

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

Microscopic traffic-related environmental simulation system for wide-area networks

後藤 亮
Ryo GOTO

指導教官 屋井 鉄雄
Tetsuo YAI

This study aims to build a microscopic traffic-related environmental simulation system for a wide area network around Kawasaki, Japan using Paramics, a microscopic traffic simulation. The focus of the simulation system is to explain vehicle behavior in detail, to estimate SPM emission from vehicles dynamically, and to analyze SPM diffusion over scores of kilometers.

Using the SPM emission estimated by the microscopic traffic-related environmental simulation system as input, SPM density was estimated using (1) local meteorological model considering SPM diffusion, and (2) Paff model which does not consider SPM diffusion. The two models were then compared.

Keywords : 広域ネットワーク、マイクロシミュレーション、浮遊粒子状物質、移流・拡散
Wide area network, Microscopic simulation, SPM, Movement and diffusion

1. はじめに

自動車交通は経済・社会活動を支え、多くの人々がその利便性を享受しているが、一方で自動車交通に伴う排出ガスにより、沿道の人々の生活環境は厳しいものとなっている。これまでも、道路管理者等により幹線道路の沿道環境の改善を図るための様々な取り組みがなされてきたが、自動車交通量の増大等もあり、十分に改善が図られてきたとは言えない状況にある。

このような背景を踏まえ、従来から自動車による大気汚染の研究が数多く行われてきた。これらの研究から、主な大気汚染物質である NO_x、SPM は、速度、車種による排出量変動が激しいため、平均走行速度を用いた推計では十分に検討することが難しく、瞬間走行速度・加速度変化を考慮したマイクロな分析が必要であることが明らかになってきた。また、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もっており、その移動距離は 1~数 10km といわれている。広域に拡散する汚染物質は、特定路線の大型車を規制するような線的な沿道対策では必ずしも被害地区の改善に十分対応できないことから、面的な対策は必要であり、それに対応した分析も必要となっている。つまり、大気汚染の研究には、拡散を考慮する必要があるため、広域な地域を対象とし、かつ車両挙動を詳細に分析することが必要とされてきている。

そこで本研究では、交通流マイクロシミュレータ Paramics を用いて、広域な交通流動を詳細に再現しうる道路交通ネットワークの構築と自動車からの汚染物質排出量を動的に推定する交通・環境マイクロシミュレーションシステムの構築を行うことを目的とする。なお、本研究では大気汚染物

質として SPM を扱う。これは、NO_x と比べ排出源から離れたところで濃度が高くなりやすく、より広域な地域を対象とした分析が必要とされているためである。本研究の分析の流れを図 - 1 に示す。

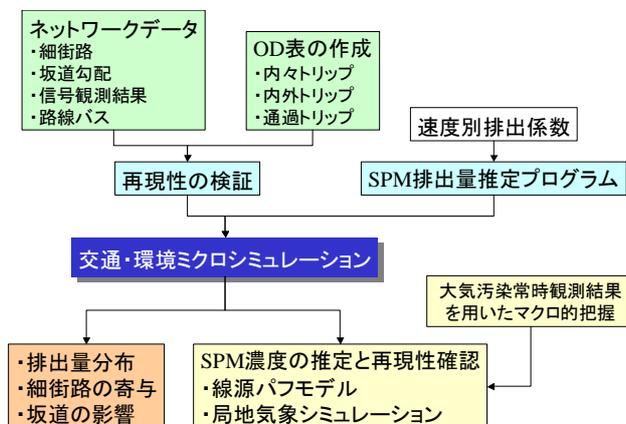


図 - 1 本研究の分析フロー

2. 既往研究と本研究の位置付け

交通流動とそれに起因する汚染物質の推計を統合したシミュレーションを提案している研究として、光畑ら¹⁾はメトロマニラ・マカティ地区において交通マイクロシミュレーション Paramics に対象地域の交通特性や沿道土地利用情報を組み込み、交通流および SPM 排出量のより高い現況の再現を行っている。Park ら²⁾は詳細な速度変動を表現するために追従型マイクロシミュレーションモデルである VISSIM を用いており、排出量推計モデル MODEM と Gaussian 拡散モデルと合わせ英国のローカルエリアに適用している。Guhnemann ら³⁾は、環境的影響と経済的影響を同時に評価するために、大気環境・騒音・事故・経済の評

