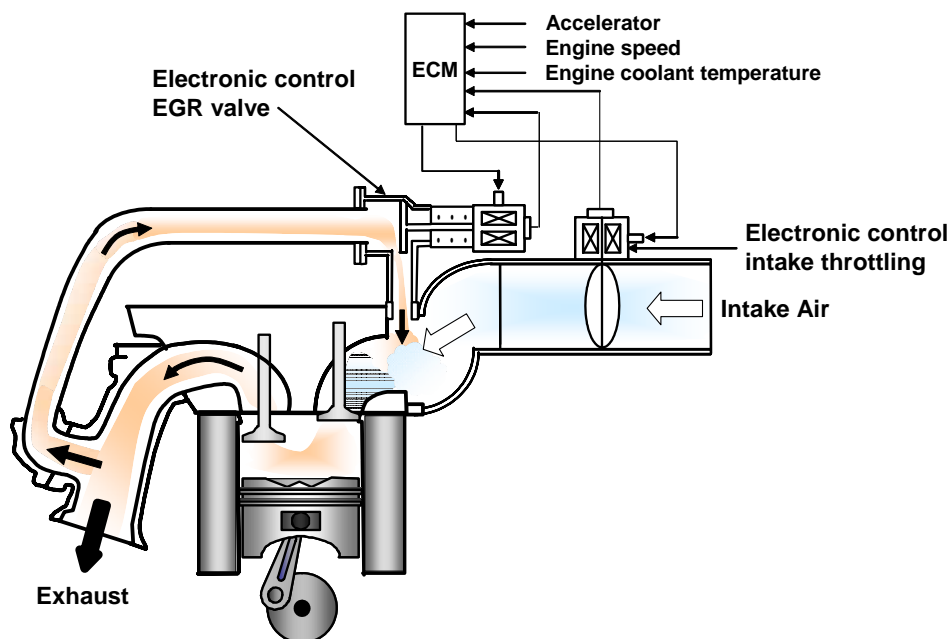


図 2.10 車両 1 の EGR システム

2.4.2. 南京自動車製小型バス

第1世代のディーゼル自動車では EGR による排出ガス対策は行われていない。このような自動車の沿道局所 NO_x 汚染の実態を調べるため、中華人民共和国で使われている南京自動車の10人乗り小型バス(IVECO 社製車両のライセンス生産)を選定した。実際に使われている状況で沿道局所 NO_x 汚染の実態を明らかにするために、この車両では北京市街において沿道局所 NO_x 汚染の調査を行った。本試験車両を“車両2”とする。この車両は、1992年にヨーロッパで導入されたディーゼル大型車の排出ガス規制であるユーロ 規制前の EEC 規制に対応した車両で、77kW の最高出力を持つ直噴ターボ OHC ディーゼルエンジンを搭載した小型バスである。EGR 装置は装着されていない。車両初度登録年月は1997年9月で、試験開始時の積算走行距離は約45,000kmである。

車両2の概観を図2.11に、主要諸元を表2.3に示す。



図 2.11 車両2 概観

表 2.3 試験車両諸元

試験車両		車両 1	車両 2
製造メーカー		いすゞ	南京自動車
登録		2000年3月	1997年9月
車両タイプ		バンタイプ 小型貨物自動車	10人乗り小型バス
全長 mm		4,990	4,850
全幅 mm		1,880	2,000
全高 mm		2,940	2,525
車両重量		2,510	2,250
最大積載量 kg		2,000	750
車両総重量 kg		4,675	3,000
乗車定員 人		3	10
Cd 値		0.59	0.54
前面投影面積 m ²		5.4	4.9
タイヤ半径 mm		320	324
トランスミッション形式		5MT	5MT
最終減速比		4.777	3.91
ギア比 (動力伝達効率)	1st	4.987(0.90)	6.195(0.90)
	2nd	2.870(0.90)	3.895(0.90)
	3rd	1.594(0.90)	2.260(0.90)
	4th	1.000(0.92)	1.428(0.92)
	5th	0.728(0.90)	1.000(0.90)
	後退	4.774(0.89)	5.692(0.89)
エンジンタイプ		直接噴射式 OHC 無過給ディーゼル	直接噴射式 OHC ターボディーゼル
シリンダー数		4	4
総バルブ数		16	8
排気量 cm ³		4,334	2,499
ボア×ストローク mm		112.0 x 111.0	93.0 x 92.0
圧縮比		18.5	18.0
最大出力 kW/rpm		81/3,100	77/3,800
最大トルク N・m/rpm		275/1,500	222/2,200
燃料噴射系		電子制御式	機械式
燃料噴射ポンプ		分配型噴射式	
排出ガス再循環(EGR)		電子制御式	無し
排出ガス規制	規制年	1998	Pre-EURO
	試験サイクル	D13	ECE-R49
	NOx g/kwh	4.5	14.4
	CO g/kwh	7.40	11.2
	HC g/kwh	2.90	2.4
	PM g/kwh	0.25	

2.5. NO_x , O₂ 濃度の最適計測位置に関する検討

NO_x 排出質量計測の測定誤差に影響する要因は、大きく分けて二つある。一つは、各計測装置自体の精度であり、もう一つは計測センサの取り付け位置の違いに起因する計測の同時性の問題である。本車載型排出ガス計測システムでは、吸気量は吸気経路で、排出ガス濃度は排気経路で計測することになるため、カルマン流量計ならびに NO_x センサおよび O₂ センサの取り付け位置の違いによる計測時間遅れが発生し、誤差の要因となる。また、エンジンの運転状態により変化する排出ガスの温度、圧力および脈動がセンサの測定精度に影響する可能性もある。

そこで、シャシダイナモ上で定常および過渡モード試験を行い、CVS 排出ガス計測システムによる排出ガス質量と本計測システムによる排出ガス質量を同時に測定し、排気経路における NO_x 濃度および O₂ 濃度の各センサの適切な取り付け位置関係を検討する。次に検討結果に基づく NO_x センサおよび O₂ センサの取り付け位置において NO_x 排出質量の測定精度を検証する。なお、本排出ガス計測システムの構成は、CO₂ 排出質量の算出も可能であることから、あわせて CO₂ 排出質量の計測精度も評価する。

次に路上走行試験を行い、走行自動車からの NO_x 排出質量計測が可能であると同時に、沿道局所汚染に及ぼす要因の評価が可能であることを実証する。

(1) センサ取り付け位置

NO_x および O₂ センサの取り付け位置は、計測の同時性の観点からは排気系の上流であるエンジン出口が、エンジンの脈動等の影響を少なくする観点からはテールパイプ近傍が適切であると推定される。そのため NO_x および O₂ センサの最適計測位置検討にあたり、エンジン排気出口付近、テールパイプ付近およびその中間点付近の三箇所を選定した。エンジン排気出口付近は図 2.12(a)の A 点、中間点付近は B 点およびテールパイプ付近は C 点とした。

(2) センサ取り付け位置に起因する計測誤差

定常試験であるディーゼル 13 モード排出ガス試験（以下 D13 試験）における、排気管 A-C 点の位置での O₂ センサからの O₂ 濃度（縦軸）および D 点でのシャシダイナモ設備の磁気式分析計からの O₂ 濃度（横軸）の関係を図 2.12(b) , (c) , (d) に示した。サンプリング間隔は 0.5 秒である。NO_x については、A , B 点での計測値をシャシダイナモ設備である化学発光分析計で計測した結果との比較を図 2.13(a) , (b) に示した。なお、測定孔 A 点から D 点までの流路に漏れにつながる異常のないことを実験終了後に目視にて確認した。

2.5. NO_x, O₂ 濃度の最適計測位置に関する検討

NO_x 濃度, O₂ 濃度ともに, センサ取り付け位置を排気管上流にするほど, 測定値のばらつきと分析計との指示値のずれが大きくなった. ジルコニア型 NO_x センサおよび O₂ センサからの NO_x 濃度, O₂ 濃度を 1kHz で測定し周波数分析したところ, このばらつきはエンジンの燃焼に起因する排出ガスの脈動によるものであった. 分析計との指示値のずれは, 排出ガス温度, 圧力, 干渉ガスの影響等が考えられるが, 原因の特定はできていない. これらの実験結果より, 可能な限り排気管下流側で計測すると定常時における計測濃度のばらつきが少なくなることがわかった.

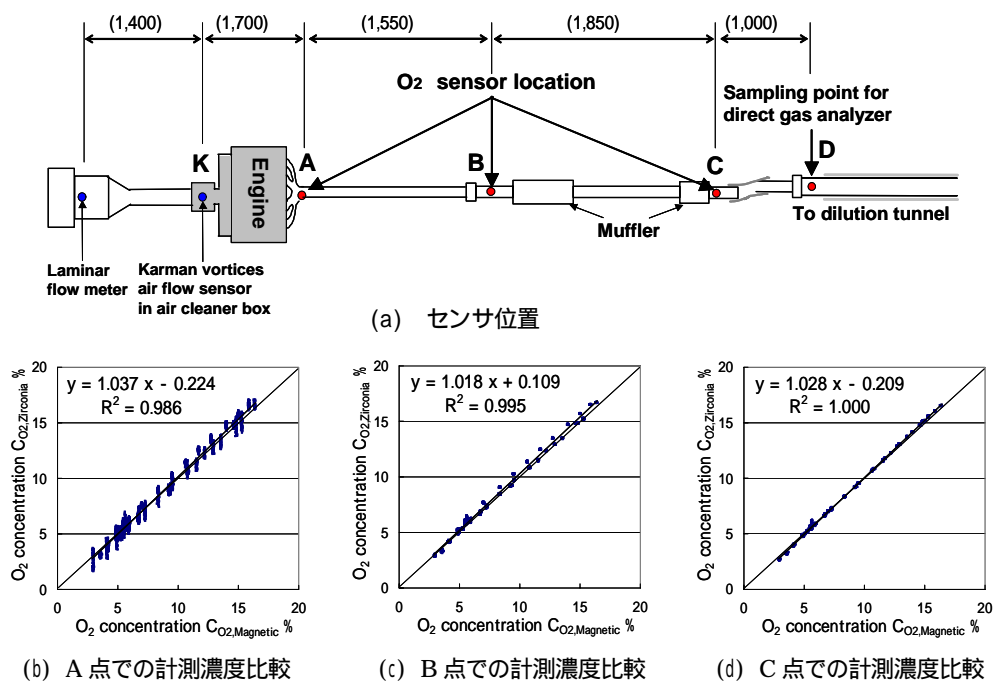
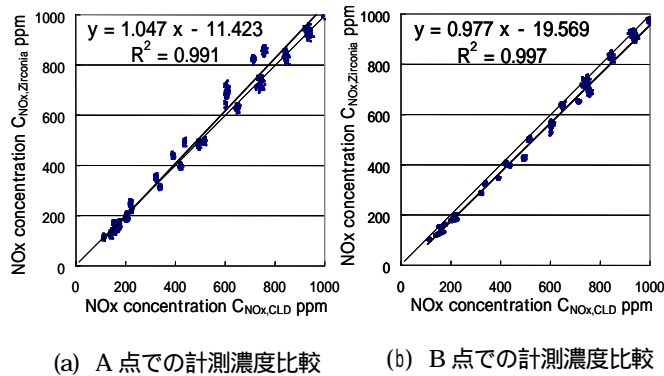


図 2.12 計測濃度に対する O₂ センサ取り付け位置の影響

図 2.13 計測濃度に対する NO_x センサ取り付け位置の影響

吸気流量あるいは排出ガス濃度等は、定常試験では一定値を示すために計測の同時性に関する評価は困難である。そこで、センサ取り付け位置の違いによる過渡時の計測時間遅れを調べるために、過渡試験法である 10・15 モード試験を実施した。エンジン回転数変化率が最も大きい 10・15 モードの発進加速時において、カルマン流量計で測定した吸気量と図 2.12(a)の A～C 点の位置で測定した O₂ 濃度の経時変化を図 2.14 に示した。図 2.15 は、図 2.14 におけるエンジン回転数変化率が最も大きい発進時の O₂ 濃度の経時変化を拡大したものである。図 2.15 より、測定位置の違いにより計測時間遅れが発生することが明らかであり、エンジン回転数変化率が最も大きい発進時においては、K～A 点間の計測遅れは、約 0.09 秒、A～B 点間は約 0.08 秒、B～C 点間は約 0.26 秒と見積もられた。

次にこれらの計測遅れ時間が過渡時の NO_x および CO₂ 排出質量にどのように影響するか把握するため、図 2.12(a)に示す計測位置において 0.5 秒おきに計測した NO_x 濃度、O₂ 濃度およびその時の吸気量から計算した NO_x および CO₂ 排出質量を図 2.16 に示した。A 点および B 点における計算値は比較的良く一致している。

定常試験におけるセンサ取り付け位置による計測誤差と、サンプリング位置による遅れ時間の双方を考慮し、センサ取り付け位置を B 点に決定した。理由は、A 点に取り付けることでセンサの指示値に誤差が生じるが、これはセンサの特性の問題で補正が不可能であることと、C 点でサンプリングすることにより、時間的誤差が大きくなることを考慮した結果である。

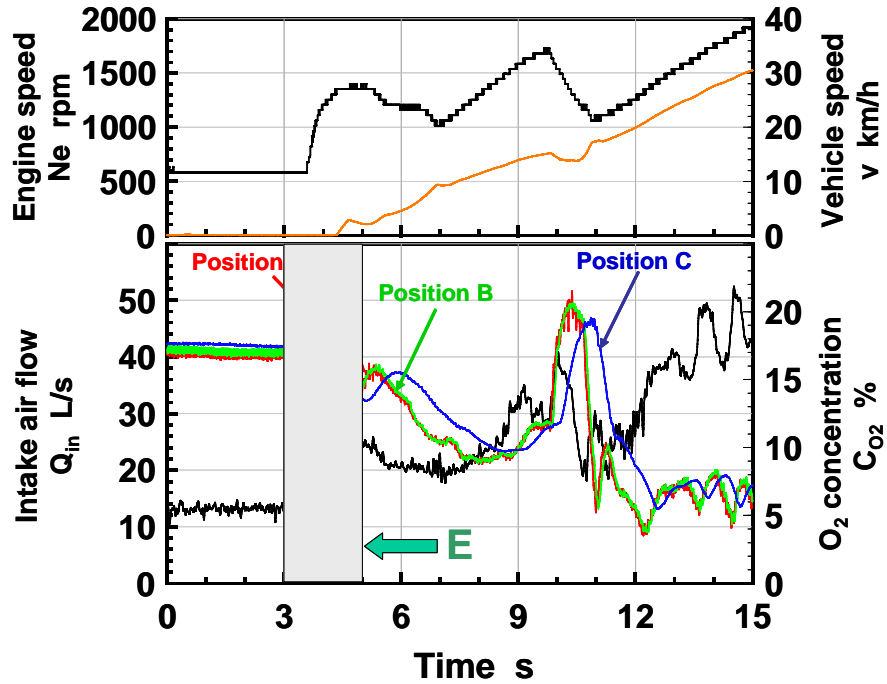


図 2.14 O₂ 濃度計測に関する時間遅れ

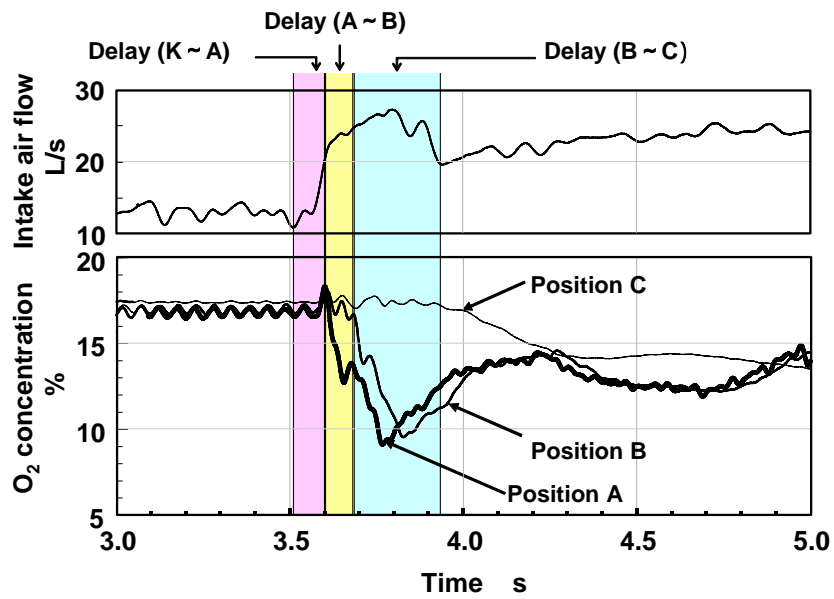


図 2.15 O₂ 濃度計測に関する時間遅れ (図 2.14 E 部分の拡大)

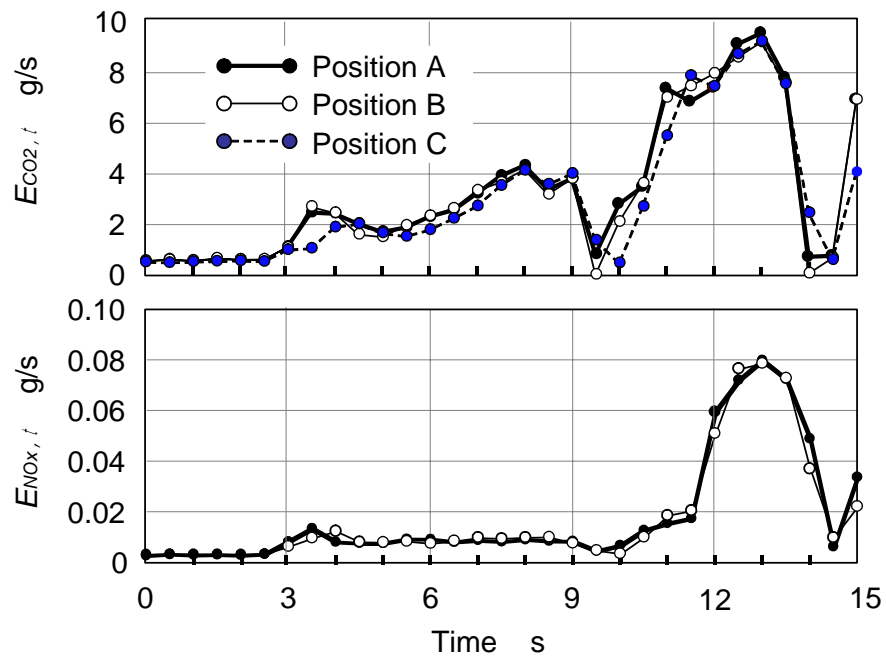


図 2.16 過渡試験における NO_x および CO₂ 排出質量計算結果

2.6. CVS 排出ガス計測システムとの精度比較

車載型排出ガス計測装置と CVS 排出ガス計測システムにおける定常および過渡試験モード計測値を比較した。二箇所のシャシダイナモ試験設備(図 2.17 に示す“CD1”および“CD2”) で比較した。図 2.17 に車載型排出ガス計測装置における排出ガス計測(図 2.17 に示す“ROM”)と CVS 排出ガス計測システム(図 2.17 に示す“CVS”)による D13 モード試験での時間当たりの NO_x 排出質量をそれぞれの計測における誤差範囲とともに示した。図 2.18 は、10・15 モードおよび東京都排出ガス試験モードの NO_x 排出質量(g/km)である。表 2.4 に試験結果をまとめた。定常試験モードでの車載型計測装置の排出ガスは、CVS 排出ガス計測システムと比較すると、NO_x で約 4.5 ~ 7.5%少なく、CO₂ で 2.5 ~ 5.8%多かった。10・15 モード、東京都排出ガス試験モードでは、計 6 回の試験において、NO_x は-5.4 ~ 2.7%、CO₂ は 3.3 ~ 11.1%の範囲内で一致した。

以上から、車載型計測装置における NO_x および CO₂ 排出質量の計測精度は、沿道局所 NO_x 汚染評価のために十分であると考えられる。

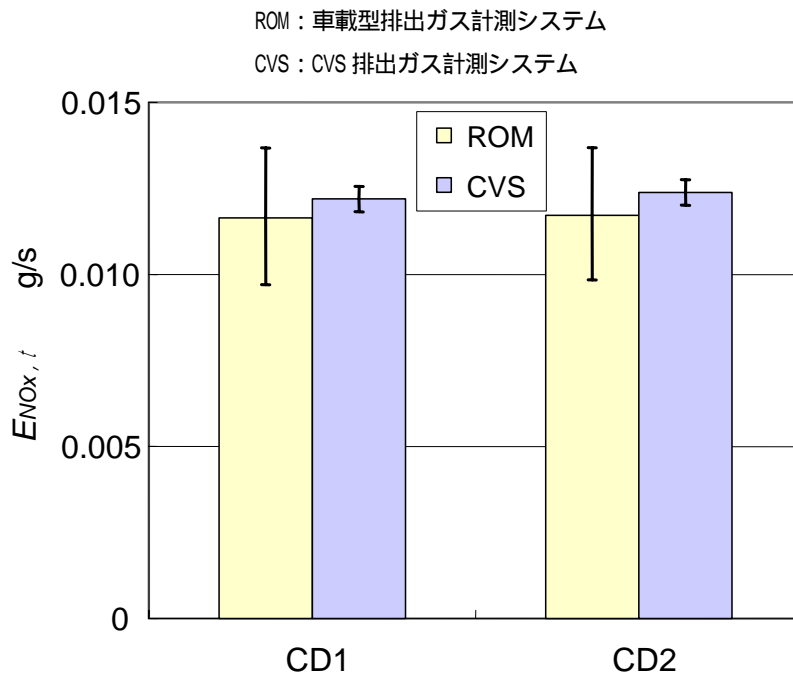


図 2.17 D13 モード試験における時間当たり NO_x 排出質量比較

2.6. CVS 排出ガス計測システムとの精度比較

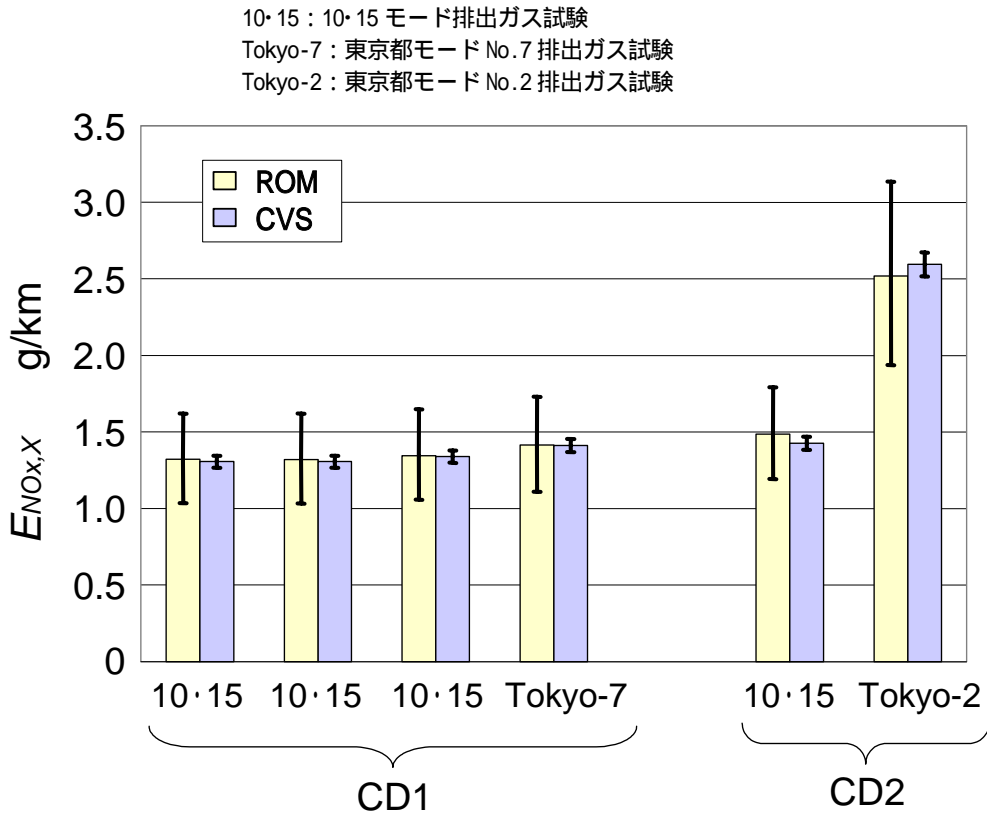


図 2.18 過渡モード試験における NOx 排出質量比較

表 2.4 定常および過渡モード試験結果概要

CD	Cycle	Date	A.P. kPa	T. deg	H. %	System	NOx	Ratio %	CO ₂	Ratio %
CD1	D13	01.11.29	101.3	25.1	49.2	ROM	3.53	95.5	1062	105.8
						CVS	3.70	100	1004	100
CD2	D13	02.2.13	101.5	24.9	51.1	ROM	3.20	92.5	985	102.5
						CVS	3.46	100	961	100
CD1	10・15	01.11.28	101.4	25.1	49.3	ROM	1.32	99.5	325	104.5
						CVS	1.33	100	311	100
	10・15	01.11.28	101.4	25.0	49.9	ROM	1.32	99.5	326	105.5
						CVS	1.33	100	309	100
10・15	01.11.28	101.5	25.0	50.1	ROM	1.34	98.9	327	105.1	
					CVS	1.36	100	311	100	
Tokyo-7	01.11.29	101.3	25.1	49.2	ROM	1.41	98.5	317	103.3	
					CVS	1.44	100	307	100	
CD2	10・15	02.2.13	101.7	24.9	50.8	ROM	1.49	102.7	349	111.1
						CVS	1.45	100	314	100
	Tokyo-2	02.2.14	102.0	24.9	50.8	ROM	2.52	94.6	521	104.6
						CVS	2.66	100	498	100

A.P. : Atmosphere pressure Unit of NOx: D13 g/kWh, Others g/km
 H. : Humidity Unit of CO₂ : D13 g/kWh, Others g/km
 T. : Intake air temperature

2.7. 路上試験による車載型排出ガス計測装置の有効性確認

2.7.1. 走行自動車の排出ガスによる沿道 NO_x 汚染マップ

NO_x および O₂ センサの取り付け位置の最適化および精度検証を行った車載型排出ガス計測装置を搭載した車両 1 を用いて、NO_x が沿道のどこにどのような要因でどれだけ排出されたかについて評価可能であることを実証するため、市街路走行試験を行った。試験コースとして慶應義塾大学矢上校舎を発着点とする交差点、上り坂、下り坂、右左折、幹線路、狭路、渋滞路等を含む約 17.5km の市街路（以下、横浜市街路）を設定した。試験時の積載量は半積（1,000kg）とした。

2001 年 12 月 20 日午前 8 時に慶應義塾大学矢上校舎をスタートした試験について、GPS 車両位置情報から瞬時の NO_x 排出質量（g/km）を横浜市街路地図上にマップした。なお、アイドリング等車両停止中の瞬時 NO_x 排出係数は無限大となり表記不可能なため、停止中の排出ガス質量を積分し停車位置に表示した結果を図 2.19 に示す。この走行試験ではルート NO_x 排出係数は 3.01g/km であったが、地図上の沿道局所には、より大きい瞬時の NO_x 排出係数が現れている場所が明確に点在しており、車載型排出ガス計測装置で沿道局所のどこに NO_x が多く排出されたか評価可能である。

本車載型排出ガス計測装置を中華人民共和国北京市において現地で使用されている小型バスに搭載して走行試験を行った。2001 年 9 月 4 日に清華大学構内で行った走行試験における時間当たりの NO_x 排出質量を地図上にマップした結果を図 2.20 に示す。このように、本車載型排出ガス計測装置により、沿道への時間当たりの NO_x 排出質量の評価も可能である。

2.7. 路上試験による車載型排出ガス計測装置の有効性確認

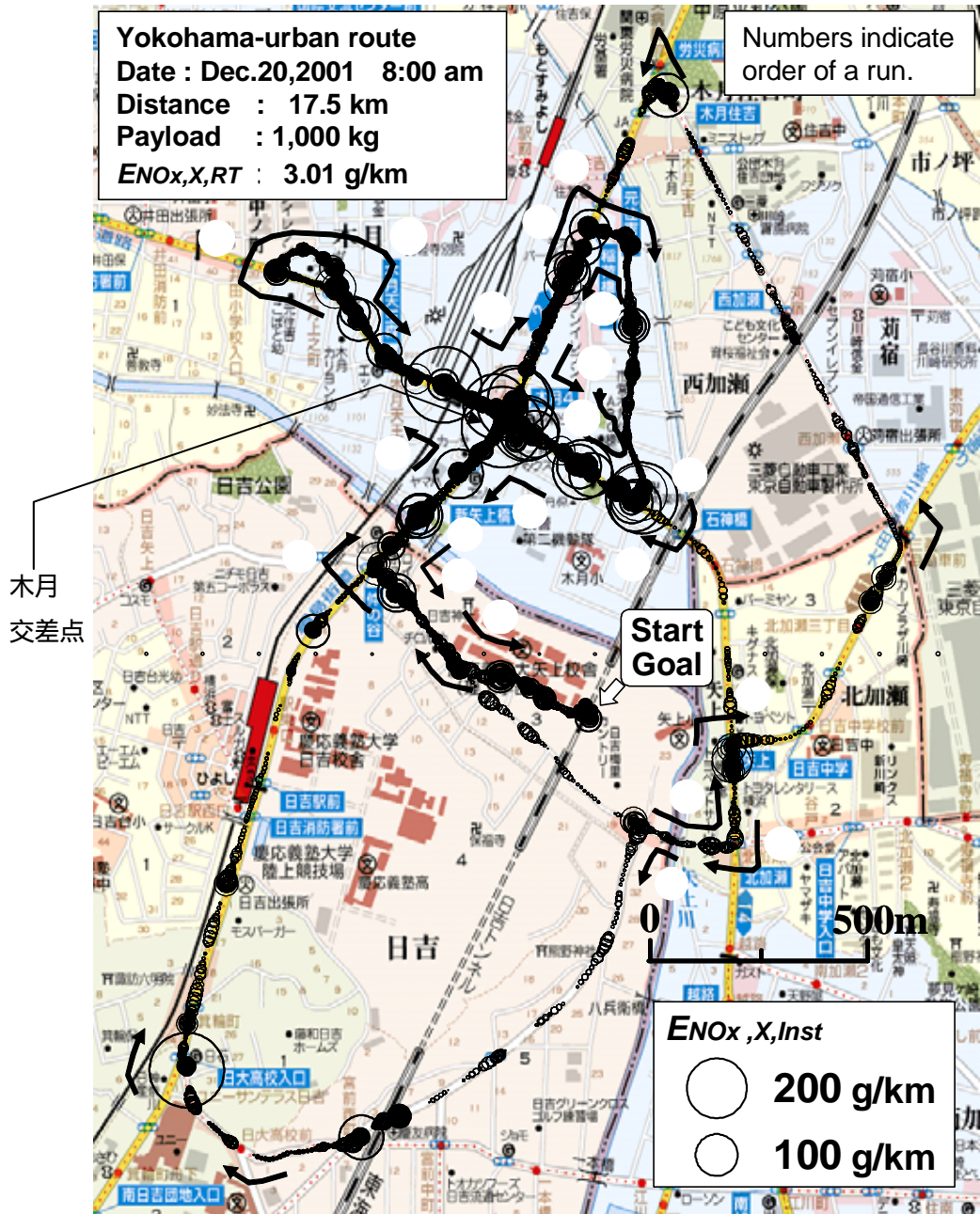


図 2.19 横浜市街路における瞬時の距離当たり NOx 排出質量分布

掲載の地図は、(株)アルプス社の許可を得てアルプス社製品 (GEOATLAS2000) の地図を使用しています。無断転載、転図を禁止します。

2.7. 路上試験による車載型排出ガス計測装置の有効性確認

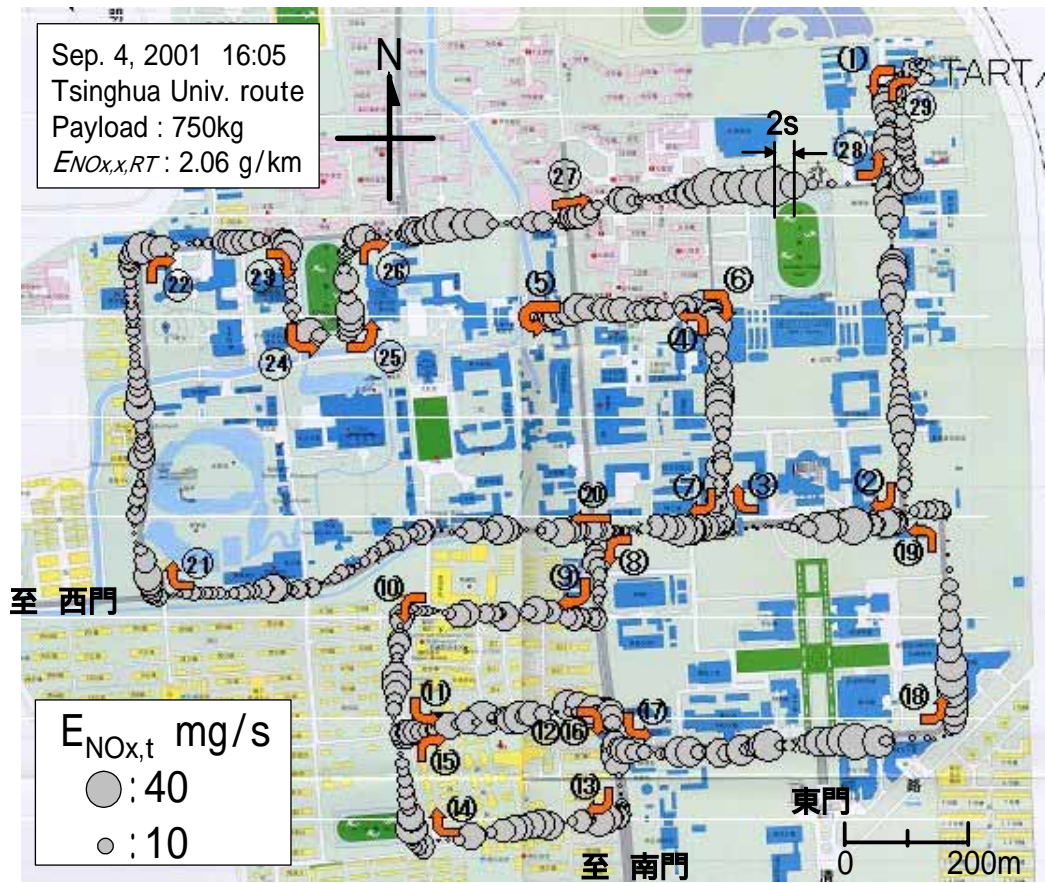


図 2.20 清華大学構内走行試験における時間当たり NOx 排出質量分布

2.7.2. 車載型排出ガス計測装置による沿道局所 NO_x 汚染測定

車載型排出ガス計測装置を沿道局所 NO_x 汚染解析に用いることが可能かどうか明らかにするため、図 2.19 に示した木月交差点で車両が停止、発進した場合を例に挙げ、道路インフラ、運転挙動、走行動態、排出ガス履歴の関係を計測した結果を図 2.21 に示した。どの位置にどの程度の NO_x が排出されているか視覚的に示すため、排出された NO_x の排出質量位置を表す平面図も図中に示した。円の面積が単位時間当りの NO_x 排出質量に相当し、円の中心間距離は車両が 0.5 秒間に進む距離を表している。

このケースでは、運転者は交差点手前約 120m で赤信号を視認してアクセルを離し、約 110m 手前でブレーキを作動させた。車両は減速し、交差点中心より約 30m 手前で信号待ちのため 75 秒停止した。その後、発進、加速を行い交差点を通過した。これらの運転操作により、車両速度、単位時間あたりの NO_x 排出質量が変化し、その結果沿道局所への単位距離あたりの NO_x 排出質量が大きく変化した。単位距離あたりの NO_x 排出質量は、運転者がアクセルを離し車両が制動状態に入るとほぼ 0 になり、車両が停止してアイドリングのときに無限大となる。発進加速時に単位距離あたりの NO_x 排出質量が大きくなるが、車両速度の増加と共に減少した。このケースでは、2 速ギヤでの加速時に交差点で集中的な NO_x 汚染が発生したことが明らかとなった。

