

道路環境モデリングに基づく効果分析

坪田幸政*

川嶋弘尚**

交通施策は交通渋滞による経済的損失や環境の改善、交通の安全性や利便性を向上するために策定される。交通施策には新規道路の建設、既存道路の拡幅や交差点の形状や信号制御の変更などハード的な施策と、交通需要管理や道路交通規制などのソフト的な施策がある。これらの交通施策に対する事前の効果分析には道路環境モデリングによるシミュレーションが用いられる。道路環境モデリングでは、交通モデル、排出ガスモデル、気象モデルや大気汚染モデルなどが統合されるが、その構成は評価対象のスケールや内容によって異なる。ここではミクروسールの例として自動料金収受システムと信号制御方法、マクロスケールの例としてロードプライシングの効果分析を紹介する。

The Assessment of Road-Traffic Policies Using a Road-Traffic Environment Modeling

Yukimasa TSUBOTA*

Hironao KAWASHIMA**

Road-Traffic Policies are designed to improve traffic safety and efficiency in addition to mitigate the economic loss and environmental impacts due to traffic congestion. New-road construction and widening of existing roads, and changing 'intersection geometry' and 'traffic signals' are examples of hardware policies. Traffic-demand management and traffic regulation are examples of software policies. Road-traffic environment modeling has been applied towards the assessment of these policies. Road-traffic environment modeling utilizes the traffic, emission, meteorology and air-pollution models based on the targeted scale and evaluation aspects. The assessment of electronic toll-collection and traffic-signal control systems are discussed for the micro-scale examples. Road-pricing assessment is investigated as an example of macro-scale traffic policy.

1. はじめに

交通施策は交通渋滞による経済的損失や環境の改善、交通の安全性や利便性を向上するために策定される。ハード面での施策としては、新規道路の建設

や既存道路の拡幅、交差点の形状や信号制御方法の変更などがある。ソフト面での施策としては交通需要管理や道路交通規制などが考えられる。これらさまざまな交通施策に対する事前の効果分析の方法として、道路環境モデリングによるシミュレーションが用いられる。ここで道路環境モデリングを利用するのは、単に交通流の円滑化や安全性の向上により評価するのではなく、環境負荷低減の面からの評価など多方面から効果分析を行うためである。

私たちは平成9年度から建設省土木研究所（現国土交通省国土技術政策総合研究所）の委託研究の一環として道路環境モデリングに関する研究を継続し

* 慶應義塾高等学校教諭・慶應義塾大学理工学部講師
Teacher, Earth Science Dept., Keio Senior High School
Lecturer, Faculty of Science and Technology,
Keio University

** 慶應義塾大学理工学部教授
Professor, Faculty of Science and Technology,
Keio University
原稿受理 2002年12月25日

で行っている。これまでの研究から、交差点や料金所周辺への影響などのミクロスケールの効果分析では交通モデルと排出ガスモデルを中心とした道路環境モデルを、またロードプライシングや経路誘導などの交通施策評価では交通モデルと排出ガスモデル、気象モデル、大気汚染モデルなどを組み合わせたメソスケールの道路環境モデルを利用する必要があることがわかった¹⁾。

道路環境モデリングで中心となるのは交通モデルであり、個々の車両の挙動を再現するミクロ交通シミュレータと、個々の車両の挙動を再現しないマクロ交通シミュレータがある。本研究ではミクロ交通シミュレータとしてドイツPTV社のVISSIMを用いた²⁾。その理由としてはユーザーインターフェイスのよさだけでなく、車両の挙動を再現するドライバーモデルや車両からの排出ガス計算ルーチンを任意の外部関数とすることができ、その汎用性が高いためである。広域を対象としたロードプライシングなどの交通需要管理の評価には、現段階ではミクロ交通シミュレータを用いることは困難を伴うので、ドイツPTV社のマクロ交通シミュレータVISUM/DYNEMOを用いた³⁾。このモデルは広域ネットワークに対して均衡配分できるだけでなく、車群としての挙動が表現でき、動的経路誘導やロードプライシングなどの効果分析が可能である。

