

# 数値解モデルを用いた大気濃度からのディーゼル車 SPM 排出量推計モデルの推定手法

建設工学専攻 504042 三瓶 信人  
 土木計画研究 指導教員 岩倉 成志

## 1. はじめに

タイやフィリピンなどの開発途上国の都市部では、道路交通起因の大気汚染が問題となっており、特に汚染物質の1つである浮遊粒子状物質 SPM (粒径  $10\mu m$  以下の粒子) の削減が求められている。

大気汚染改善のための交通政策には、公共交通機関整備、信号制御最適化、アイドリングストップ等がある。そして、これらの政策評価のため、自動車の挙動を再現する交通マイクロシミュレーションに SPM 排出量推計モデルを組み込む手法が研究されている。

SPM 排出量推計モデルとは、走行車両の毎秒の SPM 排出量を速度、加速度等から推定するものである。先進国ではその構築のため、シャーシダイナモ試験と呼ばれる台上試験を行い、それらのデータを直接測定している。しかし、開発途上国では経済的、技術的な問題からその試験実施が困難であり、車種別の SPM 排出量推計モデルを構築することができない。

そこで本研究では、開発途上国で導入可能な安価で簡便な SPM 排出量推計モデルの推定手法の構築を目的とする。

## 2. 路側 SPM 濃度からの SPM 排出量推定手法

本研究のフローチャートを図 1 に示す。SPM 排出量推計モデル推定のためには、自動車走行時に時々刻々に変化する SPM 排出量を得る必要がある。しかし、SPM 排出量を直接測定することは上述の理由から困難である。そのため、大気拡散モデルを用い、路側 SPM 濃度から走行車両の SPM 排出量を推定する手法を提案する。

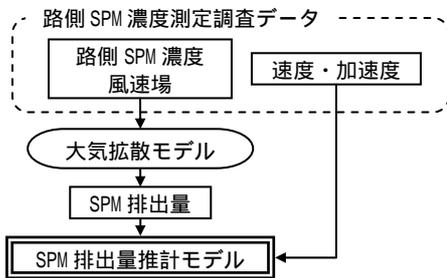


図 1 研究フローチャート

### 2-1. 路側 SPM 濃度測定調査

路側 SPM 濃度測定のためには図 2 に示す機材配置で調査を行う。併用前の道路を使用し、調査車両はいすゞフォワード 4t、積載量は空載とする。測定項目は路側 SPM 濃度、風向、風速、速度、加速度であり、それらを 1 秒毎に測定する。

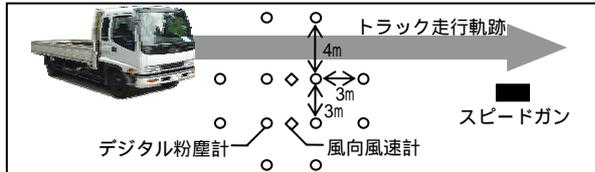


図 2 路側 SPM 濃度測定調査の機材配置図

### 2-2. 大気拡散モデル

本研究で用いる大気拡散モデルは式(1)の 2 次元非定常移流拡散方程式である。C は SPM 濃度、u, v は風速成分、K は拡散係数、q は SPM 排出量を表す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + q \quad (1)$$

大気拡散モデルとは汚染物質排出強度、気象条件から

環境中の汚染物質濃度を推定するものであり、計算方法により解析解モデル、数値解モデルに大別される。解析解モデルとは、汚染物質排出強度、風向風速が空間的、時間的に変化しない等の仮定条件により式(1)を簡略化したものであり、ブルームモデル、パフモデル等がある。計算が容易だが、時間分解能が低い。数値解モデルとは、式(1)を離散化し、直接に数値的に解くものであり、差分モデル等がある。計算量が多いが、時間分解能が高く、複雑地形上の濃度場計算にも対応することができ、解析解モデルに比べて汎用性がある。

小泉ら(2004)は、解析解モデルに属する JEA 線煙源モデルを用い、本研究と同様の手法で SPM 排出量推計モデルを推定している。その再現性は実測 SPM 排出量と近似するものであり、本研究の有効性を示したといえる。しかし、路側 (トラックからの距離: 3m) における濃度場、風速場 (図 3) は局所的な変動が大きく、非定常なものであるため、解析解モデルにより SPM 排出量を推定するには限界があると考えられる。

そこで本研究では、より高精度に SPM 排出量を推定することを目指し、数値解モデルに属する差分モデルを用いることとする。

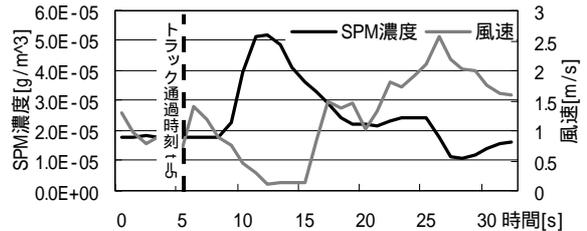


図 3 路側における濃度場・風速場の観測値

### 2-3. 差分モデルによる濃度場推定

式(1)の離散化にはコントロールボリューム法を適用する。コントロールボリューム法とは、計算対象領域を細かい格子に分割し、式(1)の各項を 1 つの格子について積分して対象とする物理量 (SPM 濃度) の保存則を満たそうとするものである。また、式(1)中の時間項 (左辺第 1 項) には陽解法、移流項 (左辺第 2 項, 第 3 項) には風上法、拡散項 (右辺第 1 項, 第 2 項) には中心差分法を適用し離散化を行う。