価モデルを組み込んだ動的マイクロ交通シミュレーションを構築している。さらに、Sbayti ら⁴⁾はネットワークの構造的な違いではなく、汚染物質排出量推計法のスケールの違いに着目し、840 ノード、850 リンクのネットワークを対象としてミクロスケールの有効性をマクロ・メソスケールと比較することによって明らかにしている。また、細街路を無視することは重大な過小評価を招くことも示している。

これらの研究は、マイクロシミュレーションにより車両の挙動を詳細に把握し、排出量推定の精度向上を図っている。しかし、SPM をはじめとした汚染物質が広域に移流、拡散する点から見れば、その対象領域は狭く、環境問題の厳しい大都市圏においてそれらの再現可能性は十分明らかになっていない。本研究では、自動車に起因する大気汚染が深刻な首都圏の中でも、特にその問題が深刻であるとされる川崎周辺を対象として、約 20km 四方という交通マイクロシミュレーションにおいては比較的大規模なネットワークを構築することによって、車両の挙動を詳細に把握する。さらに、構築したシステムより得られた排出量から、SPM の移流、拡散を考慮したモデルと考慮していない 2 つのモデルによって SPM 濃度を推計し、各モデルの特性を把握する。

3 交通マイクロシミュレーション Paramics を活用した川崎周辺の道路ネットワークの構築

(1) 道路ネットワークの作成

本研究では、交通流マイクロシミュレータ Paramics を活用してシミュレーションの構築を行っていく。これは、実際の交通現象において無視できない、地形・信号制御・車種・時間帯等の要因による影響を正確に扱うために開発されたシミュレータであり、従来のマイクロシミュレータの対象範囲よりも遙かに広域なネットワークに適用できるようにしたシステムである。本研究において Paramics を活用する利点として以下のことが挙げられる。

- ・ 大規模ネットワークを表現可能なマイクロシミュレータ
- ・ ネットワークの作成が容易
- ・ システムの部分的変更・改良が容易

ここでは、Paramics で作成した道路ネットワークについて特に考慮した点を以下に示す。

細街路の選定

細街路は、市町村道のようなバス路線に指定されている道路から私道まで含まれる。私道のような道路からの排出量は、誤差に含まれる程度の小さなものであると考えられ、ネットワークに組み込む必要はないと思われる。しかし、細街路のデータが一般には存在しないことから、本研究では以下の選定基準を定義し、その選定基準のいずれかを満たすものを、細街路としてネットワークに組み込むことに

した。

- ・ バス路線に指定されている
- ・ タクシーのプロブデータにおいて走行軌跡がある
- ・ 地図上で「裏道」「抜け道」に指定されている

その結果、ノード数：9,544、リンク数：14,592、総リンク長：3,470.2km、実道路網の細街路のうち約 6 割を独自に作成して道路ネットワークを構築した(図-2)。

ネットワークの3次元化

交通流動を詳細に表現するためには、速度や加速度に大きな影響を与えると考えられる坂道勾配を反映させる必要がある。そこで、数値地図 50m メッシュ(標高)から、リンクの両端であるノードに標高を与えることによってネットワークを3次元化した。なお、ネットワーク内の標高値の範囲は、-1~110m となっている。

信号表示の設定

信号は、交通流に大きな影響を与える要素の一つである。特に、日本では海外と比べ信号数のはるかに多い。そこで、実際には幹線道路どうしが交差する信号ごとにグループ化を行い、そのグループ内の信号は互いに連動するように信号が制御されていることを踏まえ、本研究では対象地域全体の幹線道路同士が交差する信号 187 箇所について現地観測を行った。その観測概要は以下のとおりである。

- ・ 観測日時：2001 年 12 月 14 日~2002 年 1 月 6 日
- ・ 観測対象：本研究で対象とする地域内に存在する信号交差点のうち、都・県道、指定市道以上の階級の道路どうしが交差する交差点の信号
- ・ 観測内容：信号サイクル(各フェーズの青、黄、赤、矢印信号時間)、車線数、右折レーン数
- ・ 観測方法：ひとつの交差点に存在する複数信号を同時に観測する。5 サイクル以上計測し、その平均をその交差点の信号サイクルとする
- ・ 観測地点数：187 箇所(東京：78、横浜：61、川崎：48)

