

ランダム - パフモデルを用いた自動車起源の SPMの輸送過程に関する数値シミュレーション

A NUMERICAL SIMULATION OF TRANSPORT PROCESS OF MOBILE SPM WITH RANDOM-PUFF MODEL

玉井昌宏¹・松村暢彦²・石井義裕³・足達晋平⁴

Masahiro TAMAI, Nobuhiko MATSUMURA, Yoshihiro ISHII, and Shimpei ADACHI

¹正会員 工博 大阪大学助教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 大阪大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³正会員 工博 広島工業大学講師 工学部建設工学科 (〒731-5143 広島市佐伯区三宅2-1-1)

⁴学生員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻博士前期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Air pollution is getting serious in urban areas by increase of automobile traffic. A variety of methods to control the traffic have been proposed, but efficiency of the methods has not been examined quantitatively yet. It's important to develop a system to simulate a series of processes from an occurrence of automobile traffic to reaction and deposition of pollutants. In this study, we are trying to construct such a system with HOTMAC of a mesoscale meteorological simulation model and RAPTAD, a sort of random walk model to calculate transport process of pollutants in an urban area. And the mobile source emissions are estimated by using road traffic census data and emission function in RAS-W. Here we simulate behavior of SPM (Suspended Particulate Matter) which is ejected by automobiles in Osaka area under a various meteorological conditions to examine a validity of the system.

Key Words : *air pollution , three-dimensional numerical model, random-puff model ,*

1. はじめに

自動車交通量の増加により、都市の大気汚染が深刻になりつつある。ロードプライシング等の交通量抑制による発生源対策も種々検討されているものの¹⁾、その効果については定量的に検討されていないのが実情である。このような状況に鑑みて、本研究では、交通量推計モデルとメソスケールの大気環境シミュレーションモデルを組み合わせることにより、交通量抑制策の都市の大気環境に及ぼす影響を定量的に把握することを目標としている。

大気汚染現象は、200m～20km程度の都市スケールにおいては、移流拡散による輸送現象が卓越し、汚染物質の変質はそれほど重要ではない。20～200kmのメソスケールにおいては、光化学反応による変質や消失の影響が大きくなってくる²⁾。UAM (Urban Airshed Model) 等、メソスケールの光化学大気汚染のシミュレーションモデルもいくつか開発されているものの、それらはいずれも極めて複雑であり、また取り扱いにくいものである。都

市程度の空間スケールであれば、また比較的変質にくい汚染物質を対象とするのであれば、こうした煩雑なモデルに頼ることなく、簡単な移流拡散モデルによってもある程度の予測精度は期待できるであろう。

本研究では、ラグランジェ型モデルとパフモデルを組み合わせたRAPTAD(Random-Puff Transport and Diffusion)を用いて、自動車により発生する SPM (浮遊粒子状物質 : Suspended Particulate Matter) の移流拡散過程を追跡する。実測結果と比較することにより、モデルの適用性について検証する。なお、メソスケールの気象モデルには、HOTMAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation) を用いている。