排出ガスモデルとして、本研究では、東京都環境保全全局が作成した平均速度ベースの排出係数を用いた⁴⁾。しかし最近の研究では平均速度を用いた推計では十分ではなく、加速度などを考慮する必要があることが指摘されている¹⁾。

気象モデルでは道路交通から排出された大気汚染物質を移流・拡散する風の場合を計算する。移流とは平均流による輸送であり、拡散とは乱流による汚染物質の輸送を意味する。大気汚染モデルでは大気汚染物質間の化学変化や光化学反応、沈着過程などが計算され、大気汚染物質の濃度が評価される。本研究では、オーストラリア連邦科学技術研究機構の大気研究部門が開発した大気汚染モデル(TAPM)を用いた⁵⁾。TAPMは気象モデルと大気汚染モデルを組み合わせたモデルであり、ユーザーインターフェイスに優れているので、道路交通起源の汚染物質を線源や格子点データとして容易に入力できる。

本報告では、これまでの研究成果の中からミクロスケールの例として自動料金収受システムと信号制御を、マクロスケールの例としてロードプライシ

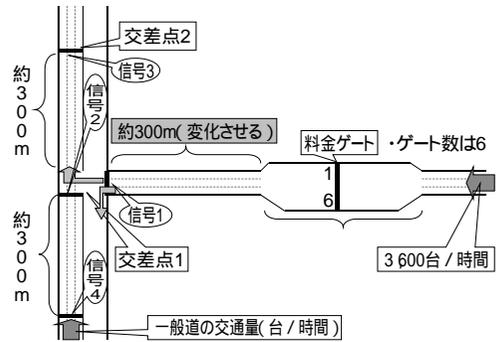


Fig. 1 港北インターチェンジのモデル

の效果分析を紹介する。

2. 自動料金収受システム導入の効果分析

高速道路の渋滞は料金所付近で発生していることが多く、その原因は料金所の処理能力不足であると言われる。そこで、平成13年度から自動料金収受システム(ETC)が導入され、平成14年度中には全国約900箇所の料金所に設置される予定である。ETCゲートでは車両が一時停止することなく料金所を通過できるので、料金所の処理能力向上だけでなく、排出ガスの削減もでき環境負荷低減効果も期待されている。

ETCの導入に際しては、ETCゲートの数や配置、料金所周辺の道路環境などを考慮する必要がある。例えば、ETCゲートの導入により、料金所での渋滞が緩和解消されても、その下流の一般道路で渋滞を引き起こす可能性がある。ミクロ交通シミュレータと排出ガスモデルを利用した道路環境モデリングの手法で、ETCの導入方法やその効果分析を行った^{6,7)}。ETC導入効果への理論的な研究については堀口・桑原⁸⁾を参照されたい。

2-1 シミュレーションの概要

ミクロ交通シミュレータとしては、ドイツPTV社のVISSIM2.36を用いた。研究対象として第三京浜高速道路港北インターチェンジへのETC導入方法について検討した。港北インターチェンジ出口の概要をFig.1に示した。料金所エリアは約300mであり、ゲート数は6、料金所は信号付き交差点を経て一般道路に接続している。一般道路には両方向約300m先に交通信号が設置されている。

シミュレーション時間は3,600秒(1時間)とし、評価指標として、ゲートの総処理台数、高速道路から一般道路までの旅行時間、各信号での平均待ち行列

ュレーションを行った。また、シミュレーションは現状(普及率0%)とETCゲートを片端1箇所(普及率30%)、両端の2箇所(普及率50%)に設置した場合について行った。

一般道路の交通量が少ない時はFig.5に示したようにETC導入後にNO_x排出量が減少している。しかし、一般道路の交通量が多い時には逆に排出量が増加している。これは料金所での処理台数が増加した影響で、もともと交通量が多かった一般道路が渋滞してしまっただめだと考えられる。