その他の細街路を含んだ交差点信号に関しては、代表的な信号サイクルを入力し、それを同時に青になるように設定し連動させた。以上の想定のもと、ネットワーク上に計 1,655 箇所の信号を設置した。

路線バスの配置

バスの排出原単位は、乗用車はもちろ

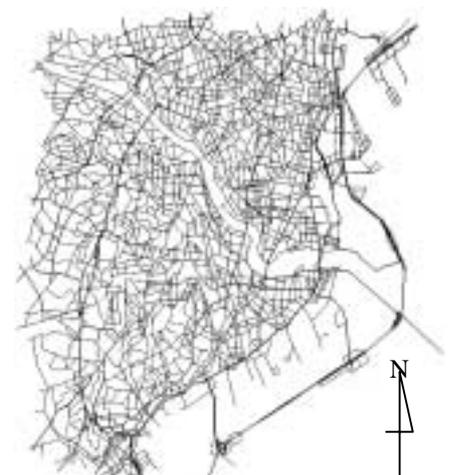


図-2 作成された道路ネットワーク

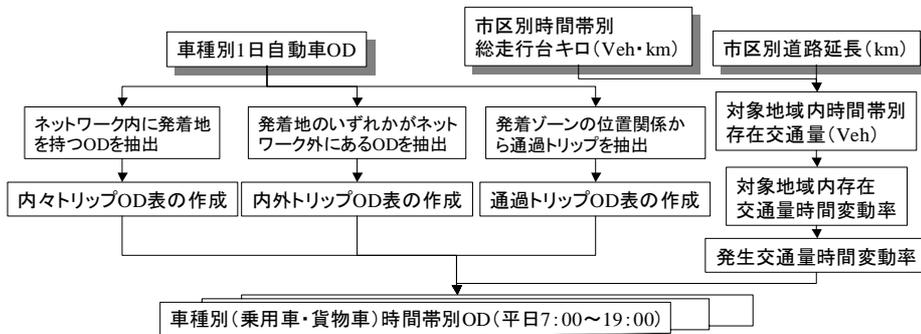


図 - 3 車種別時間帯別 OD 表の作成フロー

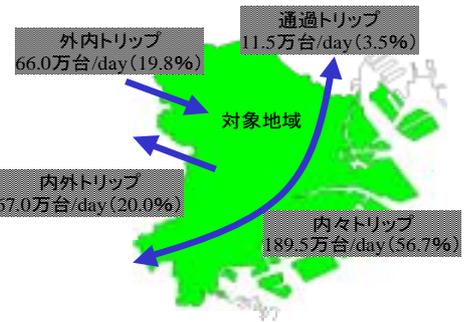


図 - 4 各トリップの構成比

ん貨物車と比べてもかなり高い。そのバスの存在を明示しておくことは排出量を推定するにあたって重要なことである。Paramics では、路線バスを OD 交通量とは別に設定する。本研究では対象ネットワーク内を走行する路線バスとして、都営、東急、京急、川崎市営、横浜市営の 5 社のバス路線図を用いてバスルートを決定し、

- ・ 起点から終点までノンストップで走行
- ・ 運行頻度はすべての路線で 20 分間隔

という仮定をもとにバス路線を入力した結果、全部で 462 路線（東京：193、川崎：89、横浜：180）となった。これは、理論的にはネットワーク内に 1 時間に 1,386 台のバスが存在することを意味する。道路交通センサスの「幹線道路を走行する平日平均バス便数」よりネットワーク内に発生するバス便数を概算したところ、約 1,100 台/h となり、対象地域内のバス交通をおおむね再現できているといえる。

(2) 車種別時間帯別 OD 表の作成

本研究で対象とした川崎周辺地域には、東名高速道路、首都高をはじめとした根幹道路が数多く走っている。そのため、対象地域内に起終点を持たず通過するだけのトリップ（通過トリップ）や、起終点のいずれかが対象地域外であるトリップ（内外トリップ）が多く存在する。それらを考慮するために、ここでは各トリップの OD 表作成を行う。まず、ゾーニングを行う。本研究ではネットワークの境界上に、車両をネットワーク外に流し出す境界ゾーンを 4 つ、対象地域内に存在する 59 の域内ゾーンと合わせて計 63 ゾーンに分割した。