離散化することで式(2)の差分方程式が得られる。下添字  $j, k$  は座標番号、上添字  $n$  は時間ステップを表す。また、下添字  $j+0.5$  は任意格子点とそれに隣接する格子

$$a_{j,k}^{n+1} C_{j,k}^{n+1} = a_{j+1,k}^n C_{j+1,k}^n + a_{j-1,k}^n C_{j-1,k}^n + a_{j,k+1}^n C_{j,k+1}^n + a_{j,k-1}^n C_{j,k-1}^n + a_{j,k}^n C_{j,k}^n + Q_{j,k}^n \quad (2)$$

$$a_{j+1,k}^n = \max(-u_{j+0.5,k}^n, 0) \Delta y \Delta t + \frac{K_x \Delta y \Delta t}{\Delta x}$$

$$a_{j-1,k}^n = \max(u_{j-0.5,k}^n, 0) \Delta y \Delta t + \frac{K_x \Delta y \Delta t}{\Delta x}$$

$$a_{j,k+1}^n = \max(-v_{j,k+0.5}^n, 0) \Delta x \Delta t + \frac{K_y \Delta x \Delta t}{\Delta y}$$

$$a_{j,k-1}^n = \max(v_{j,k-0.5}^n, 0) \Delta x \Delta t + \frac{K_y \Delta x \Delta t}{\Delta y}$$

$$a_{j,k}^n = \Delta x \Delta y$$

$$a_{j,k}^{n+1} = a_{j+1,k}^n + a_{j-1,k}^n + a_{j,k+1}^n + a_{j,k-1}^n + a_{j,k}^n$$

$$+ (u_{j+0.5,k}^n - u_{j-0.5,k}^n) \Delta y \Delta t + (v_{j,k+0.5}^n - v_{j,k-0.5}^n) \Delta x \Delta t$$

点の境界面を表す座標番号であり、風速成分はこの下添字で表される格子境界面上で定義する。

式(2)の構造を図4に示す。

任意時間ステップ  $n+1$  における任意格子点  $(j,k)$  の SPM 濃度  $C_{j,k}^{n+1}$  は、1つ前の時間ステップにおける  $(j,k)$  の  $C_{j,k}^n$  と、その周辺格子点での  $C_{nb}^n$  ( $nb$  は隣接 neighbor の意味) から推定される。こうして推定された  $C_{j,k}^{n+1}$  は次の時間ステップ  $n+2$  における  $C_{j,k}^{n+2}$  の推定に用いられる。この操作を繰り返すことにより、全時間ステップの SPM 濃度を推定することができる。なお、式(2)中の  $Q$  が求めるべき SPM 排出量であり、排出源位置となる格子点で構築される式(2)で  $Q=0$ 、それ以外で  $Q=0$  となる。

図4 式(2)の構造

計算対象領域における格子と座標番号は、図5のようにアイドリング時、走行時に設定する。双方とも格子点数は12個である。内側に位置する4個の格子点(印)について構築した式(2)を解き、それら4個の格子点の濃度を推定する。計算対象領域の周辺に位置する8個の格子点(印)での SPM 濃度は、計算を行う際に境界条件となるため、濃度測定器(デジタル粉塵計)により測定した実測値を用いる。

#### 2-4. 濃度場からの SPM 排出量推定

2-3. では式(2)による濃度場推定手法について述べたが、式(2)に含まれる SPM 排出量  $Q$  は未知数であるため、 $Q$  を外生的に与える必要がある。そこで  $Q_{min}=0.0001g/s$ 、 $Q_{max}=0.05g/s$  とし、 $0.0001g/s$  刻みで  $Q$  を与え、それぞれの  $Q$  に対して濃度場を推定し、それを仮想濃度場とする。こうして推定される仮想濃度場と実測濃度場を比較し、実測濃度場に最も近似する仮想濃度場が得られるときの  $Q$  を求めるべき SPM 排出量の最適解とする。実測濃度場は全格子点において SPM 濃度を測定することによって得る。最も近似している仮想濃度場は、実測濃度場と比較したときの残差平方和が最小となるものとする。

#### 2-5. 仮想データを用いた濃度場推定例

2-3. で述べた手法で実際に濃度場推定が可能であるかを検証するため、走行時(図5)について仮想データを用いてシミュレーションを行う。トラックは  $t=5s$  に(2,2)、 $t=6s$  に(2,3)に位置するように通過するものとし、その際の SPM 排出量  $Q$  はどちらの格子点においても  $0.001g/s$  とする。境界条件となる SPM 濃度および風速はトラック通過に伴い増加し、その後減少するように設定する。また、格子点間隔は  $x=y=3m$ 、拡散係数は全領域において  $K_x=K_y=1m^2/s$ 、時間間隔は  $t=1s$  である。