2. 気流場の再現計算

(1) 数値計算の概要

本研究では HOTMAC を用いて、気流場の再現計算を行った。モデルについては Yamada and Bunker^{3),4)} に詳しいため省略する。

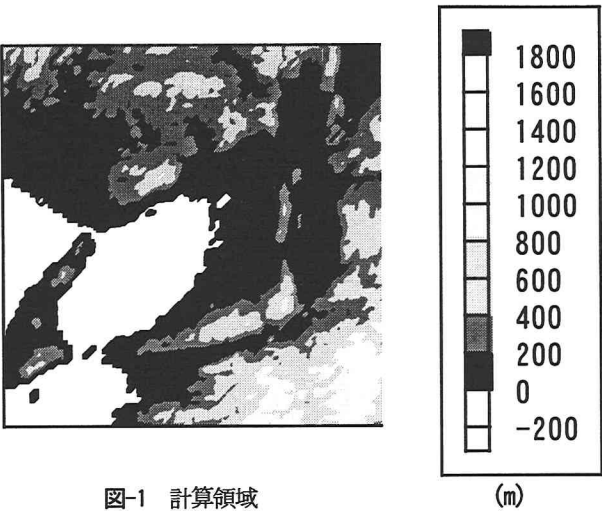


図-1 計算領域

計算領域は北緯34.07度，東経134.73度を原点とする水平方向117km×117km，鉛直方向 5kmである。水平格子間隔は3km，鉛直方向は不等間隔で15層に分割してある。また，各メッシュの土地利用に関しては，国土地理院の土地利用情報により与えている。計算領域である大阪平野周辺の地形を図-1に示す。

(2)再現計算

気流場の境界条件をできるかぎり妥当なものにする為に，気象庁観測による高層気象観測データとアメダスデータをナッジングにより取り込んだ。ナッジングとは，計算値と観測値の差をニュートン緩加法で補正する手法である。実測値と計算値の差異を，外力項として導入し計算値を修正する。実測値そのものを境界条件としてとりこむものではない，これを時間，空間方向に行うのがFDDA (Four Dimensional Data Assimilation)である⁵⁾。

気象庁の高層観測データ（風向，風速）は一日4回，3時，9時，15時，21時に観測されている。本研究では，計算領域周辺の3観測点（潮岬，米子，輪島）のデータを，距離の2乗の逆数の重みをつけて内挿し，計算領域を代表する高層風とした。時間方向に線形内挿して1時間ごとのデータを求めている。この高層風は，逆転層高度以上の格子点と，ケースによっては側面境界格子点においてナッジングにより取り込まれる。

アメダスデータは計算領域内の約10地点のデータを用いている。観測位置に最も近い格子点にナッジングで観測風向，風速を取り込んでいる。

気象条件の異なる3ケースを対象に計算を行った。表-1にそれぞれのケースの概要を示す。

表-1 各ケースの気象状況

	計算対象日	気象場の特徴
Case1	1995年8月 18-19日	両日ともに太平洋高気圧に覆われ，気圧傾度が小さい。
Case2	1995年11月 1-2日	両日ともに冬型の気圧配置で，等圧線が南北に走り，強

		い西風が吹いている。
Case3	1995年11月 5-6日	両日ともに移動性高気圧に覆われ，気圧傾度が小さく，風速も弱い。

図-2～4にそれぞれのケースの計算結果とアメダスによる実測データとの比較を示す。風向図の縦軸は，アメダスと同様に，風向を16方位で表している。北北東が風向1，北が風向16であり，時計周りに増加する。16（北）付近で風向が変動する場合には，グラフを見やすくするために，風向1～4を17～20に適宜変換している。ここで，各ケースごとにFDDA，NO-FDDAとあるのは，アメダスデータでナッジングしているか，していないかを表している。ただし，NO-FDDAの計算にも逆転層高度以上でのナッジングは行っている。

側面の境界条件の取り扱いについては，各ケースに対して，ノイマン条件を適用する場合と，高層風と同じ風でナッジングする場合の計算を行い，実測結果との一致が良いものを選択した。Case1とCase3においてはノイマン条件を，Case2では高層風によるナッジングを適用した。

Case1は夏期の晴天日であり，気圧傾度も小さいために，大阪，和歌山とも明確な海陸風循環が観測されている。和歌山の風向図に見られるとおり，海風から陸風への転換は20時付近に生じることが観測されているが，計算では若干の遅れがみられる。それを除けば，風向，風速ともによく再現できていると思われる。

Case2は両日ともに比較的強い西風が吹きつづけている気象条件である。側面でのナッジングを行うことで，風向，風速ともによく再現できている。

Case3は秋期の晴天日であり，気圧傾度も小さい。先ほどのCase1とは若干変動パターンは異なるが，海陸風循環が観測されている。風向に関しては，計算結果が実測結果を極めてよく再現している。風速に関しては，実測値がかなり変動しており，これを再現することはできなかった。

