

1. はじめに

この10数年來のわが国における、全国的な自動車の急速な普及および道路整備の進展は著しく、それに伴って今日、自動車による大気汚染、騒音、振動等の公害が深刻な社会問題となり、その抑制防止対策が緊急課題となっている。とくに、自動車交通量の増大に伴って、自動車排ガスによる汚染物質濃度が高まり、最近においては光化学スモッグの深刻化とともに、その主犯と考えられている自動車排ガス問題がクローズアップされている。自動車排ガスには、図1にみられるように一酸化炭素(CO)や鉛化合物のような、直接人体に影響を及ぼす有害物質や、炭化水素(HC)や窒素酸化物(NO_x)のような光化学スモッグの原因物質といった有害汚染物質を多量に含んでいる。にもかかわらず、それら汚染物質の大気中における化学変化や物理的挙動(輸送、拡散、沈着等)の解明が非常に遅れている。従って、自動車排ガスによる環境汚染の現状も十分把握されていないし、また将来の発生源対策や、交通計画、行政計画等の自動車環境計画をも考慮した自動車排ガスによる環境汚染予測、いわゆる自動車排ガスに係る環境アセスメント、といったものもほとんどなされていない。

自動車排ガスによる大気汚染の問題における排出汚染源の特徴として、①各汚染源(自動車)からの汚染物質の排出量が汚染源毎に異なり、かつ同一汚染源であっても、走行状態、使用燃料の性状等によっても排出量が異なること、②汚染物質排出源の位置が非常に低く、地上もしくはそれに近い場合がほとんどであり、しかもそれがマクロ的にみた場合面汚染源的に広がっていること、が挙げられる。従って、自動車排ガスの研究においては、これらの特徴をよくつかみ、環境汚染評価がなされねばならない。一方、自動車排ガスによる環境汚染評価の目的は、①局地的汚染レベルを減少させるための、道路内あるいは道路周辺における局地汚染の解明、②広域全体の汚染レベルを減少させるための、広域環境汚染に及ぼす自動車排ガスの影響(以下広域汚染と呼ぶ)の解明、とに大別することができよう。局地汚染では道路内あるいは道路周辺における“汚染濃度”の解明が要求される場合が多く、従って道路周辺における汚染物質の局地的な輸送・拡散現象がとくに問題となる。一方広域汚染においては、自動車排ガスの放出→拡散→汚染による広域の汚染濃度の解明が必要とされる場合もあるが、他の固定発生源の影響、拡散過程における汚染物質の化学変化(HC, NO_x)、あるいは前述した自動車排ガスの汚染源の特徴①、等を考慮すれば、自動車排ガスによる広域汚染の評価ではその指標として“汚染濃度”よりも“汚染

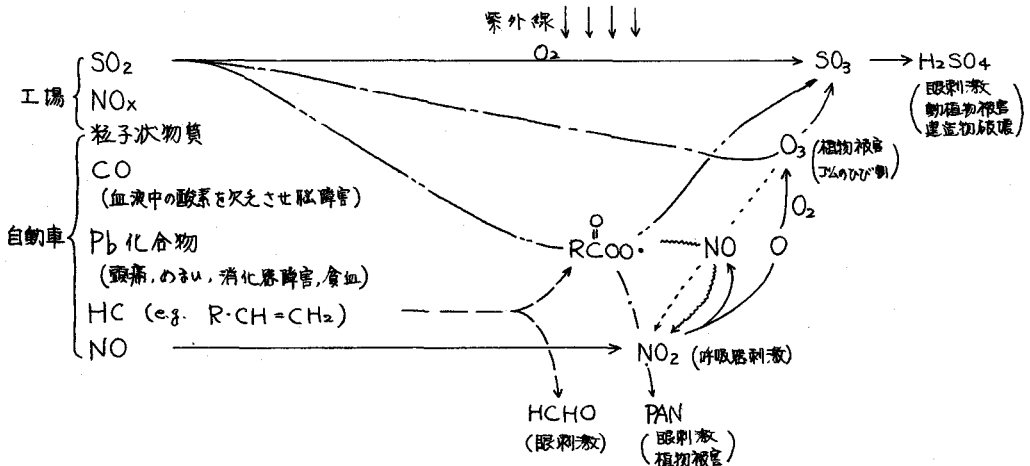


図1 大気汚染物質の大気中における主反応と人体への影響

量”をとる方が適していると考えられる。

なお、これら自動車排ガスによる環境汚染評価においては、前述の如く自動車による汚染物質の排出量は汚染源毎に異なり、かつ走行状態によっても異なることから、実走行状態における汚染物質の排出量を、より正確につかむ必要がある。