次にゲートから下流の交通信号までの距離との関係調べた結果をFig.6に示した。ゲートから交通信号までの距離が長い時には処理台数が増加するが、短い時にはほぼ変わらない。これはゲートから交通信号までの間に渋滞が発生し、ETC導入の効果が得られないためと考えられる。

ETC導入の効果は一般道路への交通信号サイクル長にも依存する。サイクル長を100秒、130秒、160秒と変化させた結果をFig.7に示した。サイクル長が160秒の時はETC導入の効果が十分に得られない。ETC普及率が30%の時は130秒、50%の時は100秒で最も処理台数が多くなった。つまり、ETC導入の効果を十分に引き出すようなサイクル長の決定が重要であることが示唆される。

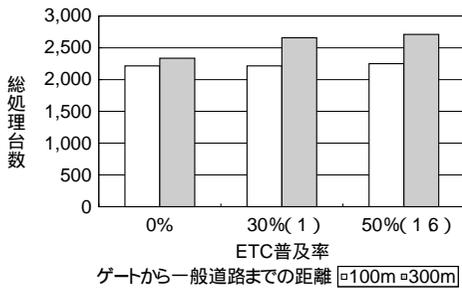


Fig. 6 一般道路までの距離と総処理台数

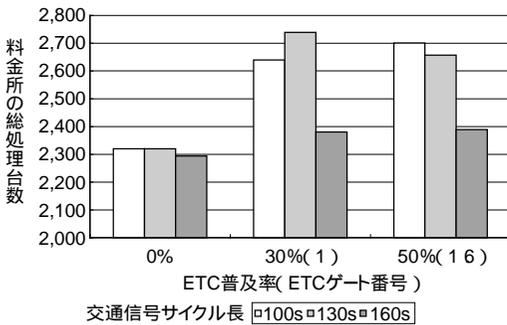


Fig. 7 出口の信号周期と処理台数の関係

サイクル長だけでなくスプリット(青信号比率)の変更が及ぼす影響を調べた結果、ETC導入後の新しい交通量を考慮してスプリットを変更することで総処理台数の増加が認められた。また、旅行時間や信号での平均待ち行列長も短くなった。

最後に、ETC導入後の新しい交通量を考慮して、サイクル長やスプリット変更した場合のNO_x排出量削減効果をFig.8に示した。新しい交通量を考慮して、サイクル長やスプリットを調整することで、NO_x排出量を削減できることが確認できる。

2-3 まとめ

高速道路の料金所にETCを導入することによって、料金所の処理台数の増加や旅行時間の短縮、NO_x排出量の低減などの利点が得られる。ただし次のような場合、その効果は充分には期待できない。

- ・ ETCの普及率に対し、適切なETCゲート数でない場合
- ・ 接続する一般道路の交通量が多い場合
- ・ ゲートから交通信号までの距離が短い場合
- ・ ETC導入後の交通量を考慮した信号制御でない場合

つまり、ETC導入の効果を十分に引き出すためには、その料金所の形状や交通流の特徴を考慮して、導入方法を事前に検討する必要があり、道路環境モデリングはそれを容易に可能とする。

3. 信号制御方法の効果分析

川崎市川崎区池上新田公園前にある自動車排出ガス測定局は、二酸化窒素の環境基準を達成できなかった日数が平成13年で67日もあり、この地域で道路交通に起因する大気汚染が深刻であることを示している。この測定局に近い池上新田交差点における観測から、信号周期に同期した大気汚染物質濃度の変動があることが認められた^{1,9)}。