次に、OD 作成に関して使用するデータである平成 11 年道路交通センサス自動車起終点調査は乗用車と貨物車の車種別にはなっているが、1 日単位での集計値となっており、1 時間単位での OD 表は存在しない。そのため、時間帯別存在交通量から、市区别に時間変動率を算出し、これを発生交通量の時間変動率と同じものとみなして市区ごとに時間変動率をかけ、時間帯別 OD 表を作成した。その車種別（乗用車・貨物車）時間帯別 OD 表（平日 7:00~19:00）の作成フローを図 - 3 に示す。

以上によって作成された車種別時間帯別 OD 表の概要を

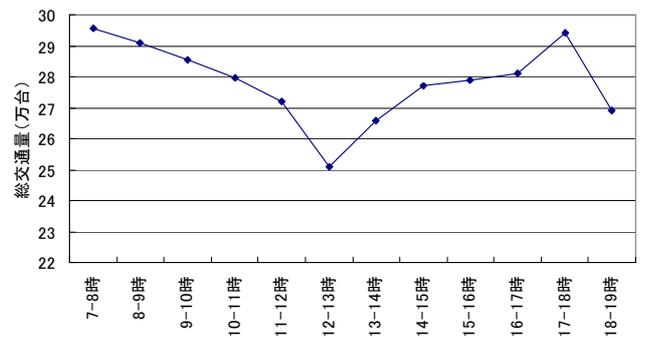


図 - 5 総交通量の時間変動

示す。まず、車種構成比は乗用車 70%、貨物車 30%となっており、図 - 4 に示すように、この地域ではネットワーク外に起終点を持つトリップが 43%と重要な位置を占めているといえる。また、ネットワーク内総交通量の時間変動率を図 - 5 に示す。

4. シミュレーションの再現性検証と SPM 排出量推定

(1) ネットワークの試行と調整

3 章で構築したネットワークを用いてシミュレーションを行うためには、いくつかの調整が必要となる。ここで行った調整を以下の 3 つの項目に分け、それぞれ示す。

車両（ドライバー）

OD が同じである車両は、まったく同じ経路を選択する傾向が強いため、乗用車を 5 種類、貨物車を 2 種類に分け、それぞれドライバーの性格、道の詳しさの度合を変えることで経路選択の多様化を行った。

交通流

Paramics ではゾーン内に存在するリンクからランダムに車両が発生するが、それが一部のリンクに偏っているため、リンクに重みを与え、車両発生場所の分散化を図った。

道路構造

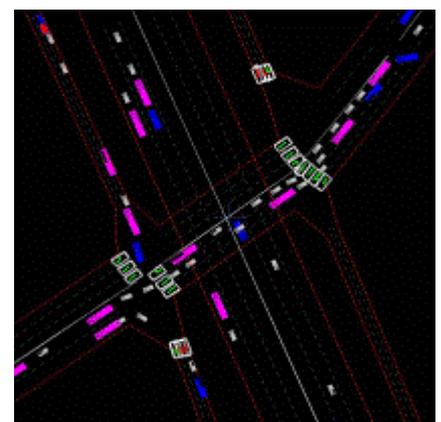


図 - 6 シミュレーション画面の一部

内外、通過トリップの影響で生じるネットワーク境界に近い交差点での右左折待ちによる滞留と、立体交差点における信号表示の現実との乖離によって右折車が交差点内に滞留するという現象を解消するため、各交差点の交通容量を増加した。

図 - 6 に調整後のシミュレーション画面の一部を示す。

(2) 再現性の検証とその考察

ここでは、構築したシミュレーションの再現性を排出量推定に影響を及ぼすと考えられる車種別1時間断面交通量と平均速度について実測値とシミュレーションで得た値とを比較することによって進めていく。また、観測地点はネットワーク内に140地点存在し、すべて高速道路、国道沿いにある。なお、比較する時間帯を15:00~18:00の3時間分とする。これは、図 - 5 にも示したようにピークに向かうまでの時間帯であり、この状態を表現できることが交通流シミュレーションにとって重要なことであるからである。表 - 1 に、乗用車断面交通量、貨物車断面交通量、平均速度の実測値の相関を時間帯別に示す。また、横軸に実測値を縦軸にシミュレーションで出力された値をプロットした図を図 - 7 に示す。