以上のような考え方に基づく、自動車排ガスによる環境汚染評価法を

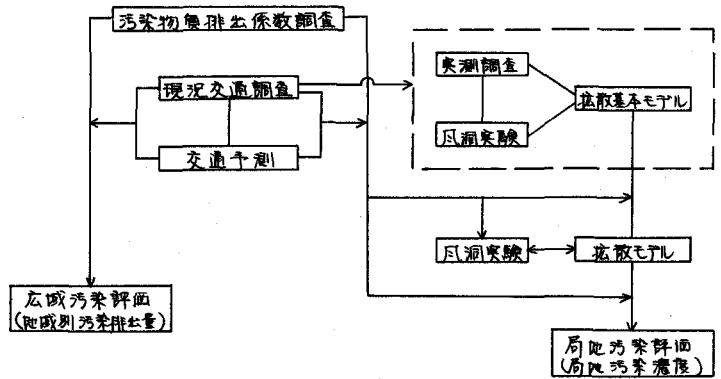


図2 自動車排ガスによる環境汚染評価法の概要

図示すれば図2のようになる。そしてここでは、これらの考え方に基づく自動車排ガスによる大気汚染の現状把握と将来予測のために必要な手段、方法及びそれらの問題点について概観し、さらにこのような方針のもとに、筆者が参加し現在研究継続中である“自動車の排出ガスの調査研究委員会”による研究調査の概要を紹介する。

2. 自動車からの大気汚染物質排出係数

自動車が単位距離（1km）走行する間に排出する汚染物質の成分別排出量を、ここでは排出係数と名づける。排出係数は、車種、車令、走行状態、使用燃料の性状、荷重状態等により異なりその決定は容易でない。一般には排出係数はシミュレーション試験、即ちパイロットカーによる走行調査とそれに続くシャーシダイナモ試験により推定される。図3は、車種別排出係数推定法の一般的概要と、委員会により採用された推定法を示す。

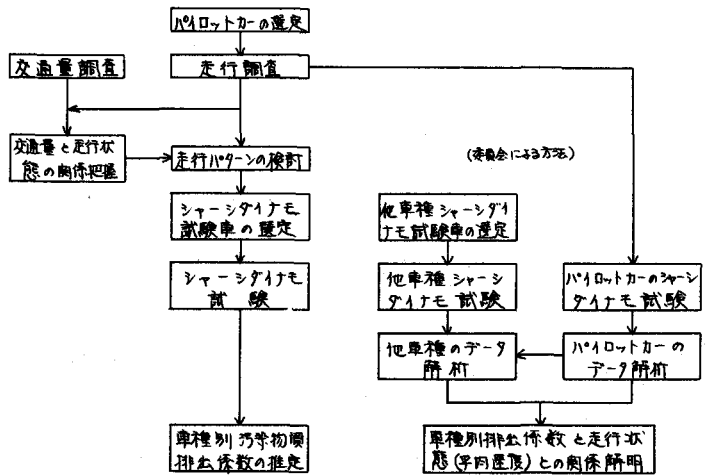


図3 車種別排出係数推定法

2.1 走行調査

都市内の一般街路及び高速道路における自動車の走行状態を調べるための走行調査では、まずパイロットカーの選定が問題となるが、これは保有自動車数統計、交通量調査結果から代表的な車種と計器の搭載などの条件を考慮して選ばれる。ただし排出ガス測定車とパイロットカーとは原則的には同一車種、同一の車でなくてもよく性能の良悪が極端でなければ、坂道の少ない市街地においては軽自動車、トラック等と除けば、走行パターンにそう異なることはないと考えられる。なお、委員会で行ったようなパイロットカーをシャーシダイナモ試験車として使用する場合には、汚染物質排出量の同一車種での代表性に対する検討、及び他車種との排出量の比較検討が十分行われているなければならない。

走行調査における走行ルートは目的に適した路線が、また走行時間帯については、環境汚染問題では一般に、交通量の時間的変動を考慮して平日の標準的な朝、日中、夕方、夜間と、ピーク時、オフピーク時といった時間帯が、それぞれ選ばれる。走行調査でのパイロットカーによる測定項目としては、車速、エンジン回転数、吸気圧力、燃料消費量、変速ギヤ位置、信号待ち時間と回数、主要交差点通過時刻と、また車外測定項目としては、