計算値を評価する一つの指標として，次式のような，モデルの一致性インデックス d (index of agreement)が提案されている⁵⁾。

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (1)$$

$$P'_i = P_i - \bar{O} \quad (2), \quad O'_i = O_i - \bar{O} \quad (3)$$

ここに， $\bar{O}$ は次式で表される各時間における全観測点の平均値である。

$$\bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \quad (4)$$

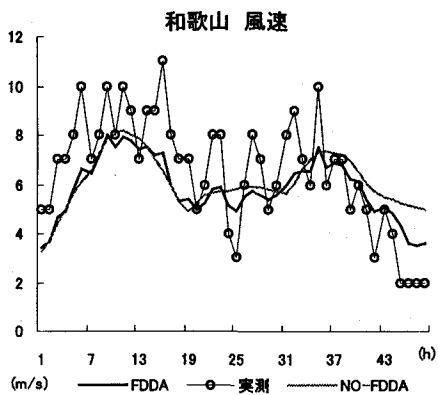
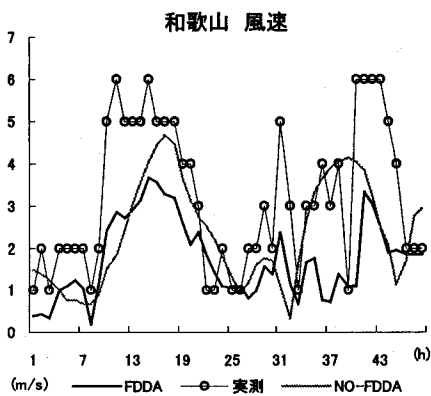
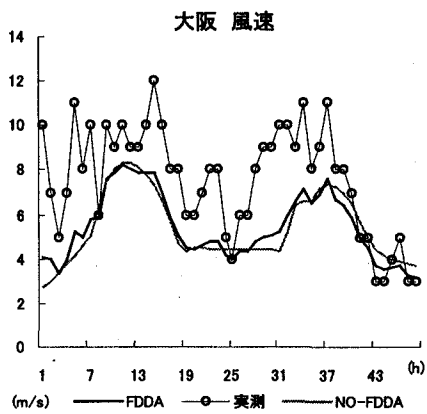
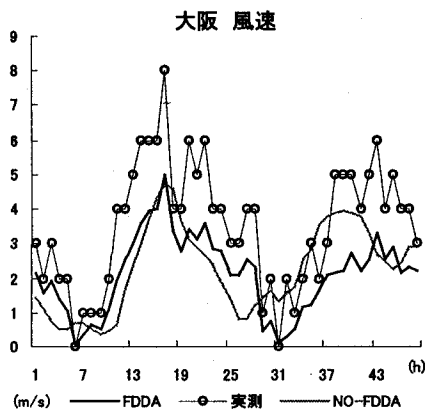
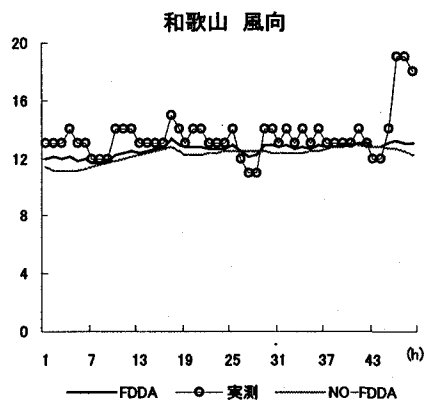
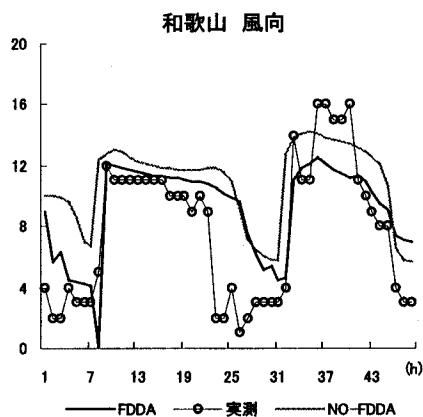
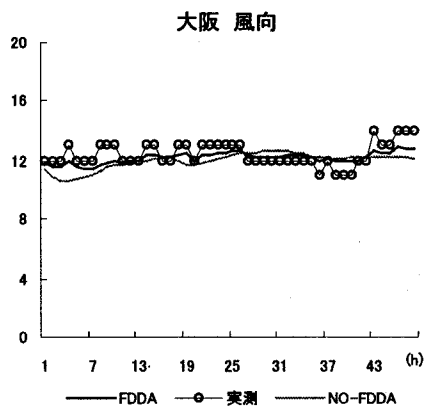
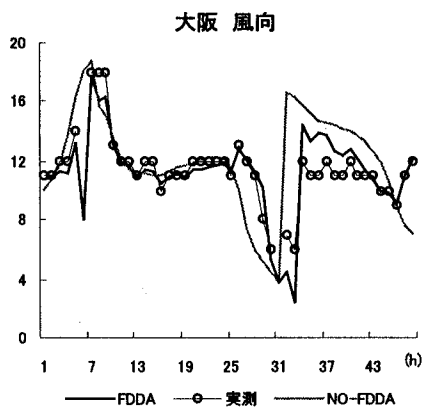