表 - 1 シミュレーション値と観測値の相関係数

	15-16時	16-17時	17-18時
乗用車	0.78	0.78	0.79
貨物車	0.50	0.41	0.48
平均速度	0.73	0.76	0.74

この結果は、本研究がマイクロシミュレーションとしては例を見ないの大規模なネットワークであることを考慮すれば、広域交通流動をある程度は再現できているものといえる。しかし、十分に妥当性があるとは言い切れないため、この乖離の原因を以下に述べていく。

- ・車両の経路選択が現実と乖離していた。特に、細街路を

経路として選択すべき車両が幹線道路を利用するにまっすぐ向かう傾向が強く見られ、観測値よりも過大評価してしまった。細街路を裏道、抜け道として機能するようなリンクコスト関数の設定の精緻化が必要である。

- ・内外・通過 OD を発生させる境界ゾーンが大きすぎたため、最短経路が現実と明らかに異なるものとなっしまい、交通流に偏りが生じてしまった。境界ゾーンをより細分化する必要がある。
- ・交通運用に関しては、信号が断面交通量をセンシティブに変化させることを踏まえると、信号を連動させることはもちろん、交通量に応じた感应式信号の導入も検討すべきである。
- ・道路構造に関しては、車線数のデータ不足があげられる。道路交通センサスのデータは正確なものとは言えず、細街路の車線数も大きな影響を与えるものといえる。また、路上駐車による車線数の減少も考慮に入れた可変的な車線数を導入する必要もあると考えられる。

(3) 動的な SPM 排出量推定モデルの構築

SPM 排出量推定のフローを図 - 8 に示す。本研究では、時間軸を導入するために、排出係数を(g/km)から(g/s)に変換した。そのプロットデータと近似曲線を図 - 9 に示す。この排出モデルをシミュレーションに組み込み、瞬間走行速度から1秒単位で SPM 排出量を算出し、10分ごとにリンク別に集計した。これによって、車両挙動を詳細に表現し、