交通量、気象調査を行う必要がある。このような走行調査結果に基づいて、自動車走行パターンが決定される。

2.2 シャーシダイナモ試験

シャーシダイナモ試験は、路上と同一の走行パターンをシミュレートし、その際排出する汚染物質を直接測定する実走行試験法である。シャーシダイナモ試験では、アイドリング、加速、定速、減速等の一連の走行状態を実走行に即して再現し、しかも対象とする車での実施が可能であるが、その反面走行パターンの選定、シミュレーションの方法、排ガスの採取試験方法に種々の問題点がある。

車種別排出係数を求めるためには、必ず排出ガス測定車としての代表車種を選定せねばならない。車種選定にあたっては、自動車の種類（大型貨物車、大型乗用車、小型貨物車、乗用車、軽自動車）、使用燃料（ガソリン、軽油、LPG等）、エンジンの型（4サイクル、2サイクル）、車令（使用過程車、00年度規制車）、荷重状態（満載、空）等の汚染物質排出量に影響を及ぼす種々の因子を考慮し、さらに自動車の保有車両数等の統計資料に基づいて決定されねばならない。シャーシダイナモ試験車として選定された車については、その車種に対する代表性の検討を行う必要がある。また、少数の車種にて試験を行う場合には、車種相互間の各汚染物質毎の相関関係も十分明らかにしておく必要がある。

シャーシダイナモ試験による実走行状態における排出係数の算定では、走行調査によって得られた結果から走行パターンを作成し、それに従って排出係数を求める場合が多いが、委員会の調査研究では、実際の走行全区間についてのシャーシダイナモ試験（CVS法）と、1秒毎の排ガス濃度（CO、CO₂、HC、NO_x）の連続測定を併用して行い、その結果を紙テープに記録した。このような試験方法によれば、費用がかさむ反面、小区間毎のデータ処理を行うことにより、種々の問題に対し非常に広範囲に利用可能な基礎データを得ることができる。

2.3 車種別汚染物質排出係数の推定

前述した自動車の種類、使用燃料、エンジンの型、車令、荷重状態等を考慮して一般には数車種に分類し、走行調査により作成した走行パターンに沿ってシャーシダイナモ試験を行い、汚染物質の車種別排出係数を決定する。しかしこの際、走行パターンは対象区域で要領り、選定した走行パターンが代表的なものであるかどうかという疑念が常に伴う。その点を委員会によき、シャーシダイナモ試験及びそのデータ解析結果は汎用性のある形、即ち汚染物質毎の車種別排出係数を区間速度の関数として表わしている。その解析法の概要は次の通りである。

パイロットカーによる走行調査、シャーシダイナモ試験で得られたデータを、区間（平均区間1.89km）別、ルート別に、(1)区間速度、(2)加速標準偏差、(3)平均速度こう配、(4)走行速度、(5)km当り停止回数、(6)燃費、(7)汚染物質排出量、の各項目について集計し、走行状態に係る(1)～(6)と排出量との相関関係あるいは相互間の関係等についての解析を行った。その結果、汚染物質（CO、THC、NO_x）のいずれに対しても、その排出係数Eは区間平均速度Vの関数として表わすのが最も説明しやすく、しかもその場合、 $E = \alpha V^p$ の回帰式がよく適合することばかりであった。しかも高速道路、一般街路走行時の別なく一つの回帰式で表わせることを検定により確かめた。このことは、自動車排ガスに係る環境アセスメント等において、高速道路と街路というような道路種別、あるいは路牌によって排出量算定式を変える必要はないことを意味し、排出量計算を非常に容易なものとする。

次に車種別排出係数と区間平均速度との関係式は、パイロットカーにより得られた上記種々のデータの解析結果と、車種毎のシャーシダイナモ試験（10モード、定速、実走行モード）結果を用いて次のように推定される。

いま、区間平均速度Vにおける運転モード別の時間比率(%)と汚染物質排出量(g/sec)をそれぞれT(V)、g(V)と表わすと、汚染物質の排出係数E(g/km)は、

$$E(V) = \{g_i(V) \cdot T_i(V) + g_a(V) \cdot T_a(V) + g_c(V) \cdot T_c(V) + g_d(V) \cdot T_d(V)\} \cdot \frac{3600}{V}$$

