

マイクロシミュレーションを活用した交通と大気環境の広域評価システム*

Traffic-Related Air Environmental Evaluation System for Wide-Area Network Using Microscopic Simulation*

白濱好文**・屋井鉄雄***・神田学****・福田大輔*****

By Yoshifumi SHIRAHAMA**, Tetsuo YAI***, Manabu KANDA**** and Daisuke FUKUDA *****

1. はじめに

首都圏において、NO_x や SPM（浮遊粒子状物質）は、未だに環境基準の達成率が低い状態にあり、交通渋滞・環境対策を、今後いかに行っていくべきかを検討することが、引き続き重要な課題である。特に、大気中に浮遊する SPM は、発生場所と影響を受ける場所とが必ずしも一致しない特性を持っており、その移動距離は 1~数 10km と言われている。また、走行車両から排出される SPM は、速度、加速度、車種、車齢、燃料タイプ、道路勾配によってその量が激しく変動するため、車種の相違、走行速度変化・加速度変化等の走行状況の相違、勾配等地形の影響の相違を詳細に考慮した分析が必要となる。

このような分析を行うためには、道路環境・運転状況を詳細に表現可能な交通マイクロシミュレーション¹⁾、及び、気温、風向、大気境界層等の気象状況を詳細に表現可能な高解像度の気象シミュレーション²⁾を統合的に用いることが有効であると思われる。

そこで本研究では、環境改善に資する各種交通政策の分析が可能な交通・大気環境シミュレーションシステムを構築し、交通流、環境計測両方の現況再現性の向上を図ることを目的とする。次に、排出量推計モデルによって得られた出力結果を気象モデルの入力データとして PM 拡散濃度を出力し、その結果を沿道レベルでの分析結果と比較する。最後に、ITS 導入に伴う環境改善効果について考察する。

2. 本研究の位置付け

堀口・小根山³⁾は、道路ネットワークシミュレーションモデルの利用実態を分析し、都市レベルでの広域を対象とした分析例が少なく、特に、一般道と高速道路を組

み合わせた統合ネットワークに対する適用事例が無いことを指摘した。一方、交通環境に関する研究では、車両をマクロ的に扱う分析が多く、車両を個々に表現するミクロレベルになると、対象地域も局所的になっている。

本研究は、①交通状況をミクロレベルで表現し、②加速度を考慮した排出量の算定を行い、③統合型広域ネットワークを対象とし、④大気汚染物質の移流拡散を考慮した面的な分析を行う、という点において新規性を有していると考えている。

3. 東京南部・川崎・横浜地域を対象とした広域ネットワークデータの構築

(1) ネットワークデータの作成

本研究で使用する交通マイクロシミュレータは Paramics であり、東京南部・川崎・横浜地域の道路ネットワークを分析と対象とする。また、ベースとなるネットワークとして後藤他¹⁾を用いる。本研究では、以下の各項目に関して、ネットワークデータの精緻化を図った。

a) ネットワーク範囲の拡大と道路構造の修正

後藤他¹⁾をベースに対象範囲を拡大し、ノード数 9,850、リンク数 17,429、総リンク長 4,220km のネットワークを最終的に作成した（図 1）。また、分断されていた高速道路のネットワークを繋げ、迂回交通を再現できるようにした。さらに、道路構造に関しても、車線数や右左折ポケットレーン、高速ランプ、スリップレーン、高速道路の料金所等を可能な限り再現している（図 2）。

b) 信号データの設定

対象とするネットワーク内には、信号が 3,000 個以上設置されている。信号サイクル長の全てを現地で観測し、現状のシステムに手入力することは極めて困難である。そこで、神奈川県警と警視庁から、それぞれ 1,000 箇所、1,200 箇所の信号データを提供頂き、現在までに、1,000 箇所の信号に関してサイクル長情報の入力を完了した。残りの箇所に関しては、サイクル長の代表値を入力することで暫定的に対処している。

*Keywords: 広域ネットワーク, マイクロシミュレーション, SPM, OD 交通量修正

**正会員 修(工), 東京三菱銀行

(〒100-8388 千代田区丸の内 2-7-1 Tel & Fax: 03-3240-1111)

***正会員 工博, 東京工業大学大学院総合理工学研究科

人間環境システム専攻

(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1 Tel: 03-5734-2693 Fax: 03-5734-3578)