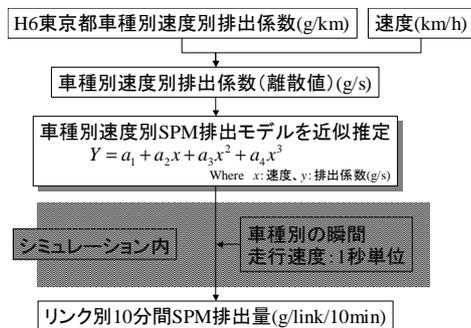


図 - 8 SPM 排出量推定のフロー

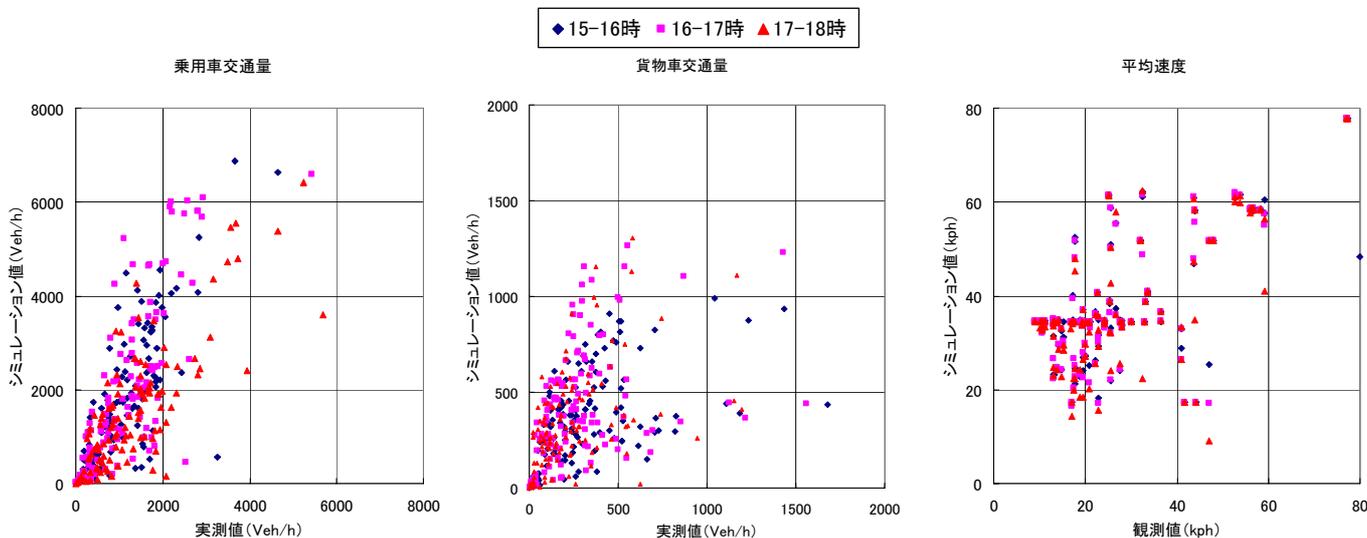


図-7 ネットワーク内140箇所の観測地点におけるシミュレーションと実測値の比較

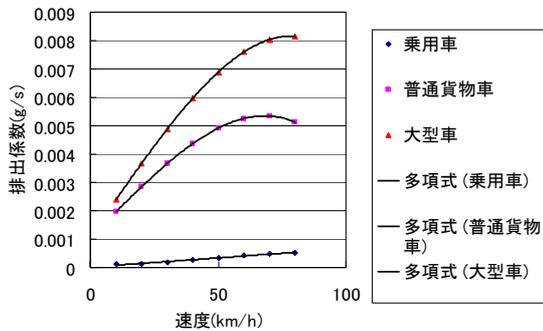


図 - 9 3車種別速度別 SPM 排出係数 (g/s)

かつその各車両からの SPM 排出量を動的に推定する交通・環境マイクロシミュレーションシステムを構築することができた。

(4) シミュレーション結果とその考察

ここでは、構築した交通・環境マイクロシミュレーションシステムによって算出された SPM 排出量について考察を行う。

地区別排出量

リンク単位で算出された SPM 排出量をメッシュ単位に変換し、地区別にわかるようにした。そのうちの 17:00~18:00 の SPM の排出分布を示したのが、図 - 10 である。交差点からの排出による点状の分布と、路線に車両が集中していることを示す線状の分布という 2 つの排出パターンを表現できているといえる。

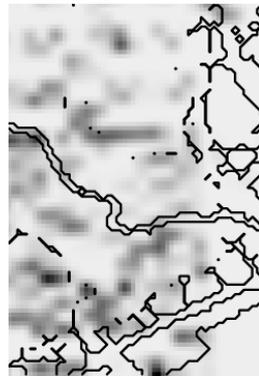


図 - 10 地区別排出量分布

表 - 2 道路種別の排出量寄与率

	寄与率
細街路	17.9%
幹線道路	66.9%
高速道路	15.2%

細街路の寄与

全体の排出量のうち、細街路からの排出量を夕方（ピーク時間帯である 17:00~18:00）において算出したところ、表 - 2 に示すように細街路からの排出量は全体の 18% を占めることがわかった。これは高速道路よりも多い値となっており、細街路からの排出量は決して無視できないものであることが明らかになった。

坂道抵抗による排出量の増加

ここでは、速度のみでは表れない坂道を登ることによるエンジン出力の増加に起因した排出量への影響を見るため、簡便な推計を行う。SPM 排出量はエンジン出力に比例すると考えられ、そのエンジン出力はエンジン回転数とトルクの積に比例する。走行速度が 40km/h 程度であるならばエンジン回転数はトルクに比例すると考えられる。勾配の坂道を登るとき、平坦な道を走行するより $(1+\sin \theta)$ 倍のト

ルクを必要とするので、これらの関係から SPM 排出量は $(1+\sin \theta)^2$ 倍となる。下りの際は平坦な道を走行する場合のエンジン出力と変わらないとすると、結果としておよそ 16% 排出量が増加すると試算された。