図-2 計算結果 風向・風速 Case1

図-3 計算結果 風向・風速 Case2

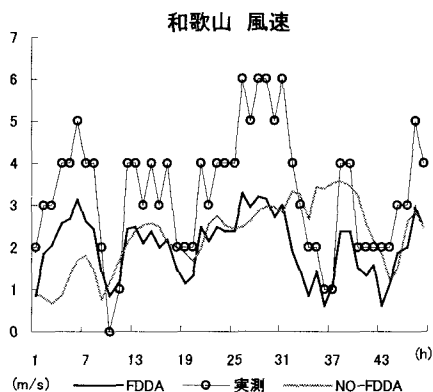
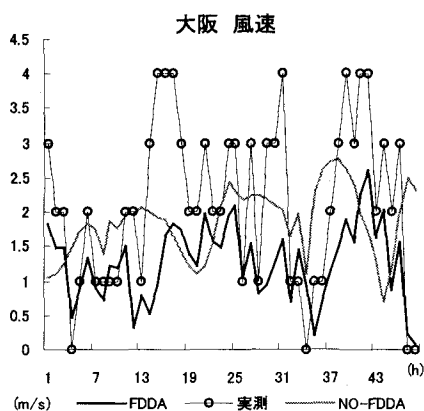
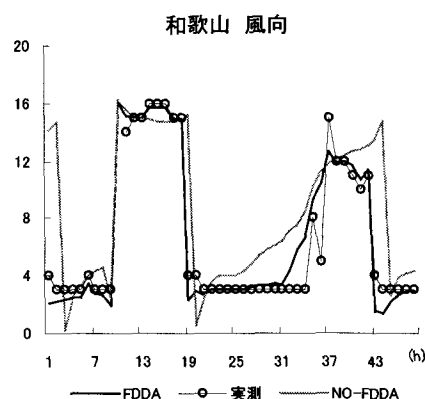
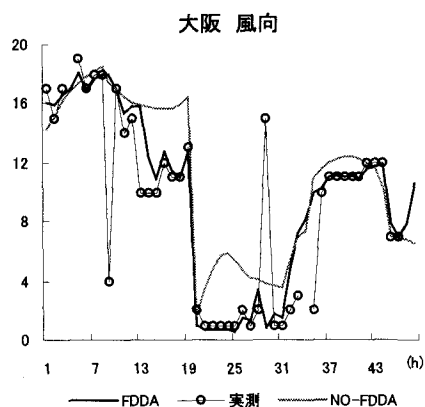