となる。ここで添字i、a、c、dはそれぞれアイドル、加速、定速、減速の運転モードを意味する。車種Kの汚染物質排出係数は、①運転モード別時間比率Tは車種に無関係に一定とする、②運転モード別汚染物質排出量gについては、K、pは車種K及びパイロットカーとしるとき、

$$K g_m(V) = A \cdot p g_m(V) \quad [m=i, a, d \text{ の時}], \quad K g_m(V) = B \cdot p g_m(V) \quad [m=c \text{ の時}]$$

とする、ただし係数A, Bは車種毎のシャーシタイプも試験から求まる係数である、という2つの仮定により、最終的に

$$KEV = \left[A \cdot \sum_{m=i,a,d} p g_m(V) \cdot p T_m(V) + B \cdot p g_c(V) \cdot p T_c(V) \right] \cdot \frac{3600}{V}$$

と求まる。こうして求められた式は、 $E(V) = \alpha \cdot V^2 + \beta \cdot V^2 + \gamma \cdot V + \delta + \varepsilon \cdot V^{-1}$ の形で表わされ、汚染物質の種類はらびに種々の車種、様式別に $\alpha \sim \varepsilon$ の係数が与えられる。なお、汚染物質ごとにみた場合、CO, HCについてはかなり高い精度で排出係数は算定されるが、NOxについてはバラツキが大きい。従って、自動車排ガスに係る環境アセスメントといった問題においては、環境維持という見地から、NOxの排出量の算定では、これらの分散に伴う信頼限界といったような安全側の倍率を考慮することが望ましい。

3. 自動車排ガスの広域汚染評価

自動車排ガスによる環境汚染の広域的な評価は、地域全体の汚染レベルを減少させるため、道路整備計画等に伴う地域環境汚染変動を評価するため、自動車排ガスによる地域環境汚染への寄与率を推定するため、などの目的で行われる。自動車排ガスの広域汚染評価では、1で述べたように指標として汚染濃度よりも汚染量を採る方が妥当であると考えられる。図4は、地域別汚染物質排出量と、委員会により求められたような区間平均速度の関数として表わされた排出係数を利用して推定する手順を示す。即ち、広域汚染の現状は、地域内の車種別交通量及び走行状態の調査結果と排出係数から、最終的に地域内の汚染物質の総排出量として評価することが出来る。また、広域汚染の将来予測は、①道路整備計画による地域内道路網の把握、②目標年度における地域内道路網での車種別交通量、走行状態の推定、③排ガス規制による排出係数の補正、を行い上記現状評価と同様に行うことが出来る。この際、交通量、走行状態の推定が一番困難かつ重要な問題である。これらは、道路ネットワークに与えられたOD交通量を、ある配分手法に従って流し、それぞれの道路区間における交通量から、その区間の走行速度が推定される。この推定作業で取りあげられるべき主な問題点としては、(1)調査対象地域の設定、(2)目標年度における道路網の設定、(3)目標年度における自動車OD交通量の推定及びその時間別分配、(4)交通量配分、(5)細街路交通の取扱い、等がある。次に車種構成の推定については、将来の交通需要から車種推定がなされるが、車種区分は大きくは乗用車、バス、小型貨物車、大型貨物車程度が限度と考えられる。この点から考えて、将来予測における排出係数の決定は、上記各車種の平均及びその分散がわかればよく、あまり細かく分類する必要はない。

この様にして、地域別汚染物質排出量と、交通政策、経済動向あるいは交通規制による交通量変化、排ガス規制による排出係数の変化、道路整備計画に基づく地域内道路網の変化、などを考慮して推定することができ、環境維持、さらに進んで環境改善のための環境政策に利用することができる。また、区間別、路線別排出量の評価も

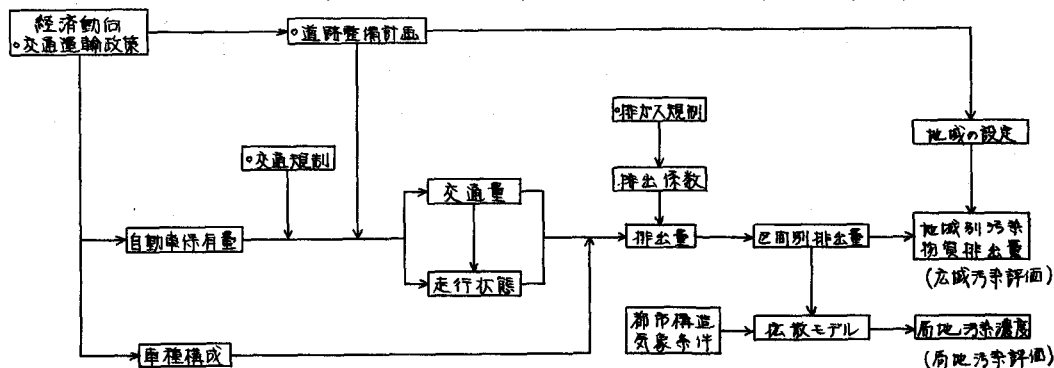


図4 自動車排ガスの環境汚染評価と防止対策(○)