****正会員 工博, 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻

*****正会員 修(工), 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

c) 外部 OD ゾーンの設定

対象地域外部からの流出入交通に関しては、対象地域外部に接続する幹線道路から出現するように設定した。また、外部 OD 交通量は、関東圏を対象とした分割配分結果を用い、それぞれの幹線道路に与えることとした。この結果、総 OD ゾーン数は、従来の 64 ゾーンから 122 ゾーンへと細分化された。

d) センサデータを活用した時間帯別 OD 表の作成

24 時間単位の対象地域 OD 交通量を 1 時間毎の交通量に分配するために、平成 11 年道路交通センサデータを用いて時間帯別車種別 OD 交通量への変換を行った。この作業のために、センサデータから発着ゾーン、発着時

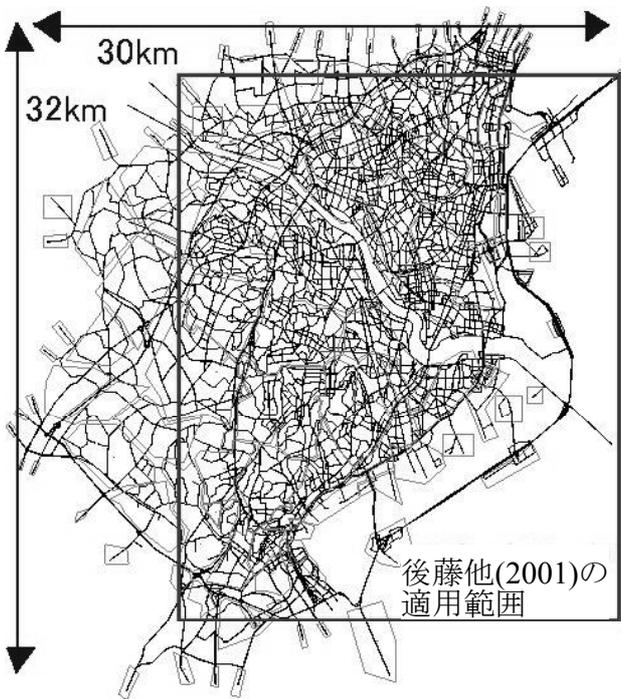


図 1 対象道路ネットワーク

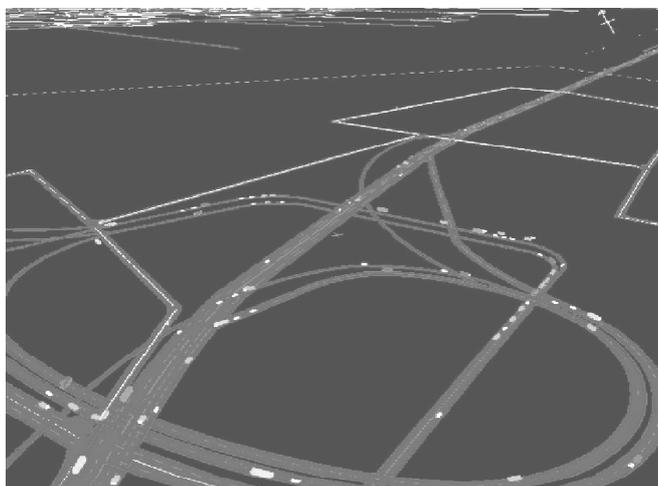


図 2 交通マイクロシミュレーション画面(大黒 JCT)

間、車種の情報を取得し、OD ペア毎に時間帯別交通量シェアを算出するプログラムを作成した。

(2) マイクロシミュレーションの問題点と対応策

ネットワークに細街路等を含めると、各車両が選択可能な経路が増える反面、隣接する細街路や駅前のロータリーに出入りする車両が発生するという問題が生じる。これは、リンクコストに右左折コストを導入していないことや、経路に幅を持たせるためのアルゴリズムを組み込んでいるために生じる現象で、ネズミ走行と呼ばれる。本研究では、ネットワークデータの作成段階において、細街路の 1 リンクあたりに 1.5 分のリンクコストを与え、ネズミ走行が激しい箇所について右左折禁止にするといった対処を施すことで対応している。

4. 常時観測交通量を活用した OD 交通量修正方法の提案と現況再現性の検証

(1) OD 交通量の修正方法

後藤他¹⁾では、道路交通センサデータの情報のみを用いて対象地域の時間帯別 OD 交通量を算出している。すなわち、時間帯毎の交通情報を用いておらず、現状のままでは、より短い時間スケールで交通状況を再現することが困難である。

そこで本節では、神奈川県警、警視庁から提供頂いた常時観測交通量データを用いて、時間変化する OD 交通量をオフラインで修正し、再現性の高いネットワークデータを構築する方法を開発する (図 3)。