以上の結果から、車載型排出ガス計測装置により道路インフラ、交通状況、運転操作、走行動態および沿道局所 NO_x 排出質量履歴などの情報が得られ、走行する自動車の排出ガスによる沿道局所 NO_x 汚染の解析に有効であることが確認できた。

2.7. 路上試験による車載型排出ガス計測装置の有効性確認

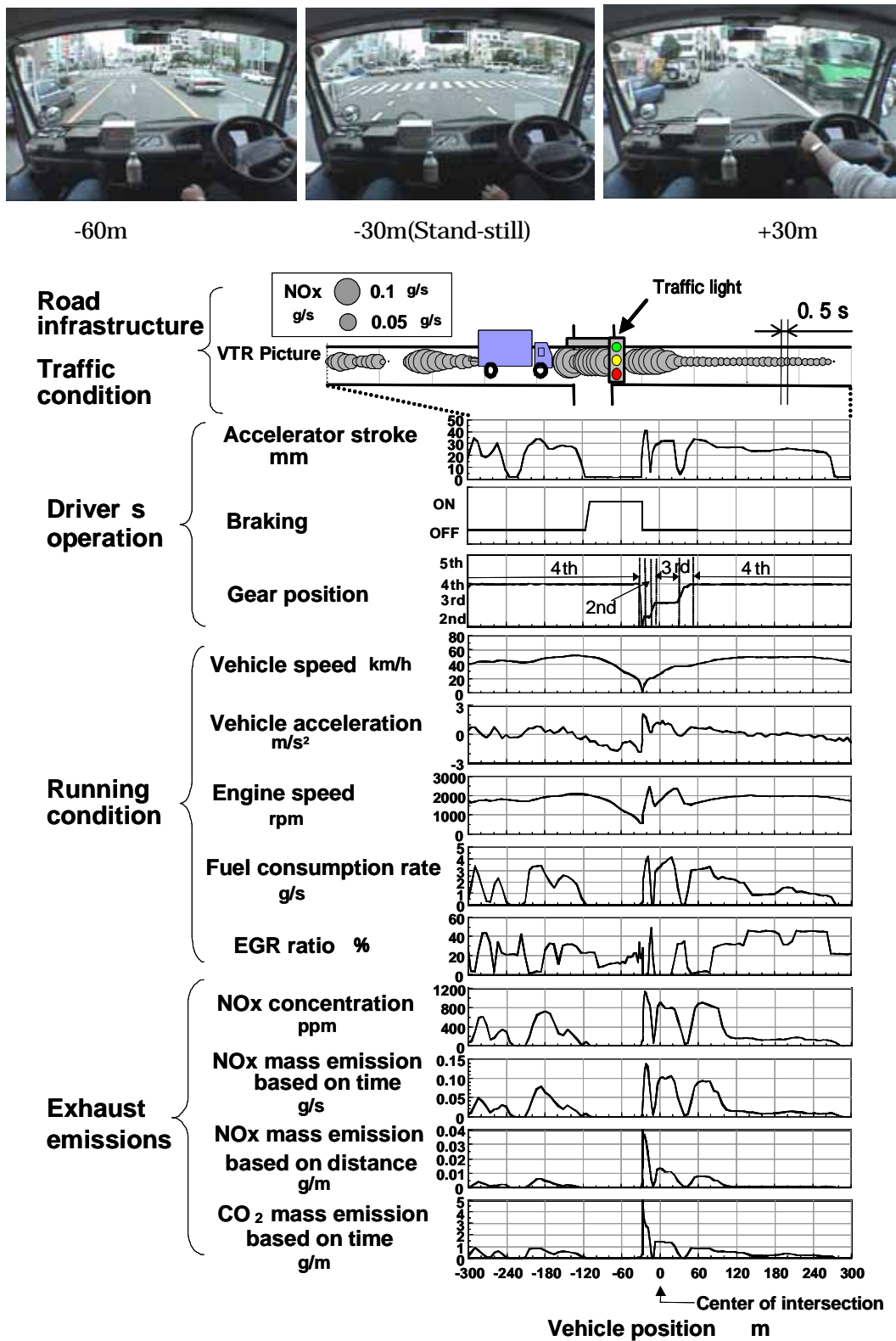


図 2.21 車載型計測装置により計測したデータ

2.8. まとめ

本研究の目的を達成するため、車載型排出ガス計測装置の開発を行った。

小型貨物自動車に開発した装置を取り付け、NO_x 濃度および O₂ 濃度の計測に用いたジルコニアセンサの最適取り付け位置の検討を行い、シャシダイナモ上にて定常および過渡排出ガスモード試験による精度確認を行った。その結果、定常試験モードでの車載型計測装置の排出ガスは、CVS 排出ガス計測システムと比較すると、NO_x で約 4.5～7.5%少なく、CO₂ で 2.5～5.8%多かった。過渡排出ガス試験モードでは、NO_x は-5.4～2.7%、CO₂ は 3.3～11.1%の範囲内で一致した。以上から、車載型計測装置における NO_x および CO₂ 排出質量の計測精度は、沿道局所 NO_x 汚染評価のために十分であった。

路上にて走行試験を行った結果、大きな瞬時の NO_x 排出係数が現れている場所が点在していることが地図上で明らかになり、沿道局所のどこに NO_x が多く排出されたか評価可能であることを実証した。

以上の結果から、開発した車載型排出ガス計測装置により道路インフラ、交通状況、運転操作、走行動態および沿道局所 NO_x 排出質量履歴などの情報が得られ、走行自動車の排出ガスによる沿道局所 NO_x 汚染の解析に有効であることを確認した。

本装置は、簡便かつ汎用性があり、路上走行における沿道局所 NO_x 汚染に与える要因を精度よく計測できる、沿道局所 NO_x 汚染発見装置として使うことが可能である。

第3章 走行自動車による沿道局所 NO_x 汚染の実態

本章では、小型貨物自動車を用い、交通による運転への影響を可能な限り除外した条件および横浜市街路における実際の交通での条件において、複数の運転者による走行実験を行い、運転者の違いと沿道 NO_x 汚染の関係を調べる。

次に、小型貨物自動車および小型バスを用い、それぞれ運転者を固定しそれぞれの車両が実際に使われる条件における沿道局所への集中的な NO_x 汚染の発生実態を、道路インフラ、交通状況および車両動態の観点で調べ、排出ガス対策の技術世代が異なる車両における集中的な NO_x 汚染発生の原因を明らかにする。

3.1. 試験条件

3.1.1. 試験自動車

第2世代の排出ガス対策技術の車両として、1998年排出ガス規制適合の小型貨物自動車1台（車両1）、第1世代の自動車として中華人民共和国で使用されているEEC規制に対応した小型バス（車両2）を試験自動車として選定した。詳細仕様は第2章2.4.を参照されたい。

3.1.2. 試験路

走行する自動車からの排出ガスは、運転者により異なることが考えられる。交通量等の環境要因を可能な限り除外した状態で、運転者の違いがNO_x排出質量に与える影響を調べるための試験路を設定し走行試験を行った。

次に一般国道、都道府県道、市町村道を含むいわゆる市街路における走行試験を行った。以下に試験路の概要を示す。

（1）群馬県高山村山間路

交通量等の要因を除外した状態で、運転者の違いがNO_x排出質量に与える影響を調べるため、信号が無くおよび交通量が非常に少ない上り坂、下り坂、右左折、一時停止を含む1.7kmの試験路を設定した。群馬県高山村山間路とする。試験路のコース平面図を車両に搭載した大気圧計から算出したコースの標高とともに図3.1に示す。コースの特徴を表3.1に示した。なお、運転者によるルートNO_x排出質量の違いは図3.1に示す区間aに示す上り部分において比較した。

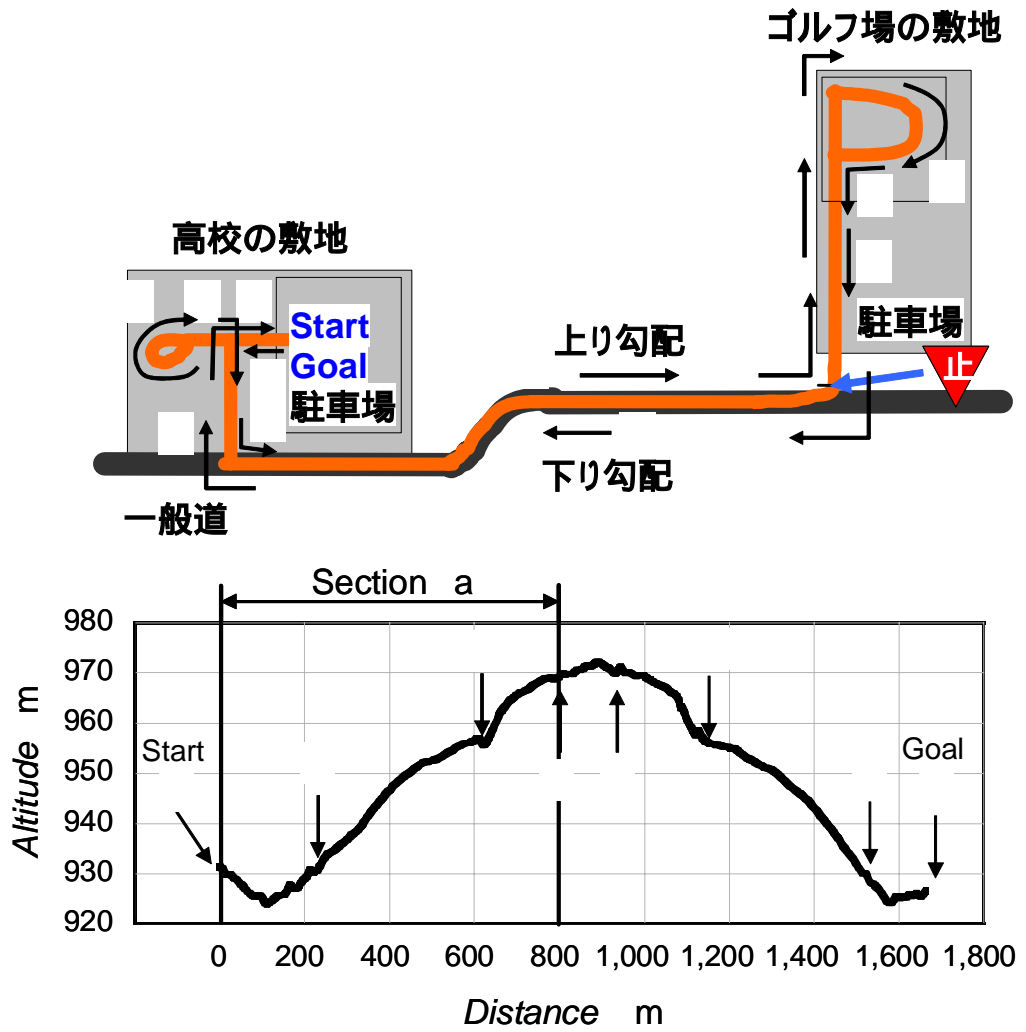


図 3.1 群馬県高山村山間路概要図

(2) 横浜市街路

横浜市の慶應義塾大学周辺に市街の試験路を設定した。以下、横浜市街路とする。横浜市街路は、慶應義塾大学矢上校舎を発着点とする交差点、上り坂、下り坂、右左折、幹線路、狭路および渋滞路等を含む約 17.5km の交通量の多い典型的な市街地の走行ルートである。ルート概要を図 3.2 に、その特徴を表 3.1 に示した。

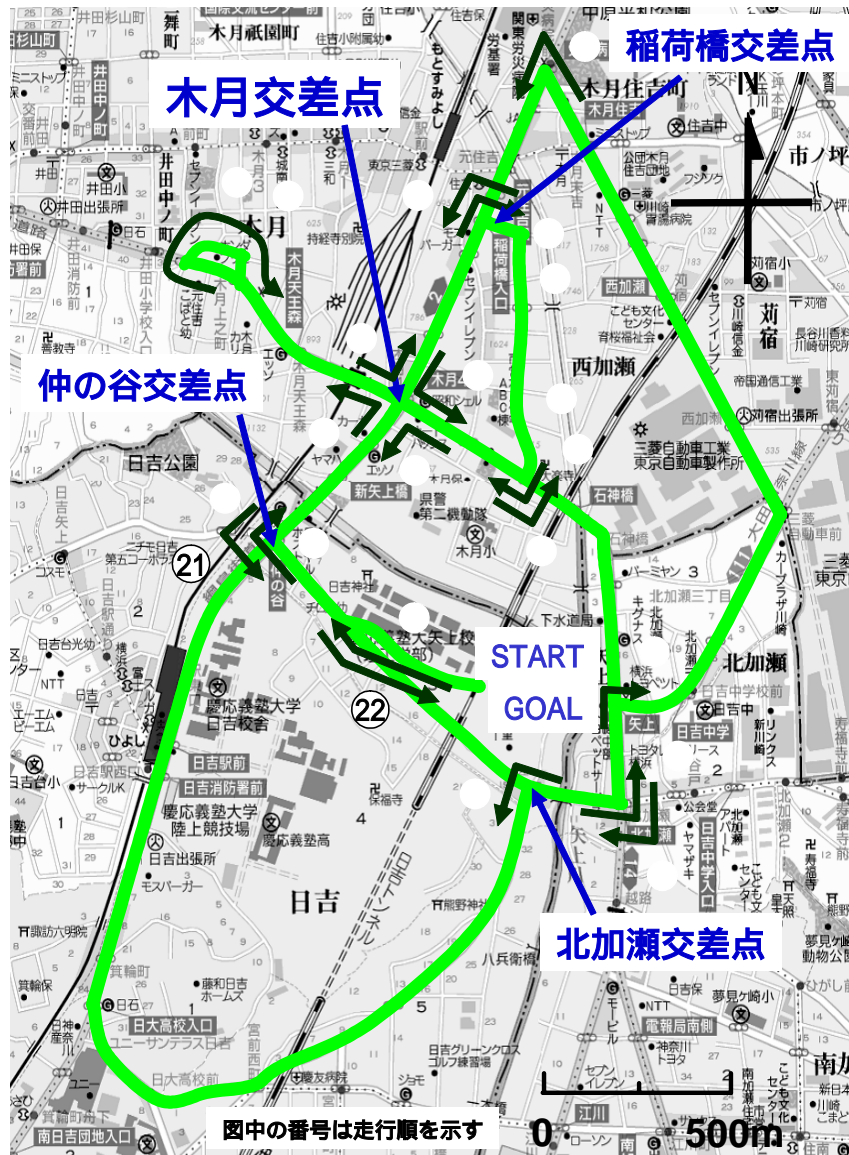


図 3.2 横浜市街路概要図

掲載の地図は、(株)アルプス社の許可を得てアルプス社製品 (GEOATLAS2000) の地図を使用しています。無断転載、転図を禁止します。

表 3.1 各試験路の特徴

Test route	Gunma Takayama route	Yokohama-urban route
Area	Takayama village	Kohoku-ku Yokohama
Distance km	1.7	17.5
Left turn	3	10
Right turn	5	11
Intersection (traffic light)	0	12
Intersection (no traffic light)	0	3
Halt	1	7
Overpass	0	4
Two lanes, more km	0	12.1
One lane km	1.7	5.4
Rate of flat road %	29.4	91.3

3.1.3. 走行条件

(1) 運転者に起因する沿道局所 NO_x 汚染調査

群馬県高山村山間路では13名の運転者による小型貨物自動車の走行実験を行った。この試験路では交通量が非常に少ないことから、交通状況や共存自動車の影響がほとんどないため、運転者の個性に従った運転とすることができた。

横浜市街路では、実際の交通条件において初心者からベテランまで4人の運転者による小型貨物自動車の走行実験を行った。

(2) 沿道局所 NO_x 汚染の実態調査

自動車の走行動態は交通量によっても大きく影響を受ける。朝、夕の交通ラッシュ時と深夜等における交通量の差は、非常に大きいと考えられる。そこで、横浜市街路で、車両1からの排出ガス質量が種々の交通量においてどのように変化するかを明らかにするため、運転者を固定し2時間ごとに24時間横浜市街路を走行した。交通量は、幹線道路の交差点(図3.2の木月交差点)における走行当日の交通台数を計数することにより把握した。仲の谷交差点から稲荷橋交差点方向における木月交差点への1時間流入量および流出量の平均とし、試験開始時刻で表した。交通量計測は、自動二輪車以上を対象とし2時間ごとに30分~1時間行い、1時間値として示した。

3.1.4. 計測データの解析方法

本研究では、走行自動車から排出される NO_x による沿道汚染の指標として、単位時間あたりの NO_x 排出質量 (g/s) を同時に計測した車両速度で除することにより求めた“単位距離あたり NO_x 排出質量 (g/km)”を用いた。“単位距離あたり NO_x 排出質量”は一般的には NO_x 排出係数と呼ばれている。本論文では以下の三つの NO_x 排出係数を定義する。

瞬時 NO_x 排出係数

瞬時 NO_x 排出係数は、0.5 秒おきに計測した NO_x 排出係数を同じく 0.5 秒おきに計測した車両速度で除することにより求める。定義式は以下のとおりである。

$$\text{瞬時 NO}_x \text{ 排出係数 (g/km): } E_{NO_x, X, Inst} = \frac{E_{NO_x, t, Inst}}{V_{Inst}}$$

なお、沿道局所 NO_x 汚染の実態を評価する指標としてこの瞬時 NO_x 排出係数を用いた。

ショートトリップ NO_x 排出係数

ショートトリップ (停止から停止までの間、図 3.3 の t_s - t_{ST} から t_e - t_{ST}) における単位距離あたり NO_x 排出質量を“ショートトリップ NO_x 排出係数”とした。定義式は以下のとおりである。

$$\text{ショートトリップ NO}_x \text{ 排出質量 (g/s): } E_{NO_x, t, ST} = \int_{t_s-ST}^{t_e-ST} E_{NO_x, t, Inst}(t) dt$$

$$\text{ショートトリップ NO}_x \text{ 排出係数 (g/km): } E_{NO_x, X, ST} = \frac{E_{NO_x, t, ST}}{X_{ST}}$$

ルート NO_x 排出係数

試験ルート (試験開始から終了までの間、図 3.3 の t_s から t_e における単位距離あたり NO_x 排出質量を“ルート NO_x 排出係数”とした。定義式は以下のとおりである。

$$\text{ルート NO}_x \text{ 排出質量 (g/s): } E_{NO_x, t, RT} = \int_{t_s}^{t_e} E_{NO_x, t, Inst}(t) dt$$

$$\text{ルート NO}_x \text{ 排出係数 (g/km): } E_{NO_x, X, RT} = \frac{E_{NO_x, t, RT}}{X_{RT}}$$

なお、本論文では CO₂ に関しても上記 から と同様な表記を用いる。図 3.3 に示したように、総走行距離を X_{RT} 、試験ルートの平均車速を V_{RT} とする。ショートトリップについても同様に X_{ST} 、 V_{ST} とする。

なお、広域 NO_x 汚染の実態を評価する指標としてこのルート NO_x 排出係数を用いた。

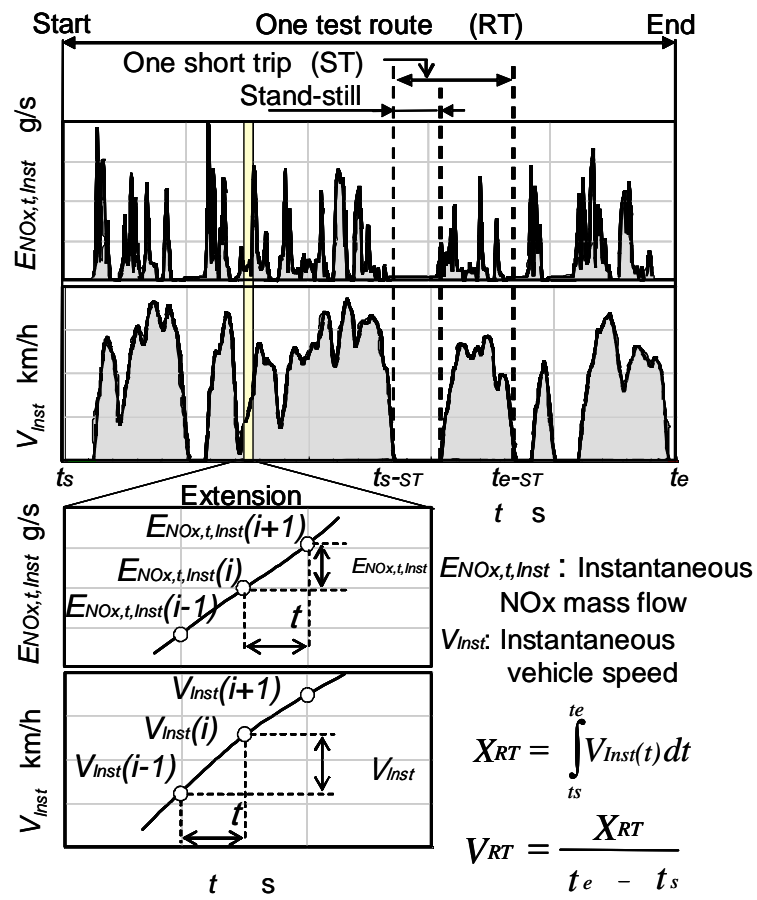


図 3.3 NOx 排出質量の定義概要

3.2. 運転者に起因する沿道局所 NO_x 汚染

3.2.1. 交通の影響がほとんどない道路における運転者と NO_x 排出係数

群馬県高山村山間路の走行試験における各運転者での車両速度，アクセルポジション，単位距離あたりの NO_x 排出係数履歴を図 3.4 に示した．運転者が異なると，道路構造，交通状況，試験車両が同じでもそれぞれに大きな違いが現れている．図 3.5 に運転者毎にルート車両速度を示した．最も速度の高い場合と，低い場合では 2 倍程度異なった．各運転者でのルート NO_x および CO₂ 排出係数の違いについて図 3.6 に示した．運転者の違いにより，ルート NO_x 排出係数は 1.9 倍，ルート CO₂ 排出係数は 1.3 倍の違いが現れた．ルート車両速度とルート NO_x および CO₂ 排出係数の関係を，図 3.7 に示した．ルート車両速度の増加と共に，ルート NO_x 排出係数は増加したが，ルート CO₂ 排出係数は減少するというトレードオフの関係が現れた．

次に，13 人の運転者の中で最もルート NO_x 排出係数が小さい YA（ルート NO_x 排出係数：2.0 g/km，ルート CO₂ 排出係数：715 g/km）と，比較的多かった車両 1 を普段から頻繁に運転している MI（ルート NO_x 排出係数：3.2 g/km，ルート CO₂ 排出係数：625 g/km）を例にあげ，運転方法の違いを分析した．図 3.8 より，運転者 MI と YA では，加速時の NO_x 排出履歴に大きな違いがあった．加速時において，運転者 MI は YA と比べてアクセル踏み込み量が 1.5 倍程度大きく，車両速度のピークも 1.3 倍程度大きかった．このことが運転者 MI と YA で単位距離あたりの NO_x 排出履歴に大きな差が生じ，結果として MI の方が YA よりルート NO_x 排出係数で 1.6 倍程度大きくなった．

各運転者の運転方法の特徴を把握するため，加速状態，減速状態，定常状態，停止状態に分け，その各状態で排出された NO_x 排出量の割合を図 3.9 に示した．なお，横軸は，ルート NO_x 排出係数の小さい順番とした．図 3.9 より，ルート NO_x 排出係数の大きい運転者ほど，加速状態での NO_x 排出割合が多くなる傾向があった．次に各運転者のギア使用時間割合について図 3.10 に示した．ルート NO_x 排出係数の小さい運転者は高シフト段を使用せずに低シフト段を多用している傾向があった．これは試験ルートが上り勾配であったことから，高シフト段を多用すると，低シフト段使用時と比べてより大きなエンジントルクが必要になり，その結果として，アクセル踏み込み量も大きくなっていたことが原因と考えられる．

図 3.8，3.9 および 3.10 の結果を総合すると，低シフト段を多用しアクセルの踏み込み量を少なくし，定常走行を多く行う運転者が，少ない NO_x 排出量で走行できたことを表している．このように運転者の個人差により，ルート NO_x 排出係数は影響を受けることがわかった．