その結果を示したものが図6である。実測濃度場(図3)と比較すると、トラック通過に伴う濃度上昇および、その後の濃度減衰の様子は表現できている。

#### 3. SPM 排出量推計モデルの構築

SPM 排出量推計モデルは、交通マイクロシミュレーションに組み込むことを考慮し、速度、加速度を変数とする式(3)を採用する。 $D_i$  はアイドリング時ダミー変数、 $D_d$  は減速時ダミー変数である。

$$\ln(SPM) = \alpha_0 + \alpha_1 V + \alpha_2 A + \alpha_3 D_i + \alpha_4 D_d \quad (3)$$

2-1. の調査実施後、2-4. の手法により推定された SPM 排出量  $Q$  を式(3)中の SPM とし、式(3)を推定する。また、その妥当性を検証するため、表1に示す調査データからも同様に式(3)を推定し、双方のパラメータ、相関、SPM 排出量再現性を比較する。表1に示す調査で得られる

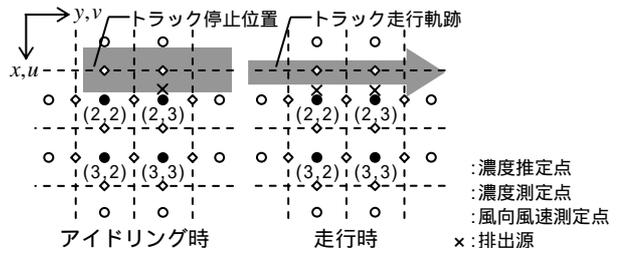


図5 格子と座標番号の設定

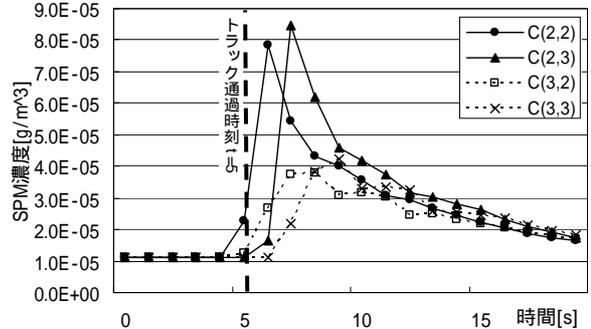


図6 仮想データを用いた濃度場推定結果

表1 車載型機材を用いた調査概要

日時	H14.9.30~10.17
場所	東京都23区, 神奈川県横浜市
車両	いすゞフォワード散水車(2-5の調査車両と同型)
積載量	空載, 半載, 満載
測定項目	SPM排出量, 速度, 加速度, エンジン回転数, 道路勾配
使用データ	9.30(空載)から280サンプルを抽出

表2 SPM 排出量推計モデルの推定結果

0	1	2	3	4	相関	サンプル数
-6.027	0.025	0.082	-0.121	-0.202	0.91	280
(-114.53)	(20.12)	(7.64)	(-2.03)	(-3.76)		

括弧内は t 値

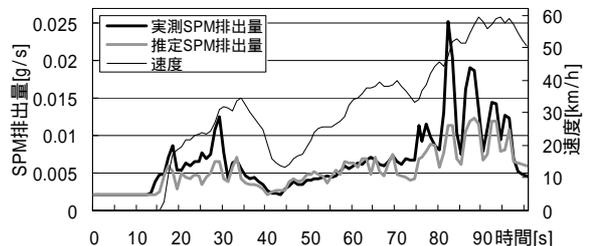


図7 SPM 排出量推計モデルの再現性

SPM 排出量は、マフラー位置に設置した機材(スモークメータ)により高精度に測定されるものであるため、検証用データとして用いることができる。

2-1. の調査は今後実施予定であり、本稿では表1の調査データによってのみ式(3)を推定する。その推定結果を表2に、また、その再現性を図7に示すが、式(3)は十分な再現性を有する SPM 排出量推計モデルといえる。

#### 4. まとめ

本稿では、路側 SPM 濃度から SPM 排出量推計モデルを推定する手法を提案した。今後は 2-1. の路側 SPM 濃度測定調査を実施し、実測データを用いて 2. で述べた SPM 排出量  $Q$  の推定を行い、SPM 排出量推計モデルの推定を試みる。そして、検証用データを用いた推定結果である表2との比較を行う。

課題としては、3次元空間での現象である SPM の移流拡散を2次元として扱っている点、拡散係数を全領域で一定の定数として与えている点、双方の調査で使用した車両の年式が異なることによる SPM 排出量の違いを考慮していない点等が挙げられる。

#### 参考文献

小泉健一・岩倉成志・屋井鉄雄：路側 SPM 濃度計測データによるディーゼル車排出係数モデルの推定，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.59th, No. Disk2, Page4-391, 2004