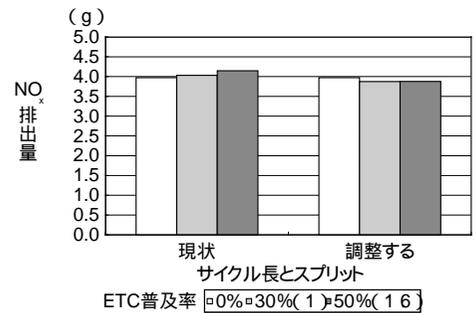


Fig. 8 ETC導入に伴うNO_x排出量の削減効果

将来のITSの導入に伴う道路情報インフラの充実により、交通流に関する情報を用いて動的に交通信号制御できる可能性が期待できる。そこで、マイクロ交通シミュレータVISSIM 5と排出ガスモデルを用いて交通信号制御方法の変更による交通流の円滑化や環境負荷低減の効果分析を行った^{1,11)}。

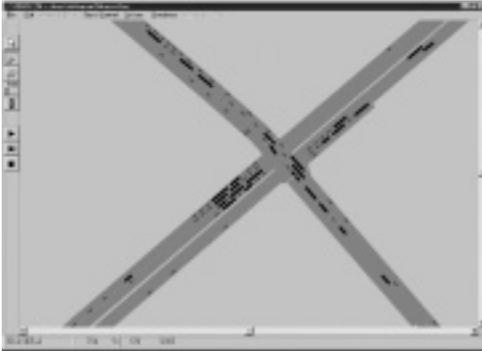


Fig. 9 VISSIMによる川崎市の池上新町交差点のシミュレーション場面

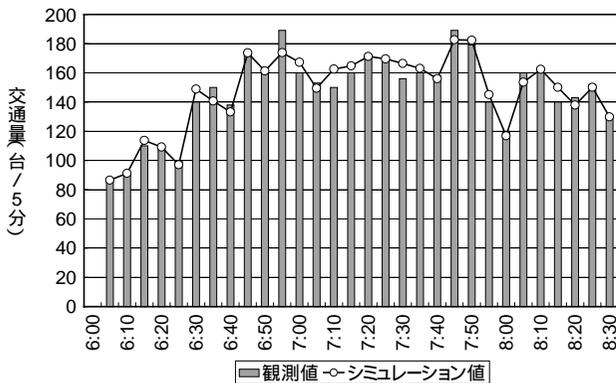


Fig. 10 観測された交通量とシミュレーションによる交通流の比較 (2000年12月22日)

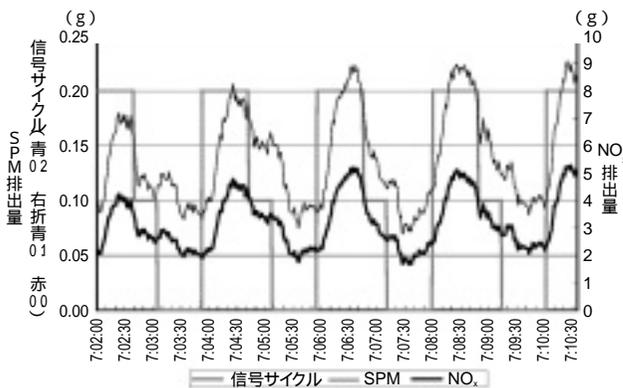


Fig. 11 再現され窒素酸化物と浮遊粒子状物質と信号パターン

3-1 シミュレーションの概要

マイクロ交通シミュレータとしてはドイツPTV社のVISSIM 5を用いた。シミュレーションの入力データである信号制御パターン、リンク交通量、右左折直進比率、大型車混入率は、池上新田交差点で2000年12月22日7:00~9:00に行った観測から得た。利用した道路ネットワークをシミュレーション画面によりFig.9に示した。交通流の再現は確率モデルによって行われるので、10種類の乱数系列を用いてシミュレーションを実行し、その平均によってそれぞれの信号制御手法を評価した。