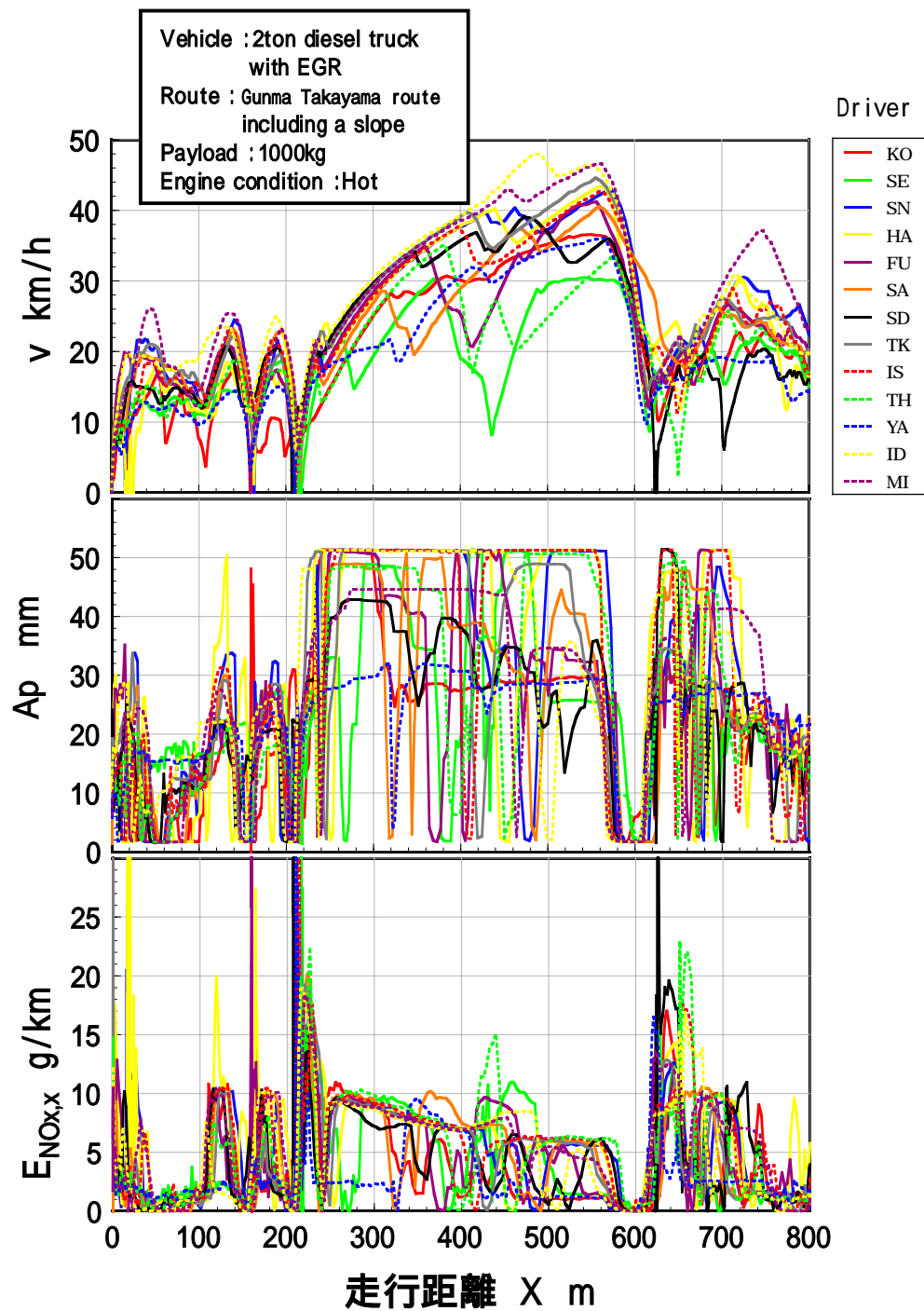


図 3.4 運転者の違いによる車両速度，アクセルストローク，単位距離あたりの NOx 排出量履歴の違い

3.2. 運転者に起因する沿道局所 NOx 汚染

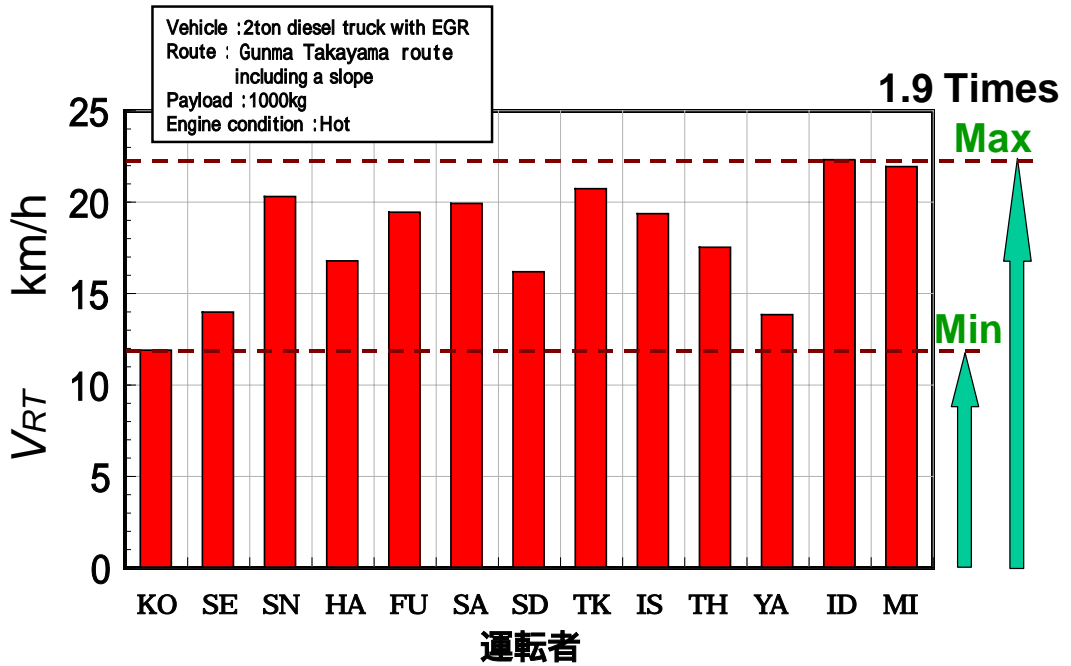


図 3.5 運転者の違いによるルート平均速度のばらつき

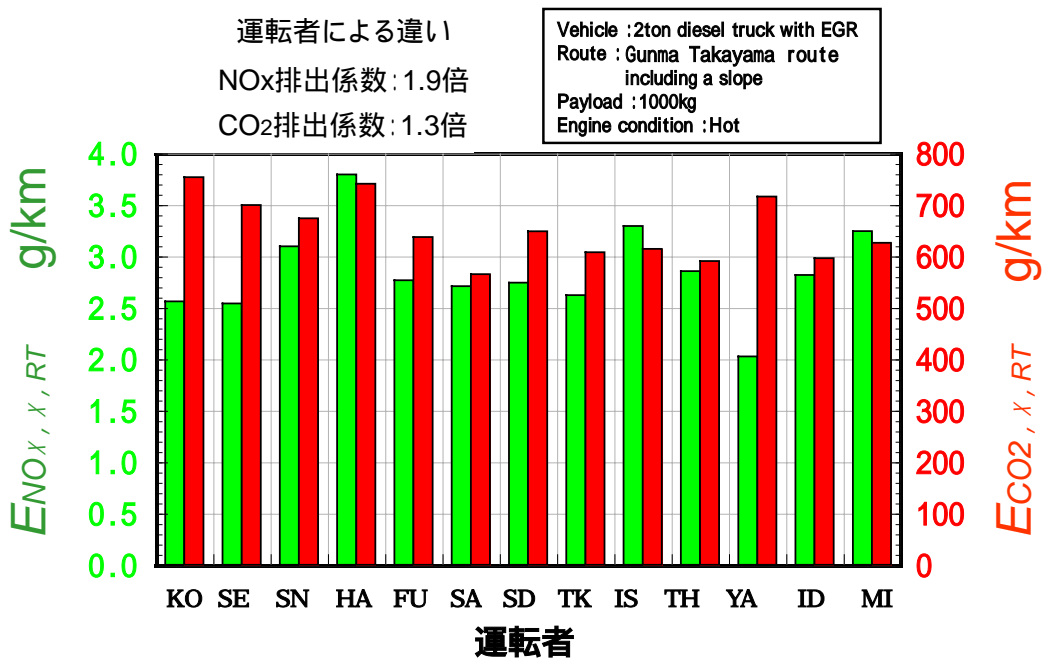


図 3.6 運転者の違いによるルート平均 NOx および CO₂ 排出係数の違い

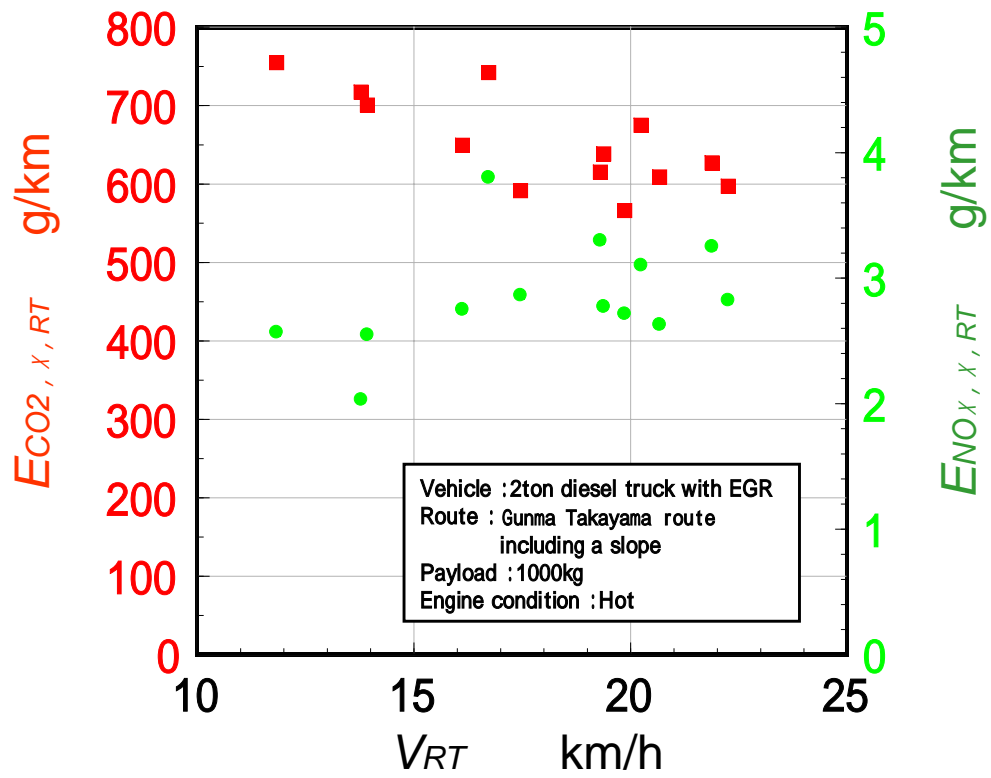


図 3.7 運転者の違いによるルート平均 NOx および CO₂ 排出係数の違い

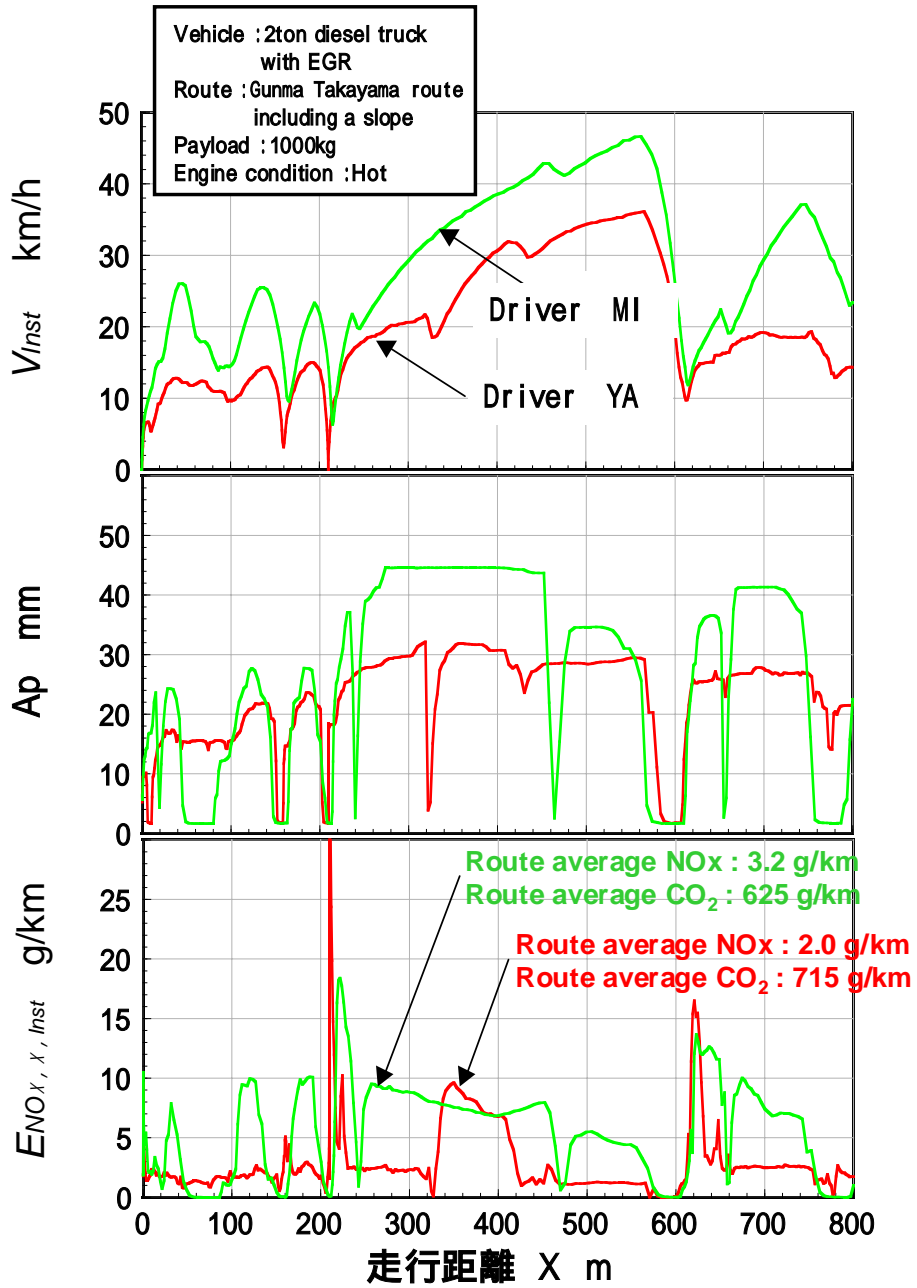


図 3.8 運転者の違いによる車両速度，アクセルストローク，単位距離あたりの NOx 排出量履歴の違い（運転者 MI と YA の場合）

3.2. 運転者に起因する沿道局所 NOx 汚染

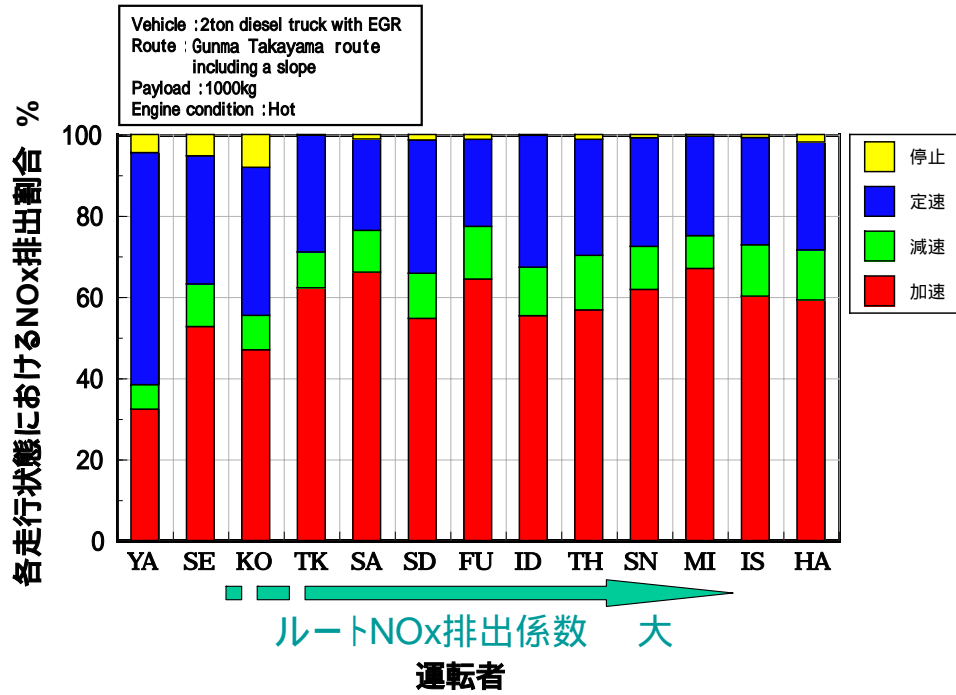


図 3.9 運転者の違いによる各走行状態別の NOx 排出割合

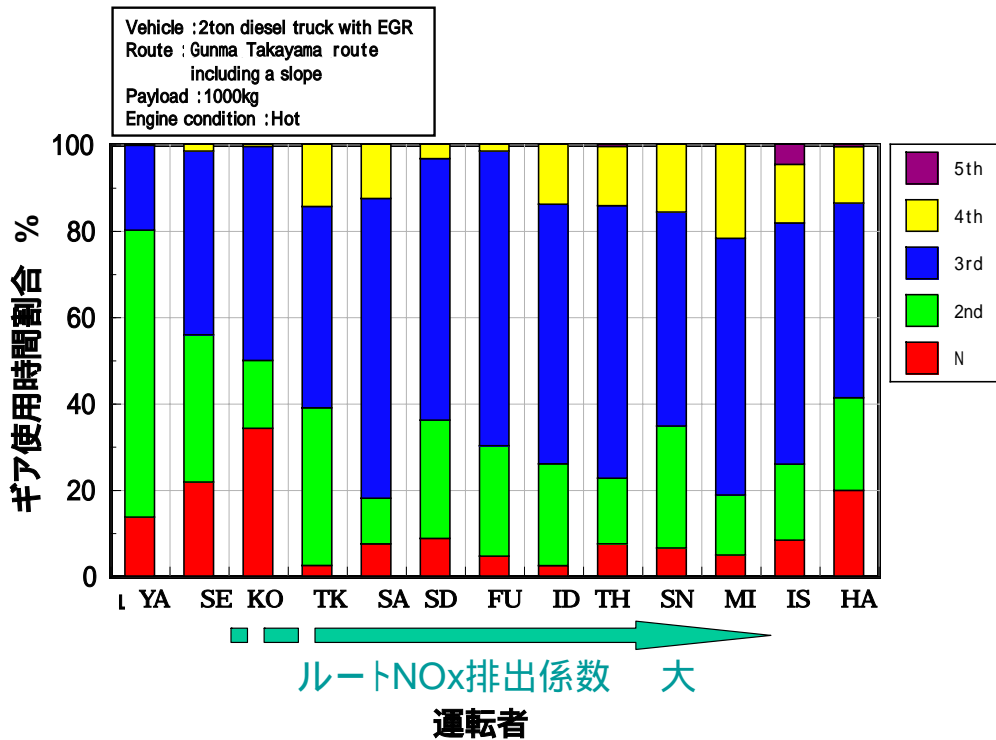


図 3.10 運転者の違いによるギア使用時間割合

3.2. 運転者に起因する沿道局所 NOx 汚染

3.2.2. 市街路走行における運転者と NOx 排出係数

横浜市街路にて、四人の運転者についてルート NOx 排出係数および瞬時 NOx 排出係数がどのように変化するか実際の交通の中で調べた。運転歴は、初心者からベテランが含まれるようにした。表 3.2 に試験条件および結果を示した。

四人のルート NOx 排出係数は、実験を行った範囲では 1.82 から 3.2g/km と、約 1.8 倍の差があり、群馬県高山村山間路での結果とほぼ同等の差であった。

表 3.3 に四人の走行における瞬時 NOx 排出係数のそれぞれ上位 20 点をまとめた。四人のうち HA の瞬時 NOx 排出係数が最も低く、MI が最も高かった。瞬時 NOx 排出係数も運転者により異なる傾向が見られた。瞬時 NOx 排出係数最大値とルート NOx 排出係数の比は、HA の場合約 11 倍、MI の場合約 38 倍となった。

ルート NOx 排出係数および瞬時 NOx 排出係数は運転者の影響を受けることが明らかになったが、いずれの運転者も路上ではルート NOx 排出係数に比べ高い瞬時 NOx 排出係数のピークがあらわれた。

表 3.2 横浜市街路運転者変数試験条件および結果

試験条件	運転者 MI	運転者 HA	運転者 TA	運転者 MA
年 齢	20 代	20 代	50 代	40 代
運転歴	4 年	2 年	30 年	20 年
試験開始時 運転経歴	乗用車中心 2 トントラック 10 回程度 運転	乗用車中心 2 トントラック の運転経歴 全くなし	乗用車中心 トラックの 運転合計 1 年程度	トラックの 運転経験 豊富 10 年以上
試験日：時間	2001/12/20 06：00	2002/5/1 18：28	2004/10/30 12：50	2004/12/23 15：55
積載量 (kg)	1,000	1,000	1,000	1,000
エンジン状態	暖 機	暖 機	暖 機	暖機
天 候	晴 れ	曇 り	雨	晴 れ
気 温 ()	2.7	19.0	6.6	-0.9
大気圧 (kPa)	0.1019	0.1006	0.1030	0.1013
相対湿度 (%)	61.2	57.7	71.7	21.7
絶対湿度 (kg/kg)	0.00280	0.00789	0.00432	0.000747
結 果 V_{RT} (km/h)	21.0	13.6	12.0	12.7
$E_{NOx, X, RT}$ (g/km)	3.20	1.82	3.07	2.97
$E_{CO_2, X, RT}$ (g/km)	414.2	439.6	543.4	549.1

3.2. 運転者に起因する沿道局所 NOx 汚染

表 3.3 横浜市街路における四人の運転者の瞬時 NOx 排出係数上位 20 点

運転者 MI			運転者 HA			運転者 TA			運転者 MA		
順位	地 点 (m)	瞬時 NOx 排出係数 ピーク	順位	地 点 (m)	瞬時 NOx 排出係数 ピーク	順位	地 点 (m)	瞬時 NOx 排出係数 ピーク	順位	地 点 (m)	瞬時 NOx 排出係数 ピーク
1	17,222	123.0	1	10,798	64.6	1	593	34.5	1	10,994	87.7
2	5,203	76.1	2	1,496	27.4	2	1	32.9	2	4,895	70.1
3	15,683	52.5	3	16,465	27.3	3	3,251	27.4	3	16,023	63.3
4	1,521	48.0	4	4,577	26.3	4	2,319	27.2	4	12,860	54.0
5	6,666	40.4	5	12,467	24.6	5	10,963	27.0	5	12,262	52.6
6	11,663	29.4	6	2,602	22.6	6	2,398	24.8	6	6,792	50.9
7	6,890	26.3	7	17,715	21.2	7	15,767	24.3	7	16,231	49.4
8	3,342	25.1	8	778	20.9	8	581	23.2	8	16,964	45.8
9	623	24.4	9	8,496	19.4	9	10,606	23.1	9	12,992	44.7
10	4,700	20.8	10	4,801	18.4	10	2,544	22.8	10	3,761	42.8
11	3,292	18.9	11	2,430	18.3	11	5,100	22.7	11	3251	39.9
12	16,981	17.6	12	2,603	18.1	12	10,654	22.5	12	9849	38.4
13	5,737	15.8	13	12,467	17.8	13	6,953	22.5	13	1511	38.1
14	7,142	15.4	14	1,506	17.3	14	920	22.4	14	5725	35.1
15	6,180	14.4	15	14,774	16.9	15	2,898	22.3	15	3415	34.5
16	13,753	13.8	16	8,686	16.8	16	5,459	22.2	16	3455	34.5
17	2,186	13.7	17	16,540	16.8	17	17,800	21.7	17	8890	33.3
18	1,969	13.4	18	8,099	16.3	18	8,526	21.5	18	14926	32.5
19	4,424	10.7	19	587	15.8	19	10,815	21.4	19	12361	32.4
20	3,187	8.8	20	3,357	15.8	20	10,230	21.3	20	2565	31.4

注) 地点：試験ルートスタート地点からの距離を表す。

3.3. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の実態

運転者によらず沿道局所において高い瞬時 NOx 排出係数が現れた。本節では、種々の交通量条件において小型貨物自動車市街路を走行場合の沿道局所 NOx 汚染の実態を述べる。

3.3.1. 交通量とルート NOx 排出係数の関係

車両 1 からの排出ガス質量が、種々の交通量においてどのように変化するかを調べるため、運転者を固定し 2 時間ごとに 24 時間横浜市街路を走行した。交通量は、横浜市街路の木月交差点における走行当日の交通台数を計数することにより把握した。試験を実施した 2001 年 12 月 20 日(木)のルート NOx 排出係数、平均車速および 1 時間交通量を図 3.11 に示した。

1 日の交通量は大きく変化し、最大約 4 倍の差があった。時間帯により平均車速も大きく変化し、交通量と高い相関があった。ルート NOx 排出係数は約 2.3g/km ~ 3.2g/km で、約 1.4 倍の変化があった。

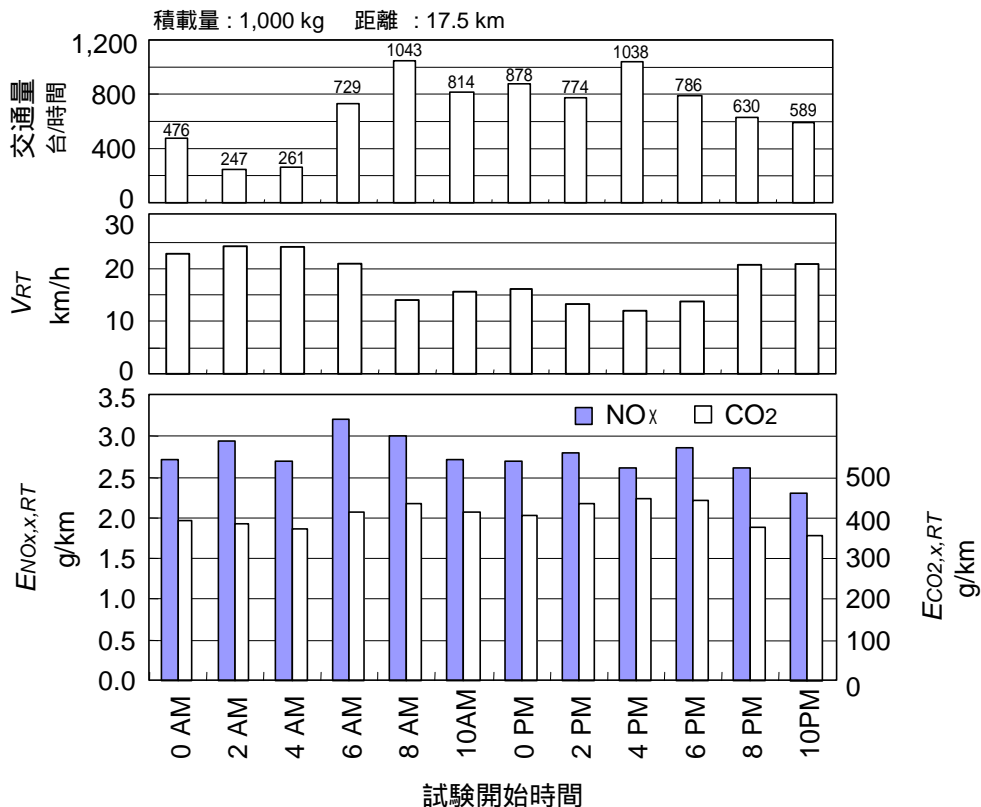


図 3.11 交通量とルート NOx 排出係数の関係

3.3.2. 沿道局所 NOx 汚染マップ

2001年12月20日(木)における車両1の12回の走行試験の中で、ルートNOx排出係数が最も高い午前6時開始の走行試験結果を表3.4に、GPSによる車両位置情報から瞬時NOx排出係数を横浜市街路上にマップした結果を図3.12に示す。なお、車両停止中の瞬時NOx排出係数は無限大となり表記不可能なため、停止中の排出ガス質量を積分し停車位置に表示した。瞬時NOx排出係数の大きい場所、小さい場所が明確に地図上に分布している。特に交差点近辺などでその数値が高く、集中的なNOx汚染があったことが示されている。この走行試験においては、ルートNOx排出係数は3.20g/kmであるが、地図上の沿道局所には、瞬時NOx排出係数の大きな場所が明確に点在している。

表 3.4 NOx 排出質量が多かった時の横浜市街路走行試験結果

Test conditions		Weather conditions	
Time, Date	6:00, 20 Dec. 01	Weather	Fine
Payload	1,000 kg	Temperature	2.7
Engine condition	Hot start	Atmosphere pressure	101.9 kPa
Sampling time	0.5 s	Humidity	61.2 %
Results	V_{RT} (km/h)	$E_{NOx, X, RT}$ (g/km)	$E_{CO_2, X, RT}$ (g/km)
	21.0	3.20	414

3.3. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の実態

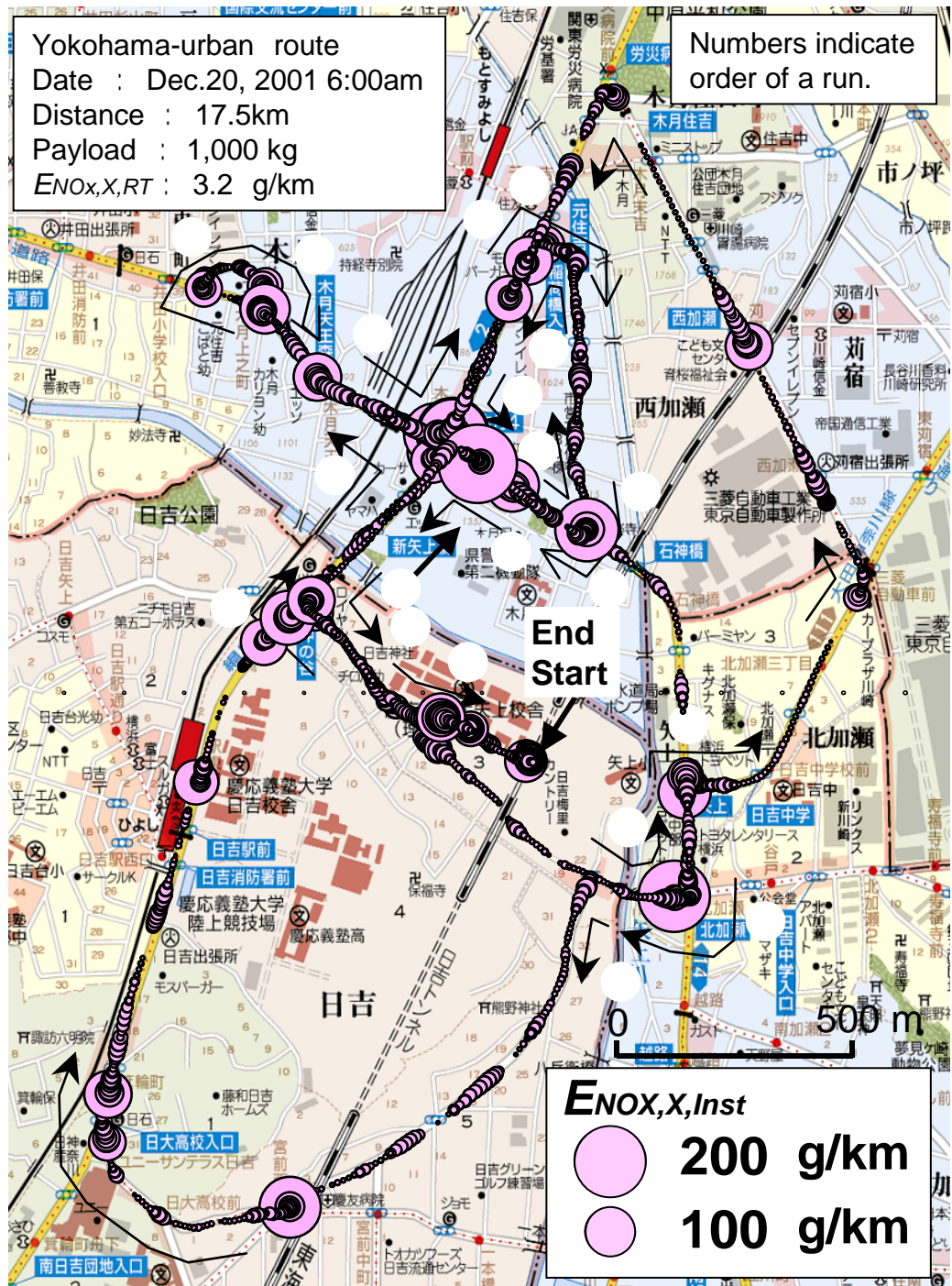


図 3.12 ルート NOx 排出係数が高い時の横浜市街路瞬時 NOx 排出係数マップ

掲載の地図は、(株)アルプス社の許可を得てアルプス社製品 (GEOATLAS2000) の地図を使用しています。無断転載、転図を禁止します。

3.3.3. 小型貨物自動車における沿道局所 NOx 汚染の発生要因

車両1を用いた横浜市街路における2001年12月20日午前6時試験開始の走行実験のデータについて瞬時NOx排出係数の上位20点,そのときの道路インフラ,交通状況および車両動態を表3.5にまとめた.なお,ここでの解析では,車両停止中のアイドリング時に排出されるNOx質量はほぼ停止時間の大きさに比例することは明らかなので,停止時以外の走行中の瞬時NOx排出係数の極大値を抽出した.横浜市街路におけるこの実験条件では瞬時NOx排出係数の上位20点は,123.2g/km~8.8g/kmであった.ルートNOx排出係数に対する瞬時NOx排出係数の最大値は,約41倍であった.

道路インフラとの関係で整理すると,20点のうち交差点が14点,狭路が4点,幹線路および上り坂がそれぞれ1点を占めた.交通状況で整理すると,信号による停止や右左折が11点,歩行者,対向車,駐車車両などの回避が5点,一時停止標識による車両停止や見通しの悪い場所での減速が4点あった.車両動態で整理すると,停止後の発進加速が12点,減速,徐行後の加速が7点,上り坂走行が1点あった.

以上から,横浜市街路では,交差点,狭路において,信号,道路標識および歩行者,対向車,駐車車両などによる停止,回避が原因で車両の発進や加速などの時に集中的なNOx汚染が発生している.

表 3.5 横浜市街路における集中的な NOx 汚染上位 20 点

ランク	地点(m)	NOx(g/km)	道路インフラ	交通状況	車両動態
1	17,222	123.2	坂道(上り)	一時停止標識で停止	停止後発進(直進)
2	5,203	76.1	信号のある交差点	赤信号で停止	
3	15,683	52.5			
4	1,521	48.0			停止後発進(右折)
5	6,666	40.4			停止後発進(左折)
6	11,663	29.4		(右に自転車)	停止後発進(右折)
7	6,890	26.3			
8	3,342	25.1			停止後発進(左折)
9	623	24.4		(右に自転車)	停止後発進(右折)
10	4,700	20.8	信号のない交差点	一時停止標識で停止	停止後発進(左折)
11	3,292	18.9		赤信号で停止	停止後発進(右折)
12	16,981	17.6	狭路	すれ違い車両	減速後加速
13	5,737	15.8			
14	7,142	15.4	幹線路	駐車車両,すれ違い	
15	6,180	14.4	狭路	すれ違い車両	
16	13,753	13.8	信号のある交差点	信号左折(停止無し)	左折後上り坂
17	2,186	13.7		信号右折(停止無し)	減速後加速
18	1,969	13.4	信号のない交差点	見通し悪い場所通過	
19	4,424	10.7			
20	3,187	8.8	狭路	歩行者回避	停止後発進(直進)

次に、車両 1 を用いた横浜市街路の幹線路および狭路の試験における走行状態と沿道局所 NOx 汚染発生要因を調べた。

図 3.2 に示した横浜市街路の綱島街道における仲の谷交差点から稲荷橋交差点までの 1km 区間を幹線路とした。幹線路区間は片側二車線で、信号が七箇所存在する。狭路は図 3.2 に示した仲の谷交差点から北加瀬交差点までの 1km とした。狭路区間は、中央線がなく道路幅員は、4~8m、信号が一箇所、電柱が両側で合計 42 箇所、見通しの悪い箇所が二箇所あり、全体として車両のすれ違いが容易ではない。それぞれ、区間の概要図を図 3.13 および 3.14 に示す。

積載量を半積(1,000kg)で、該当区間を一日一回、合計 16 日間走行したデータについて、沿道局所 NOx 汚染発生要因を解析した。それぞれ上位 20 点についてまとめた結果を表 3.6 および表 3.7 に示す。

幹線路においては、道路インフラとの関係で整理すると、20 点のうち交差点が 16 点、幹線路上が 4 点であった。交通状況で整理すると、赤信号による停止や右折待ちが 16 点、車間距離増加が 4 点あった。車両動態で整理すると、停止後の発進加速が 16 点、直進が 4 点であった。

狭路においては、道路インフラとの関係で整理すると 20 点のうち交差点が 18 点、狭路上が 1 点、坂道が 1 点であった。交通状況で整理すると、赤信号による停止や右折待ちが 18 点、車両すれ違いが 1 点、渋滞が 1 点あった。車両動態で整理すると、停止後の発進加速が 19 点、減速後の加速が 1 点であった。

以上から、幹線路では、交差点での信号による停止による発進、車間距離増加を詰めるための走行等による加速により沿道局所汚染が発生した。また、狭路では、交差点における停止のほか、車両すれ違いによる減速およびその後の加速が沿道局所汚染の原因となった。

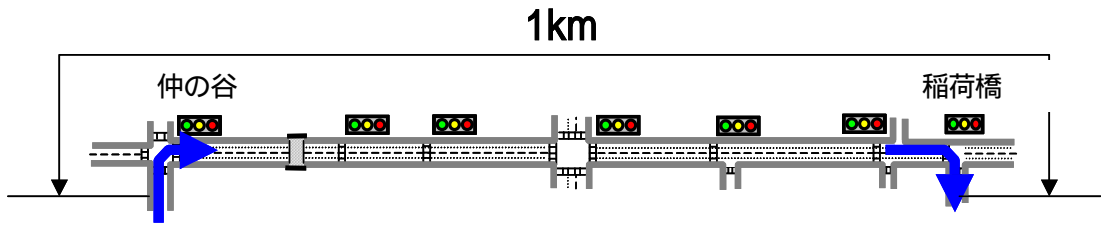


図 3.13 横浜市街路における幹線路 1km 区間概要図

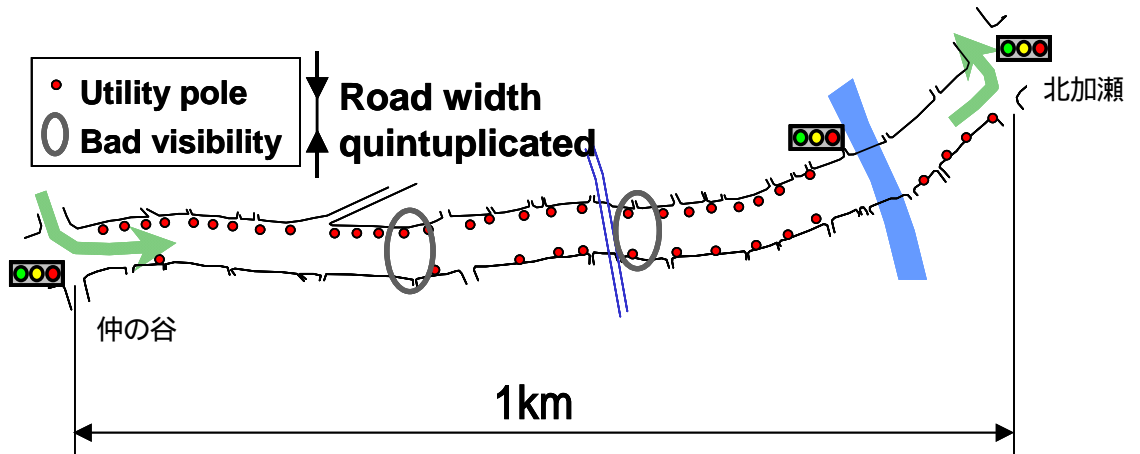


図 3.14 横浜市街路における狭路 1km 区間概要図

3.3. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の実態

表 3.6 横浜市街路の幹線路 1km における集中的な NOx 汚染上位 20 点

ランク	地点(m)	NOx(g/km)	道路インフラ	交通状況	車両動態
1	1,014	41.7	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
2	967	37.9	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
3	974	31.6	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
4	1,051	30.0	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
5	799	29.1	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
6	1,496	27.4	交差点	右折待ち	停止後発進(右折)
7	1,347	27.2	幹線路	車間距離の増加 (渋滞)	直進
8	616	25.4	交差点	右折待ち	停止後発進(右折)
9	1,395	25.1	幹線路	車間距離の増加	直進
10	979	25.0	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
11	898	25.0	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
12	628	24.7	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
13	824	23.9	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
14	1,220	23.7	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
15	1,205	23.3	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
16	1,203	22.9	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
17	1,004	22.8	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
18	785	22.4	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
19	1,293	22.0	幹線路	車間距離の増加 (渋滞)	直進
20	1,408	22.0	幹線路	車間距離の増加	直進

表 3.7 横浜市街路の狭路 1km における集中的な NOx 汚染上位 20 点

順位	地点(m)	NOx(g/km)	道路インフラ	交通状況	車両動態
1	6,564	41.9	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
2	6,757	40.8	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
3	6,521	40.7	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
4	6,555	33.4	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
5	6,553	30.5	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
6	5,729	29.1	交差点	赤信号停止	停止後発進(右折)
7	5,757	27.1	狭路(電柱)	対向車とすれ違い	減速後加速
8	5,712	26.5	交差点	赤信号停止	停止後発進(右折)
9	6,624	23.3	坂道	渋滞	停止後発進
10	6,780	22.2	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
11	6,545	22.0	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
12	5,747	21.5	交差点	赤信号停止	停止後発進(右折)
13	6,758	21.4	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
14	5,719	19.7	交差点	赤信号停止	停止後発進(右折)
15	6,517	19.6	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
16	6,726	19.4	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
17	6,536	18.3	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
18	6,759	18.1	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
19	6,529	17.6	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
20	5,748	17.4	交差点	赤信号停止	停止後発進(右折)

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別分析

本節では、路上走行における実態データから典型的な交差点における沿道局所 NO_x 汚染の事例を抽出し、VTR 画像をもとに道路構造、交通状況および運転者の観点で、沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別に沿道 NO_x 汚染を定量的に分析する。

3.4.1. 交差点通過時の沿道局所 NO_x 汚染

(1) 信号のある幅員の大きい交差点

木月交差点前後 50m について、交差点で停止後発進し直進で通過した場合、交差点を停止せずに通過した場合、交差点を停止せずに左折して通過した場合、および交差点を右折待ちの後右折で通過した場合の 4 例について、図 3.15、図 3.16、図 3.17 および図 3.18 に示した。

図 3.15 より 交差点を停止せずに通過した場合では、NO_x 排出係数のピーク値は、図 3.16 の停止後発進した場合と比べ非常に低い。しかし、交差点を停止せずに通過した場合においても、交差点内において比較的高い NO_x 排出係数の場所が存在している。これは、VTR 画像の分析の結果、交差点に進入する前に運転者が安全確認のためアクセルを戻し交差点内に入り、安全であることを確認した後に再びアクセルを踏むという運転操作のためであることがわかった。

図 3.17 に示した左折事例の場合、左右の安全を確認しながらアクセルをあまり踏まずに横断歩道を通過しており、そのため交差点における瞬時 NO_x 排出係数と比較し、大きなピークは生じなかった。

図 3.18 に示した右折の場合は、対向車の確認を行い発進した後、横断歩道上の歩行者通過の安全確認のため交差点内で一度停止し、その後横断歩道を通過している。そのため、対向車線上で一度瞬時 NO_x 排出係数は低下し、その後増加するという履歴をたどった。

いずれの場合も、交差点における停止後発進・直進時と比べ単位距離あたりの NO_x 排出量のピークは小さかった。これは、横断歩道を通過する際、安全確保のため運転者が直進時と比べ右左折時にはアクセルを踏まないためである。