まず、マイクロシミュレーション内のネットワーク上において、実際の常時観測地点と同じ場所に感知器を設置し (135 地点 270 方向)、時間帯毎に交通量や速度の

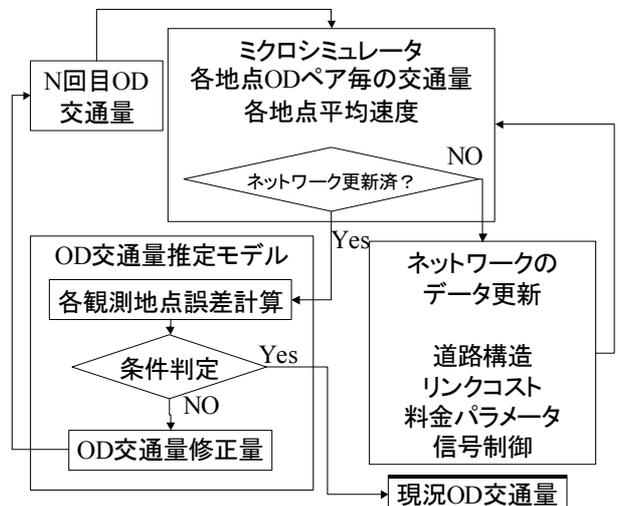


図 3 OD 交通量修正方法の概要

シミュレーション値を算出する。この算出値の現況再現性が高くなるように、算出値と実測値との乖離が大きい箇所を中心として、リンクコストや入力データのエラーを手作業で修正し、シミュレーションを繰り返し実施する。リンクコストをマニュアルで修正後、交通量のシミュレーション値と実測値とが一致するように、次に述べるOD修正モデルを適用する。そして、修正後のOD交通量を用いて再度シミュレーションし、再度リンクコストを更新していくという作業を繰り返すことによって、現況再現性を向上させる。

本研究では、OD修正モデルとして残差平方和最小化法と増減目標設定モデルという2種類のモデルを構築したが、前者の計算時間は約5時間と実用的ではない。また、観測地点の設置の仕方次第で解を求めることができない場合も生じるため、後者のモデルを適用している。

(2) 増減目標設定OD修正モデル

観測データと計算データの残差を用いてOD修正目標量を算出するモデルを提案する。観測リンクにおける交通量の計算値と実測値に差がある場合、その差が減少する方向にそのリンクを通過するODペア交通量を修正する。各観測点の残差分を、その点を通過したODペアの通過交通量を用いて重み付けした値をもって、そのODペアの修正目標値と仮定すると、修正モデルは以下のように定式化される。

$$\Delta Q_{kw} = S_{kw} \cdot \Delta Q_k \quad (1)$$

$$\Delta Q_w = \frac{\omega_w \sum_k S_{kw} \delta_k \Delta Q_{kw}}{\sum_k \psi_{kw}} \quad (2)$$

ここで、各変数の定義は以下のとおりである：

- Q_k ：観測点 k を通過する総交通量；
- ΔQ_k ：次のステップ時の増減目標値；
- Q_{kw} ：観測点 k を通過するODペア w の交通量；
- ΔQ_{kw} ：次のステップ時の増減目標値；
- S_{kw} ：観測点 k の通過ODのうちでODペア w のシェア；
- Q_w ：ODペア w の交通量；
- ΔQ_w ：次のステップ時の増減目標値；
- δ_k ：観測地点 k の渋滞ダミー（交通流が自由流領域にある場合1、渋滞領域にある場合-0.5）；
- ψ_{kw} ：ODペア通過ダミー（観測点 k をODペア w のが通過するとき1、通過していないとき0）；
- ω_w ：渋滞詰まり判定ダミー（ODペア w 内において渋滞詰まりが存在しないとき1、存在するとき-1）。

本モデルは、ダミー変数 δ_k を用いることにより、観測点 k において渋滞が発生している場合に交通量が-0.5倍される構造となっており、交通流の Q - K 特性を考慮したOD修正が行われている。また、ダミー変数 ω_k を用いることにより、ODペア w 間の経路上に渋滞詰まりが存在する場合、強制的に負の目標値に交通量が修正され、渋滞詰まり地点において交通需要が更に増加することを回避している。

表1 OD修正回数増加に伴う相関係数の変化(灰色:相関係数0.5未満, 黒抜:相関係数0.77以上)