り、グローバルは大気環境汚染面からみに道路整備計画の良否の判断資料を提供することが可能である。

4. 自動車排ガスの局地汚染評価

道路内及び道路周辺の自動車排ガスによる汚染状態、いわゆる局地汚染、を評価するためには、排出された汚染物質の道路内、周辺地域における濃度分布を明らかにする必要がある。都市における自動車排ガスによる環境汚染は、一般に交差点付近において最悪の汚染状態を示すことから、交差点を含めた道路内汚染に関する実測データをはじめ、理論的研究も比較的多く報告されている。一方、道路周辺の自動車排ガスによる汚染に関しては、理論的研究は、汚染物質の排出量の把握がむづかしいことや、風速分布、拡散係数の推定、建物など地形を考慮した境界条件の設定などが複雑である¹⁾ことから、また野外実測による汚染調査は非常に大がかりな実験となることから、従来研究された例は少なく、道路周辺の汚染状況の実態はいまだにどこまでない。しかし、道路周辺における自動車排ガスによる環境汚染の問題は、既設路線周辺における汚染の現状把握及び将来予測の問題をはじめ、とくに新設路線（いわゆる重交通量路線）計画に基づく周辺地区汚染への影響の予測、自動車排ガスによる環境汚染面よりみに新設路線の道路構造の最適設計、などの面から非常に重要な問題であり、その解明が急がれている。そこでここでは、自動車排ガスによる道路周辺の環境汚染評価について考える。

道路周辺における自動車排出汚染物質の濃度分布は、現場実測調査、風洞実験、拡散シミュレーションモデルによる数値計算により推定できるが、多くの場合汚染濃度分布予測は拡散シミュレーションモデルによって行われ、実測調査や風洞実験により、作成された拡散モデルの精度の検討あるいは基礎データの収集が行われる。

4.1 拡散シミュレーションモデル

自動車より大気中に放出された汚染物質は、気流により輸送され、大気の流れによって拡散する。大気中の汚染物質の濃度 C の変化は、放出ガスの質量保存則により得られた乱流拡散の基本方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q$$

で表わされる。ここで (u, v, w) 、 (K_x, K_y, K_z) はそれぞれ各方向の速度成分、拡散係数である。Sutton の式、Pasquill の式などのいわゆるアリュームモデル、APPS¹⁾ や自動車排ガス拡散研究会²⁾ の道路周辺モデルなどのいわゆる差分モデルは、この基本方程式から出発したものである。これらのうちアリュームモデルは、統計理論を応用した解析解である。使用方法が簡単であるためによく利用されるモデルであり、実際にも Lamb³⁾ らによって詳細に review されているように、道路からの排ガス拡散にも多く使用されてきた。しかし、このモデルの適用限界、①放出量が時間的に一定であること、②拡散場が建物などのない平坦な地形であること、③平均風速は水平方向に一定であること、なども考慮すれば、都市域での地表付近から排出される自動車排ガスの拡散、とくに排出源直ぐの局地汚染評価に利用することは適当でない。道路周辺など小規模スケールでの拡散現象では、建物や高速度道路などの幾何学的地形条件での空気の流れが重要な役割を果たすことから、流れの正確な把握が大切となる。この点差分モデルは、対象地域の特性をできるだけ反映させつつ、空気の流れ場の設定 → 汚染物質の分布の推定、を計算機を用いてくり返し計算による数値解析法であり、平均流、拡散係数及び境界条件を自由に与えることができる利点と有する。従って、とくに複雑な都市構造をもつ地域での、小規模スケールの拡散問題に有効となる。しかし、これらの差分モデルにも、流れの設定法、拡散係数の設定法、収束の判定法、長時間計算となること、などの問題点がある。