このように、運転者（人間）の行動と沿道局所 NO_x 質量には密接な関係があることがわかる。

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別分析

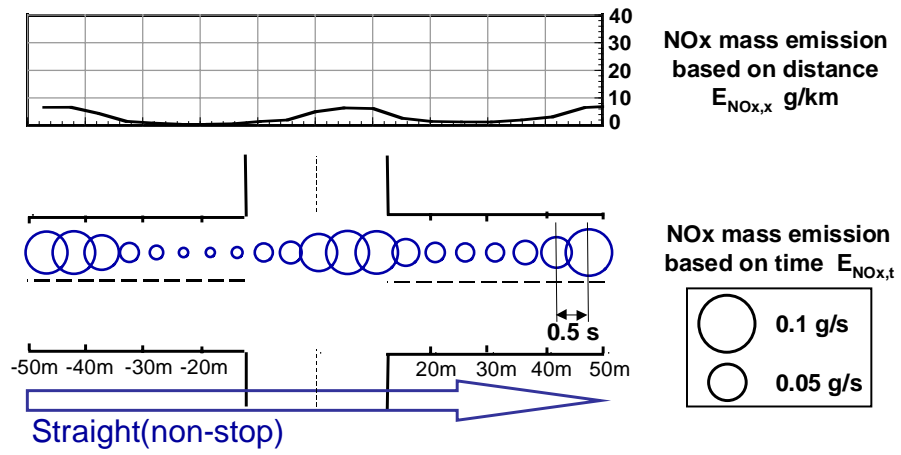


図 3.15 横浜市街路木月交差点直進通過時の排出ガス履歴例

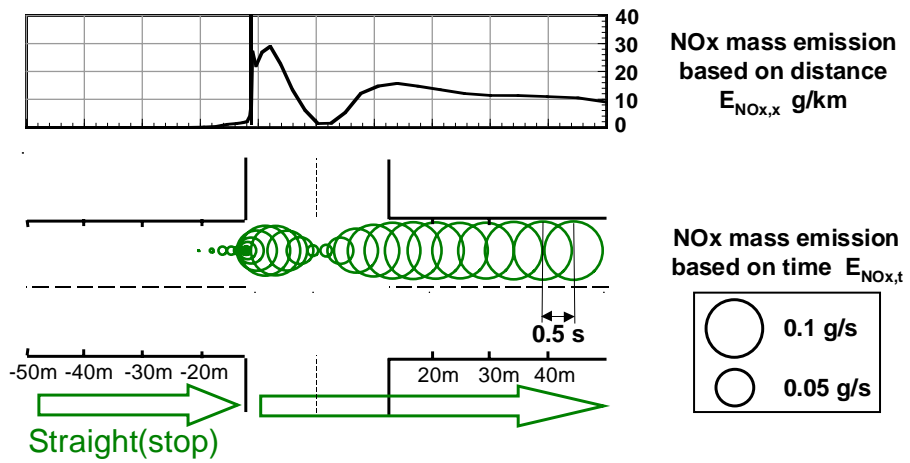


図 3.16 横浜市街路木月交差点停止・発進時の排出ガス履歴例

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別分析

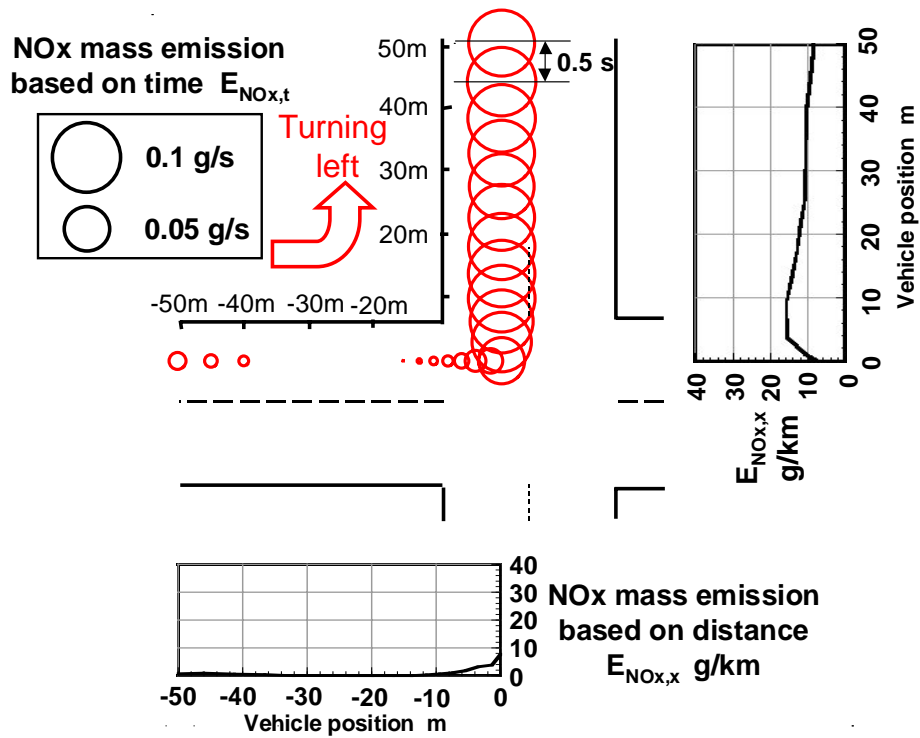


図 3.17 横浜市街路木月交差点左折時の排出ガス履歴例

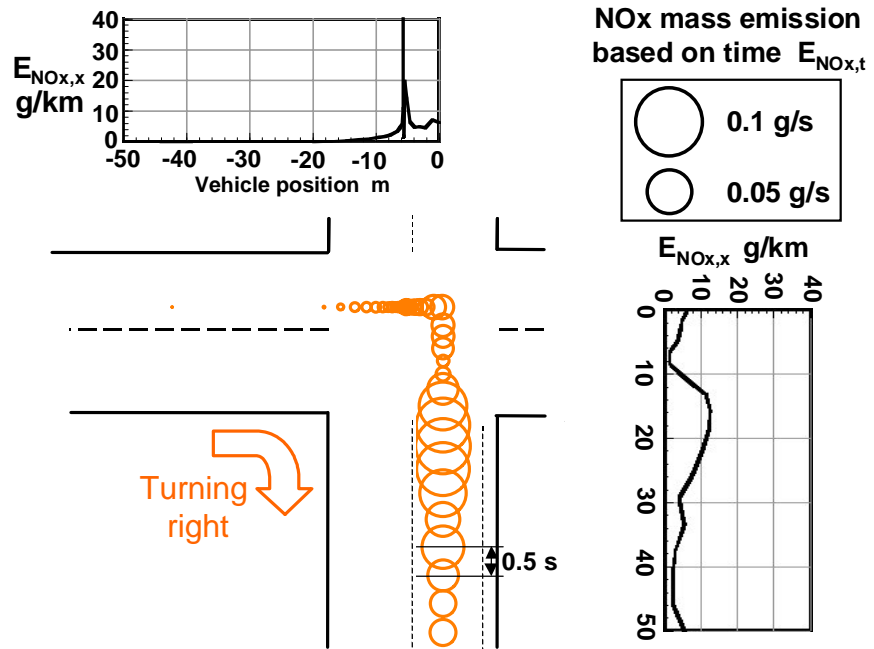


図 3.18 横浜市街路木月交差点右折時の排出ガス履歴例

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別分析

図 3.15 図 3.16 図 3.17 および図 3.18 で示したそれぞれの走行パターンについて、交差点前後 50m 区間に排出した NO_x および CO₂ 排出質量の平均値を表 3.8 に示した。交差点を停止後発進した場合が、NO_x および CO₂ 排出質量とも最も多いことが分かる。また、最も排出質量が少なかった走行パターンは、交差点を停止せずに通過した場合である。

表 3.8 横浜市街路木月交差点通過パターン別区間平均 NO_x・CO₂ 排出質量

	Average NO _x E _{NO_x,x,-50~50m-ave} g/km	Average CO ₂ E _{CO₂,x,-50~50m-ave} g/km
Straight (non-stop)	3.47	454
Straight (stop)	7.47	809
Turning left	6.44	745
Turning right	4.27	726

(2) 信号の無い幅員の小さい交差点

信号の無い幅員の小さい交差点での車両走行動態と沿道局所の排出ガスによる汚染特性を明らかにするため、横浜市街地ルート内の幅員約 6m の見通しの悪い細街路において車両が停止せずに直進して通過した場合を例に挙げ(4 事例)、道路状況、運転方法、車両走行状態、および排出ガス履歴の関係を図 3.19 に示した。

信号の無い見通しの悪い交差点では 4 事例とも、交差点に進入する前にアクセルを戻し、場合によってはブレーキを踏み車両速度を低下させ、安全確認をしていた。この運転操作によって 交差点通過後の NOx 排出係数が増加していることが分かった。

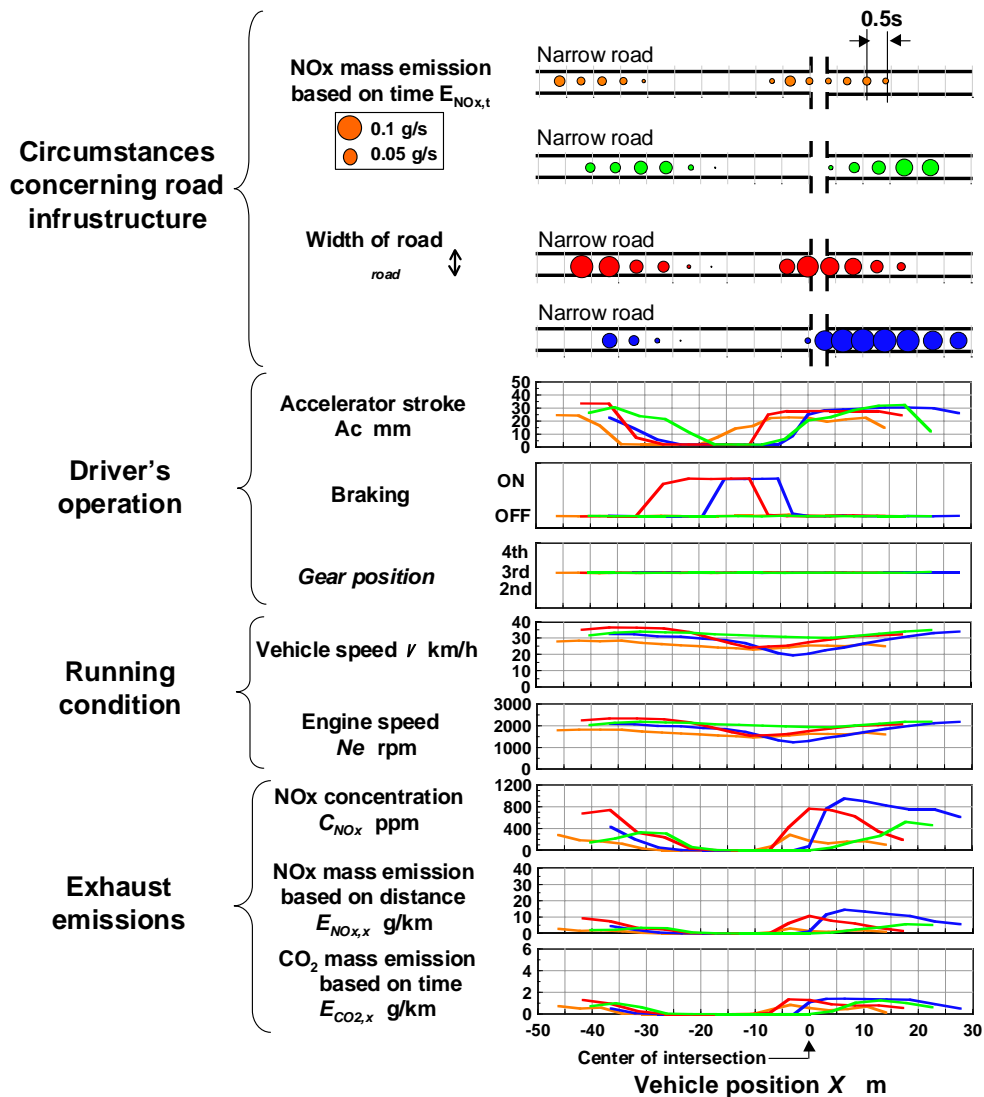


図 3.19 幅員の小さい信号のない交差点直進時の排出ガス履歴

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

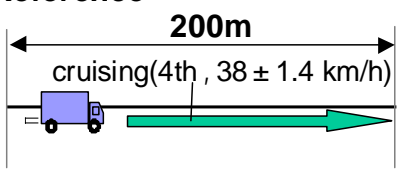
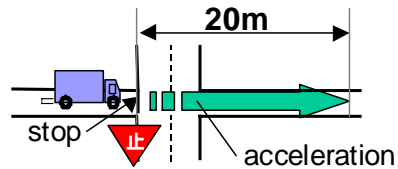
3.4.2. その他の事例

横浜市街路における走行実験の中で得られた沿道局所 NOx 汚染が発生するその他の事例をまとめる。

(1) 一時停止

一時停止の標識手前で一旦停止し、その後発進加速した事例を4ケース抽出し、各事例について、停止後20m 区間における単位距離あたりの NOx 排出量の最大値と、区間平均 NOx 排出量を調べ、表 3.9 に示した。また、比較として定常走行時についてもあわせて示した。一時停止で停止し、発進する場合、4th, 38km/h で走行している場合と比較し、これらの事例では最大値で約15倍、平均値で約10倍多く NOx が排出されていることがわかる。

表 3.9 一時停止時の NOx 排出ガス質量

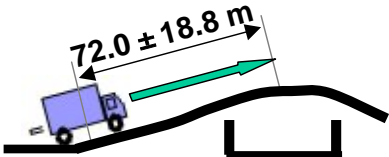
Example model	NOx mass emission $E_{NO_{x,x}}$ g/km
Reference  <p>200m cruising(4th, 38 ± 1.4 km/h)</p>	1 example Max 1.9 g/km Average 1.1 g/km
 <p>20m stop acceleration</p>	4 example Max 30.4 ± 18.8 g/km Average 12.5 ± 3.0 g/km

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

(2) 陸橋

木月交差点付近の陸橋を停止せずに通過した4つの事例について、陸橋上り区間における NOx 排出係数の最大値と、陸橋区間の平均値を表 3.10 に示した。陸橋上り区間通過時では、4th, 38km/h で走行している場合と比較し、最大値で約 3.7 倍、平均値で約 3.5 倍多く NOx が排出されていた。

表 3.10 陸橋通過時の NOx 排出ガス量

Example model	NOx mass emission $E_{NO_{x,x}}$ g/km
3rd ~ 5th, 37.8 ± 5.5 km/h 	4 example Max 7.1 ± 3.1 g/km Average 3.9 ± 1.2 g/km

(3) 道路上の段差

横浜市街路の主要幹線路である綱島街道の木月交差点手前約 300m 地点の橋梁部分は、図 3.20 に示すように段差があり、その部分を通過する際、運転者はブレーキを踏み減速する傾向にある。そのため道路上の段差が沿道局所 NOx 汚染に与える影響を調べた。



図 3.20 運転席から見た橋梁段差部分の状況

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

図 3.21 に、2001 年 12 月 20 日に 2 時間ごとに 12 回走行した横浜市街路の綱島街道における仲の谷交差点から稲荷橋交差点までの 1km 区間の走行データを示す。橋を通過した後の信号で停止した 2 回のケースを除いてすべてのケースで、車両へのショックを緩和させるため、段差手前で明らかに減速している。減速後、再加速するために段差を通過した後に NOx 排出質量のピークが表れている。

なお、たまたまこの段差は、2002 年 11 月ごろに道路改修工事が行われ平坦になった。図 3.22 に、平坦になった後の走行事例 4 例(2002 年 12 月 7 日～2003 年 4 月 26 日)の平均車速 NOx および CO₂ 排出質量履歴を示した。明らかに、橋梁手前での車両の減速はなくなっている。

そこで、道路の段差による排出ガス質量への影響を調べた。段差の改修前後のそれぞれ 4 事例について、段差による減速の開始及び終了の平均的な場所である木月交差点手前 360m から手前 220m までの 140m の間の平均車速、NOx および CO₂ 排出質量を表 3.11 に示した。

NOx 排出係数、NOx 排出係数のピーク、CO₂ 排出係数ともに段差改修後は大幅に低くなっている。このことから、道路の段差が NOx および CO₂ 排出質量に大きな影響を与えることがわかった。

表 3.11 区間 a (140m) における橋梁の段差通過時 NOx および CO₂ 排出量

段差改修前					段差改修後				
年月日 時間	平均車速 km/h	NOx g/km	ピーク NOx g/km	CO ₂ g/km	年月日	平均車速 km/h	NOx g/km	ピーク NOx g/km	CO ₂ g/km
2001.12.20 0:00	40.5	2.79	5.11	444	2002 12.07	36.8	0.924	2.15	155
2:00	39.6	1.88	6.83	345	2003 2.15	39.1	0.606	1.38	105
10:00	39.1	1.73	5.67	311	2003 3.12	39.4	1.409	5.69	253
14:00	41.3	3.22	7.72	411	2003 4.26	40.4	1.709	5.35	299
平均	40.1	2.41	6.33	378	平均	38.9	1.16	3.64	203
比率	-	1.0	1.0	1.0	比率	-	0.48	0.58	0.54

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

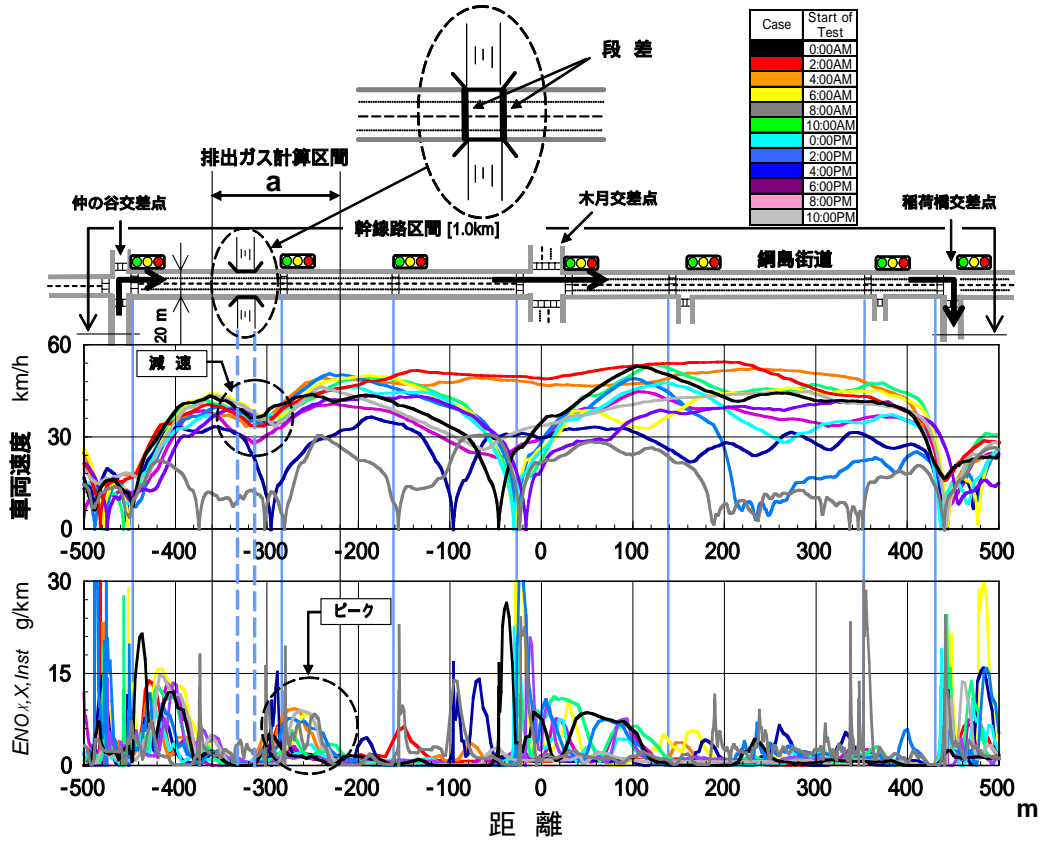


図 3.21 段差改修前の車両速度と NOx 排出質量履歴

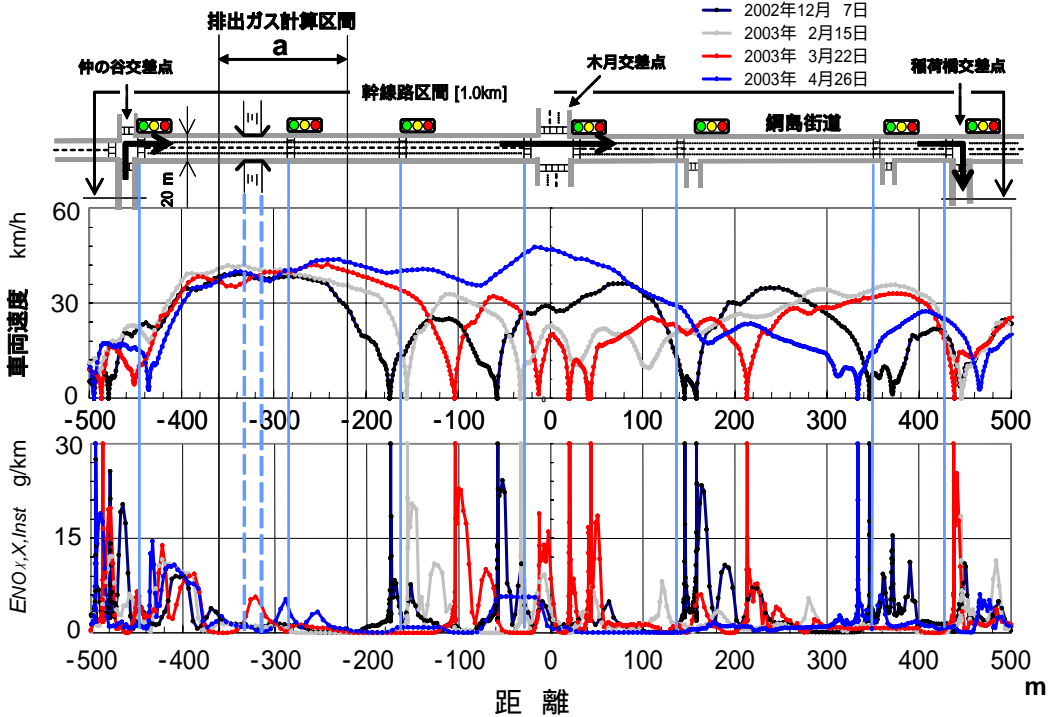


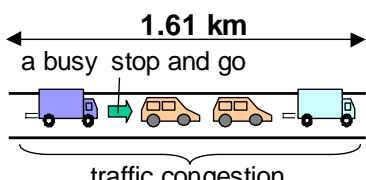
図 3.22 段差改修後の車両速度と NOx 排出質量履歴

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

(4) 渋滞の影響

渋滞区間での排出ガス量を評価するため、首都高速ルートにおける渋滞区間 1.61km を抽出した。その時の交通状況、平均速度、NOx 排出係数最大値、区間の平均 NOx および CO₂ 排出係数のそれぞれを表 3.12 に示した。これらの事例では、単位距離あたりの NOx 排出量の最大値は、定常走行の場合と比べて 22 倍程度大きい。区間平均 NOx 排出量に関しては 1.4 倍程度の増加と、交差点停止発進時などの他の事例と比較して、それほど多くの NOx を排出していないことが分かった。渋滞時では停止・発進が伴うものの、前方に他の車両が停止または徐行していることをドライバーは認知しているため、緩慢な発進となった。

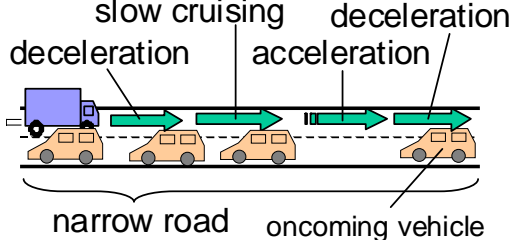
表 3.12 渋滞時の NOx 排出ガス量

Example model	NOx mass emission E_{NO_x} g/km	CO ₂ mass emission E_{CO_2} g/km
Average 15.1 km/h Max 41.0 km/h Min 0 km/h Frequency of stops 5.57 times/km 	1 example Max 41.6 g/km Average 1.56 g/km	1 example Max 11448 g/km Average 388.4 g/km

(5) 対向車両の影響

横浜市街地ルート内の狭路通過時に、対向車線が渋滞していることから、みかけの道路幅員が減少していた 2 つ事例について、対向車線が渋滞していた区間における NOx 排出係数の最大値と、区間の平均 NOx 排出係数を表 3.13 に示した。このような区間を通過時は、対向車線に停止している車両との接触を避けるために、低速度で加減速を繰り返す。そのことにより、4th, 38km/h で走行している場合と比較し、これらの事例では最大値で約 18.3 倍、平均値で約 4.9 倍多く NOx が排出されていることが分かる。

表 3.13 狭路対向車線渋滞時の NOx 排出係数

Example model	NOx mass emission $E_{NO_{x,x}}$ g/km
	<p>2 example</p> <p>Max 18.3 ± 3.1 g/km</p> <p>Average 4.9 ± 1.5 g/km</p>

3.4.3. 道路、交通状況に起因する要因の対策と効果

車両の停止や減速に起因する発進や加速が集中的な NOx 汚染の原因である。そのためには、道路インフラや交通状況の観点から、車両の停止あるいは減速の原因となる、信号、一時停止および対向車とのすれ違い、見通しの悪い場所等における回避操作を極力少なくする道路構造とすることが沿道局所汚染を抑えるために重要である。ここでは、典型的な対策がとられた場合に期待される効果度について横浜市街路等における走行例よりまとめる。

表 3.14 に本研究で得られた小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染発生実態および局所汚染を抑制するための対応をとった場合の期待される効果度について、まとめた。表には、新規に道路インフラを構築する場合も含め、考えられる一般的な対策および排出ガス低減効果を記載した。

本研究に用いた小型貨物自動車の場合、車両の停止や減速に起因する発進や加速を抑制することにより、局所の NOx 排出質量は大幅に低減する。

3.4. 小型貨物自動車の沿道局所 NOx 汚染の発生パターン別分析

表 3.14 沿道局所 NOx 汚染に関する道路，交通状況に起因する要因の対策例と効果

要 因	実 態	対策後の状態	比較条件	効果度 (低減率：%)
	NOx 排出係数			
交差点における 停止	7.47	停止無し直進	交差点前後 100m (交差点通過事例比)	54
高速道金所停止	7.8	停止無し直進	料金所より 150m (4 速 38km/h 比)	85
陸 橋	3.9	平地直進	上り 72m 区間 (4 速 38km/h 比)	70
道路段差	2.41	段差無し	段差前後 140m 区間 (段差無し状態比)	52
渋 滞	1.56	定速走行	4 速 38km/h 比	24
狭路でのすれ違い	4.9	定速走行	4 速 38km/h 比	76

3.5. 小型バスの沿道局所汚染の実態

本節では、小型バスの路上走行における実態データから典型的な沿道局所 NO_x 汚染の事例を抽出し、VTR 画像をもとに道路構造、交通状況および運転者の観点で、沿道局所 NO_x 汚染の発生パターン別に定量的に分析する。

3.5.1. 沿道局所汚染マップ

2001 年 9 月 6 日（水）に北京市街路にて走行試験を行った。試験条件および主たる結果を表 3.15 に、GPS による車両位置情報から瞬時 NO_x 排出係数を北京市街路上にマップした結果を図 3.23 に示す。図 3.23 では、非常に大きな NO_x 排出係数が見られるが、これは渋滞時に車両停止時間が長かったためである。北京市街路でも、瞬時 NO_x 排出係数の大きな場所が点在している。

表 3.15 北京市街路走行試験条件および結果

試験条件	北京市街路	
試験日：時間	2001.9.6 14：15	
積載量 (kg)	375	
エンジン状態	暖機	
運転者	S	
天候	晴れ	
気温 ()	36.5	
大気圧 (kPa)	100.1	
相対湿度 (%)	10.9	
絶対湿度 (kg/kg)	0.00412	
結果	V_{RT} (km/h)	19.5
	$E_{NOx, X, RT}$ (g/km)	3.10
	$E_{CO_2, X, RT}$ (g/km)	315.0

図 3.24 に、2001 年 9 月 5 日（火）に同じく北京市街路にて行った走行試験における、時間当たりの NO_x 排出質量を示した。時間当たりの排出質量で見ると試験路全体に平均的に排出されている。

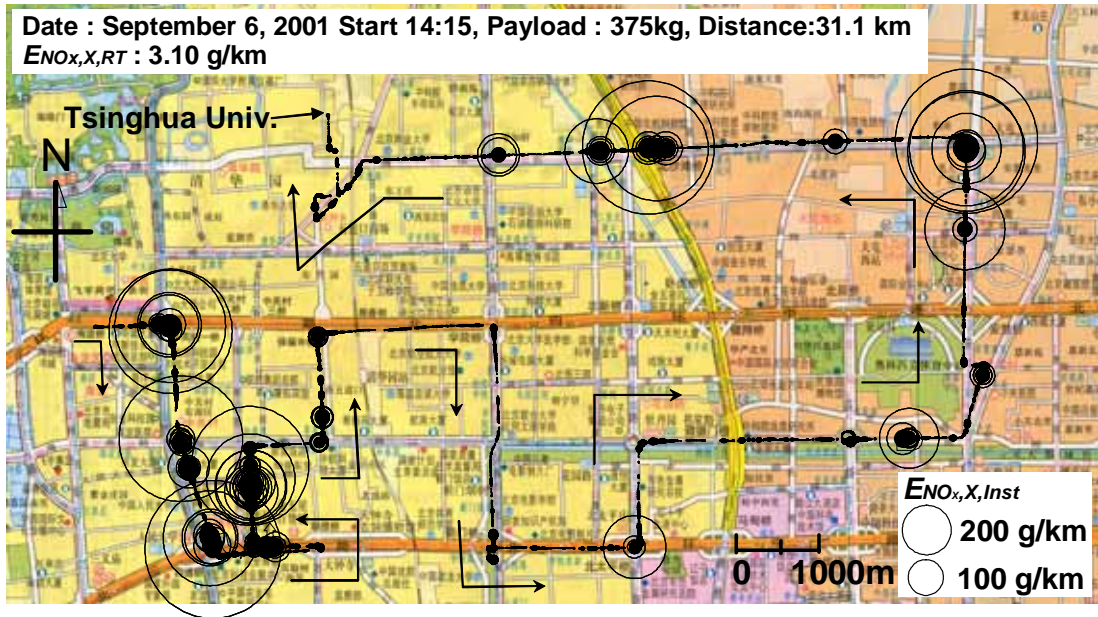


図 3.23 北京市街路 NO_x 排出係数マップ

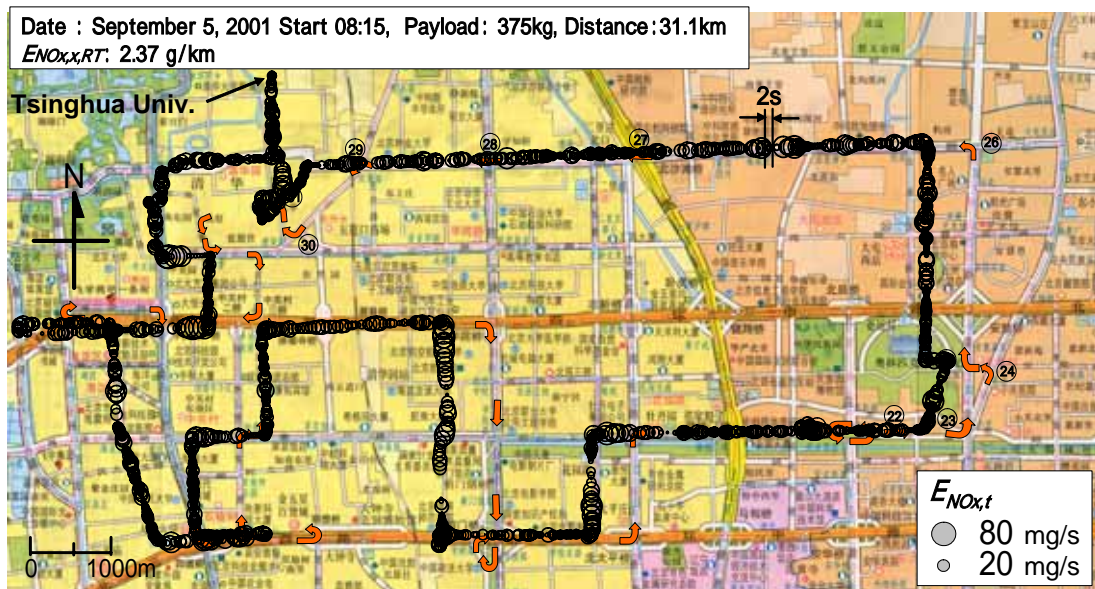


図 3.24 北京市街路 NO_x 排出質量マップ

3.5.2. 小型バスにおける沿道局所 NOx 汚染の発生要因

北京市街路における 2001 年 9 月 6 日の走行試験において、瞬時 NOx 排出係数が極大値を示す地点を抽出し、道路インフラ、交通状況、車両動態の観点で上位 20 点を表 3.16 にまとめた。瞬時 NOx 排出係数の上位 20 点は、80.7g/km ~ 48.2g/km であった。ルート NOx 排出係数に対する瞬時 NOx 排出係数の最大値は、26.0 倍であった。小型貨物自動車を用いた横浜市街路における瞬時 NOx 排出係数の上位 20 点である 123.2g/km ~ 8.8g/km にほぼ匹敵する沿道局所 NOx 汚染の絶対値であった。

道路インフラとの関係で整理すると、20 点のうち幹線路が 13 点、交差点が 6 点、駐車場が 1 点を占めた。交通状況で整理すると渋滞が 13 点、赤信号による停止後の発進が 5 点、歩行者回避後の加速が 1 点、駐車のための運転が 1 点あった。車両動態で整理すると、緩慢な発進が 13 点、停止後の発進加速が 6 点、駐車時の低速走行が 1 点あった。

以上から、北京市街路では、幹線路における渋滞中の緩慢な発進時に瞬時 NOx 排出係数が大きくなっている。

表 3.16 北京市街路における集中的な NOx 汚染上位 20 点

ランク	地点(m)	NOx(g/km)	道路インフラ	交通状況	車両動態
1	9,140	80.7	幹線路	渋滞	緩慢な発進(直進)
2	11,696	67.5			
3	11,584	66.8			
4	30,277	66.0			
5	30,358	65.8			
6	8,185	62.5	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
7	26,300	60.8	幹線路		
8	8,429	60.0		渋滞	緩慢な発進(直進)
9	27,082	57.5			
10	35,704	57.4	大学構内駐車場	駐車	低速走行
11	30,836	56.2	幹線路	渋滞	緩慢な発進(直進)
12	3,471	54.9	交差点	歩行者回避	停止後発進(右折)
13	5,053	54.3		赤信号停止	停止後発進(直進)
14	11,648	51.2	幹線路	渋滞	緩慢な発進(直進)
15	11,654	51.2			
16	19,441	51.0	交差点	赤信号停止	停止後発進(左折)
17	11,656	50.4	幹線路	渋滞	緩慢な発進(直進)
18	13,005	50.3			
19	7,095	50.1	交差点	赤信号停止	停止後発進(直進)
20	10,843	48.2		渋滞	緩慢な発進(直進)

3.6. まとめ

市街路における沿道局所 NO_x 汚染の実態を明らかにするため、第2世代の排出ガス対策技術を持った小型貨物自動車を用いた走行試験を行った。比較として EGR 装置が装着されていない第1世代の排出ガス対策技術を持った小型バスによる走行試験も行った。

はじめに、小型貨物自動車を用いて交通状況による運転への影響を可能な限り排除した状態で、13人の運転者による走行試験を行った結果、運転者の個人差によりルート NO_x 排出係数は異なった。また初心者からベテランまでの4人の運転者で実際の市街路で走行試験を行った結果、瞬時 NO_x 排出係数は異なる傾向があった。このため市街路における走行試験は運転者を固定して試験を行った。

沿道局所 NO_x 汚染の絶対値はそれぞれが実際に使われている状況ではルート NO_x 排出係数に対し最大で小型貨物自動車は41倍、小型バスは26倍であった。この結果、いずれの世代の車両もそれぞれが使われている場所で高い沿道局所 NO_x 汚染が発生することがわかった。

小型貨物自動車および小型バスの走行による沿道への集中的な NO_x 汚染の要因は、以下のとおりである。

(1) 小型貨物自動車

沿道局所 NO_x 汚染は、交差点で最も多く発生し、車両動態は停止後の発進であった。また、対向車とのすれ違い、見通しの悪い場所等における車両の減速、加速においても沿道局所汚染は発生した。したがって、信号、一時停止、障害物回避操作等による車両の停止や減速後の発進や加速が集中的な NO_x 汚染の要因であった。

(2) 小型バス

沿道局所 NO_x 汚染は、幹線路における渋滞中の緩慢な発進で最も多く発生した。したがって、緩慢な発進を起こさせる渋滞が沿道局所 NO_x 汚染の要因であった。

交差点における停止後の直進、左折および右折の事例から、運転者（人間）の行動と排出ガス質量には密接な関係があることが本研究結果の一端からわかった。運転者の行動（心理）と沿道局所 NO_x 汚染の関係に関するさらなる研究が望まれる。

第4章 沿道局所 NO_x 汚染の解析

本章では、第2世代の排出ガス対策技術を持った小型貨物自動車および第1世代の排出ガス対策技術を持った小型バスについて、沿道局所 NO_x 汚染が発生する代表的な走行パターンにおける、車両速度に対する NO_x 排出係数履歴およびエンジン NO_x マップ上での運転履歴を調べ、それぞれの自動車の沿道局所における NO_x の集中的な汚染の原因を解明する。

4.1. 車両動態の解析

4.1.1. 車両速度とNO_x 排出係数の関係

図 4.1 (a) ~ (c) は、小型貨物自動車における車両速度に対するルート NO_x 排出係数、ショートトリップ NO_x 排出係数および瞬時 NO_x 排出係数の関係を表したものである。相関式は、環境庁の調査で使われた車両速度と NO_x 排出係数との関係を良く表す関数を用いた⁽³⁰⁾。

小型貨物自動車における車両速度とルート NO_x 排出係数の関係については、横浜市街路 58 回、首都高速道路 1 回を走行した結果についてまとめた。図 4.1(a)に示す。なお、車両速度が 0 に近づくにつれ、NO_x 排出係数は無限に増加することは明らかなので、0 近傍の NO_x 排出係数を仮定して相関線を作成している。この場合、車両速度とルート NO_x 排出係数は良い相関を示している。横浜市街路 3 回、首都高速道路 1 回について車両速度とショートトリップ NO_x 排出係数の関係をまとめた結果を図 4.1(b)に示す。同様に良い相関を示している。次に、ショートトリップの解析に用いた横浜市街路 3 回のうち 1 回について車両速度と瞬時 NO_x 排出係数の関係を解析した。結果を図 4.1(c)に示す。使用ギヤ別に色分けして示した。この場合、決定係数は低かった。これは、主に低車速側で瞬時 NO_x 排出係数が高くなっていることが原因であると考えられる。