修正回数	普通車断面交通量		普通車断面交通量		普通車断面交通量		普通車断面交通量		貨物車断面交通量		貨物車断面交通量		貨物車断面交通量		貨物車断面交通量	
	0回目		1回目		2回目		3回目		0回目		1回目		2回目		3回目	
	相関係数	RMSE(台)														
0時	0.43	282	0.72	191	0.80	150	0.83	131	0.48	92	0.75	54	0.81	47	0.83	41
1時	0.39	266	0.74	150	0.82	109	0.85	93	0.39	91	0.66	56	0.78	43	0.81	38
2時	0.38	229	0.75	129	0.82	93	0.84	81	0.37	79	0.67	49	0.78	38	0.83	32
3時	0.30	208	0.70	120	0.78	92	0.81	77	0.53	56	0.65	38	0.75	30	0.77	31
4時	0.40	216	0.75	126	0.80	99	0.83	84	0.53	82	0.68	44	0.75	34	0.79	33
5時	0.48	319	0.77	200	0.83	157	0.86	120	0.57	147	0.72	70	0.77	59	0.81	47
6時	0.48	540	0.76	369	0.82	296	0.85	264	0.63	210	0.74	119	0.78	92	0.79	79
7時	0.51	498	0.72	360	0.78	285	0.79	285	0.65	196	0.71	145	0.75	111	0.78	101
8時	0.51	401	0.65	316	0.67	302	0.73	268	0.62	218	0.64	172	0.65	142	0.70	119
9時	0.46	457	0.63	341	0.68	316	0.77	256	0.62	185	0.66	109	0.66	98	0.71	90
10時	0.53	415	0.66	326	0.62	317	0.70	289	0.68	215	0.66	147	0.61	121	0.66	114
11時	0.48	409	0.57	362	0.72	279	0.76	247	0.60	247	0.65	160	0.73	129	0.73	104
12時	0.49	408	0.64	336	0.73	262	0.80	227	0.65	200	0.66	119	0.73	101	0.74	83
13時	0.50	438	0.67	334	0.72	290	0.78	259	0.64	205	0.67	136	0.70	114	0.74	102
14時	0.53	468	0.70	362	0.75	319	0.80	290	0.64	184	0.66	128	0.72	108	0.76	86
15時	0.53	474	0.55	345	0.70	356	0.77	306	0.60	179	0.54	106	0.65	101	0.73	90
16時	0.51	519	0.71	397	0.75	366	0.78	344	0.58	166	0.63	124	0.68	110	0.72	99
17時	0.53	525	0.67	446	0.73	404	0.75	384	0.60	172	0.60	133	0.73	110	0.69	110
18時	0.47	499	0.63	419	0.70	371	0.75	358	0.54	154	0.54	119	0.70	115	0.67	106
19時	0.53	439	0.72	362	0.73	326	0.78	308	0.54	150	0.65	110	0.73	109	0.68	93
20時	0.60	305	0.72	240	0.75	249	0.80	208	0.56	129	0.66	98	0.72	77	0.73	75
21時	0.56	313	0.74	231	0.78	190	0.80	190	0.60	90	0.72	72	0.80	61	0.80	65
22時	0.56	309	0.73	206	0.79	186	0.82	172	0.57	98	0.74	66	0.78	63	0.80	62
23時	0.49	294	0.75	177	0.80	157	0.82	141	0.49	107	0.74	61	0.77	61	0.81	54

(3) OD修正結果と現況再現性の検証

OD修正を行った結果を表1に示す。修正回数0回目とは、3.で構築した初期ODデータを意味している。この段階では、全体的に相関係数が低く、現状の交通流を良好に表現しているとは言い難い。しかし、OD修正を1回施すことによって、普通車の相関係数、RMSEともに大幅に改善が見られ、式(2)のような簡便な修正モデルの有効性が確認された。さらに、2回、3回と修正回数を増加させていくと、改善幅は微小になりつつも、現況再現性は着実に向上していることが確認される。

一方、ネットワーク内全体の総交通量が多くなっているようなピーク時間帯においては、改善が見られないことも確認できた。このことから、式(2)のモデルは、交通量が飽和している時間帯のOD修正に適したモデルとは必ずしも言い切れない。また、この特性は貨物車にも現れているが、普通車よりも改善の度合いが小さいことも確認できる。貨物車の場合、もともと観測値より多い交通量から減少するようにOD修正することになるが、式(2)のモデルではこの修正がうまく行われず、すなわち、渋滞流時の修正量を簡易に行うことに原因があると考えられる。再現性を向上させるためには、 $Q-K$ 特性をより正確に考慮した渋滞流の判定が必要であり、今後はこのような点について精緻化する必要がある。