5. 大気汚染物質常時観測結果を用いた SPM 挙動の把握と SPM 濃度推定の整合性

(1) 大気汚染常時観測結果による SPM のマクロ的挙動

ここでは、観測値である大気汚染常時観測結果を用いて、対象地域の SPM の動向をマクロ的に把握していく。まず、対象地域内にある一般 20 局、自排 13 局の SPM 濃度と風速の月平均値の変化を図 - 11 に示す。これより、8、12 月で濃度が高くなっていることがわかる。これは夏季については光化学反応による二次生成粒子の寄与が高くなり、冬季は逆転層の生成により SPM が拡散しにくくなると推測されているからである。また SPM 濃度と風速は負の相関を持っていることから、風が弱い時期には対象地域内で発生した SPM が滞留し、風が強い時期でも他地域からの影響をそれほど受けていないとも考えられる。

また、年間を通して風速が 2~3m であり、本研究で対象とした領域は約 20km 四方であることから、域内で発生した SPM の挙動を約 2~3 時間でなら領域内で把握することができる。SPM が 20km を移流するのに 6 時間以上かかることになる風速である、1m/s 以下になる時間帯は年間でおよそ 1 割ほどであり、この状態の場合でなら 20km 四方という領域においても十分に分析する意義があるといえる。

さらに、一般局についてその濃度が高い 8 月の対象地域内の 1 日平均の濃度分布を等高線で示したのが図 - 12 である。測定局の位置や高さにより値は異なってくるが、傾向を見ると、まず高濃度となっている都心、川崎、溝口では、主要幹線道路が存在し、一般局といえども局地的な影響が存在することがわかる。また、目黒、横浜、狛江では低濃度となっているが、沿道からの影響を強く受ける自排局の測定値は高濃度となっており、広域の拡散と局地的である沿道の 2 つの視点から考察を行う必要があると考えられる。時間帯別で分布状況を見てもおおよそ同じ傾向を示してい

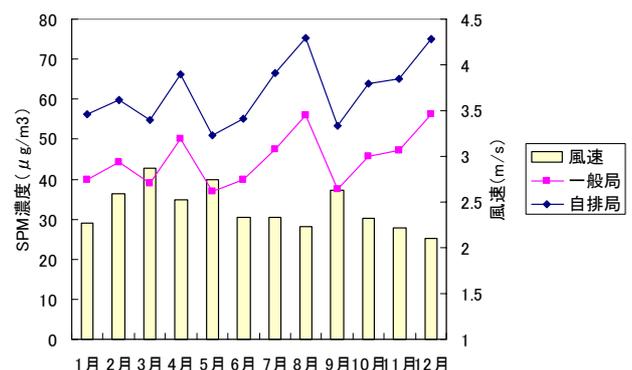


図 - 11 対象地域における SPM 濃度と風速の月変化



たので、この結果については割愛する。

(2) SPM 濃度推定
 以上で述べたように、一般局の SPM 濃度分布と自排局のそれとは乖離があり、発生

図 - 12 SPM 濃度分布 (一般局): 8 月
 場所と影響を受ける場所が必ずしも一致しないことをマクロ的に示した。そこで、ここでは交通・環境マイクロシミュレーションによって算出された SPM が沿道に到着する際の濃度を線源パフモデルによって算出し、測定局の値と比較することでそれを局地的に確かめることとする。一方、SPM 排出量を気象シミュレーションによって、SPM の移流、拡散を考慮した場合についても同様に局地的に実測値との比較を行い、パフモデルを使った SPM の移流、拡散を考慮しないモデルとの違いを明確にする。なお、比較日時として 8 月 11 日 ~ 14 日の夕方 17 時 ~ 19 時の平均値とする。

パフモデルについては、日射量は $100\text{W}/\text{m}^2$ 以上、風速は $2\sim 3\text{m}/\text{s}$ 、そして濃度測定地点は道路沿道であるとしてパラメータを代入した。ここでは、日時を特定することが困難なため 17 ~ 18 時の値を夕方の代表値として用いる。

気象シミュレーションについては、局地気象モデル RAMS⁵⁾を用いて 1998 年 8 月 11 日 0 時 ~ 15 日 0 時までのシミュレーションを行い、各測定値に最も近いメッシュの SPM 濃度を実測値と比較することとする。