小型バスにおける車両速度とルート NO_x 排出係数の関係について、中華人民共和国北京市の清華大学、北京市街路、北京市高速道路における合計 4 回を走行した結果についてまとめた。図 4.2(a)に示す。車両速度とルート NO_x 排出係数は良い相関を示している。次に、図 4.2(a)で解析した走行データについて車両速度とショートトリップ NO_x 排出係数の関係をまとめた結果を図 4.2(b)に示す。同様に良い相関を示している。ショートトリップの解析に用いた走行 4 回のうち 1 回について車両速度と瞬時 NO_x 排出係数の関係を解析した。結果を図 4.2(c)に示す。使用ギヤ別に色分けして示した。この場合、決定係数は小型貨物自動車に比べ高かった。

以上から、小型バスの場合、ルート NO_x 排出係数、ショートトリップ NO_x 排出係数および瞬時 NO_x 排出係数はいずれも車両速度に対し良い相関を示した。これまで環境庁等の調査では、あるモードにおける NO_x 排出係数と車両速度に対し良い相関を示すことがわかっているが、小型バスの場合同様に瞬時 NO_x 排出係数でも車両速度に対して良い相関を持つことがわかった。しかし、小型貨物自動車の場合決定係数は低いという特徴があることがわかった。

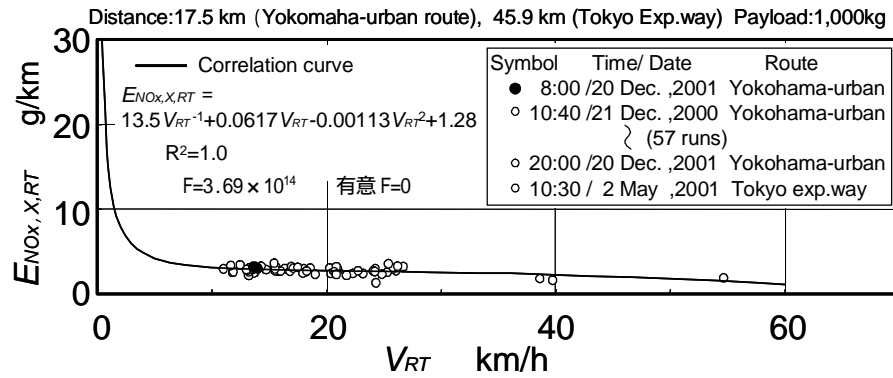


図 4.1(a) 小型貨物自動車のルート平均車速とルート NOx 排出係数の関係

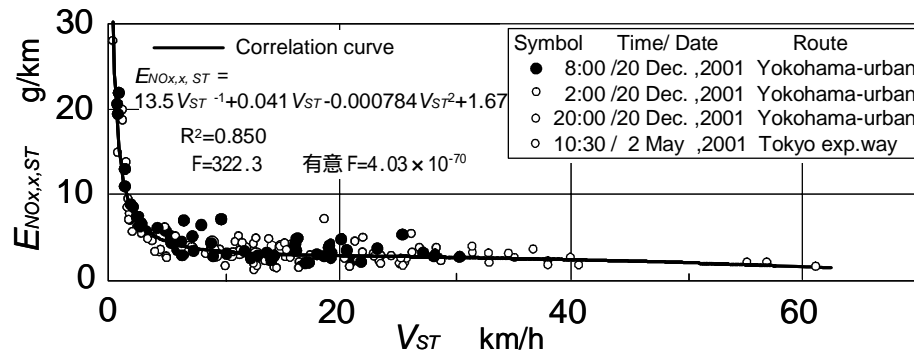


図 4.1(b) 小型貨物自動車のショートトリップ NOx 排出係数と車速の関係

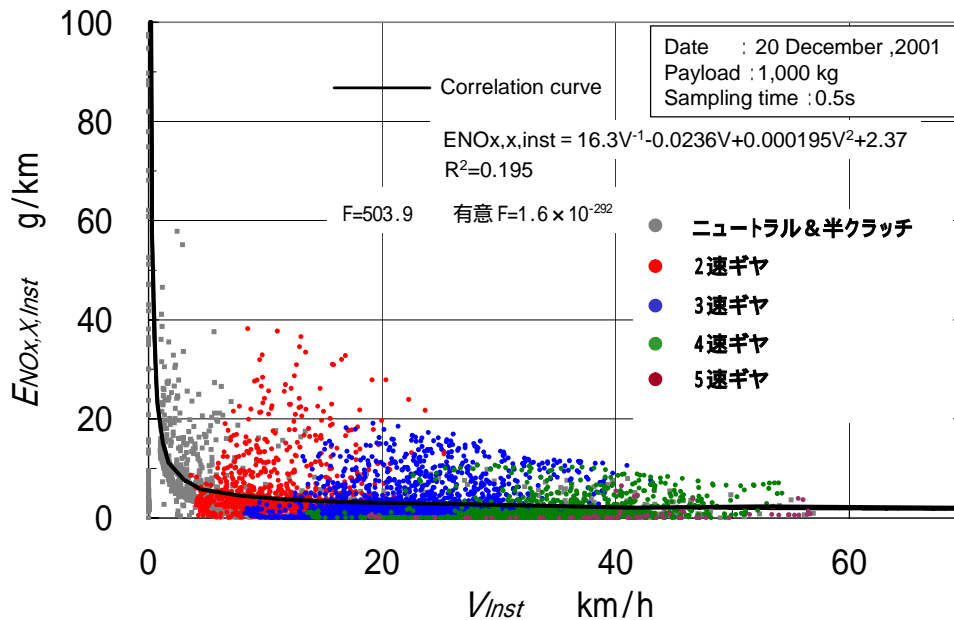


図 4.1(c) 小型貨物自動車の瞬時車速と瞬時 NOx 排出係数の関係

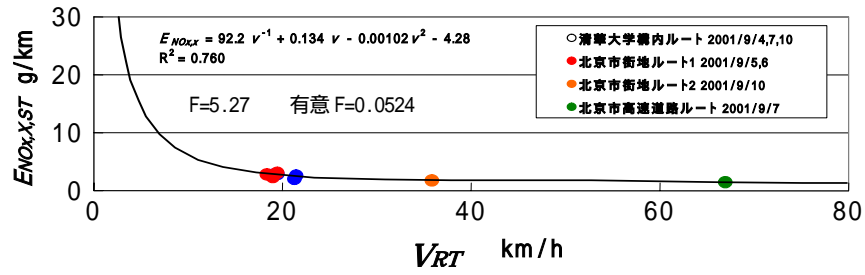


図 4.2(a) 小型バスの車両速度とルート NOx 排出係数の関係

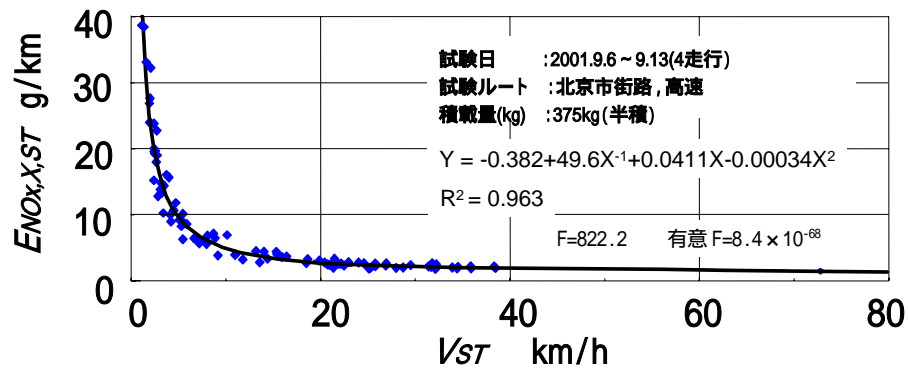


図 4.2(b) 小型バスのショートトリップ車速とショートトリップ NOx 排出係数

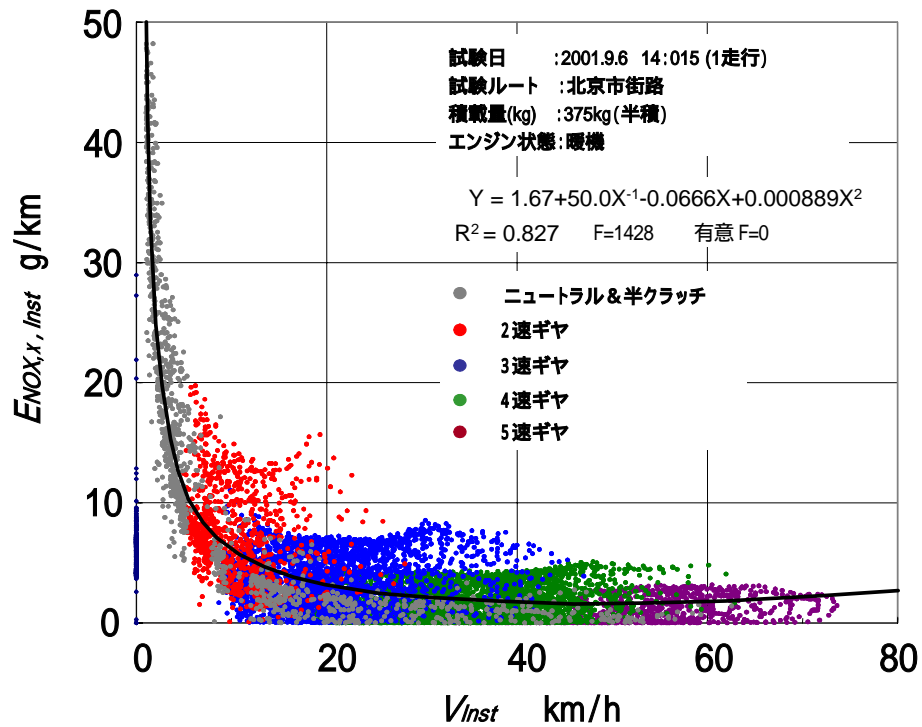


図 4.2 (c) 小型バスの瞬時車速と瞬時 NOx 排出係数

4.1.2. 沿道局所 NOx 汚染と車両動態

小型貨物自動車の場合、交差点における発進時に瞬時 NOx 排出係数が高くなるケースが一番多かったので、図 4.3 に交差点における発進時の NOx 排出係数履歴例を示した。2 速ギヤにおける加速時の瞬時 NOx 排出係数は約 38g/km であり、この例ではルート NOx 排出係数の約 13 倍の集中的な排出があった。

2001 年 12 月 20 日における走行試験の瞬時車速に対する瞬時 NOx 排出係数全データをプロットした結果を図 4.4 に示す。瞬時車速、瞬時 NOx 排出係数および EGR 率の高低との関係を明らかにするために、EGR 率 10%を基準としてそれ以上の場合および未満の場合に分けてプロットした。10%を基準としたのは、0.5 秒おきの EGR 率データを整理した結果、約 10%を越えるところから頻度が増加する傾向があったためである。

瞬時 NOx 排出係数は車速が低くなると大きくなる傾向がある。これは、式 (2-4) において分母の車両速度が小さくことが一つの要因である。しかし、約 30km/h 以下の低速では瞬時 NOx 排出係数のばらつきが大きくなっており、非常に高い点が存在している。

それらの点と車両動態との関係を調べるために、図 4.3 で示した交差点における発進時の車両速度に対する NOx 排出係数履歴を図 4.4 上に示した。集中的な汚染が発生する発進時の瞬時 NOx 排出係数の履歴を車両動態の観点で見ると、特に 2 速ギヤの走行において瞬時 NOx 排出係数が高くなっており、それらの点は EGR 率 10%未満の点である。

以上から、小型貨物自動車の場合、低速側で EGR 率が低く瞬時 NOx 排出係数が高い領域があり、2 速ギヤの加速においてそれらの領域が使われ集中的な NOx 汚染が発生した。

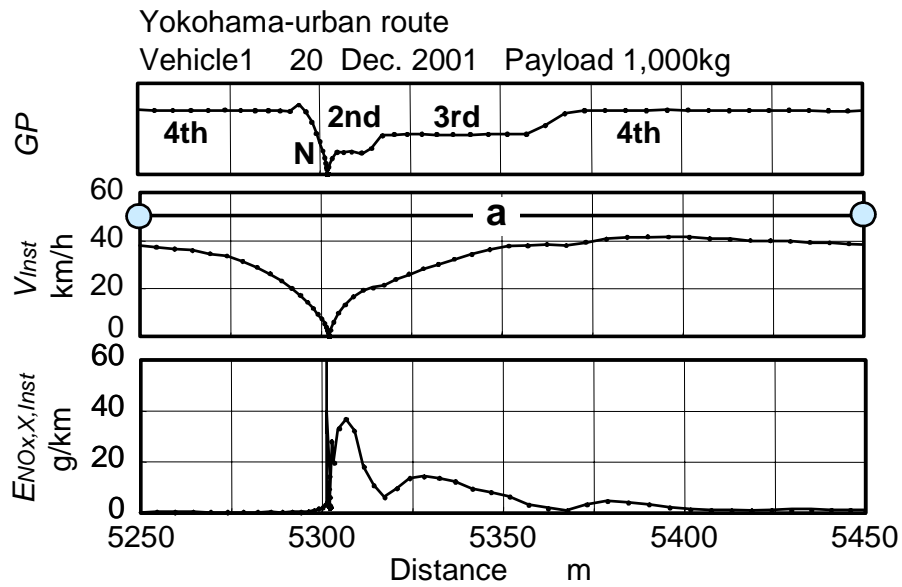


図 4.3 小型貨物自動車の交差点における発進時の NOx 履歴

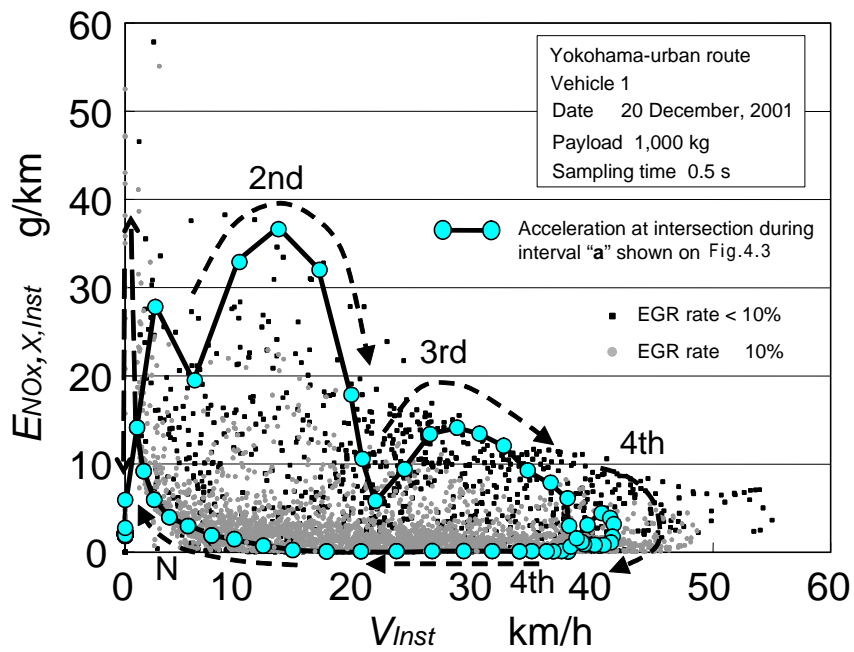


図 4.4 小型貨物自動車の車両速度と瞬時 NOx 排出係数の関係

次に、小型バスについて同様な解析を行う。

北京市街路における小型バスの走行試験では、幹線路における交通渋滞時に沿道への集中的な NOx 汚染が発生した。図 4.5 に交通渋滞時の典型的な NOx 排出履歴例を示した。低速での緩慢な発進時の NOx 排出係数は約 40g/km であり、この例ではルート NOx 排出係数の 13 倍程度の集中的な汚染が発生している。

図 4.6 に、小型バスにおける 2001 年 9 月 6 日の走行試験の瞬時車速に対する瞬時 NOx 排出係数全データをプロットした結果を示す。小型貨物自動車と比較し瞬時 NOx 排出係数のばらつきは少ないが、車速が低くなるにつれ急激に高くなる傾向を示し、特に 10km/h 以下で瞬時 NOx 排出係数が大きく立ち上がった。

小型バスにおける集中的な NOx 汚染と車両動態の関係を調べるために、図 4.5 に示した渋滞時の NOx 汚染履歴を図 4.6 に示した。そのときの車両動態は、車両速度約 10km/h 以下の高い NOx 排出係数の領域での走行であった。このため、小型バスでは、低速側の高い NOx 排出係数の運転領域を使っていることが沿道 NOx 汚染の主たる要因である。

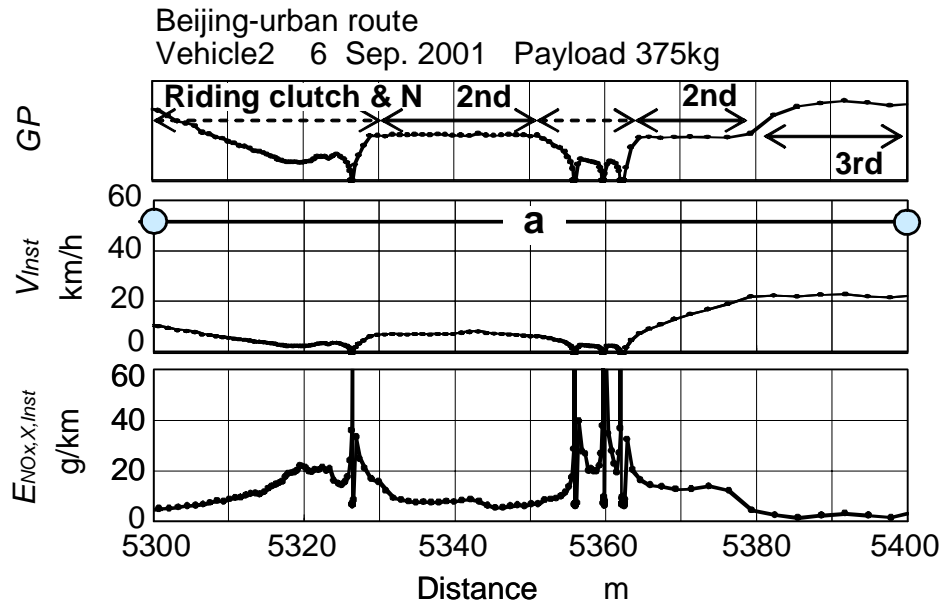


図 4.5 小型バスにおける渋滞時の NOx 履歴

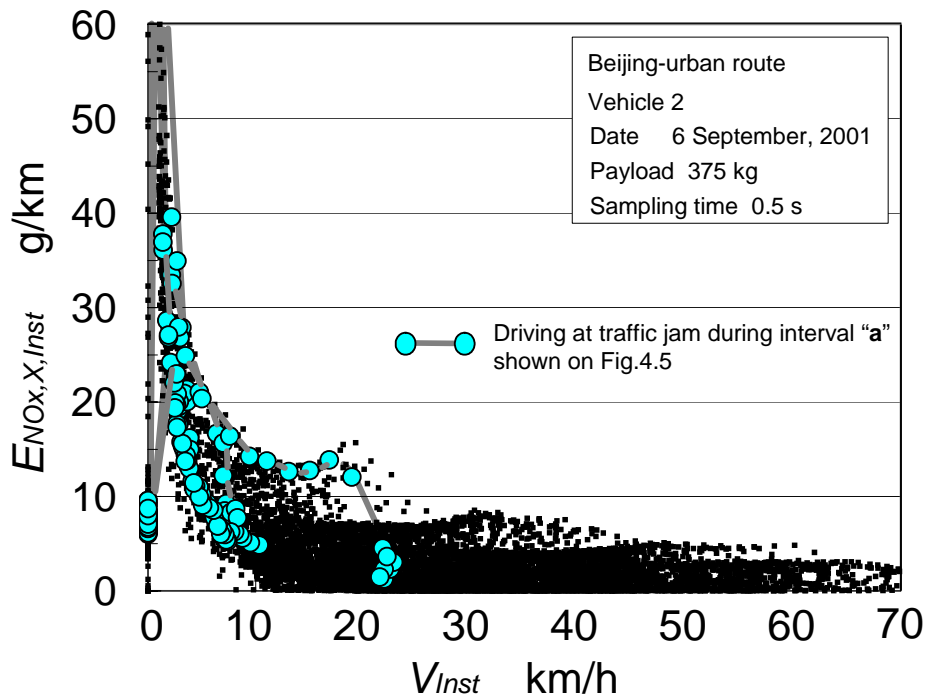


図 4.6 小型バスの渋滞時の瞬時 NOx 排出係数履歴

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

本節では、沿道への集中的な汚染が発生するエンジン挙動に関する解析を行う。

4.2.1. CO₂ と NOx 排出質量の関係

図 4.7 は、小型貨物自動車における 2001 年 12 月 20 日の走行試験の瞬時 CO₂ 排出質量に対する瞬時 NOx 排出質量をプロットしたものである。EGR 率との関係を明らかにするため、EGR 率 10% を基準としてそれより高いデータと低いデータを分離して示したが、EGR 率 10% 以上のデータが瞬時 NOx 排出質量の低い領域に集中している。

図 4.7 から、瞬時 NOx 排出質量は CO₂ 排出質量と比較的相関が高い。CO₂ 排出質量は、エンジン負荷と同等と考えられるので、瞬時 NOx 排出質量はエンジン負荷が高い場合に多くなる傾向にある。

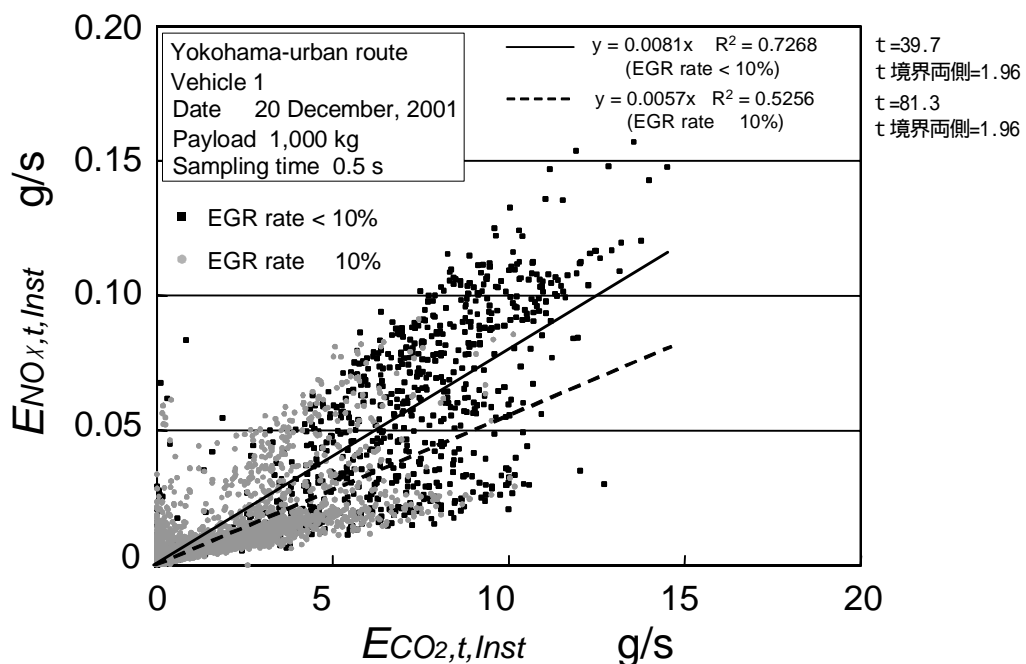


図 4.7 小型貨物自動車における CO₂ と NOx 排出質量の関係

EGR の装着されていない小型バスでは、図 4.8 に示したように瞬時 CO₂ 排出質量と瞬時 NO_x 排出質量の間にはより高い相関が見られた。したがって、本試験に供試した EGR の装着されていない小型バスでは、CO₂ 排出量が多い(負荷が高い)と NO_x 排出量が多いという特性がある。

この結果は、吉田らが大型ディーゼル車の NO_x 排出量の予測を目的とし行った研究結果である、NO_x 係数は燃料消費量と相関が大きいという事実⁽¹⁷⁾と一致するものである。

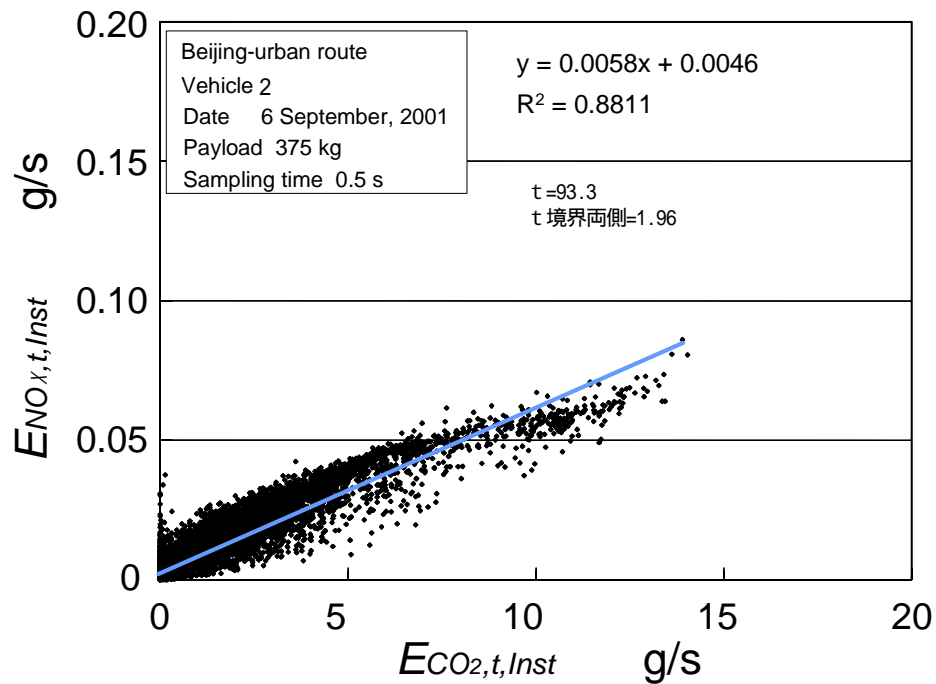


図 4.8 小型バスにおける CO₂ と NO_x 排出量の関係

4.2.2. エンジン NOx マップによる解析

沿道局所 NOx 汚染が発生する時のエンジン挙動を調べるため、小型貨物自動車におけるエンジンの NOx マップと沿道局所汚染が発生する走行状態に関するエンジン運転履歴を解析した。この NOx マップは以下のように作成した。

- a. 0.5 秒ごとの計測点について、(式 4-1)より車両走行抵抗を求め、(式 4-2)よりエンジントルクを求める⁽⁵⁵⁾

$$R = \mu_r \cdot W_{GVW} \cdot g + \mu_l \cdot AV^2 + W_{GVW} \cdot \sin \theta_{road} \cdot g + (W_{GVW} + W_r) \cdot \alpha \quad (\text{式 4-1})$$

$$\tau_{engine} = \frac{R \times r_D \times 1000}{i \times \eta_t} \quad (\text{式 4-2})$$

R	kN	: 走行抵抗	W	kg	: 車両総重量
μ_r	-	: ころがり抵抗係数	μ_l	$\text{kN} \cdot \text{h}^2 / (\text{m}^2 \cdot \text{km}^2)$: 空気抵抗係数
A	m^2	: 前面投影面積	V	km/h	: 車両速度
θ	°	: 勾配	W_r	kg	: 回転部分相当重量
α	m/s^2	: 車両加速度	g	m/s^2	: 重力加速度
T	$\text{N} \cdot \text{m}$: エンジントルク	r_D	m	: タイヤ有効半径
i	-	: 総減速比	η_t	-	: 動力伝達効率

なお、試験路はほぼ平坦路であるので勾配はゼロとして計算した。

- b. 算出されたエンジントルクの最大値および最高回転数を十等分し、エンジン運転領域をエンジン回転数、エンジントルクについて百の領域に細分する。
- c. それぞれの運転領域内の計測点における NOx 排出質量の総計をその領域内の計測点数で除し、その領域の平均 NOx 排出質量とする。
- d. 平均 NOx 排出質量をエンジン回転数、トルクマップ上の該当する領域の中心にバブルの面積で表す。

図 4.9 に、小型貨物自動車のエンジン NOx マップを示した。なお、路上走行時には使われていない運転領域もあるので、バブルが表示されていない領域もある。このエンジンは中高負荷側および中高回転数側で NOx 排出質量は多く、逆に低負荷および低回転数領域で NOx 排出質量が低い。図 4.9 には、図 4.3 で示した沿道局所汚染の典型的な例である交差点発進時のエンジン運転履歴を示したが、NOx 排出質量の多い中高負荷側、中高回転数側が発進時に使用されている。

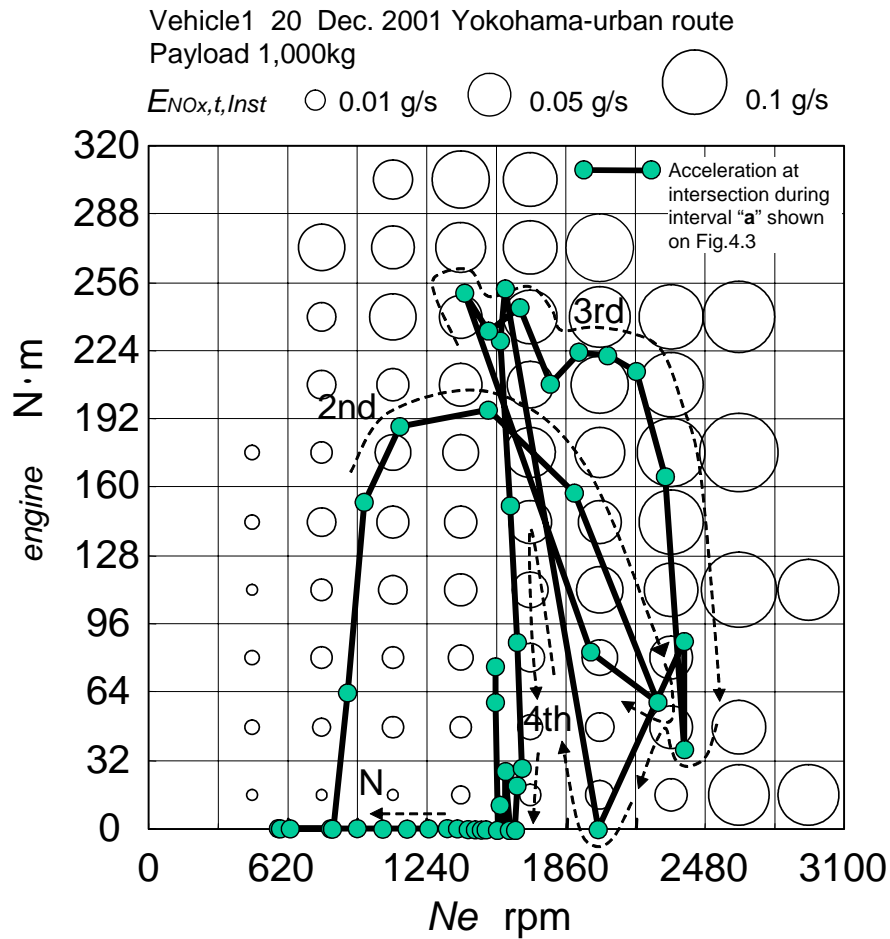


図 4.9 小型貨物自動車の NOx マップおよび発進時のエンジン運転履歴

図 4.10 は、小型貨物自動車のエンジン EGR 率マップを示した。低速、低負荷で EGR 率は高いが、それ以外の運転領域では EGR 率は低い。発進時には EGR 率が比較的低い領域が使われており、これが、NOx 排出係数が高くなる原因の一つと推定される。

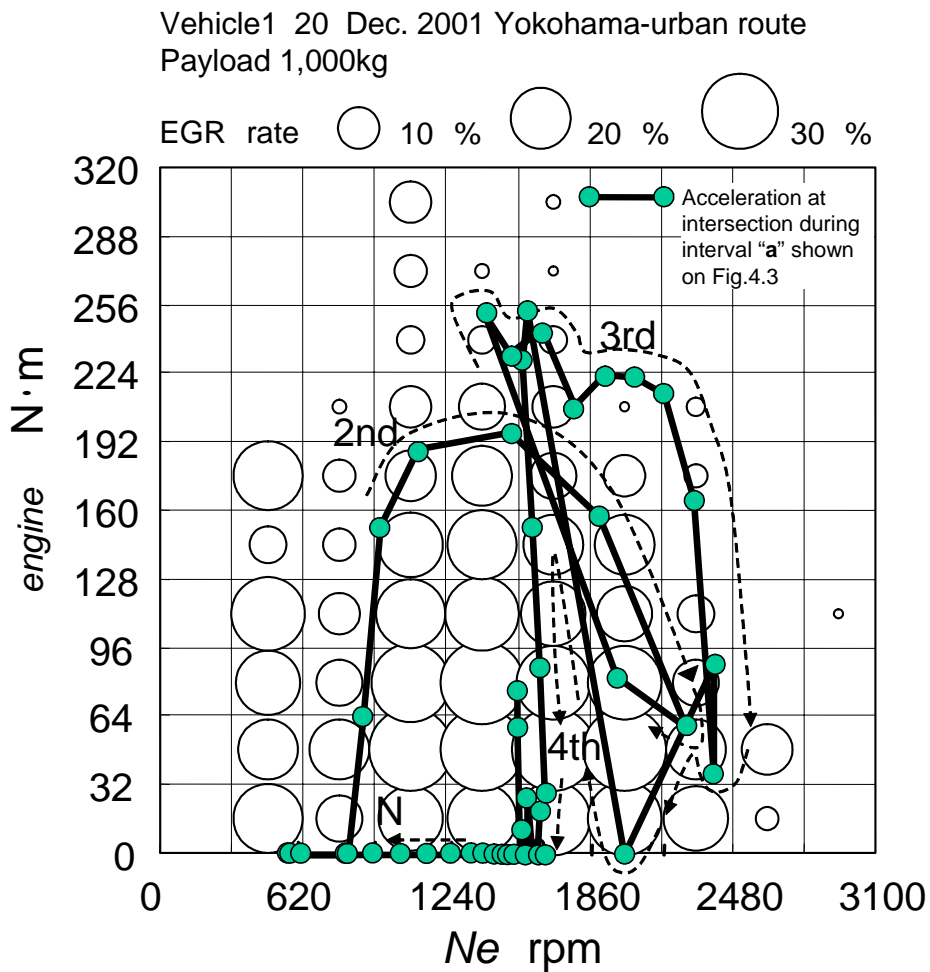


図 4.10 小型貨物自動車の EGR マップおよび発進時のエンジン運転履歴

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

次に、小型バスの NOx マップを図 4.11 に示した。高負荷，高回転数になるほど NOx 排出質量は高くなっているが，小型貨物自動車と比較すると中低負荷および中低回転数領域でも比較的 NOx 排出質量は多い。図 4.5 に示した渋滞時の緩慢な発進におけるエンジン運転履歴をプロットしたが，このような運転では低負荷，中低回転数領域が主に使用されている。EGR による排出ガス制御は無いため低負荷でも比較的高い NOx 排出質量の領域が使われている。