以降の分析では、3回の修正を完了した時点のODを現況交通量と見なして、分析に用いる。

5. 詳細な車両挙動を考慮した排出量推計モデル

本節では、速度、加速度、アイドリング状況、道路勾配等といった個々の車両の詳細な走行状況を考慮可能なPM排出量推計モデルを構築する。構築したネットワークには、信号交差点や急勾配地点を多数含まれているため、本節で構築したモデルから求める瞬間排出係数を用いることで、地域特有の走行状況を排出量に反映させることができると考えている。

(1) 速度・加速度・勾配とPM排出量の回帰分析

使用したデータは、(財)計量計画研究所が2002年10月2日に東名高速道路横浜青葉ICルートで実施した散水車の車載型計測装置走行調査データの中から、無作為に抽出した2,000サンプルである。このデータに、Lee and Miller⁴⁾が提案しているCO₂排出原単位算定式を基本にして、さらに、速度の3乗項と勾配ダミー項を追加した式(3)によってPM排出量モデルを特定化した。なお、

各係数値は重回帰によって得られた推定値を表し、括弧内の数字はt値を表している。

$$\begin{aligned} \ln(E_{PM}(t)) = & -2.0856 + 0.0495v(t) \\ & -0.0007v(t)^2 + 0.000005v(t)^3 \\ & + 0.1161a(t) - 0.04652D_d(t) \\ & + 0.07086D_i(t) - 0.18793D_{\sim 2.5}(t) \\ & - 0.0391D_{-2.5\sim 0.5}(t) + 0.1332D_{0.5\sim 2.5}(t) \\ & + 0.40072D_{2.5\sim}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、各変数の定義は以下のとおりである：

$E_{PM}(t)$ ：時刻 t における PM 瞬間排出係数(g/min)；

$v(t)$ ：時刻 t における速度(km/h)；

$a(t)$ ：時刻 t における加速度(km/h/s)；

$D_d(t)$ ：減速時ダミー；

$D_i(t)$ ：アイドリング時ダミー；

$D_{\sim 2.5}(t)$ ：勾配-2.5%以下ダミー；

$D_{-2.5\sim 0.5}(t)$ ：勾配-2.5%～-0.5%ダミー；

$D_{0.5\sim 2.5}(t)$ ：勾配0.5%～2.5%ダミー；

$D_{2.5\sim}(t)$ ：勾配2.5%以上ダミー。

また、式内の各係数値はその重回帰結果（推定値）、括弧内はそのt値を表している。重決定係数は0.89、RMSEは0.2g/minとなり、精度の高いモデルが得られた。

なお、交通・環境シミュレーションを実行する場合には、複数車種の排出量推計モデルが必要となる。しかし、データ制約のために、車種別のモデル構築は困難である。そこで本研究では、平成6年東京都車種別排出係数の速度別排出係数(g/km)の利用を前提に、次のような対応を行っている。具体的には、普通貨物車の速度別排出係数が上記散水車の排出係数と同一と仮定し、その比を取ることによって、各車種に対応する速度別の補正係数を算出し、車種の拡大を図っている。

(2) 瞬間排出係数の妥当性検証

構築したモデルを用いて得られる予測PM排出量と、実走行調査における観測PM排出量とを比較すると、突発的に排出量が高いところでは、予測PM排出量値が過少推計になっていることが分かる。このような予測値は、高加速で走行している時に高頻度で出現しており、急加速時の再現性は低い。また、速度、加速度と排出量の関係に着目すると（図4）、100km/h超の高速走行時に加速を行った場合、排出量が著しく大きくなる傾向があることが分かる。高速・高加速時の走行データは存在しな

いが、これは明らかに非現実的な推計値である。このような問題点を改善するために、排出量推計モデルに対して、以下の設定を追加で加えた。

まず、交通流側では、車両が極力そのような走行をしないようにネットワークデータを再構築した。次に、環境計測側では、排出量の最大値を設けることにより、瞬間排出係数の推定限界内での算出が行われるように定式化した。以降の分析では、この修正モデルを用いて車両毎に排出量を推計する。