3-2 シミュレーションの結果

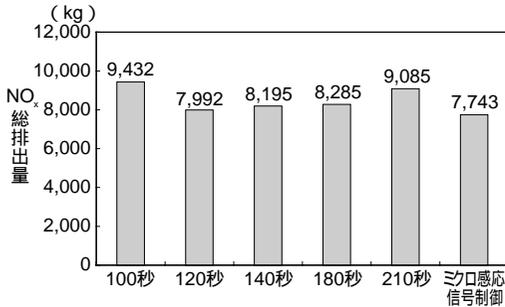
観測された交通量とシミュレーションによって再現された交通量の相関係数は0.98であり、Fig.10に示したように交通流の再現が妥当であると判断した。

シミュレーションによってFig.11に示したようにNO_xとSPMの交通信号サイクルと同期した変動が再現された。観測では赤信号でNO_xが増加し、青信号で減少する変動が認められ、シミュレーションでも

同様の結果になった。しかし、SPMについては赤信号で減少、青信号での増加が観測され、NO_xとの位相の差が認められたが、シミュレーションでは再現することができなかった。これは排出量の計算に用いた速度ベースの排出ガスモデルに原因があることが、その後の研究で明らかになった¹¹⁾。

交通流とNO_xの排出量の再現に関しては、整合性があるとして信号制御方法の評価を行った。交通信号のサイクル長を変化させて行ったシミュレーションから、Fig.12に示したように観測された交通量に対して、窒素酸化物の排出量を最低にする信号周期が存在することが判明した。この信号サイクル長は交通量に依存するが、実際の交通信号では準固定周期が採用されていた。また、観測された信号サイクル長は、NO_x排出量を最小にするサイクル長と一致していなかった。

そこで、ITSの導入により道路情報インフラが整備された場合を想定し、交通流に関する情報を利用して、

Fig. 12 信号制御方法とNO_x排出量

信号サイクルを変更するミクロ感応信号制御方式の導入を提案した⁹⁾。

ミクロ感応信号制御方式とは、信号の各現示の青時間の最小値と最大値を予め設定し、各車線に設置した感知器からの情報により青時間を調整するシステムである。この信号制御方式の効果をシミュレーションによって評価した結果、窒素酸化物排出量が5%削減できることが判明した(Fig. 12)。

3-3 まとめ

交差点周辺では交通信号に同期した汚染物質濃度の変動があり、信号サイクル長によって、排出される汚染物質量が変化する。そこで、交通量の変化に対応してサイクル長を変化させたり、ITSを活用したミクロ感応信号制御によって、環境負荷を低減できることを示した。

道路環境モデリングでは任意の場所に感知器を設置したり、それを利用した任意のアルゴリズムを用いた信号制御方法を試すことができる。例えば、単独交差点のモデリングだけではなく、広域ネットワークを用いて特定交差点への流入交通量を予想した交通信号制御システムの導入なども、容易に評価できる¹¹⁾。

4. ロードプライシングの効果分析

首都圏における道路交通に起因する大気汚染は国や地方自治体のさまざまな努力にもかかわらず依然として大きな問題である。東京都は交通渋滞を低減し、環境改善を目指して交通需要管理施策として、東京アクションプランを発表した¹²⁾。この中には交通からの排出量を直接的に低減するロードプライシングが含まれ、東京都は提案したロードプライシングによる運転者の交通転換行動に関してアンケート調査も行った。このロードプライシングの効果分析を、交通モデル、排出ガスモデル、気象・大気汚