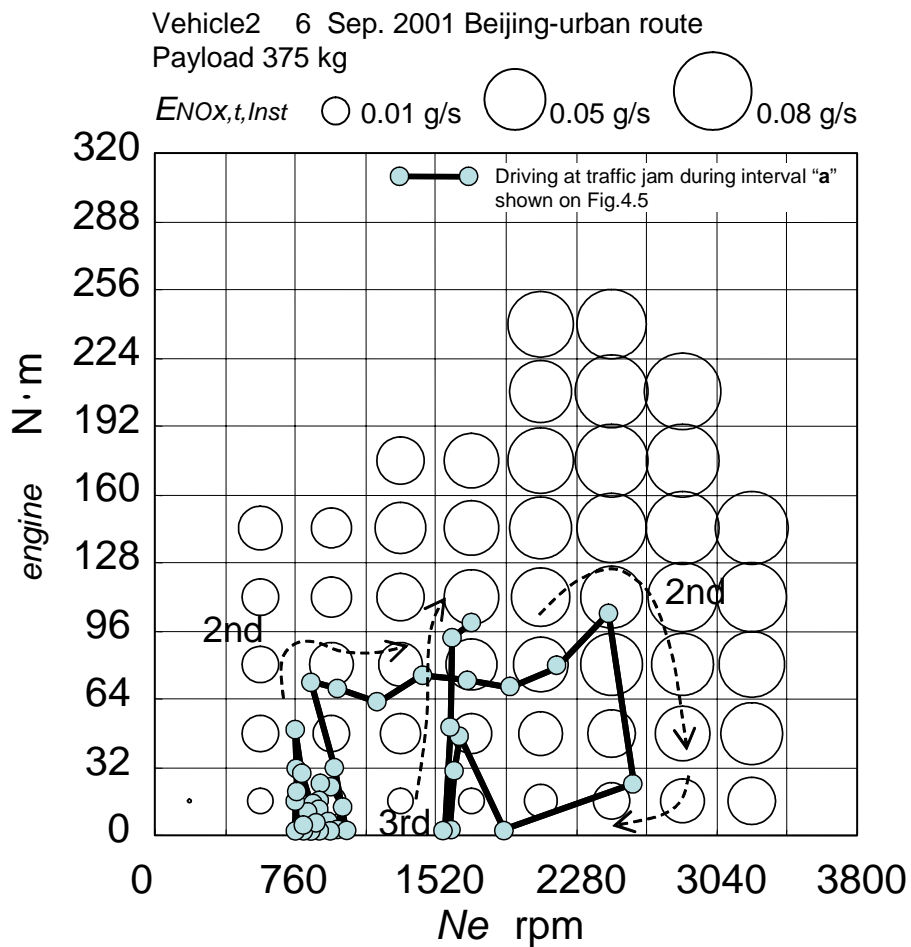


図 4.11 小型バスの NOx マップおよび渋滞時のエンジン運転履歴

4.2.3. 小型貨物自動車の過渡時の NOx 排出特性

エンジンの定常および過渡状態における EGR 率に差がある場合、沿道への NOx 排出質量に影響する可能性がある。たとえば、過給器付きエンジンでは黒煙対策等で過渡運転時に空気過剰率を適正に保つため、EGR 率を最適化するような制御が行われている⁽⁵⁶⁾。そこで、EGR 付き車両の過渡時のエンジン挙動に注目し、NOx 排出特性を解析した。

図 4.12 は、シャシダイナモ上で本計測システムを用いて測定した D13 モード点を含む定常計測点における NOx 排出質量マップを表している。中低速、中低負荷で NOx 排出量は低く保たれている。

一方、図 4.13 は、横浜市街路における瞬時 NOx 排出量を図 4.12 における計測点と同等のエンジン回転数および負荷で整理した NOx 排出質量マップである。本試験条件では 3100rpm におけるエンジン使用はなかったが、2480rpm 以下の中低負荷で比較すると、路上走行時は中低速、中低負荷で NOx 排出質量が多くなっている。特に D13 モードの測定点である赤色の棒グラフで示した負荷ポイント近辺で大きな違いが生じており、D13 モードでの NOx 平均排出量は、路上走行試験結果より算出した値の方がシャシダイナモ上での定常試験結果より算出した値より 2.5 倍程度大きくなっていることがわかった。これは、定常の排出ガス試験法において NOx 排出質量が削減できても、路上走行下では NOx 排出質量を有効に減らすことができていないという事実を示しており、台上における排出ガス試験は路上での走行実態を反映した過渡モードで行うことが重要であることを示している。

なお、同様な条件における CO₂ 排出質量マップを作成し、図 4.14、4.15 に示した。D13 モードでの平均排出質量 (g/kWh) を図中に示した。CO₂ 排出量に関しては定常および過渡排出マップの形状はほぼ同じ傾向を示しており、D13 モードでの CO₂ 平均排出質量でも ±10% の範囲で一致した。したがって、CO₂ 排出量は NOx ほど過渡および定常の影響を受けないことがわかる。

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

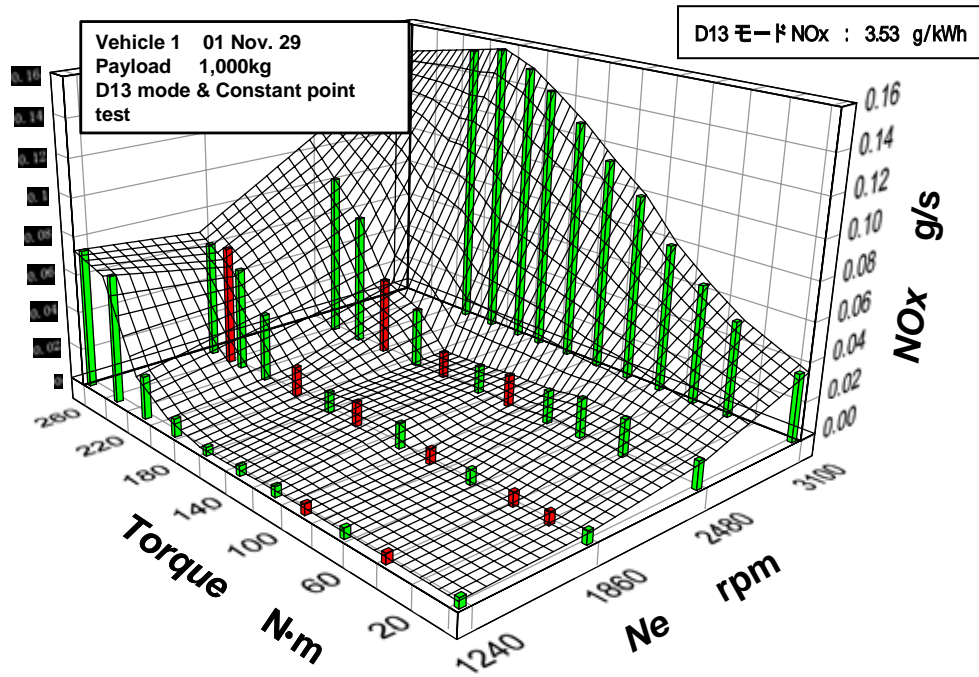


図 4.12 シャシダイナモ上での定常試験結果より求めた定常 NOx マップ

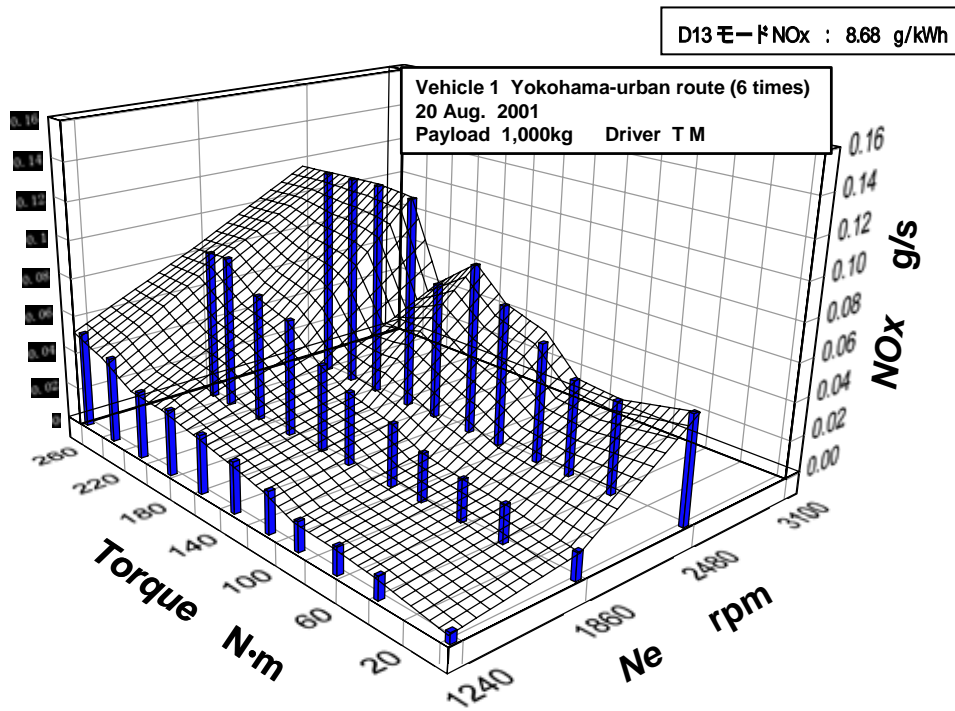


図 4.13 路上走行試験結果より求めた過渡 NOx マップ

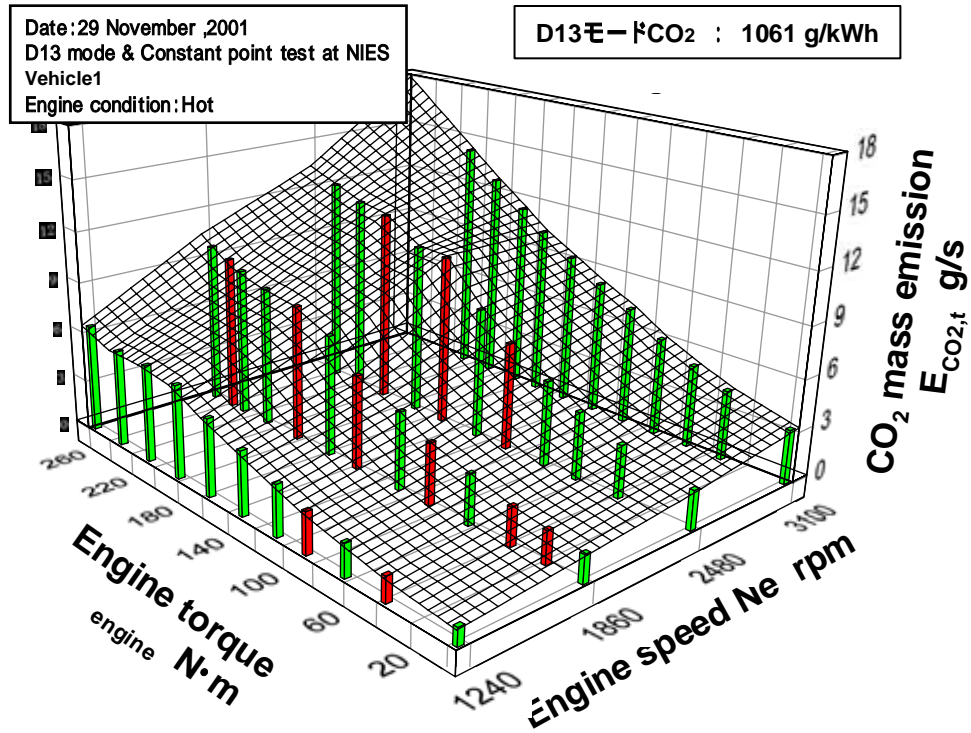


図 4.14 シャシダイナモ上での定常試験結果より求めた定常 CO₂ 排出マップ

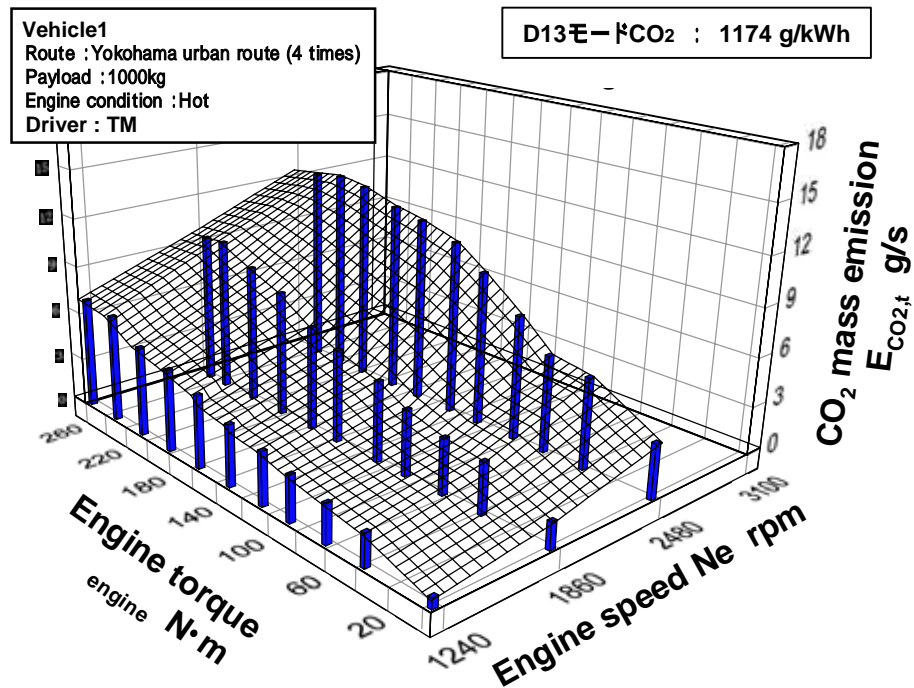


図 4.15 路上走行試験結果より求めた過渡 CO₂ 排出マップ

4.2.4. 小型貨物自動車の過渡時の NOx 排出特性の解析

過渡状態における NOx 排出特性をさらに詳細に調査するため、2002 年 5 月より 2003 年 4 月までの 1 年間にわたる横浜市街路における路上走行試験データを解析した。なおこの試験も運転者を固定して行ったが第 4 章で述べた横浜市街路における走行試験とは異なる運転者で行った。表 4.1 に走行試験結果概要を示す。年間を通じた種々の交通状況、気象条件で 0.5 秒ごとに計測した NOx 排出質量を含む走行データが収集できた。なお、解析のための統計処理では、0.5 秒おきにサンプリングし物理量へ計算処理したデータを 2.5 秒おきにピックアップして使用した。

NOx 排出質量は、エンジン負荷と関係があることおよび使用するギヤ位置により差があることから、図 4.16 に 1240 から 1550rpm の間の全瞬時データについてエンジントルクに対する NOx 排出質量、NOx 濃度および EGR 率をギヤ位別に示した。なお、エンジントルクは 320N・m の間を十等分し、それぞれの範囲の平均値をその範囲の中心値として表した。

NOx 排出質量はエンジン負荷とともに増加した。また、ギヤシフト別に見ると同等のエンジン負荷であっても 2 速ギヤは他のギヤより NOx 排出質量が大きくなる傾向が見られた。これは図 4.3 で示した発進時に 2 速ギヤで NOx 排出質量が増加する事実と一致する。ジルコニアセンサからの直接の NOx 濃度出力値(ppm)においても同様な傾向があり、同等出力で明らかに 2 速ギヤ使用時に NOx 排出質量が多くなる特性があった。

図 4.16 にはエンジントルクに対する EGR 率も示したが、150N・m 前後の中負荷領域で 2 速ギヤの EGR 率が他のギヤに比べ 20 ポイント程度低い傾向にある。このことから、2 速ギヤにおける NOx 排出質量の増加は、EGR 率の低下に関係するものであると考えられる。

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

表 4.1 1年間の走行試験結果

Payload 1,000kg Driver : TA

Date	Weather	Temp.	Humidity %	V_{RT} km/h	$EN_{Ox, X, RT}$ g/km	$EC_{O2, X, RT}$ g/km
02/ 5/29	Cloudy	23.1	45.0	16.3	2.47	437
02/ 6/29	Rainy	20.6	77.4	10.8	2.67	547
02/ 7/20	Fine	29.8	52.9	16.8	2.50	477
02/ 8/24	Cloudy	29.1	46.9	13.7	2.89	520
02/ 9/21	Cloudy	27.5	30.6	11.8	3.39	566
02/10/26	Cloudy	14.9	53.9	11.9	3.29	566
02/11/16	Cloudy	10.8	47.3	11.8	3.38	505
02/12/ 7	Rainy	5.2	64.9	9.7	3.66	609
03/ 1/18	Cloudy	10.3	41.7	14.5	2.38	422
03/ 2/15	Fine	10.0	30.6	13.4	2.65	452
03/ 3/22	Cloudy	9.1	43.4	13.8	2.65	445
03/ 4/26	Fine	27.1	37.3	13.9	2.51	521

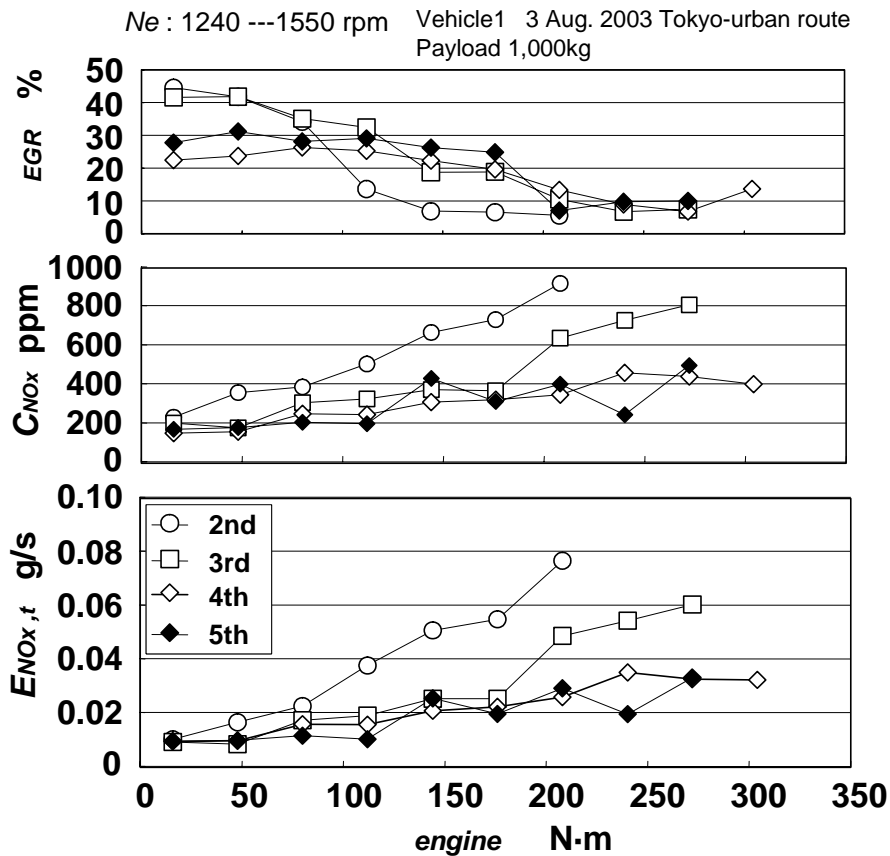


図 4.16 小型貨物自動車のエンジン負荷に対するギヤ位置と NOx 排出質量の関係

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

一般的には、使用するギヤ位置が低くなるほど車両速度変化率あるいはエンジン回転数変化率は大きくなる。そこで、路上走行時におけるギヤ位置別のエンジン回転数の変化率を分析した。なお、エンジン回転数変化率は、一般的なエンジン回転数の表記法である1分間当たりのエンジン回転数(rpm)を時間(s)で除した値として表した。

結果を図4.17に示す。横浜市街路における1年間の走行試験では、3速および4速ギヤの使用頻度が高かった。使用ギヤが低くなるほどエンジン回転数変化率の範囲は広がった。特に、2速ギヤの時間使用頻度は全体の約6%であるが、エンジン回転数変化率は大きく、最大で5速ギヤのエンジン回転数変化率の約8倍である約800rpm/sである。

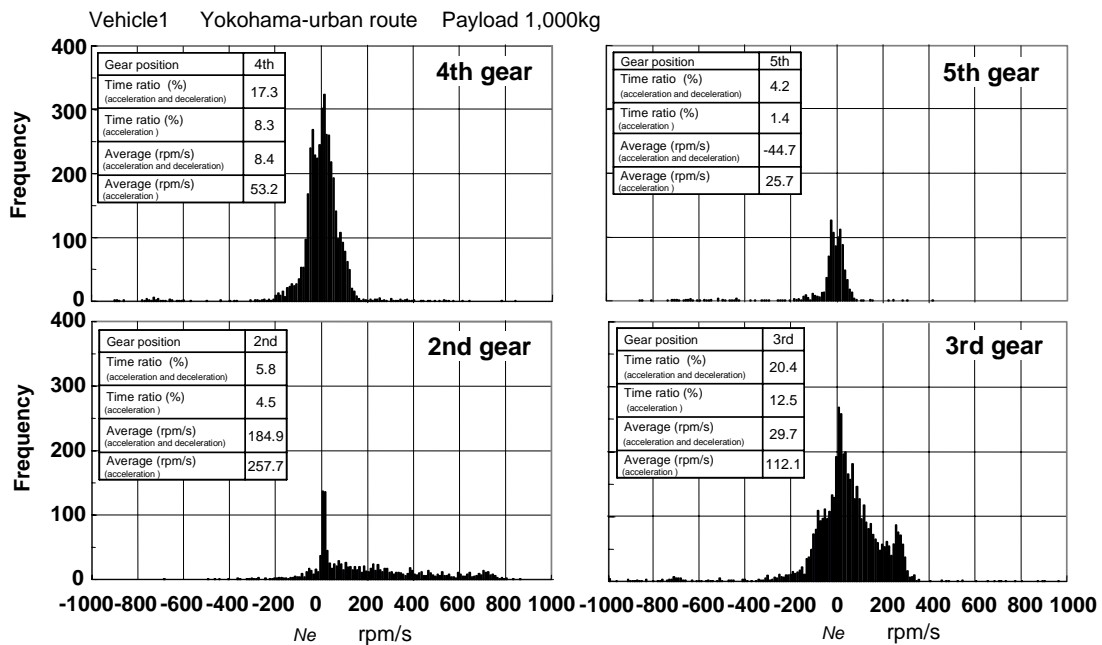


図 4.17 小型貨物自動車のギヤ位置別のエンジン回転数変化率頻度分布

図 4.17 に示したように、2 速ギヤではエンジン回転数変化率の範囲が大きいことから、エンジン回転数変化率に注目して NOx 排出質量特性を解析した。エンジン回転数変化率と NOx 排出量の関係をより明らかに表すために、エンジン回転数変化率が小さい場合、中程度の場合、大きい場合の三つのケースに分け、エンジン回転数変化率、NOx 排出質量およびエンジントルクの関係調べた。結果を図 4.18 に示す。なお、1240～1550rpm 間の全瞬時データについてエンジントルクを十等分して、それぞれの範囲の NOx 排出質量の平均値を中心値として表した。エンジン回転数変化率が大きくなると同等負荷であっても NOx 排出質量は大きくなる傾向があることがわかった。このため、エンジン回転数変化率の大きい 2 速ギヤにおいてその影響がより大きく出たものと考えられる。

図 4.10 より 1240～1550rpm の間ではエンジントルク 256N・m 程度までは EGR 制御が働いているので、その範囲で三つのエンジントルクケースについてエンジン回転数変化率に対する NOx 排出質量の関係を検討した。結果を図 4.19 に示す。同一トルク範囲でエンジン回転数変化率に対して明らかに NOx 排出質量は増加している。

エンジン回転数変化率に応じて NOx 排出質量が増加する原因を調べるため 図 4.18 と同一の条件でエンジン負荷に対する EGR 率およびエンジン回転数変化率の関係を調べた。結果を図 4.19 に示した。エンジン回転数変化率が大きくなると EGR 率が小さくなる傾向があった。このことから、特に 2 速ギヤ使用時において NOx 排出質量が大きくなる要因は、エンジン回転数変化率が大きい時に EGR 率が低下するためであり、これが沿道局所の集中的な NOx 汚染の原因の一つにつながっていると考えられる。

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

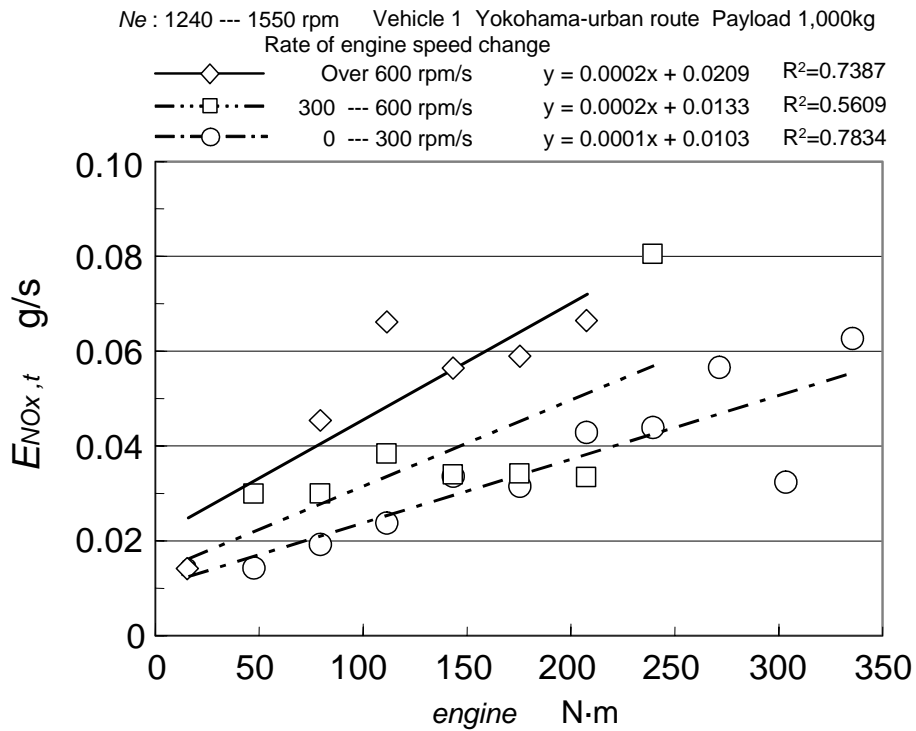


図 4.18 小型貨物自動車の負荷に対するエンジン回転数変化率と NOx 排出質量の関係

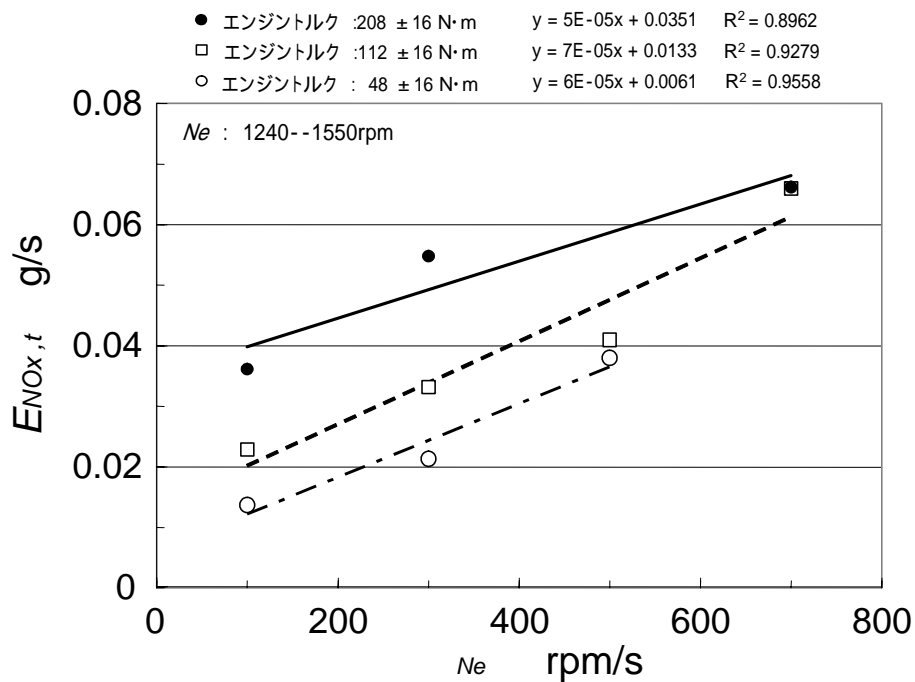


図 4.19 小型貨物自動車のエンジン回転数変化率に対する NOx 排出質量の関係

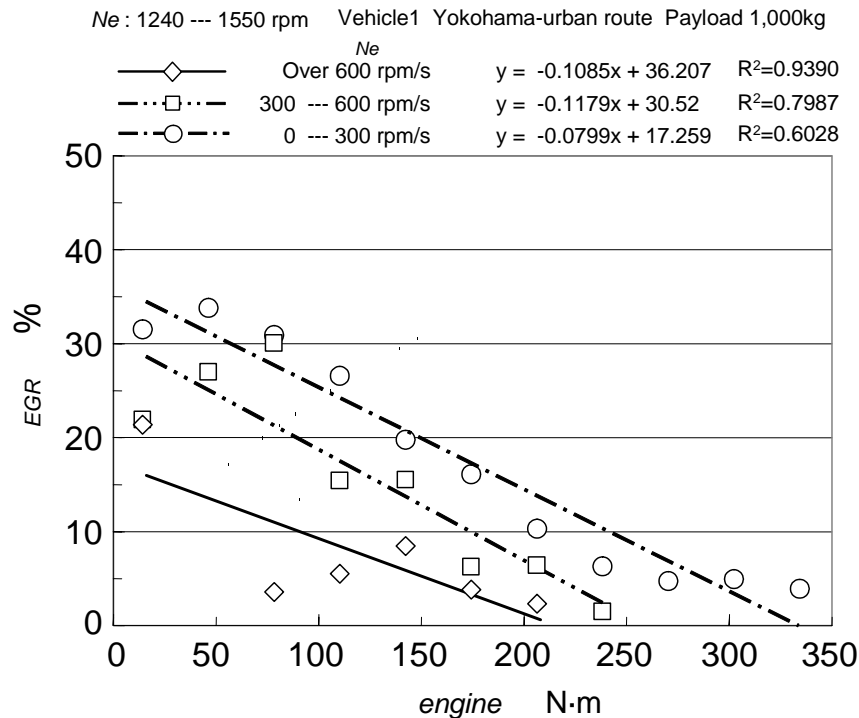


図 4.20 小型貨物自動車の負荷に対するエンジン回転数変化率と EGR 率の関係

エンジン回転数変化率が大きい時に、EGR 率が低下する原因には、二つの理由が考えられる。

一つは、過渡時における吸気への EGR ガスの時間的供給遅れである。これは、EGR 配管の設計、管内の共鳴等の問題が考えられる。

二つ目は、過渡時において吸気量を確保するための EGR 率制御の問題である。過給器付きディーゼルエンジンでは、スモークの悪化を防止するため過渡時において空気過剰率が一定値より小さくならないようにするため EGR 率を適正にコントロールすることが行われる⁽⁵⁶⁾。本エンジンの EGR 率制御は、エンジン負荷に相当するアクセル開度信号およびエンジン回転数信号に基づき、DC モーターによる EGR バルブ開度制御およびsteppingモーターによる吸気シャッタ開度制御により行われている。本エンジンは無過給であるが、過渡時における EGR 率の動的解析と排出ガス質量の関係を調査する必要がある。

過渡時に EGR 率が低下する現象をさらに詳細に調べるため、シャシダイナモ上にて動力計を定電流制御（エンジン出力の吸収馬力を一定とする運転）にて運転し、過渡時の EGR 制御特性を調べた。図 4.21 に動力計を定電流制御し、低負荷から全負荷まで瞬時に負荷を増加させたときのエンジン回転数および EGR 率の変化を示した。

1,200 回転，約 20% 負荷での低速運転では，EGR 率は約 42% であるが，アクセルを全負荷にすると 0.5 秒以内にほぼ 0% 近くまで低下した．このように，アクセルの動きに対して EGR 率は非常に良い応答性を示しており，EGR バルブ等の動的制御特性は非常に良いと考えられる．

図 4.22 に，アイドリングから約 14% 負荷までアクセル位置を変化させたときの EGR 率，エンジン回転数および NOx 濃度を示した．アイドリング時の EGR 率は約 35%，14% 負荷時の EGR 率は約 40% であるが，加速後 0.5 秒に瞬間的に EGR 率が低下し，ほぼ 0% になっている．そのため NOx 濃度も上昇している．なお，NOx 濃度の上昇が若干遅れているのは，EGR 率の算出はエアクリーナ内のカルマン流量計で，NOx 濃度は排気管中間部で計測しているためであると考えられる．

以上の結果から，EGR が行われているある過渡条件時には，EGR 率を低くする制御が行われている現象があることが確認された．これは，過渡時は運転性向上あるいは瞬間的な黒煙排出防止のため十分な吸気量を確保することが望ましいので，このような制御が行われたものと推定される．従って，EGR が行われている車両では一般的にこのような現象が発生する可能性が高いと思われる．

4.2. エンジン挙動と沿道局所 NOx 汚染の関係

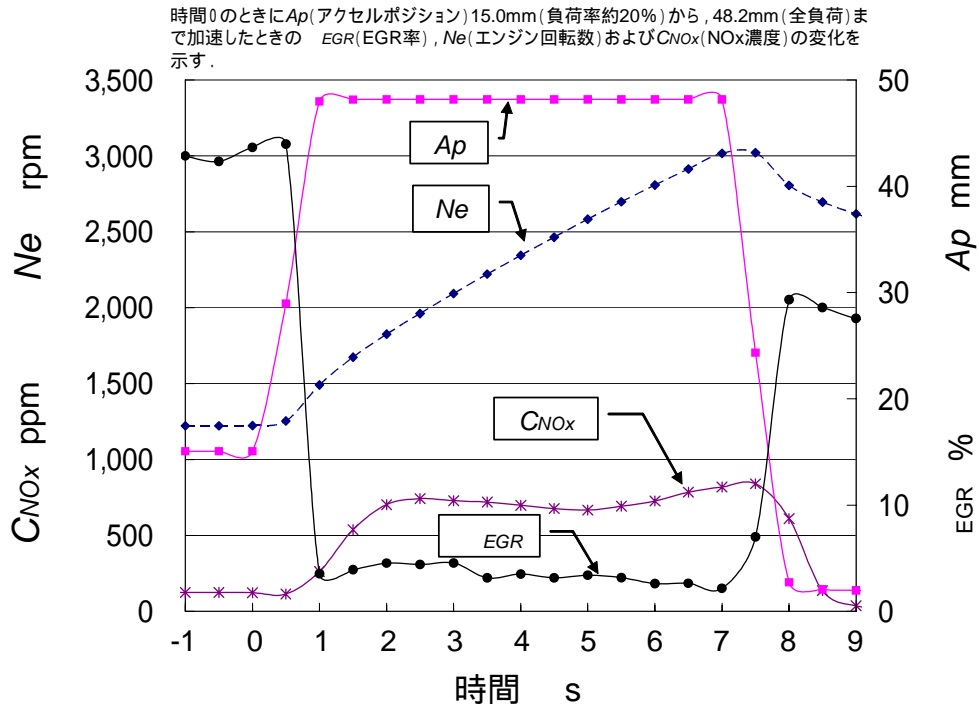


図 4.21 低負荷から全負荷までの加速時の EGR 率履歴 (シャシダイナモ試験)