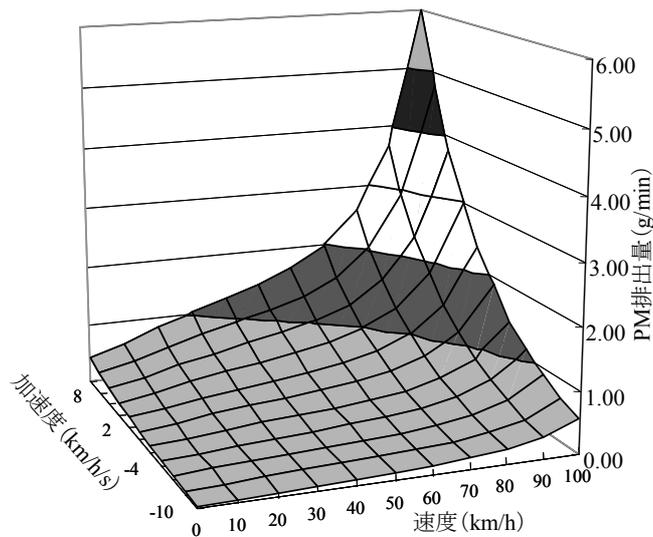


図4 PM 排出量予測値(勾配0%時)

6. 移流拡散を考慮した交通大気環境分析

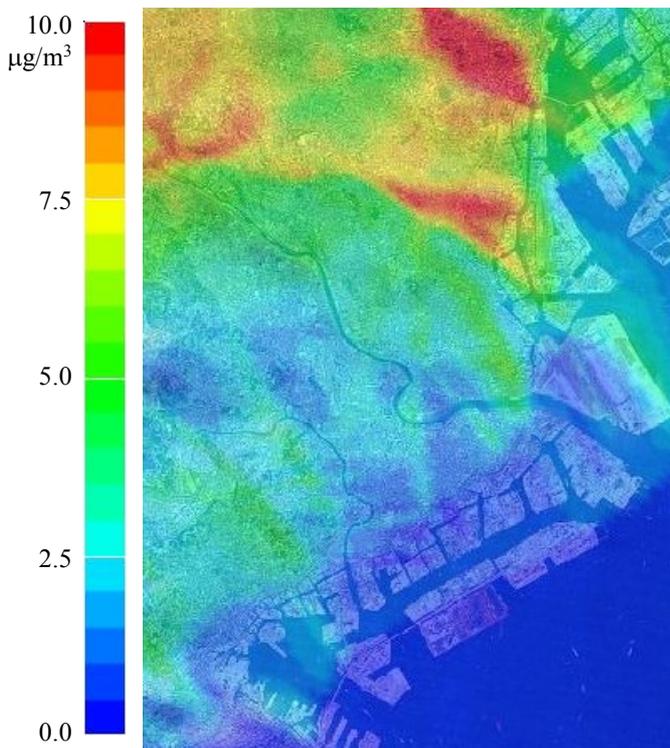
本節では、3. で構築したネットワークデータ、4. で現況再現性を向上させたOD交通量データ、5. で算出したPM瞬間排出量推計モデルを統合して、交通環境マイクロシミュレーションを構築する。さらに、これと局地気象シミュレーションRAMS-TIT²⁾とのデータ交換を行い、交通流とPM汚染状況に関する面的な分析を行う。

(1) 気象モデルの設定条件

湾岸部からの移流拡散現象を分析するために、気象場が安定し、海風が卓越しているという条件でシミュレーションを行う。具体的には、1998年8月11日(快晴)の24時間をシミュレーション期間として選定している。

湾岸部からの移流拡散に注目する理由は、以下のとおりである。まず、分析対象である京浜臨海部は、交通では南北方向の流動が卓越している。一方、気象面では、海からの南風が卓越している。以上より、湾岸線や横羽線から排出された汚染物質が内陸部に拡散される特徴があり、環境改善のためには何らかの面的な制御が必要になると考えられるからである。

気象シミュレーションに入力するPM排出量データの時間単位は1時間単位とし、24時間分のデータを用意した。その24時間分のデータを用いて、一日の気象シミュレーションを実施している(図5)。



(a) 地表面のSPM濃度(μg/m³)



(b) 濃度3μg/m³以上の地点(茶色)と風向

図5 気象シミュレーションの出力結果(13時)

(2) PM移流拡散濃度とPM排出量の差異

交通シミュレーションから出力された結果と、気象シミュレーションから出力された結果を比較することにより、大気汚染物質の排出と、それが移流拡散した後の濃度とで、空間分布にどのような差異が生じるのかを地域毎に把握する。ここでは、メッシュ毎に集計される各シミュレーション出力値を、それぞれの平均値と標準偏差を用いて基準化し、それら値の差をとって比較のための指標（PM 指標）を定義した。その結果を図 6 に示す。