4.2 拡散野外実測調査

自動車排ガスによる道路周辺における環境汚染の現場実測は、非常に大がかりとなり費用もかかむので、十分な実験計画を立てその検討を行わねばならない。拡散シミュレーションモデルの検証という目的での拡散野外実測調査では、拡散モデルで対象としている地形的条件、気象条件等を十分に把握した上で、④実測調査場所の設

定、⑤調査期間及び時間、⑥エア・トレーサーガスの種類及び噴霧法、⑦拡散実験調査における測定項目及び試料採取法、⑧拡散気象調査における測定項目と測定法、⑨データ解析法、⑩交通量調査などと考えねばならない。

4.3 風洞実験

風洞実験においては、野外実験に代替する風洞実験を行い、両者の結果を比較検討することにより風洞モデルの再現性（整合性、相関性）を明らかにすることが最も重要であり、実用上の整合性があれば、濃度予測に風洞実験が利用できることになる。逆に相関性があれば、その原因を調査し実験法（相似則）の吟味を行い、風洞実験の改善を行わねばならない。自動車排ガスの拡散風洞試験においては、①相似則、②車走行、排煙法、③気象条件の再現法、④濃度定置法などが実験法上の留意点となる。

4.4 局地汚染調査例

委員会による局地汚染調査法は、図2にみられるように、ある特定モデル地区（高架道路、平坦地区）に対する差分モデルである拡散基礎モデルを作成する。一方、その地形条件に適合する周辺におけるエア・トレーサー実験、及び野外実験、拡散モデルに対応する風洞再現試験を行い、両者の結果を比較検討することにより、風洞モデルの再現性を明らかにし、濃度予測に風洞実験が利用できると確認する。また、これらの実験結果を基に拡散基礎モデルの検証を行う。このような拡散基礎モデル、風洞実験、野外実験の三つの整合性を確認したうえで、さらにこれらの研究を基礎とした、周辺地形、道路構造等の相関する場合に対する拡散モデルの開発（及び風洞実験による検証）が引き続き計画されている。なお、拡散モデル開発におけるいくつかのパラメータ効果の把握のため、風洞再現試験とともに風洞拡散基礎試験が行なわれている。

今後これらの成果に基づき、局地汚染濃度評価、都市構造、道路構造、気象条件、汚染物質排出条件などをパラメータ効果とした道路周辺における環境汚染の評価、新設（計画）路線による沿線地区の環境汚染評価、あるいは自動車排ガスによる環境汚染面のうち道路構造の最適設計、などに活用されることが期待される。

5. 環境保全のために

自動車排ガスによる環境汚染は、大都市をはじめ各地で今や一刻の猶予ならない状態であり、その上今後も交通量が増大することが予想されることから、自動車排ガスによる環境汚染の現状把握、将来予測に基づいた環境保全、環境改善対策が早急に行われねばならない。自動車排ガスの環境汚染防止策としては、汚染物質排出源（自動車）を減かせること、個々の汚染源からの排出量を減かせることに大別できる（図4参照）。前者に対しては、流通機構の改革、高い税負担による交通需要を減かせるような交通運輸政策の推進、交通規制の強化等による交通量減少策、自動車利用者の自覚、後者に対しては、排ガス規制や道路整備による低排出係数に等が考えられる。ただし、道路整備に伴っては、交通量が増大する可能性があること、広域的には環境改善とほる場合でも、新設路線沿線では環境汚染が甚る危険性があることが考えられ、これらのことにも十分考慮した広い意味での道路整備計画とならなければならぬ。また排ガス規制に関しては、排ガス対策、低公害車の開発が進められているが、これらの対策や開発においては、現在自動車から排出される大気汚染物質対策が主であるが、二次公害の危険性にも十分な配慮がなされねばならない。例えば、排ガス対策の酸化触媒方式は硫酸ミストの生成が、また電気自動車はバッテリーの処分における廃物処理法、水質汚染、土壌汚染の二次公害が懸念される。

環境保全、環境改善という点から、今後交通制御方式が採用されていくと思われる。この際、制御の目的函数として何をとるのかがキー・ポイントとなろう。今迄の道路整備計画、交通規制等でみられた“いかに多くの車を走らせる”という段階は過ぎたようである。

参考文献 1) 日本機械学会；自動車排ガスによる大気汚染に関する研究（1971）

2) 自動車排ガス拡散研究会；高圧道路における自動車排ガス拡散に関する研究（1975）

3) Lamb, D. V. et al. ; A critical review of mathematical diffusion modeling techniques for air quality with relation to motor vehicle transportation (1973)