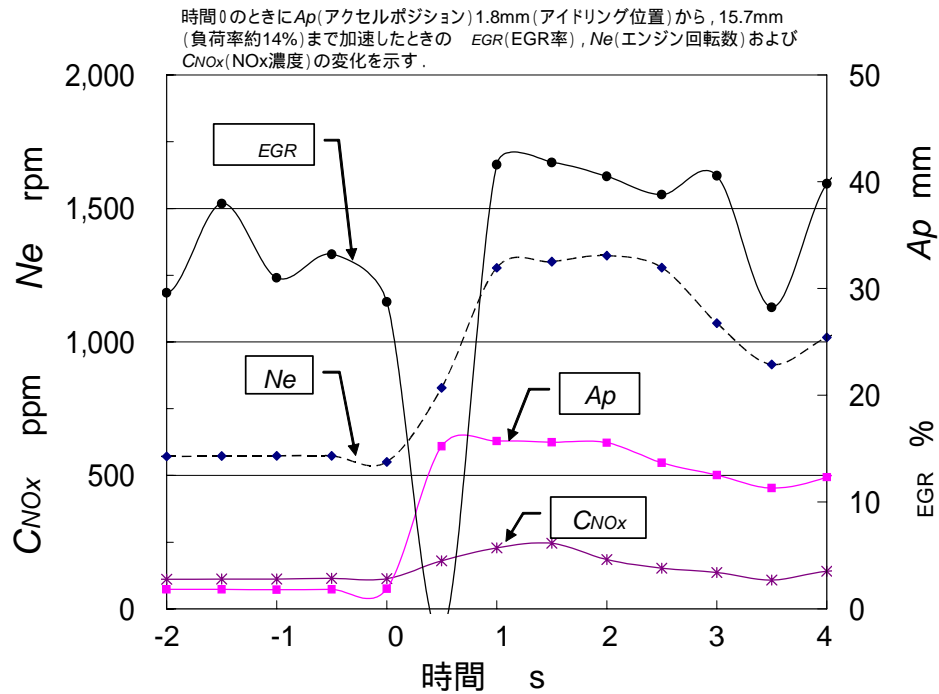


図 4.22 アイドリングから低負荷までの加速時の EGR 率履歴(シャシダイナモ試験)

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NO_x 汚染について

これまで1998年排出ガス規制対応のEGR付き小型貨物自動車一台を用いて沿道局所 NO_x 汚染の実態およびその原因を解析した。他の EGR 装置付自動車の場合にも同様な特性があるかどうか調査した結果を示す。

4.3.1. 実験条件

(1) 試験自動車の仕様

本研究で用いた小型貨物自動車と同一車種、型式の1994年排出ガス規制（平成6年短期規制）対応車両を比較車両とした。この車両には、最高出力86kWの直列4気筒無過給直噴OHCディーゼルエンジンが搭載されている。車両初度登録は1999年3月で、走行試験時の積算走行距離は約75,000kmである。この車両を“車両3”とする。この車両にもEGR装置が装着されている。車両の概観を図4.23に、本研究で用いた車両1と比較した主要諸元を表4.2に示す。車両3の基本仕様はほぼ車両1と同等であるが、表4.3に示したように、排出ガスレベルは高い。シャシダイナモにおける10・15モード排出ガス試験の結果、車両1に対しNO_xレベルは約1.8倍であった。



図 4.23 1994 年排出ガス規制対応小型貨物自動車の概観

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

表 4.2 車両 1 と比較した車両 3 の主要諸元

試験車両	車両 1(いすゞ)	車両 3(いすゞ)
登録	2000 年 3 月	1999 年 3 月
車両タイプ	バンタイプ 小型貨物自動車	
全長 mm	4,990	4,950
全幅 mm	1,880	1,920
全高 mm	2,940	2,760
車両重量 kg	2,510	2570
最大積載量 kg	2,000	
車両総重量 kg	4,675	4,735
乗車定員 人	3	
Cd 値	0.59	
前面投影面積 m ²	5.4	
タイヤ半径 mm	320	
トランスミッション形式	5MT	
最終減速比	4.777	
ギア比 (動力伝達効率)	1st	4.987(0.90)
	2nd	2.870(0.90)
	3rd	1.594(0.90)
	4th	1.000(0.92)
	5th	0.728(0.90)
	後退	4.774(0.89)
エンジンタイプ	直接噴射式 OHC 無過給ディーゼル	
シリンダー数	4	
総バルブ数	16	
排気量 cm ³	4,334	
ボア×ストローク mm	112.0 x 111.0	
圧縮比	18.5	
最高出力 kW/rpm	81/3,100	85/3,200
最大トルク N・m/rpm	275/1,500	275/1,600
燃料噴射系	電子制御式	
燃料噴射ポンプ	分配型噴射式	
排出ガス再循環(EGR)	有(電子制御式)	

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

表 4.3 車両 1 および 3 の排出ガス試験結果

車 両		車両 1	車両 3
排出ガス規制年		1998 (長期規制)	1994 (短期規制)
排出ガス 規制値 [D13mode]	NOx g/kWh	4.5	6.0
	CO g/kWh	7.40	7.40
	HC g/kWh	2.90	2.90
	PM g/kWh	0.25	0.70
排出ガス 試験結果 [D13mode]	NOx g/kWh	3.58	-
	CO g/kWh	4.60	-
	HC g/kWh	0.35	-
	PM g/kWh	0.55	-
	CO ₂ g/kWh	987	-
排出ガス 試験結果 [10-15mode]	NOx g/km	1.32	2.38
	CO g/km	0.84	1.67
	HC g/km	0.17	0.68
	PM g/km	0.099	0.41
	CO ₂ g/km	294	396
	GVW kg	3,765	3,570

(2) 試験路

車両 3 は、千代田区、江東区の一般路、細街路を含む約 20.3km の都内路において走行試験を行った。東京都内路とする。東京都内路の概要を横浜市街路と比較し表 4.4 に示した。東京都内路は、信号、交差点の数が多い都内の典型的な一般路である。

比較のため、車両 1 についても東京都内路における走行試験を行った。

表 4.4 試験路の概要

Test route	Tokyo-urban route	Yokohama-urban route
Area	Koto-ku, Chiyoda-ku	Kohoku-ku
Distance km	20.3	17.5
Left turn	14	10
Right turn	13	11
Intersection (traffic light)	115	12
Intersection (no traffic light)	11	3
Halt	1	7
Overpass	0	4
Two lanes, more km	17.1	12.1
One lane km	3.2	5.4

4.3.2. 沿道局所 NOx 汚染の実態

車両 1 および車両 3 の東京都内路での試験結果を表 4.5 に示す。1998 年排出ガス規制車である車両 1 のルート NOx 排出係数は 2.53g/km であったが、1994 年排出ガス規制車である車両 3 は 4.83g/km と約 1.9 倍高くなった。

車両 3 の沿道局所 NOx 汚染の実態を明らかにするため、車両 1 とほぼ同等の発進

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

加速をしたケースを抽出し 図 4.24 に走行距離に対する NOx 排出質量履歴を示した。排出ガス規制の新しい車両 1 のルート NOx 排出係数は低いが、発進加速時における瞬時 NOx 排出係数は車両 3 と比べるとほとんど変わらないことがわかった。

表 4.5 東京都内路における走行試験条件および結果

試験車両	車両 1	車両 3
排出ガス規制	1998 (長期規制)	1994 (短期規制)
試験日：時間	2003.8.2 12:10	2002.1.30 12:00
積載量 (kg)	1,000	1,000
エンジン状態	暖機	暖機
天候	晴れ	晴れ
運転者	TA	NE
気温 ()	16.8	13.5
大気圧 (kPa)	100.2	101.5
相対湿度 (%)	42.8	27.0
絶対湿度 (kg/kg)	0.00507	0.00258
結果 V_{RT} (km/h)	15.8	14.1
$E_{NOx, X, RT}$ (g/km)	2.53	4.83
$E_{CO_2, X, RT}$ (g/km)	487.0	532.0

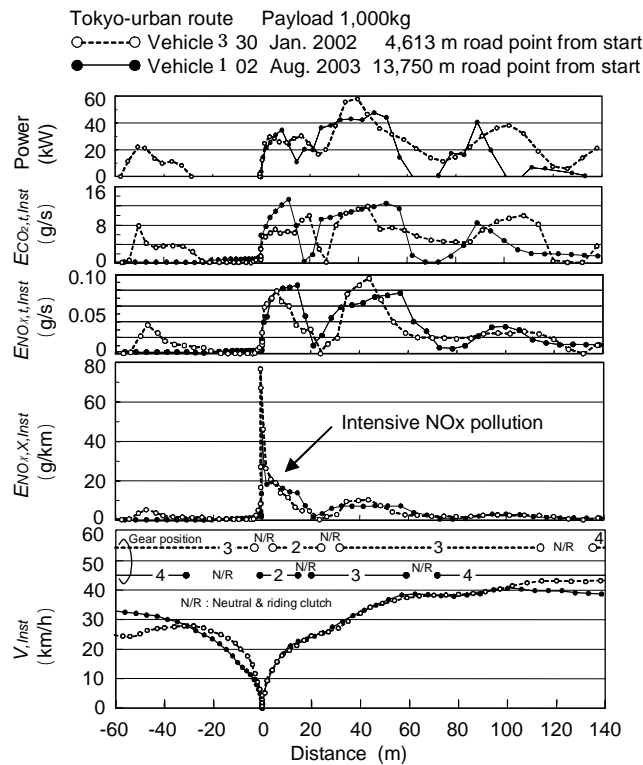


図 4.24 車両 1 と 3 における発進時の NOx 排出質量履歴

4.3.3. 沿道局所 NOx 汚染の解析

(1) 車両動態の解析

図 4.25 は、車両 1 および 3 の車両速度に対するショートトリップ NOx 排出係数の関係を表したものである。車両 1 および 3 とともに良い相関を示している。車両 1 の場合、車両速度に対する NOx 排出係数は低く、広域の NOx 汚染低減に効果があると考えられる。

図 4.26 は、車両 1 および 3 の車両速度に対する瞬時 NOx 排出係数の関係をギヤ位置別に表したものである。これまで説明したとおり車両 1 の決定係数は低い。車両 3 は、瞬時車速と瞬時 NOx 排出係数の相関について見ると、車両 1 と同様に、瞬時 NOx 排出係数は車速が低くなると大きくなる傾向があるが、比較的決定係数は高い。

車両 3 における 2002 年 1 月 30 日午後 2 時試験開始のデータに関し、瞬時車速に対する瞬時 NOx 排出係数全データをプロットした結果を図 4.27 に示す。瞬時車速、瞬時 NOx 排出係数および EGR 率の高低との関係を明らかにするために、EGR 率 10% を基準としてそれ以上の場合および未満の場合に分けてプロットした。瞬時 NOx 排出係数の高い点は EGR 率が低い。0~10km/h の間は EGR10%以上の点は存在しない。図 4.27 には、図 4.24 に示した車両 3 の発進加速時の NOx の排出履歴を表した。2 速ギヤの走行時において 60g/km 以上の高い瞬時 NOx 排出係数が現れているが、10km/h 以下で現れている高い瞬時 NOx 排出係数は、車両 2 における沿道局所 NOx 汚染のパターンと似ている。2 速ギヤの低速での走行において瞬時 NOx 排出係数が高くなっており、それらの点は EGR 率 10%未満である。

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

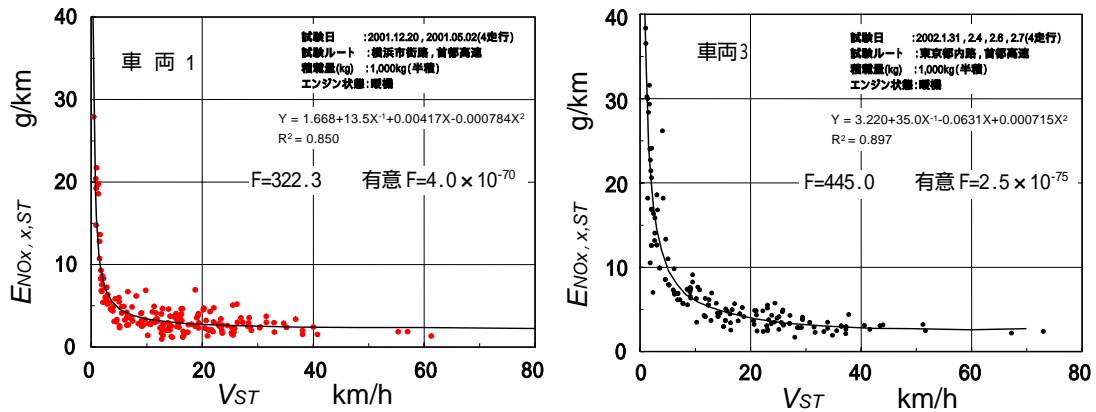


図 4.25 車両1および3のショートトリップ車速とショートトリップ NOx 排出係数

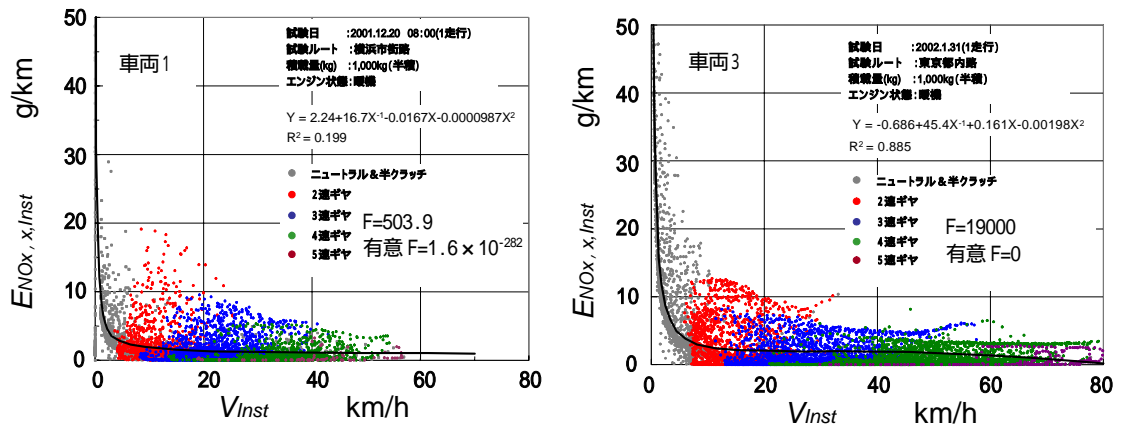


図 4.26 車両1および3の瞬時車速と瞬時 NOx 排出係数

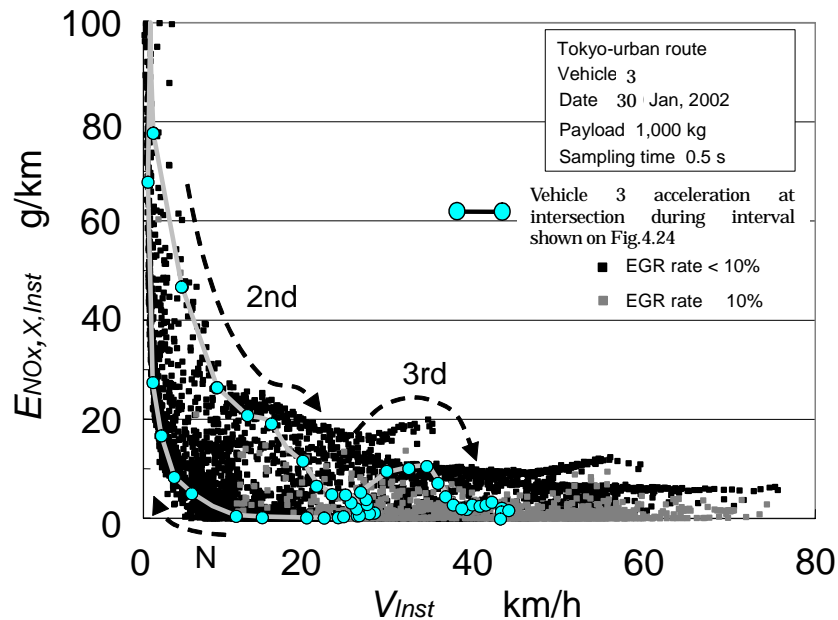


図 4.27 車両3 (94年規制車) の車両速度と瞬時 NOx 排出係数の関係

(2) CO₂ と NOx 排出質量の関係

図 4.28 は、車両 3 における 2002 年 1 月 30 日の走行試験の瞬時 CO₂ 排出質量に対する瞬時 NOx 排出質量をプロットしたものである。瞬時 NOx 排出質量は CO₂ 排出質量と比較的相関が高い。EGR 率との関係を明らかにするため、EGR 率 10% を基準としてそれより高いデータと低いデータを分離して示したが、EGR 率 10% 未満のデータが瞬時 NOx 排出質量の多い領域に集中しており、図 4.7 に示した車両 1 と同様な傾向を示している。

このようにして CO₂ 排出質量と NOx 排出質量の関係でみると、実験を行った二台の EGR 付き車両とも EGR 率が高い領域と低い領域が明らかに分布することが特徴であることがわかった。

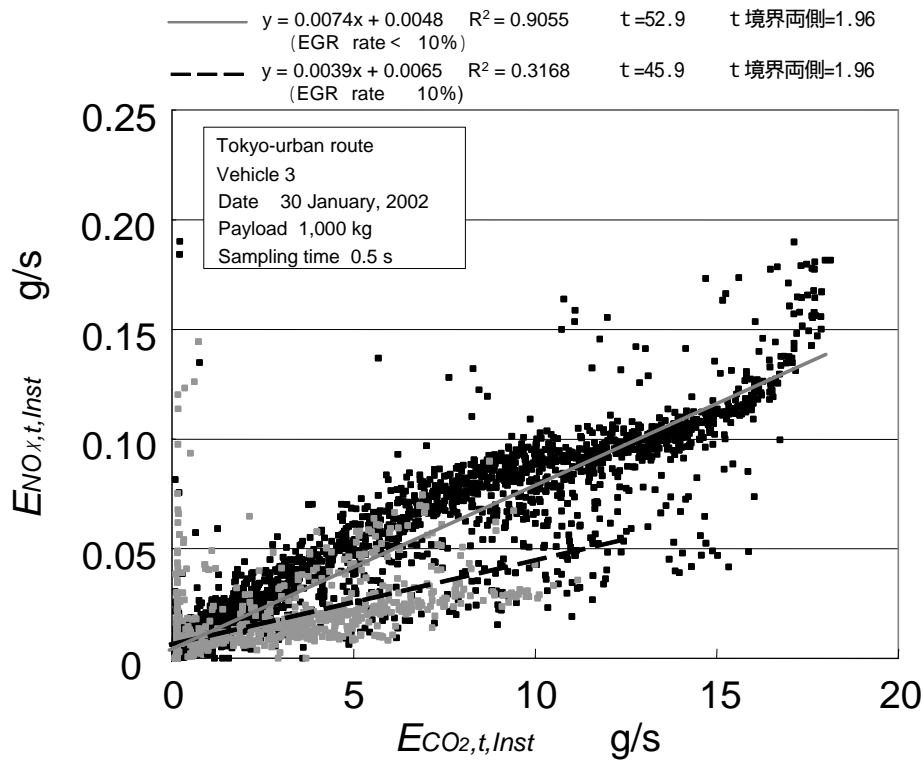


図 4.28 車両 3 の CO₂ 排出質量と NOx 排出質量の関係

(3) エンジン NOx マップによる解析

図 4.29 および図 4.30 に車両 1 および 3 のエンジンの NOx 排出質量マップを示した。マップは、車載型計測装置からのエンジン回転数、車速から算出した走行抵抗からのエンジントルクおよび NOx 排出質量により作成した。エンジン回転数およびエンジントルクをそれぞれ 10 等分し、100 のエンジン運転領域に細分した。NOx 排出質量は、一つの運転領域内の瞬時 NOx 排出質量全データを平均してバブルの大きさで表した。なお、0.05g/s を基準として NOx 排出質量のバブルの色で分けた。

車両 1 は 1860 回転以下の領域で NOx 排出質量は少ないが、車両 3 は高速、高負荷側で NOx 排出質量が多い。全体的に車両 3 の NOx 排出質量は多い。

車両 1 および 3 の EGR 率特性を明らかにするためにエンジン NOx マップと同様にエンジン回転数およびトルクをそれぞれ 10 等分し 100 の運転領域に細分し、一つの運転領域内の EGR 率全データを平均してバブルの大きさで表した。図 4.31 および図 4.32 にそれぞれの車両の EGR 率マップを示した。車両 3 では EGR の範囲が非常に限られており、中高速回転数の中負荷以下で EGR が作動している。車両 1 では EGR の制御範囲は車両 3 より低速側、高負荷側に広がっており、さらに EGR 率自体も高くなっている。この EGR 制御範囲の差が車両 1 においてルート NOx 排出係数が低くなっている要因と推定される。

以上の結果、車両 3 は EGR 付きであるが、車両 1 に比べ EGR の制御範囲は狭いことがわかった。

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

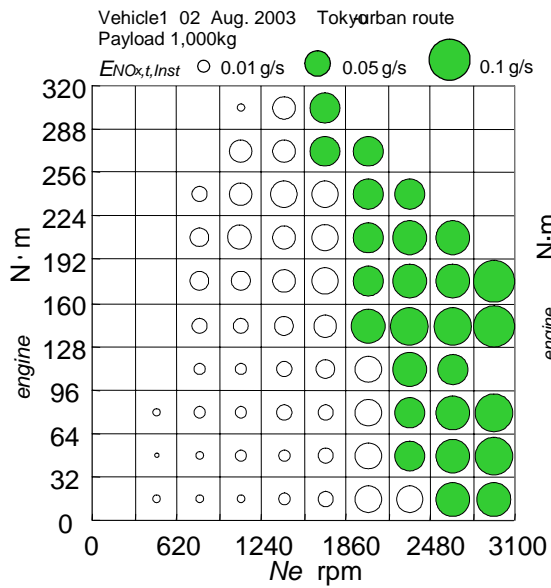


図 4.29 車両 1 の NOx 排出質量マップ

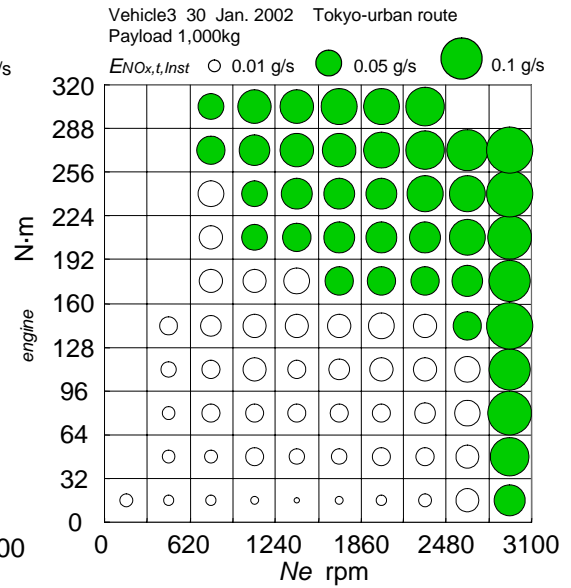


図 4.30 車両 3 の NOx 排出質量マップ

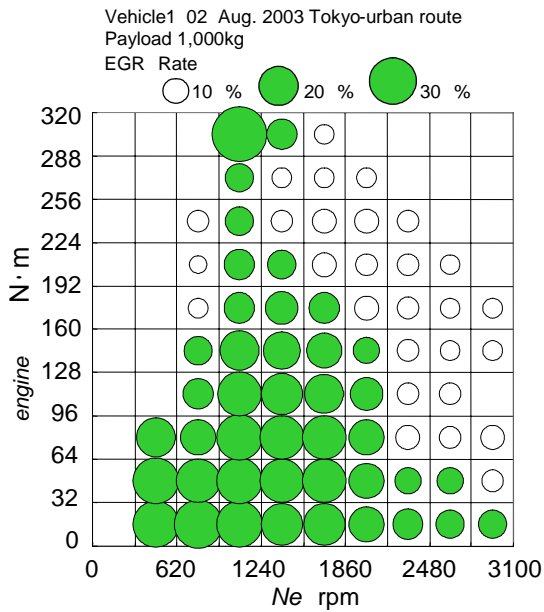


図 4.31 車両 1 の EGR マップ

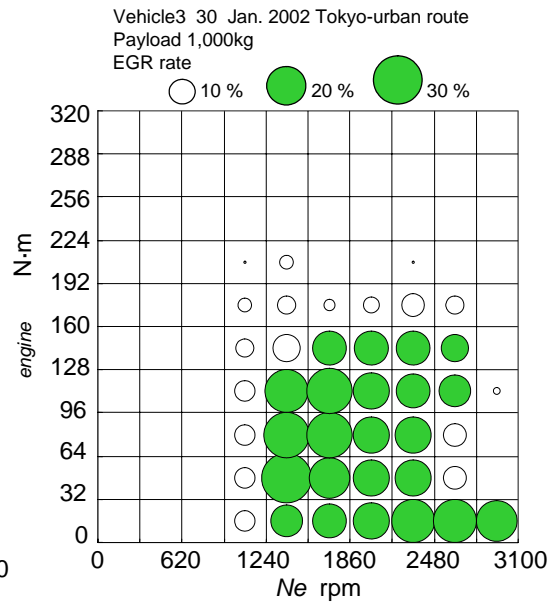


図 4.32 車両 3 の EGR マップ

4.3. 他の EGR 装置付自動車の沿道局所 NOx 汚染について

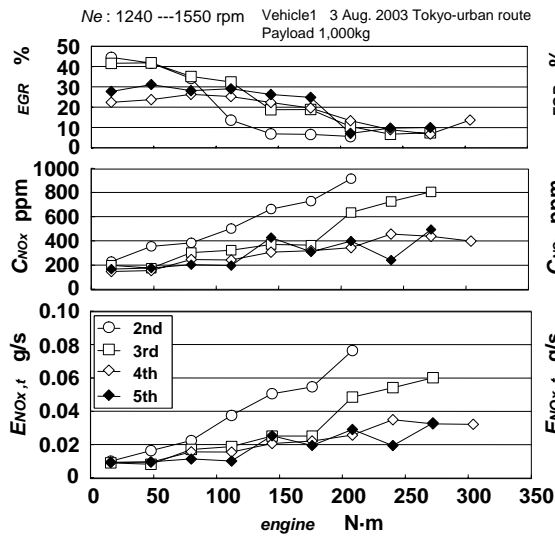


図 4.33 車両 1 のエンジン負荷に対するギヤ位置と NOx 排出質量の関係

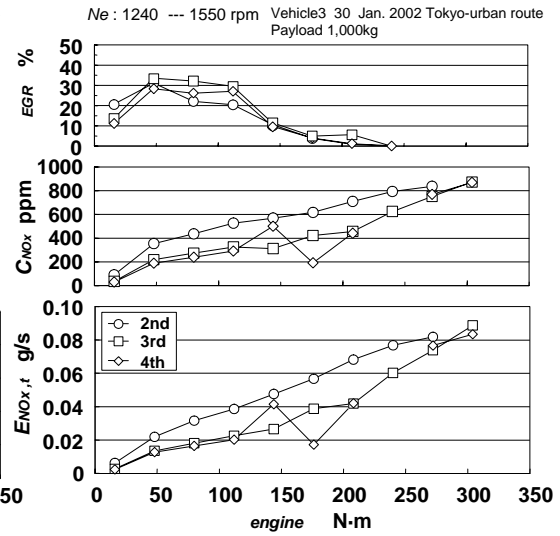


図 4.34 車両 3 のエンジン負荷に対するギヤ位置と NOx 排出質量の関係

次に、車両 1 と同様にエンジントルクおよびギヤシフトで整理した場合、2 速ギアで NOx 排出量が高くなる傾向があるか調べた。

図 4.33(比較のため図 4.16 を再掲)および図 4.34 に 車両 1 および 3 における 1,240 から 1,550rpm の間の全瞬時データについてエンジン負荷に対する NOx 排出質量を平均してギヤシフト別に示した。なお、エンジントルクは 320N・m の間を 10 等分し、それぞれの範囲の平均値で示した。車両 3 の NOx 排出質量は、車両 1 と同様にエンジン負荷が増加すると増加傾向にある。また、ギヤシフト別に見ると同等の負荷であっても車両 1 と同様に 2 速ギアにおいて他のギヤより NOx 排出質量が大きくなる傾向が見られた。ジルコニアセンサからの直接の NOx 濃度出力値(ppm)においても同様な傾向があった。このように車両 3 は EGR 制御の範囲、程度が狭いものの、いずれも 2 速ギア使用時に NOx 排出量が多くなる特性があった。

車両 3 の場合も 2 速ギアで NOx 排出質量が増加する原因を明らかにするため、図 4.34 にはエンジン負荷に対する EGR 率も示した。

車両 1 では 50~100N・m 近辺で EGR 率が 20~30% 強の高い数値を示しているが、その領域で 2 速ギアの EGR 率は比較的低くなっている。このことから、車両 3 における 2 速ギアにおける NOx 排出質量の増加は、EGR 率の低下に起因するものであると考えられる。なお、図 4.33, 4.34 において、EGR 率はエンジン負荷に対し異なる特性を示しているが、それぞれの車両の EGR 制御設計の考え方の違いによるものと推定される。

以上の結果、車両 3 は、車両 1 より EGR 制御範囲および EGR 率は低い、車両 1 と類似した NOx 排出特性を持つといえる。

4.4. まとめ

沿道局所 NO_x 汚染を車両動態およびエンジン挙動の観点で解析した結果、以下のことがわかった。

(1) 小型貨物自動車

車両速度が低くなると NO_x 排出係数は増加する傾向にあった。低速側では NO_x 排出係数のばらつきは大きくなり、非常に高い NO_x 排出係数領域が存在した。特に車両が 2 速ギヤで発進加速するときそれらの領域が使われ、集中的な NO_x 汚染が発生した。そのような車両動態では、NO_x 排出質量が多いエンジンの中高負荷領域が使われており、それらの領域は EGR 制御が十分に行われておらず、NO_x 排出係数が高かった。

定常時と過渡時でエンジンの NO_x 排出質量に差があることがわかった。過渡時では同等のエンジン出力でも定常時と比較し NO_x 排出質量は多かった。その原因は、エンジン回転数変化率が大きいときに EGR 率が低下するためであった。

以上から、小型貨物自動車では、交差点、狭路等において信号あるいは障害物回避等に起因する車両の発進、加速により沿道への集中的な NO_x 汚染が発生するが、その原因はエンジン回転数変化率の大きい発進、加速時に EGR 率が低下し NO_x 排出質量が増加するためであった。

エンジン回転数変化率が大きいときに EGR 率が低下する原因を解明するためシャシダイナモにおける過渡試験を解析した結果、EGR 率制御の応答性は高いこと、EGR 制御が行われている運転条件間における過渡時に、瞬間的に EGR 率が低くなる現象があることを確認した。これは、十分な吸気量を確保し、運転性向上あるいは瞬間的な黒煙排出防止を図るためであると考えられ、EGR が行われている車両では一般的にこのような現象が発生するものと思われる。

なお、排出ガス規制年度の異なる他の EGR 付き小型貨物自動車においても同様な傾向があるかどうか確認したところ、2 速ギヤにおいて NO_x 排出量が増加する傾向が見られた。

(2) 小型バス

車両速度が低くなると NO_x 排出係数は増加する傾向があった。小型貨物自動車より車両速度と NO_x 排出係数の相関は高かった。特に低速側では NO_x 排出係数が急増するが、渋滞中の緩やかな発進でそれらの領域が使われ、集中的な NO_x 汚染が発生した。また小型バスの場合、エンジンが低負荷でも比較的 NO_x が多く排出されており、NO_x 排出係数が高くなる原因の一つとなった。

以上から、小型バスにおいては、渋滞等に起因する車両の緩慢な発進により沿道への集中的な NOx 汚染が発生し、その原因は発進において NOx 排出量が多い低車速領域が使われるためであることがわかった。

従来の研究結果より EGR の無い自動車は、NOx 排出質量(g/s)と燃料消費量 (CO₂ 排出質量(g/s))との相関が高いことが知られている⁽¹⁷⁾。また、環境庁(当時)が平成 10 年にまとめた結果⁽³⁰⁾より、当時の車両(EGR 無し)は車両速度(km/h)と NOx 排出係数(g/km)の相関が高いことが知られている。

本研究においても、小型バスには NOx 排出質量(g/s)と CO₂ 排出質量(g/s)の関係には高い相関が見られた。また、車両速度(km/h)と NOx 排出係数(g/km)にも高い相関が見られ、車両速度が遅いときに瞬時 NOx 排出係数の高い運転領域が使われ、沿道局所 NOx 汚染が発生した。従って、本研究で扱った小型バスと同じような特性を持つ EGR の装着されていない従来の車両は、本研究で見出されたような沿道局所 NOx 汚染が発生するものと考えられる。

第 5 章 沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案

本章では沿道局所 NO_x 汚染の解析結果をもとに、沿道局所 NO_x 汚染を低減するための道路管理者、自動車製造者および運転者への提案をまとめる。

5.1. 道路管理者への提案

自動車の運転者は 時々刻々変化する道路インフラ、交通状況等の情報を自ら知覚、処理、判断し、自動車の運転を行う。それによりエンジンから走行に必要な所定の動力が出力され、運転者の意図に沿った走行が行なわれるとともに、結果として路上に種々の有害ガスが排出されるため、沿道局所への NO_x 排出質量は、道路インフラ、交通状況に影響を受ける。

第2世代の排出ガス対策技術を持った小型貨物自動車における、典型的な市街路で得られた知見から、自動車の走行動態は道路インフラ、交通状況等の交通環境に大きく影響を受け、自動車の停止、減速およびその結果としての発進、加速を生じさせる道路インフラ、交通状況により沿道局所へ集中的な NO_x 汚染が発生する。従って、道路インフラ、交通状況等の観点からは、自動車の停止あるいは減速の原因となる、信号、一時停止および対向車とのすれ違い、見通しの悪い場所等における回避操作を極力少なくする道路構造、交通環境を確保することが沿道局所 NO_x 汚染を抑えるために重要である。

第1世代の排出ガス対策技術を持った小型バスが走行する地域における実験では、交通量が非常に多く、渋滞の激しい環境下で沿道局所 NO_x 汚染が発生した。実験に用いた車両は EGR 装置が無く、渋滞等の低負荷走行でも比較的 NO_x 排出質量は多いため、このような車両が使用される条件では道路インフラ、交通状況の面から渋滞等を改善することが沿道への集中的な NO_x 汚染を抑制するために重要である。

5.2. 自動車製造者への提案

本研究における異なる排出ガス規制の車両の実験から、自動車単体の排出ガス対策により広域 NO_x 汚染低減には効果があることがわかった。しかしながら、沿道局所への集中的な NO_x 汚染はいずれの車両も発生しており、かつ沿道における瞬時 NO_x 排出係数のピークは同じように高かった。このことは、これまでの単体排出ガス対策は、広域汚染低減には有効であるが、沿道局所汚染の低減には十分ではないことを示すものであり、今後は沿道局所汚染抑制も考慮したエンジンおよび自動車の設計が望まれる。自動車からの排出ガス質量は、種々の要因により影響を受ける。したがって、法定の排出ガス規制モードのみを前提にした設計だけでなく、自動車が使用される道路インフラ、交通状況および運転状況等を十分の考慮した設計が沿道局所汚染を低減するために必要である。

本研究により得られた知見から、以下に具体的な提案を示す。

(1) EGR の活用

EGR はその特性上、低負荷あるいは空気過剰率の大きな条件において有効に適用できる。したがって、特に低負荷が使われる渋滞時等の緩慢な発進時に沿道局所汚染を有効に減らすことが可能である。

小型貨物自動車における渋滞時の瞬時 NO_x 排出係数の履歴例を図 5.1 に示した。2 速ギヤの 20km/h 以下の緩慢な加速では瞬時 NO_x 排出係数は低くなっている。次に図 5.1 に示した区間 a における渋滞時のエンジン運転履歴を NO_x および EGR 率マップ上に示した。それぞれ図 5.2, 5.3 に示す。2 速ギヤの 20km/h 以下の緩慢な加速では EGR 率が高く、NO_x 排出質量の少ない低負荷、中低回転数領域が使われており、沿道局所汚染が抑えられている。

北京市街路では、渋滞時に沿道局所 NO_x 汚染が発生した。渋滞を発生させない道路インフラ、交通状況等の改善は必要であるが、インフラの改善には相当の時間がかかる。したがって、そのような地域を走行する自動車の観点からは、渋滞時の沿道局所 NO_x 汚染抑制のため、EGR 制御による排出ガス対策が有効であると考えられ、このような交通状況の地域への EGR 制御技術を持った車両の導入が期待される。