例えば、15 時の状況（図 6）では、幹線道路の排出量が拡散濃度よりも卓越し、一方、大田区や鶴見区等の細街路では、拡散濃度が排出量に比べて卓越している箇所が多数見られる。すなわち、排出量が相対的に大きい場所が、濃度も相対的に大きくなるとは一概には言えず、気象場の影響次第で、排出量が相対的に少ない箇所においても、大気汚染物質が移流拡散することによって、濃度が高くなる可能性が示唆される。面的な大気汚染物質制御の重要性が再確認される結果である。

(3) ITS関連交通政策の影響分析

最後に、交通に起因する大気汚染問題を解消するための対策として、ITS を活用した情報提供と料金政策に着目し、ドライバーの経路選択の変更が交通流と大気環境にどのような影響をもたらすのかをシミュレーション上で分析する。ここでは紙面の都合上、情報提供効果分析

結果（細街路への誘導効果分析）の結果のみを示す。

現況ケースのシミュレーションでは、全ネットワークのリンクコスト情報を 20 分間隔でドライバーに与えている。ここでは、情報提供がされたという状況を表現するために、現況ケースで細街路に与えていたコスト（細街路 1 リンクあたり 1.5 分）をゼロに設定し、細街路に進入しやすくしている。この操作によって、情報提供がなされたという状況を便宜的に表現する。

政策実施に伴う交通量の変化を道路種別、時間帯別に比べる（図 7）と、細街路の交通密度が全時間帯で増加しており、一方、一般道路の交通密度が最大で 2 割ほど減少する結果となった。また、PM 排出量に関しては、ネットワーク全体で 7% の削減が見られた。但し、細街路部では PM 排出量が顕著に増加し、一般道路では、ほとんどの時間帯で PM 排出量が削減している。朝など、非常に交通量が多い時間帯では、細街路での PM 排出量が著しく増加し、ネットワーク全体でも正の効果を得られない状況も生じている。しかし、昼においては、PM 排出量削減効果は高い。特に、夕方時間帯では、細街路の排出量も削減している結果となっている。

7. まとめ

本研究では、環境改善に資する政策分析が可能な交通・大気環境の統合シミュレーションシステムを構築した。まず、交通流、大気環境両方の現況再現性向上を図るために、ネットワークデータの改良、OD 交通量修正モデルの構築、SPM 排出係数の推計モデルの構築等を行った。次に、気象シミュレーションとの統合を経て、PM 排出量と PM 移流拡散濃度との差異を分析した。最後に、ITS 導入に対応する政策分析を行い、この政策が、PM 排出量と PM 拡散濃度の双方に及ぼす影響の評価を行った。

今後は、広域かつ詳細なネットワークに対応するミクロレベルでの経路選択モデル構築、OD 交通量修正方法の改善、バックグラウンド濃度の考慮等を行う必要がある。そのためには、OD 交通量や断面交通量データの精度向上、排出係数算定のための観測データの収集等、社会的に進めるべき課題も多く、今後の検討が期待される。

謝辞

本研究は、国土技術政策総合研究所の支援を受け、土木計画学研究委員会 ITS 小委員会研究 WG で行われた研究成果の一部である。この場を借りて感謝の意を表したい。

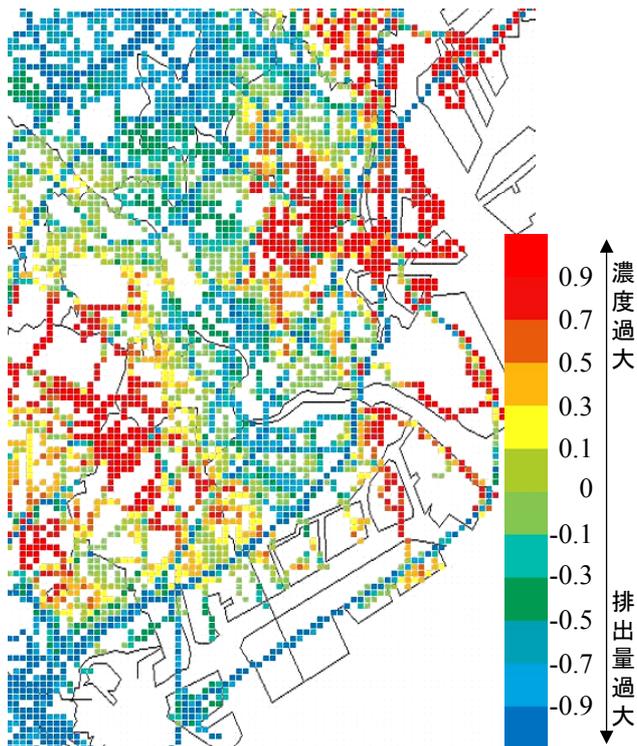


図 6 PM 濃度と排出量の地点間比較(15 時)