図-4 計算結果 風向・風速 Case3

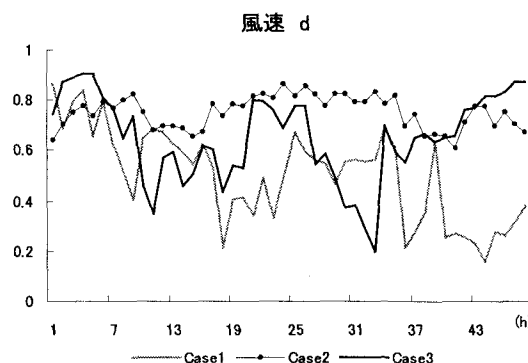
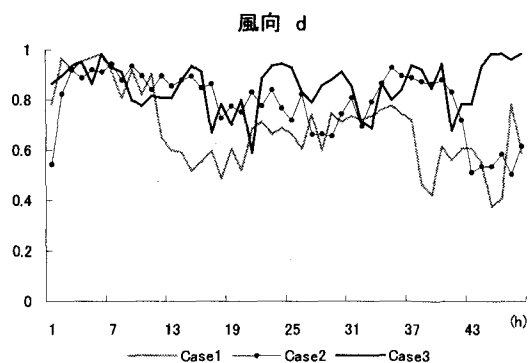


図-5 各ケースの index d

d はモデルと観測値が完全に一致した場合は $d=1$ 、全く不一致の場合には $d=0$ をとる。既往の研究では、0.6～0.7以上の値をとった場合、計算値と実測値との一致がよいとしている。

図-5に各ケースごと（すべてFDDAの計算結果）の d の時間変化を示す。

風向に関しては、各ケースともに良好な結果が得られた。Case2, Case3では多少の変動はあるものの、おおむね 0.6以上の値を維持している。

風速に関しては、Case2では良好な値が得られている。Case1とCase3のスコアが悪いのは、アメダスの風速の分解能が 1m/s と粗いことも一因となっている。しかしながら、風速の実測値は、全体的に計算値よりも大きく、なんらかの改善が必要であると考えられる。

なお、ここではモデルの精度について、一致性インデックス d を用いて評価したが、バイアスエラー等については、今後検討する予定である。

3. 汚染物質の拡散シミュレーション

(1) 拡散モデルの概要

大気汚染拡散シミュレーションモデルには、これまで多種多様なものが提案されている。物質輸送方程式を数値的に直接解く方法（オイラー型モデル）、流れとともに動く座標系のもとで移流計算を省略し数値的

に解く方法（ラグランジュ型モデル），物質輸送方程式を解析解が得られるところまで簡略化したモデル（解析解モデル）がある。

ここで用いた RAPTAD は、モンテカルロ法に基づく移流拡散モデルである。ガウス分布型の濃度分布を有するパフを、煙源から連続的に放出する。パフの中心位置をモンテカルロ法で求めるとともに、パフの形状を乱流強度に応じて増加させる。粒子の中心位置での平均風と乱流強度は、気象モデル（HOTMAC）による格子点での計算値を内挿して求められる。すべてのパフの濃度分布を線形に重ねあわせて、各格子点の濃度を求める。本モデルについても Yamada and Bunker^{3),4)} に詳しい。

(2) 自動車交通による大気汚染物質排出量の推計方法

自動車の排気ガスに含まれる二酸化炭素、窒素酸化物、二酸化硫黄、浮遊粒子状物質の大阪府下の時間排出量を平成2年度道路交通センサスの車種別時間交通量を用いて推計した。

まず、各観測リンク別の時間交通量を松井ら⁶⁾によって推計された道路タイプ別の時間BPR関数に代入してリンク平均旅行速度を算出する。道路種別は、道路機能面から分類し、都市間高速道路、都市高速道路、幹線多車線道路、幹線2車線道路、準幹線多車線道路、準幹線2車線道路の6種別とした。