そのほか、北京市街路のような渋滞時の沿道局所汚染低減には車両停止時アイドリングストップも有効であると考えられる。

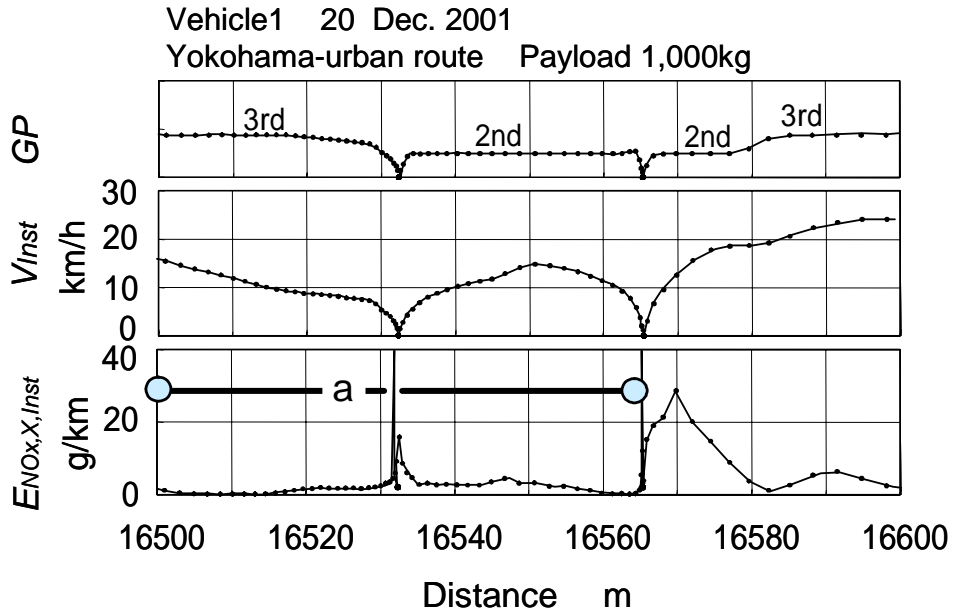


図 5.1 小型貨物自動車の渋滞発進時の NOx 排出係数履歴

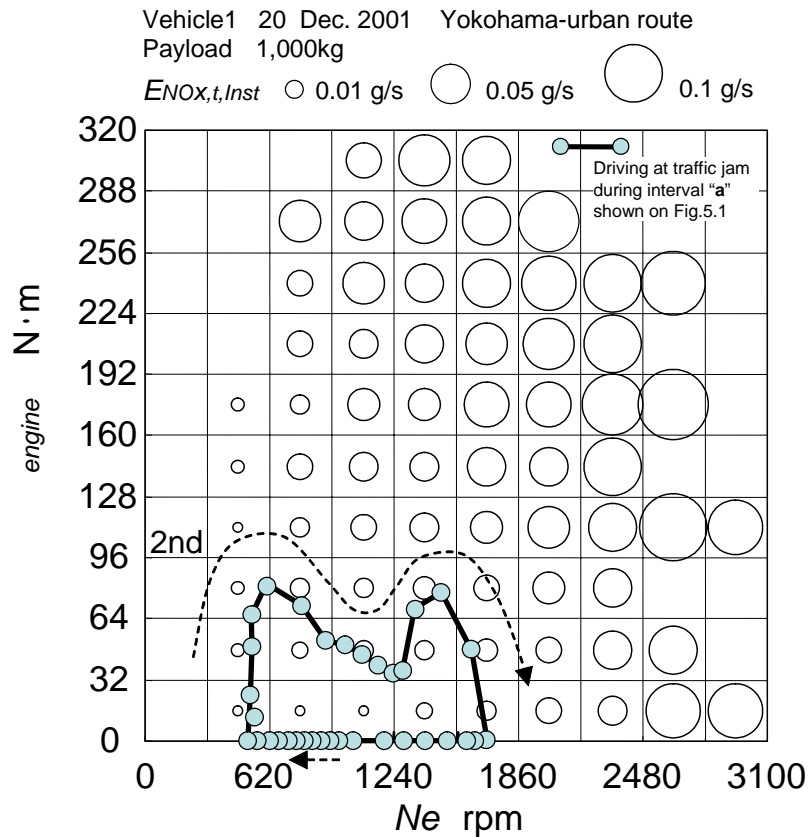


図 5.2 小型貨物自動車における NOx マップ上の渋滞時エンジン履歴

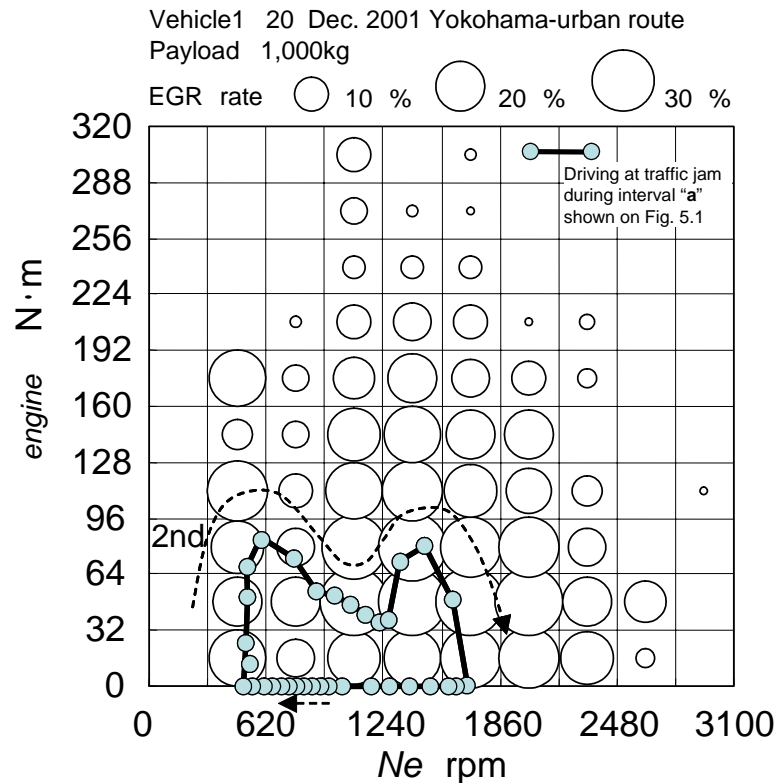


図 5.3 小型貨物自動車における EGR マップ上の渋滞時エンジン履歴

(2) 過渡時における EGR 性能の改善

本研究における小型貨物自動車の市街路走行試験では、主に交差点等での停止および発進に伴い沿道局所 NO_x 汚染が発生した。発進時における 2 速ギヤ使用時はエンジン回転数変化率が大きく、EGR 率が低下するためであった。シャシダイナモ試験の結果、EGR が行われているある過渡条件時には、EGR 率を低くする制御が行われている現象があることが確認された。これは、過渡時は運転性向上あるいは瞬間的な黒煙排出防止のため十分な吸気量を確保することが望ましいので、このような制御が行われたものと推定される。

エンジン回転数変化率が大きい時でも、EGR 率が十分確保された場合、沿道局所 NO_x 汚染がどの程度減少するか推定した。図 5.4 に、小型貨物自動車の発進時における実測の瞬時 NO_x 排出係数履歴と、エンジンの NO_x 排出質量が定常状態レベルであると仮定し計算した同条件における瞬時 NO_x 排出係数履歴をプロットした。発進時のあるエンジン回転数およびトルク点における NO_x 排出質量は図 4.12 に示した定常時の排出ガス質量マップ計測点を直線補間することで求めた。定常時における排出ガス質量レベルが確保された場合には、沿道における集中的な NO_x 排出ガス汚染が大幅に抑制されることが明らかである。

以上のことからエンジン側の対応として、自動車製造者が EGR 制御設計の際に、エンジン回転数変化率が大きい運転における EGR 率を適正に保つ対策の検討が望まれる。これにより、この例では発進時の NOx 排出係数は、最大で 1/8 程度に減らすことが可能であると推定される。但しこの場合、黒煙、PM 等の発生が問題となる可能性があり、後処理装置等、NOx と PM の同時低減を可能にする技術の導入が必要になると考えられる。

また、本研究の知見から車両側の具体的手法の一つとして、無段変速機の利用が考えられる。エンジン回転数変化率が急激に大きくなるよう変速機側で制御し（エンジン側のトルクの増加で加速時の出力を確保することになる）発進時のエンジン回転数変化率を低く抑える制御ロジックを持った無段変速機の利用が有効であると考えられる。

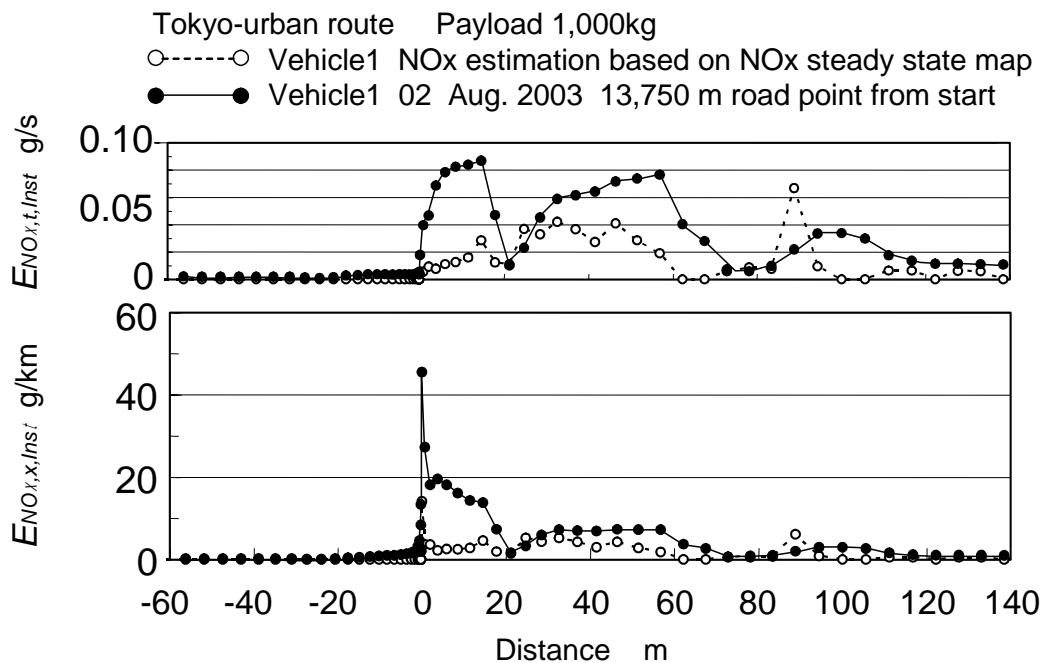


図 5.4 定常時の NOx 排出質量が確保された場合の NOx ピーク低減効果

5.3. 運転者への提案

運転者は、時々刻々変化する道路インフラ、交通状況等の情報を自ら知覚、処理、判断し、自動車の運転を行うため、沿道への集中的な NOx 排出質量は、道路インフラ、交通状況等に大きく影響を受けると同時に、自動車の持つ固有の排出ガス特性および運転方法にも影響される。

運転者が、道路インフラ、交通状況等の事情により運転の自由度が制限されるときは、沿道局所への集中的な NOx 汚染はより自動車の排出ガス特性に影響を受ける。たとえば、本研究における小型バスの走行実験では、渋滞時の走行で集中的な NOx 汚染が発生したが、運転者はひどい渋滞により運転の自由度が大きく制限され、低負荷走行を余儀なくされた。このとき、使用されていた自動車は EGR 装置が無く低負荷で比較的 NOx 排出質量が多い特性を持つため、局所 NOx 汚染の原因となった。

一方、運転の自由度が制限されずに、運転者の意思に沿った運転が可能な場合は、自動車の EGR 制御特性および運転方法により大きく影響を受ける。たとえば、本研究における小型貨物自動車の場合、発進時、加速時に沿道局所への集中的な NOx 汚染が発生した。運転者は、交差点通過時において横断歩道上の歩行者等への安全確保のため徐行を行うが、安全が確保されている場合は自由に加速する。このとき、エンジン回転数変化率が大きいとき、EGR 率が低下するというエンジンの EGR 率制御設計の理由から、NOx 排出係数が大きくなった。したがって、運転者の面からは、発進時にエンジン回転数変化率を小さくする、つまり車両の加速を緩やかにし、瞬時 NOx 排出係数が高くなる運転領域を回避することが沿道への集中的な NOx 汚染を少なくするために有効である。

本研究により得られた知見から、以下に運転者が加速を緩やかにすることによる具体的な効果を示す。

図 5.5 に、路上での典型的な発進および穏やかに発進したときの NOx 排出質量履歴の差を示した。

緩やかに発進したときは 2 速ギヤにおける瞬時 NOx 排出係数ピークは大幅に低減している。加速区間である図に示す“a”における NOx 排出量は表 5.1 に示すように 41%低減した。また CO₂ 排出質量は 33%低減した。このことから、運転者が緩やかに発進することは、沿道局所 NOx 汚染低減に加え、CO₂ 排出量低減に大きく貢献することがわかる。CO₂ 排出質量の低減は、燃料消費量の削減を意味するので、使用者にとって燃料経済性向上につながる。このような沿道局所 NOx 汚染が低減するような運転は使用者にとって大きな副次的効果をもたらす。

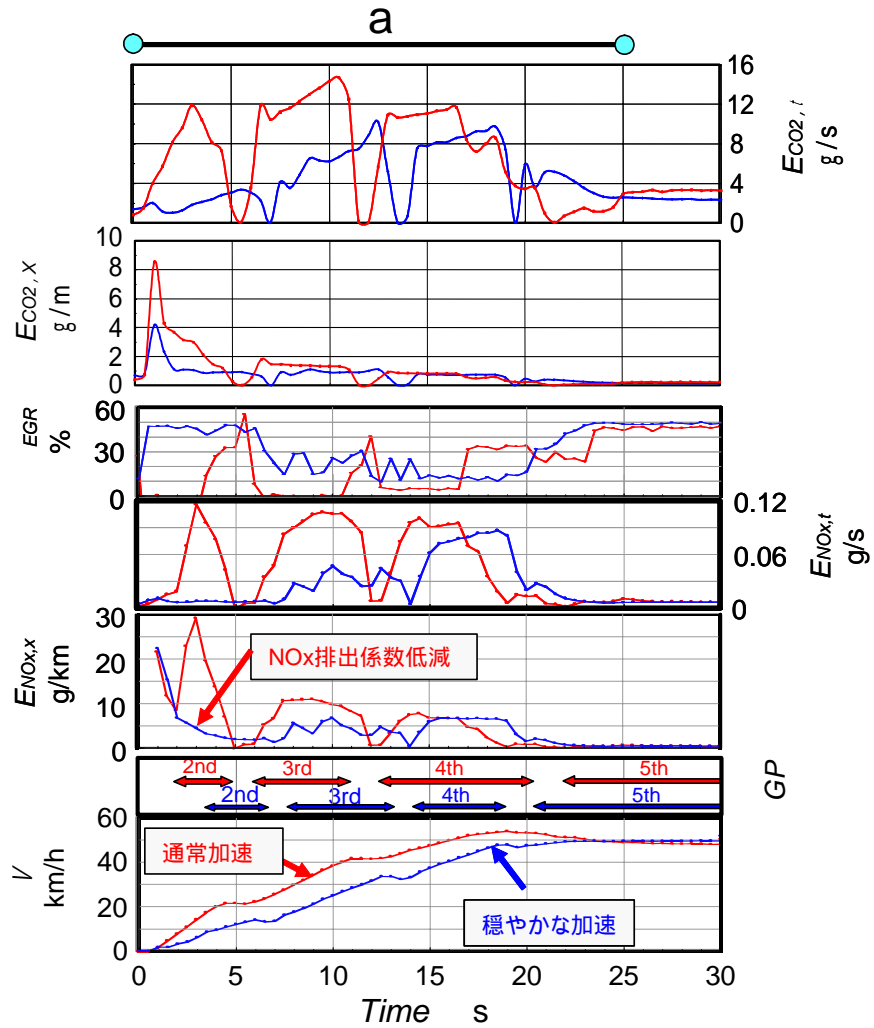


図 5.5 穏やかな加速の NOx 排出係数低減の効果

表 5.1 緩やかな加速による NOx および CO₂ 排出質量低減効果(図 5.5 a 区間)

	2速ギヤでのピーク (g/km)		低減率(%)	排出質量(g)		低減率(%)
	通常加速	緩加速		通常加速	緩加速	
NOx	29.3	22.4	24	1.21	0.711	41
CO ₂	8,536	4,178	51	175.9	117.2	33

第6章 結論

本研究では、自動車排出ガスによる沿道局所汚染に影響する以下の要因に注目し、車載型排出ガス計測システムを搭載したディーゼル自動車で路上走行試験を行った。

- (1) 道路インフラ、交通状況等の環境要因
- (2) 排出ガス性能等の自動車要因
- (3) 運転操作等の運転要因

沿道のどのような場所に、何が原因で集中的な NO_x 汚染いわゆるホットスポットが発生するか実態調査し、得られた結果から走行する自動車に起因するホットスポットの原因を解析した。有害排出ガスとして、NO_x に注目した。

得られた知見から、道路管理者、自動車製造者および運転者に対する沿道局所 NO_x 汚染低減のための提案を行うことを目的とした。

本研究の目的を達成するため車載型排出ガス計測システム開発し、精度を検証した。二箇所のシャシダイナモにおける CVS 排出ガス計測システムと排出ガス質量を比較した結果、路上における NO_x および CO₂ 排出質量評価のために十分な計測精度を持つことを確認した。

開発した車載型排出ガス計測システムを二台のディーゼル車に装着し、それぞれの車両が実際に使用されている地域での道路インフラ、交通状況下で路上走行試験を行った。試験に供試した車両は、1台は第2世代の排出ガス対策技術を持つ EGR 装置付き小型貨物自動車であり、他の1台は第1世代の排出ガス対策技術世代の小型バスである。

それぞれの車両の沿道への集中的な NO_x 汚染の要因は、以下のとおりである。

小型貨物自動車の場合、沿道局所 NO_x 汚染は交差点で最も多く発生し、信号、一時停止、障害物回避操作等による車両の停止や減速後の発進、加速時に集中的な NO_x 排出が発生する。

小型バスの場合、沿道局所 NO_x 汚染は、幹線路における渋滞中の緩慢な発進で最も多く発生する。

沿道局所 NO_x 汚染を車両動態およびエンジン挙動の観点で解析した結果、以下のことがわかった。

(1) 小型貨物自動車

車両速度が低くなると NOx 排出係数は増加する傾向にあるが、低速側では非常に高い NOx 排出係数領域が存在した。特に車両が 2 速ギヤで発進加速するときこれらの領域が使われ、集中的な NOx 汚染が発生する。そのような車両動態におけるエンジン運転領域では、NOx 排出量を低減するための EGR 制御が十分に行われておらず、NOx 排出係数が高くなる。

定常時と過渡時でエンジンの NOx 排出質量に差がある。過渡時では同等のエンジン出力でも定常時と比較し NOx 排出質量は多い。その原因は、エンジン回転数変化率が大きいときに EGR 率が低下するためである。

以上から、小型貨物自動車では交差点、狭路等において信号あるいは障害物回避等に起因する車両の発進、加速により沿道への集中的な NOx 汚染が発生し、その原因は発進、加速において NOx 排出質量が多いエンジン領域が使われることと、エンジン回転数変化率の大きい過渡時に瞬間的に EGR 率を低下させる制御が行われ、NOx 排出量が増加するためである。

(2) 小型バス

車両速度が低くなると NOx 排出係数は増加する傾向にあり、小型貨物自動車と比較し、車両速度と NOx 排出係数の相関は高かった。低速側では NOx 排出係数が急増するが、渋滞中の緩やかな発進でこれらの領域が使われ、集中的な NOx 汚染が発生する。小型バスの場合、エンジンが低負荷でも比較的 NOx が多く排出されており、NOx 排出係数が高くなる原因の一つである。

以上から、小型バスにおいては、渋滞等に起因する車両の緩慢な発進により沿道への集中的な NOx 汚染が発生し、その原因は発進において NOx 排出量が多い低車速領域が使われるためである。

最後に、本研究結果から沿道局所汚染を低減するための道路管理者、自動車製造者および運転者への提案をまとめる。

運転者は、時々刻々変化する道路インフラ、交通状況等の情報を自ら知覚、処理、判断し、自動車の運転を行う。それによりある排出ガス特性を持ったエンジンから走行に必要な所定の動力が出力され、運転者の意図に沿った走行が行なわれるとともに、結果として路上に種々の有害ガスが排出されるため、沿道局所 NOx 汚染低減のためには、道路インフラ、交通状況等の環境要因、エンジンの排出ガス特性等の自動車の要因および運転の要因の特徴を考慮した対策が必要である。

本研究で得られた知見より、道路管理者、自動車製造者および運転者の観点から以下のことが重要である。

道路管理者への観点からは、EGR 排出ガス制御を行っている第2世代の排出ガス対策技術を持った自動車が使われる地域では、自動車の停止あるいは減速の原因となる。信号、一時停止あるいは対向車とのすれ違い、見通しの悪い場所等における回避操作を極力少なくする道路構造、交通環境を確保することが沿道局所 NOx 汚染を抑えるために重要である。第1世代の排出ガス対策技術を持った車両が走行する地域では、道路インフラ、交通状況の面からは渋滞等を改善することが走行する自動車による沿道への集中的な NOx 汚染を抑制するために重要である。

これまでの単体排出ガス対策は、広域汚染低減には有効であるが、沿道局所汚染の低減には十分ではないため、自動車製造者への観点からは、沿道局所汚染抑制も考慮したエンジンおよび自動車の設計が望まれる。自動車からの排出ガス質量は、種々の要因により影響を受ける。したがって、法定の排出ガス規制モードのみを前提にした設計だけではなく、自動車が使用される道路インフラ、交通状況および運転状況等を考慮した設計が沿道局所汚染を低減するために必要である。本研究により得られた知見から、以下に具体的な提案を示す。

低負荷が使われる渋滞時等の緩慢な発進に起因する沿道局所 NOx 汚染の場合、EGR により汚染を有効に減らすことが可能である。したがって、渋滞が激しい交通状況の地域へ EGR 制御技術を持った車両の導入が期待される。またアイドリングストップも有効であると考えられる。

EGR 付き車両では、エンジン回転数変化率が大きいとき、瞬間的に EGR 率が低下する制御が行われているが、そのような時でも、EGR 率が十分確保された場合、沿道局所 NOx 汚染は大幅に低減すると推定される。EGR 制御設計の際に、エンジン回転数変化率が大きい運転において EGR 率を適正に確保し NOx を低減する対策の検討が望まれる。この場合、黒煙、PM 等の発生が問題となる可能性があり、後処理装置等、NOx と PM の同時低減を可能にする技術の導入の検討も必要になる。

そのほか、エンジン回転数変化率を低く抑えることを目的とした無段変速機等の組み合わせも有効であると考えられる。

沿道への集中的な NOx 排出質量は、運転方法により影響を受ける。

道路インフラ、交通状況等の原因で運転の自由度が制限されるときは、沿道局所への集中的な NOx 汚染はより自動車の排出ガス特性に依存するため、運転者が取り得る沿道局所 NOx 汚染低減のため対策は少ない。たとえば、渋滞時の走行では運転の自由度が大きく制限され、局所 NOx 汚染は低負荷走行における車両の NOx 排出質量特性に依存した。

一方、運転の自由度が制限されずに、運転者の意思に沿った運転が可能な場合、沿道局所 NO_x 汚染を低減することが可能である。たとえば、本研究における小型貨物自動車の場合、エンジン回転数変化率が大きいとき、EGR 率が低下し、NO_x 排出係数が大きくなるので、発進時にエンジン回転数変化率を小さくする、つまり車両の加速を緩やかにし、瞬時 NO_x 排出係数が高くなる運転領域を回避することが沿道への集中的な NO_x 汚染低減のために有効である。運転者が緩やかに発進操作をすることは、沿道局所汚染低減に加え、CO₂ 排出量低減に大きく貢献し、経済性向上にも有効である。

謝 辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在学中に、本学理工学部システムデザイン工学科、飯田訓正教授のもとで行ったものです。飯田教授には、子細な事象にとらわれたときなど、時間を惜しまずいつも大所高所の観点から適切なご指導をいただいたことに心より感謝申し上げます。また、研究室における若い学生との日々の研究活動のみならず、国内外の学会等で研究成果の発表の機会をいただいたことは、あらためて自分の視野を広げるためにいい経験となりました。

本論文を執筆するにあたり、本学理工学部機械工学科、松岡由幸教授、システムデザイン工学科、中澤和夫助教授、応用化学科、田中茂教授には、ご多忙中にも関わらず研究成果により磨きをかけるための的確なアドバイスをいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

堀場製作所の塚本時弘様（当時）には、車載型排出ガス計測装置の構築にあたりご指導いただいたことにお礼申し上げます。

本研究は、環境省事業「車載型機器による実走行時自動車排ガス計測管理システムの実証に関する研究」において、計測機器の精度検証および走行試験を行いました。国立環境研究所の森口祐一様、小林伸治様、近藤美則様および東京都環境科学研究所の横田久司様には、本研究で用いた計測システムのシャシダイナモにおける排出ガス試験等にご協力いただきましたことにお礼申し上げます。

「エネルギー・環境・経済(3E)をめぐる慶應義塾大学・清華大学の共同研究プロジェクト」において、中華人民共和国北京市清華大学の王建昕助教授には、北京市での走行実験にご協力いただいたことにお礼申し上げます。

飯田研究室の諸先輩方、学生諸君、そして一緒に研究を行った宮崎富夫さん、小林武夫さん、千賀君博さん、金英俊さん、萩野谷僚さん、高田典史さん、田中美緒さんそして河上裕美さんのご協力をいただき、本論文をまとめることができましたことに感謝申し上げます。

このような貴重な機会を与えてくださった(財)運輸低公害車普及機構の役員の方々、そして多忙な中いろいろな面で支えてくださった職場の皆様に感謝申し上げます。

最後に、本学に在学し研究を進めるにあたり、いつも温かく見守ってくれた家族に感謝します。

参考文献

- (1)環境庁, 野村総合研究所, 自動車排出ガス原単位および総量に関する調査報告書, 平成9年度環境庁委託調査業務報告書 (1998)
- (2)~(6) 平成16年版 環境白書 環境省編, p.67 - 69
- (7) 国土交通省ホームページ <http://www.mlit.go.jp/road/ir/kihon/sank542.pdf>
- (8) 中央公害対策審議会大気部会, 窒素酸化物に係わる環境基準専門委員会, 窒素酸化物に係わる環境基準についての専門委員会報告および資料, 大気汚染研究, 7, 33 (1972)
- (9) 中央公害対策審議会大気部会, 二酸化窒素に係わる環境基準についての中央公害対策審議会専門委員会報告, 大気汚染研究, 13, 111 (1978)
- (10) 日本化学会, 窒素酸化物, 丸善 (1977)
- (11) National Research Council 編, 窒素酸化物(和田 政訳)東京化学同人(1979)
- (12) 新・道路運送車両の保安基準, 別添42 軽・中量車排出ガスの測定方法, 交文社, (2004.1)
- (13) 西田耕之助, 村上嘉孝, 山川正信, 片山徹, 都市域における自動車の走行様式に関する研究, 公害と対策, Vol.20, No.3 (1984)
- (14) 三角明裕, 内山勉, 土岐真一, 衣笠幸夫, 國見均, リモートセンシング法を用いた実走行車両からの排気計測, 大気環境学会 (2003.9)
- (15) 吉田耕一, 小池章介, 塚本雄次郎, 成沢和幸, 大型ジーゼル車における NOx 排出量の予測・評価手法に関する研究, 交通安全公害研究所, p.91-1 - 91-9 (1982)
- (16) 吉田耕一, 小池章介, 塚本雄次郎, 成沢和幸, 大型ジーゼル車における NOx 排出量の予測・評価手法に関する研究, 交通安全公害研究所, p.91-1 - 91-12 (1983)
- (17) 吉田耕一, 小池章介, 塚本雄次郎, 成沢和幸, 大型ジーゼル車における NOx 排出量の予測・評価手法に関する研究, 交通安全公害研究所, p.90-1 - 90-18 (1984)
- (18) 横田久司, 中村健, 福岡三郎, 舟島正直, 車載計測システムによるディーゼル・トラックからの NOx 排出特性の把握(幹線道路走行時), 大気汚染学会誌, Vol.24, No.4, p.276 - 286 (1989)
- (19) 横田久司, 中村健, 舟島正直, 福岡三郎, 梅原秀夫, 車載計測システムによる大型ディーゼル自動車からの NOx 排出特性の把握, 東京都環境科学研究所年報, p.70 - 73 (1990)

-
- (20) 横田久司, 舟島正直, 福岡三郎, 泉川碩雄, 梅原秀夫, 中村健, 車載計測システムによるディーゼルトラックからの NOx 排出実態(交差点走行時), 東京都環境科学研究所年報, p.24 - 28 (1991)
- (21) 横田久司, 竹永祐二, 幹線道路における信号密度と NOx 排出量, 東京都環境科学研究所年報, p.15 - 21 (1992)
- (22) D.Bruce Harris, Foy G. King, Edward Brown, Development of On-road Emission Factors for Heavy-duty Diesel Vehicles Using a Continuous Sampling System, *National Technical Information Service U.S. Department of Commerce*, No.600/A-98/125, p.1 - 19 (1999)
- (23) Joseph M. Norbeck, J. Wayne Miller, William A. Welch, Matthew Smith, Kent Johnson, David Pankratz, Develop On-Road System for Emissions Measurement from Heavy-Duty Trucks, *South Coast Air Quality Management District Contract 20906*, No.0012-AP-20906-005-FR, p.1 - 46 (2001)
- (24) 木原信隆, 塚本時弘, 車載型分析システムによる NOx 排出量のリアルタイム計測, 自動車技術会 学術講演前刷り集, No.23, p.13 - 16 (2000)
- (25) Nobutaka Kihara, Tokihiro Tsukamoto, Koichi Matsumoto, Kozo Ishida, Masao Kon, Takao Murase, Real-time On-board Measurement of Mass Emission of NOx, Fuel Consumption, Road Load, and Engine Output for Diesel Vehicles, *SAE Paper*, No.2000-01-1141, p.1 - 9 (2000)
- (26) Nobutaka Kihara, Tokihiro Tsukamoto, Real-time On-board Measurement of Mass Emission of, THC and Particulate Matters from for Diesel Vehicles, *COMODIA*, No.1-06 (2001)
- (27) H.Christopher Frey, Nagui M.Rouphail, Alper Unal, James D.Colyar, Evaluation of the Effect of Traffic Signalization on Real-World Vehicle Emissions Using a Portable Instrument, *The 11th CRC On-road Vehicle Emissions Workshop*, San Diego, CA (2001.3)
- (28) JCAP 技術報告書 PEC-2001JC-05 大気モデル技術報告書(2), (財)石油産業活性化センター JCAP 推進室, p.69 (2002.3)
- (29) JCAP 第4回成果発表会予稿集 JCAP 大気モデルシミュレーション結果概要(2005.6.2)
- (30) 自動車排出ガス原単位及び総量に関する調査報告書(平成10年) 環境庁
- (31) 川嶋弘尚, 坪田幸政, 道路環境モデリングに基づく ITS 導入効果推定に関する基礎研究, ITS 導入効果および AHS 技術に関する基礎的研究報告書, p.205 - 303 (1999)

-
- (32) 川嶋弘尚, 坪田幸政, 道路環境モデリングに基づく ITS 導入効果分析, ITS 導入効果および AHS 技術に関する基礎的・先端的な研究報告書, p.281 - 381 (2000)
- (33) 川嶋弘尚, 坪田幸政, 道路環境モデリングに基づく ITS 導入効果分析, ITS 導入効果および AHS 技術に関する基礎的・先端的な研究報告書, p.359 - 487 (2001)
- (34) 森野伸崇, 寺町賢一, 角知憲, 交差点付近の窒素酸化物の濃度分布予測, 環境システム研究 - アブストラクト審査部門論文 - Vol.27, p.643 - 648 (1999.10)
- (35) 金山直司, 古屋秀樹, 岡本直久, 石田東生, 交差点における自動車排出ガス量推計手法の開発, 土木計画学研究・講演集, No.24(2), p.225 - 228 (2001)
- (36) 小林伸治, 山崎哲, 鈴木和彦, JCAP における大気モデル研究, 自動車技術, Vol.54, No.5, p.39 - 46 (2000)
- (37) 山崎哲, 大気モデル WG 報告, JCAP 第 2 回成果発表予稿集-大気改善のための自動車・燃料等の技術開発-, p.1 - 17 (2000)
- (38) 柳漢呉, 小林伸治, 自動車排出ガスの大気環境影響シミュレーション, 自動車研究, Vol.18, No.1, p.27 - 30 (1996)
- (39) 国見均, 林誠司, 吉川康雄, 森川多津子, 秋山元, 小林伸治, 大気モデル(1), JCAP 技術報告書, No.1-5-1, p.1 - 25 (1999)
- (40) 平井洋, 国見均, 小林伸治, 大気モデル(2), JCAP 技術報告書, No.1-5-2, p.1 - 9 (1999)
- (41) 本田真人, 田辺智昭, 堀江健一, 大聖泰弘, 齋藤孟, 交通流の計測とシミュレーション, (社)自動車技術会学術講演会前刷集, No.973-188 (1997.5)
- (42) 大口敬, 谷口正明, 岡本智, 実用燃費を規定する要因について -実交通環境における燃料消費構造分析-, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.955, p.17 - 20 (1995)
- (43) Takashi Oguchi, Masaaki Taniguchi, Satoshi Okamoto, Analysis of Consumption Structure in Real Traffic Situations, *The 8th International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Vol.1, p.305 - 310 (1995)
- (44) 谷口正明, 大口敬, 岡本智, 実用燃費の要因構造に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, p.59 - 64 (1997)
- (45) 谷口正明, 山口友行, 大口敬, 交通流の視点からの燃料消費の考察, 自動車技術, Vol.50, No.12, p.84 - 89 (1996)
- (46) 岡本智, 谷口正明, 貴志泰久, 大口敬, 路上駐車による交通流阻害と燃料消費量増加の分析 交通流シミュレーションによるケーススタディ, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.955, p.13 - 16 (1995)
- (47) 谷口正明, 貴志泰久, 交通流制御による大気環境負荷低減, 自動車技術, Vol.54, No.7, p.73 - 78 (2000)

-
- (48) 景山一郎, 前方視野の危険感を用いたドライバモデルについて, 自動車技術会
論文集, Vol.24, No.2 (1993)
- (49) 景山一郎, 栗谷川幸代, 心負担推定のための心拍変動モデルに関する研究, 日
本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, Vol.7, p.203 - 206 (1998)
- (50) 景山一郎, 蛭川欽也, 任炯根, 交通流評価のためのトラフィックシミュレータに
関する報告書, 清華大学・慶應義塾大学・3E 研究院 中日エネルギー・環境・経
済学術セミナー前刷集 (2001)
- (51) Breton, L.A.G. ,Real-time On-road Vehicle Exhaust Gas Modular Flowmeter
and Emissions Reporting System, *U.S.Patent*6, 148 , 656 (2000)
- (52) Gautam, M., Thompson, G.J., Carder, D.K., Clark, N.N., Shade, B.C., and
Lyons, D.W., Measurement of In-use, On-board Emissions From Heavy-duty
Diesel Vehicles:Mobile Emissions Measurement System, *SAE Paper*;
No.2001-01-3643 (2001)
- (53) Weaver, C., Development of RAVEM Ride-Along Vehicle Emissions
Measurement System, *The 11th CRC On-road Vehicle Emissions Workshop*,
San Diego, CA (2001.3)
- (54) Nobutaka Kihara, Tokihiro Tsukamoto, Koichi Matsumoto, Kozo Ishida,
Masao Kon, Takao Murase, Real-time On-board Measurement of Mass
Emission of NOx, Fuel Consumption, Road Load, and Engine Output for
Diesel Vehicles, *SAE Paper*; No.2000-01-1141 (2000)
- (55) 自動車技術ハンドブック基礎・理論編, (社)自動車技術会, P.105 - 107 (1992)
- (56) Hitoshi Yokomura, Susumu Kouketsu, Seijiro Kotooka and Yoshiyuki Akao,
Transient EGR Control for a Turbocharged Heavy Duty Diesel Engine, *SAE
Paper*; No. 2004-01-0120 (2004)