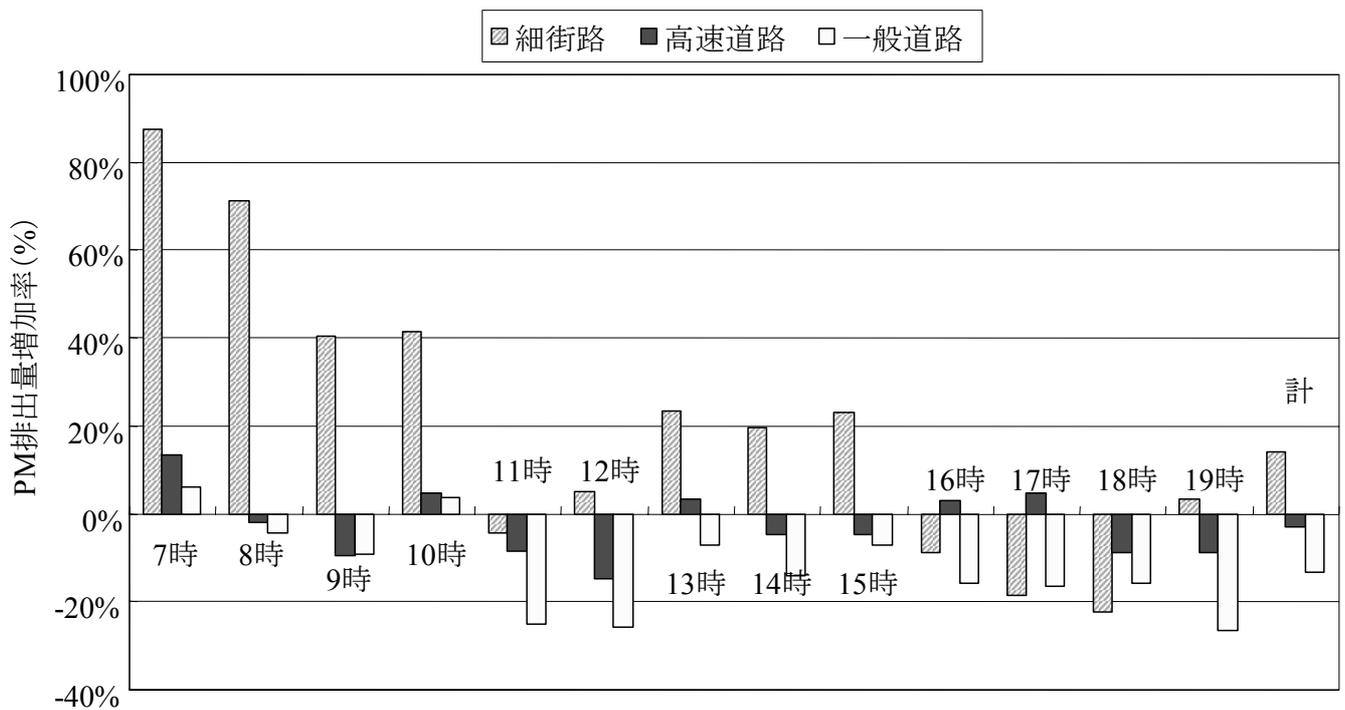


図7 細街路誘導政策実施に伴うPM排出量の変化(時間帯別)

参考文献

- 1) 後藤亮, 白濱好文, 屋井鉄雄: 広域ネットワークを対象とした交通・環境マイクロシミュレーション, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 129-132, 2002.
- 2) 妹尾泰史, 神田学: 交通起源の大気汚染物質の三次元移流拡散シミュレーション, 土木学会水工学論文集, Vol. 47, pp. 19-24, 2003.
- 3) 堀口良太, 小根山裕之: 適用事例を通じた交通シミュレーション利用実態の分析と利用促進への課題, 土木学会論文集, No. 709 / IV-56, pp. 61-69, 2002.
- 4) Lee, C. and Miller, E. J.: A Microsimulation Model of CO₂ Emissions from Passenger Cars –Model Framework and Applications–, *Proceedings of the 80th Transportation Research Board Annual Meeting*, Paper No. 01-2231, CD-ROM, 2001.