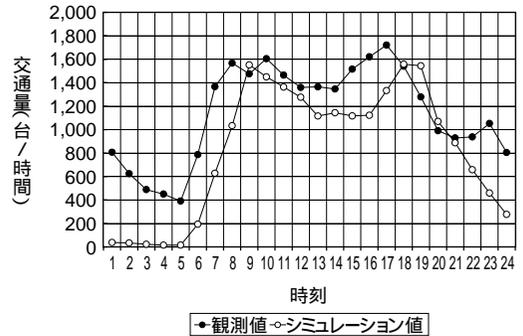


Fig. 13 環状6号線渋谷区宮ヶ谷における時間別交通量の比較

染モデルから構成される道路環境モデリングの手法を用いて行った¹³⁾。

4-1 シミュレーションの概要

交通モデルにはドイツPTV社のマクロ交通シミュレータVISUM / DYNEMOを用いた。この交通モデルにより交通流を再現し、車速に応じた東京都の排出ガスモデルを用いて道路交通からの窒素酸化物の排出量を計算した。排出された窒素酸化物をTAPMに入力し、気流場の効果を評価した¹³⁾。

首都圏の道路ネットワークは3887ノード、5047リンク、254ゾーンから構成した。起終点行列は1988年の東京都パーソントリップ調査結果を利用した。交通シミュレーションは現状の再現と東京都が示した四種類の課金対象領域の五種類のシナリオで実行した。

気流場については高濃度が観測された1999年2月18日と低濃度であった1999年3月23日について行った。気流場の計算には三重ネストを用い、格子点間隔は、大きい方から10km、3km、1kmとし、格子点数は全て東西方向40グリッド×南北方向40グリッドとした。全ての領域の中心は北緯35度40分、東経139度45分とし、気流場の境界条件はオーストラリア気象局の緯度・経度0.75度間隔の全球解析LAPS / CSIROを用いた。また、鉛直方向には地表から8,000mまでに30層を設定した。そして、大気汚染物質の計算は格子点間隔の2分の1で行った。

固定発生源からの排出データや窒素酸化物以外の汚染物質の濃度データが入手できなかったので、トレーサーモードでのシミュレーションとして実行した。つまり、汚染物質の化学反応過程は考慮せず、自動車から排出される汚染物質の移流・拡散を計算したにすぎない。

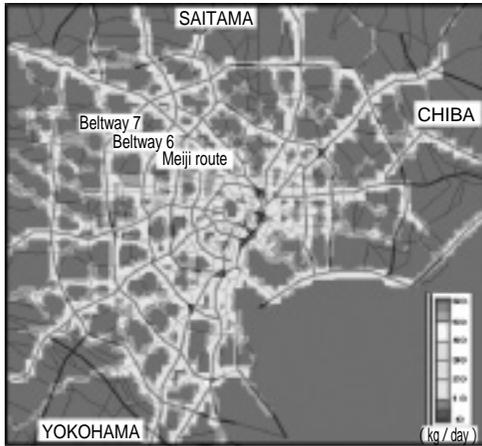


Fig. 14 現状再現による窒素酸化物の日合計排出量

Table 1 各課金領域別の日窒素酸化物排出量

	総NO ₂ 排出量 (kg/日)	削減率
現状	21197	-
課金領域1	20908	1%
課金領域2	20538	3%
課金領域3	20369	4%
課金領域4	20042	5%

4 - 2 シミュレーションの結果

交通シミュレーションの整合性は24時間交通量の観測値とシミュレーション値の比較によって行い、66リンクに対する相関係数は0.65であった。また、交通量の日変化の再現性を調べるために、時間交通量の比較をFig.13に示した。環状6号線の渋谷区富ヶ谷における観測値とシミュレーション値の相関係数は0.88であった。その他の地点における比較も行い同様の結果が得られたので、本研究で用いた交通モデルは観測値に対して整合性があると判断した。

現状の再現結果を示したFig.14で本研究で用いた道路ネットワークが確認できる。窒素酸化物の排出量の極大 (>50kg/day) はネットワークの中心部分、特に各交差点で認められる。

交通モデルと排出ガスモデルを用いて計算した窒素酸化物の日総排出量を各課金領域別にTable 1に示した。最大の削減率は一番広い課金領域4の5%であった。ロードプライシングは交通量を減少させる直接的効果がある。しかし、課金領域を避ける迂回によって総旅行距離が増加する車両もあり、行動転換率から予想される減少率よりも小さい。