次に、この平均旅行速度推計値とドイツの道路プロジェクトに対し、経済的な評価を行う経済性調査指針RAS-W (Richtlinien für die Anlage von Straßen : Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen)⁷⁾で採用されている燃料消費関数よりリンク別燃料消費量を求め、さらに同指針で示されている大気汚染物質の排出係数を掛け合わせることで道路延長1kmあたりの時間大気汚染物質排出量を推計する。燃料消費関数と排出係数は、乗用車、バス、貨物車の車種別に設定されており、車種構成の影響を大気汚染物質排出量に反映できるよう配慮されている。

こうして求められた各観測リンクの時間排出量推計値を道路種別ごとに平均し、大気汚染物質の時間排出量原単位を定めた。この原単位を大阪府下の各市町村ごとに把握されている道路延長⁸⁾にかけあわせることで、自動車から排出される大気汚染物質時間排出量を市町村別に推計した。この大阪府下の市町村別の窒素酸化物の推計値の合計と大阪府から発表されている自動車から排出される窒素酸化物排出量⁹⁾を比較すると、概ね整合していることから、本研究で用いた推計方法は妥当と判断し、シミュレーションにこの推計値を用いた。

図-6に計算の入力データとした、各市町村（代表4地点）におけるSPMの排出量の日変化を示す。本研究ではこの24時間のデータを2回繰り返して、48時間の計算を実施した。また、初期のパフは市町村庁舎の位置を中心とし、市町村面積に等しい円内より、一様な確率分布で

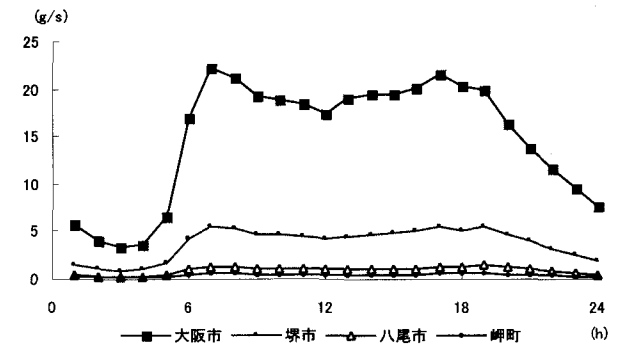


図-6 SPM 排出量

ランダムに発生する。各々のパフの濃度はガウス分布形となっており、標準偏差はその円の半径によって変化させている。

(3) 拡散シミュレーションの結果と検討

気流場の再現計算を行った3ケースについて、SPMの移流拡散シミュレーションを行った。これらの計算の汚染源入力データは、3ケース共、前述の同じデータを使用している。

図-7～9に、各ケースのSPM濃度の、実測データと計算結果の比較を示す。観測地点は、大阪府東部の八尾市である。

終日強い西風が吹いた Case2と比べ、風速が比較的小さい気象条件であった Case1、Case3では全体的に濃度が高くなっている。Case1、Case3で両日ともに、8時前後に明確なピークが見られる。その後、排出量は横ばいなのにも関わらず濃度が減少しているのは、日射による拡散と、低濃度の海風の影響であると考えられる。Case3では20時前後にも高濃度が現れている。これは、Case1よりも日射が弱いと、夜間に拡散がより小さくなるためと考えられる。

各ケースの計算結果は、それぞれ実測の日変化の傾向をよく再現しているが、低濃度の時間帯において計算値は実測よりも過小となっている。これは、今回の計算では自動車以外の発生源を考慮していない事も原因の一つである。

4. おわりに

本研究では、ラグランジュ型モデルとパフモデルを組み合わせたRAPTADを用いて、自動車により発生するSPMの移流拡散過程を追跡した。メソスケールの気象モデルを用いて、気象条件の異なる3ケースについて気流場の計算を実施し、その再現性を確認した。SPMの移流拡散計算結果は、実測値の変動傾向を概ね再現できた。