その結果を図 - 13 に示す。横軸の観測地点は、幸、川崎、大師が一般測定局、松原橋、池上が自排局である。それぞれの値は平均値であるため、標準偏差分の幅を同時に示している。パフモデルでは、自動車以外の排出源からの SPM 濃度であるバックグラウンド濃度をどの地点でも $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ と仮定して加算している。バックグラウンドを考慮すると、パフモデルによる推計値は観測値とおおよそ同じになることがわかる。しかし、それでも一般局の川崎と大師で過小評価となっているのは、各測定局の少し離れた東側に位置する幹線道路からの SPM が、季節風である南東風によって移流する分を考慮しきれていないためだと考えられる。また、RAMS では移流、拡散を考慮しているため、どの測定局でもあまり大きな差はない。しかし、自排局の松原橋と池上において観測値との乖離が見られる。これは、SPM の移流、拡散を考慮した気象シミュレーションでは、掘割構造内の沿道濃度のような局地的な影響を受ける SPM 濃度を表現しづらいと考えられるからである。

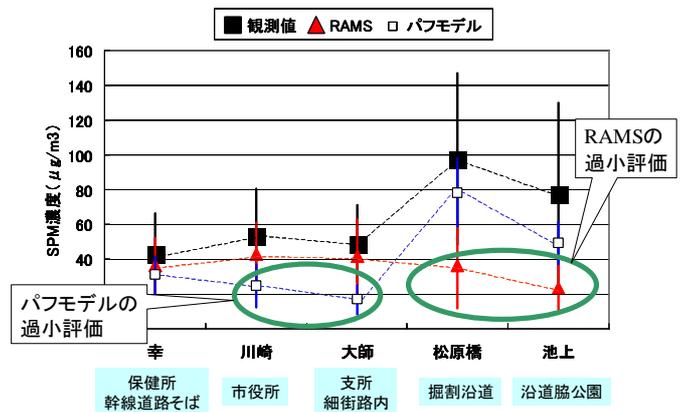


図 - 13 パフモデルと RAMS による SPM 濃度推定と実測値との比較

6. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- ・広域交通流動を扱うため、川崎周辺の約 20km 四方を対象とし、細街路、坂道、信号現示を考慮に入れることにより、詳細に自動車の走行状況を表現しうる道路ネットワークを作成した。さらに、車両を走行させつつ SPM 排出量を 1 秒ごとに動的に算出させるモデルを組み込むことによって、交通・環境マイクロシミュレーションシステムを構築した。
- ・システムの再現性を見るために、車種別交通量と平均速度において実測値との比較を行ったところ、広域な領域にもかかわらず相関係数が $0.6\sim 0.8$ というある程度の再現性を得ることができた。また、これ以上再現力が高まらない原因についても考察した。
- ・本システムを用いて SPM 排出量を推計し、領域内の排出分布、細街路の寄与、坂道の影響等を考察した。
- ・SPM の移流、拡散を考慮しないパフモデルとそれらを考慮した局地気象モデルの 2 つを用いて SPM 濃度を推計し、観測値との比較を行うことで、それぞれの特性を把握した。

「参考文献」

- 1) 光畑太、市民の環境価値意識を組み込んだ SPM 削減交通施策評価システムの構築 - メトロマニラ・マカティ地区を対象として - : 東京工業大学人間環境システム専攻修士論文 2000,
- 2) Jin Young Park and John Polak, Microscopic Modelling of Air Pollution from Road Traffic: The 9th of WCTR, F4, No.6408, 2001
- 3) Guhnmann, Wagner and Eissfeldt, Intelligent transport management by integrated dynamic traffic simulation and impact assessment: The 9th of WCTR, E1, No.5114, 2001
- 4) H.Sbayti, M.El-Fadel and I.Kaysi, Effect of roadway network aggregation levels on modeling of traffic-induced emission inventories in Beirut: Transportation Research Part D7 pp.163-173, 2002
- 5) 妹尾泰史、交通起源の大気汚染物質の 3 次元移流拡散シミュレーション: 平成 13 年度東京工業大学土木工学科神田研究室卒業論文、2002