窒素酸化物の排出量をTAPMに入力し、気流場の効果を評価した結果、ロードプライシングよりも気流場の影響の方が非常に大きいことが確認できた。

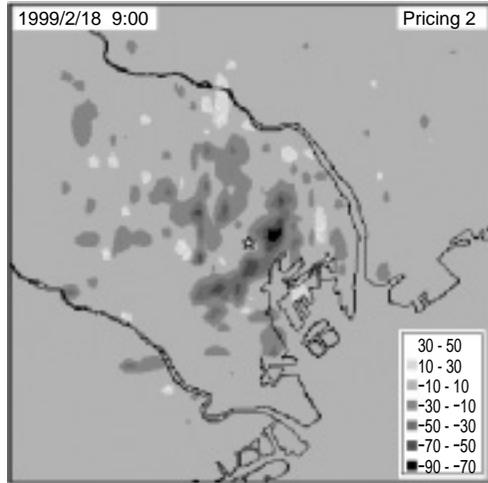


Fig. 15 気流場も考慮したロードプライシングの効果 (午前9時)

ロードプライシングの効果は、課金領域によっても特定の場所によっても異なる。気流場も考慮したロードプライシング(課金領域2)の効果をFig.15に示した。領域中心部における窒素酸化物の削減率は(>50 $\times 10^{-6}$ g \cdot m $^{-3}$)とかなり大きい。しかし、気流場の影響により、中心部付近にも増加域(白い領域)が見られる。また、課金領域を超えた所では、迂回交通による窒素酸化物濃度の増加域が認められる。

TAPMによって再現された格子点(0,0)(Fig.15中の「付近」)における窒素酸化物濃度の日変化のパターンをFig.16に示した。またこの地点は大気環境測定局の国設霞ヶ関局付近になるので、実際の観測値も示した。この図から観測された日変化のパターンがある程度再現できていることが確認できる。この結果、ロードプライシングの効果がきわめて小さいことが確認でき、特に朝の時間帯ではロードプライシングにもかかわらず、気流場の影響から窒素酸化物濃度が高まっていることが確認できる。大きな課金領域4では、ロードプライシングによって中心部で窒素酸化物を減らしている時間帯もあるが、夕方のピーク時には気流場が2倍に増加させてしまっている。

4 - 3 まとめ

交通モデルと排出ガスモデル、気象・大気汚染モデルを用いて道路環境モデリングを行い、東京都アクションプランで提示されたロードプライシングの効果分析を行った。

現状の再現によって、道路環境モデルの整合性と大気汚染レベルに対する気流場の重要性が確認でき

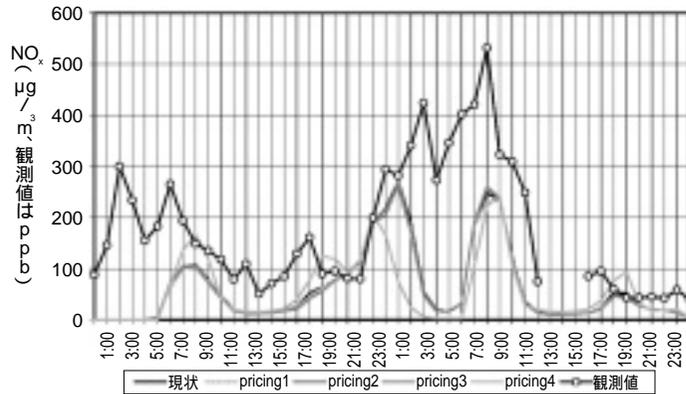


Fig. 16 格子点(0,0)と電ヶ関における窒素酸化物濃度の日変化

た。ロードプライシングの最大の効果は、総窒素酸化物排出量5%の削減であった。特定地点における効果では、ロードプライシングよりも気流場の効果の方が大きいことが確認された。また、気流場の効果は、特定の場所ではロードプライシングの効果を打ち消す場合もある。ロードプライシングの課金領域の外側では、迂回交通の増加によって大気汚染が悪化する地域があることも確認された。