今後は、パフの初期分布の考え方の妥当性について検

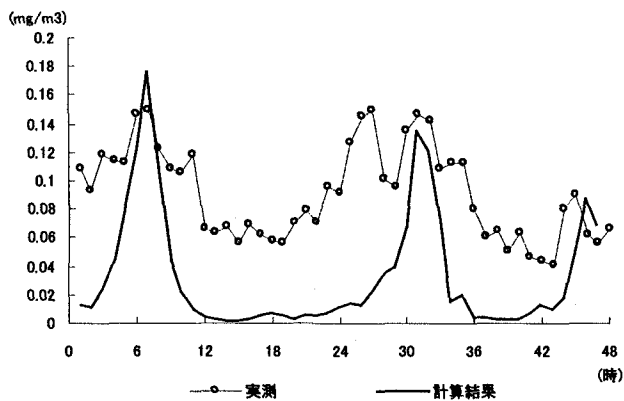


図-7 SPM濃度 Case1(1995.8.18-19)

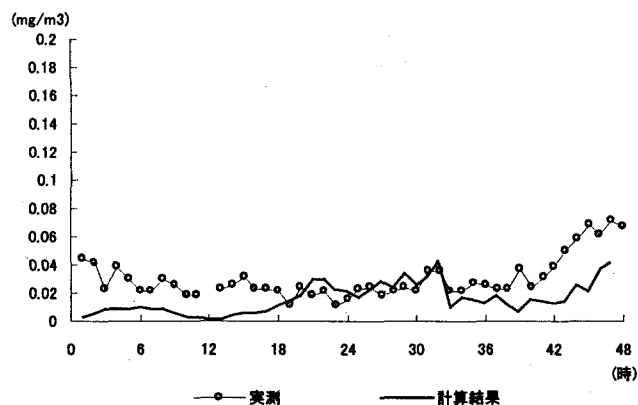


図-8 SPM濃度 Case2(1995.11.1-2)

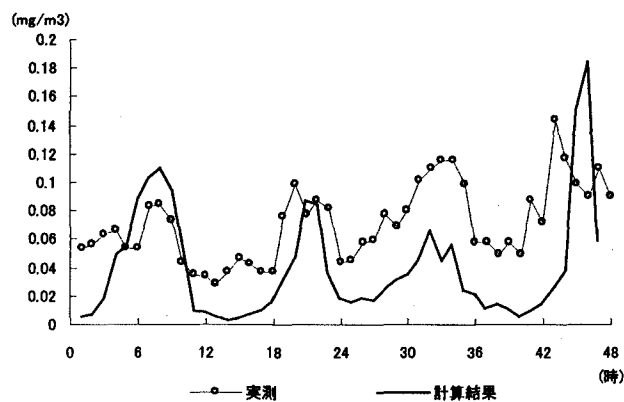


図-9 SPM濃度 Case3(1995.11.5-6)

討するとともに、移流拡散モデルへの光化学反応などの変質過程の導入を進める。最終的には本モデルを用いて、交通量抑制策の都市の大気環境に及ぼす影響を定量的に把握する。

参考文献

- 1) 松村暢彦, 新田保次, 片岡伸吾: 大都市圏におけるロードプライシングの自動車交通量削減効果の試算, 第52回土木学会年次学術講演会第IV部門, pp.54-55, 1997.
- 2) 大原利眞・鶴野伊津志: メソスケールの大気汚染シミュレーション, 大気環境学会誌, 第32巻, 第3号, A39-A57, 1997.
- 3) Yamada, T., and S. Bunker, 1988, "Development of a Nested Grid, Second-Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation," J. Appl. Meteor., 27, 562-578.
- 4) Yamada, T., and S. Bunker, 1989, "A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients," J. Appl. Meteor., 28, 545-554.
- 5) 鶴野伊津志: 四次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価, 大気環境学会誌, No.30, pp.351-366, 1995.
- 6) 松井寛・山田周治: 道路交通センサスデータに基づく BPR 関数の設定, 交通工学, Vol.33, No.6, pp.9-16, 1998
- 7) 道路投資の効果分析手法の検討, 建設省
- 8) 大阪の交通白書, 大阪府警察, 1991
- 9) 大阪府環境白書, 大阪府, 1992

(1999.9.30受付)