5. おわりに

道路環境モデリングはドイツを中心としてヨーロッパで1990年代後半から盛んに研究されてきた¹⁴⁾。最近の動向としては、向上した計算機の処理速度を利用してマイクロ交通シミュレーションの広域ネットワークへの応用がある¹⁵⁾。そこで重要となるのは加速度などを考慮した詳細な排出ガスモデルの構築である。現在、日本でもJCAP¹⁶⁾などのプロジェクトがその開発に取り組んでいるが、完全な排出ガスモデルの構築には至っていない。また、首都圏全域を対象としたマイクロ交通シミュレーションの実行には、膨大な入力データを処理するために、さらに高速な計算機も必要であり、並列計算機の活用も重要となろう。そこで、並列計算に対応した汎用マイクロ交通シミュレータの開発も必要となろう。つまり、これからの道路環境モデリングを用いた効果分析には、排出ガスモデルと広域ネットワークを対象としたマイクロ交通シミュレーションの実行が鍵になる。また、効果分析の精度向上には道路環境モデリングが実際の道路交通・大気汚染の測定によって検証され、評価分析手法として確立される必要がある。

[謝辞]

慶應義塾大学理工学部管理工学科川嶋研究室の学生諸氏にはシミュレーションの実行でお世話になった。なお、本研究の一部は国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として行われた。

参考文献

- 1) 川嶋弘尚、坪田幸政「ITSを利用した道路環境モデルの実用化に関する基礎研究」『ITS導入効果およびAHS技術に関する基礎的先端的研究報告書』国土交通省土木研究所、慶應義塾大学、pp.197-320、2002年
- 2) PTV System : USER'S MANUAL VISSIM , PTV System , 1998
- 3) PTV System : USER'S MANUAL VISUM / DYNEMO , PTV System , 1998
- 4) 東京都環境保全局『都内自動車走行量および自動車排出ガス量算出調査報告書』1996年
- 5) Hurley , P . : The Air Pollution Model (TAPM) Version 2 . Part 1 : Technical Description , CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No 55 , pp.1-49 , 2000
- 6) 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』建設省土木研究所、慶應義塾大学、pp.205-303、1999年
- 7) Yukimasa Tsubota and Hironao Kawashima : Traffic Simulator as an Evaluation Tool for Policy Making and Its Application , Proceedings of International Congress on Modeling

- and Simulation , MODSIM '99 , pp 965
970 , 1999
- 8) 坂口良太、桑原雅夫「ETC導入による料金所容量への影響に関する理論的解法と考察」『土木学会論文集No.653/IV.48』pp.29-38、2000年
- 9) 坪田幸政、川嶋弘尚「路側における環境測定とシミュレーション」『第42回大気環境学会年会講演要旨集』P.600、2001年
- 10) 坪田幸政、川嶋弘尚「交差点における大気汚染物質の動態」『日本気象学会2001年秋季大会講演予稿集』P.193、2001年
- 11) 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研究報告書』国土交通省土木研究所、慶應義塾大学、pp.359-487、2001年
- 12) <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/jcdousya/roadpricing/hokokusyo/hokoku.htm>
- 13) Yukimasa Tsubota and Hironao Kawashima : Measurements of roadside air pollution and traffic simulations , Urban Transport IX , Wessex Institute of Technology , pp 273-282 , 2003
- 14) Noekel , K . , Schmidt , M . , van Vuren , T . : An integrated dynamic traffic simulation and air pollution decision support system , Meersman , van de Voorde , Winkelmanns Eds . , World Transport Research , Selected Proceedings from the 8 th World Conference on Transport Research , Volume 2 , Elsevier , 1999
- 15) 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.199-132、2002年
- 16) http://www.pecj.or.jp/jcap/index_jcap.asp