都市内幹線道路沿線における 大気質予測シミュレーションシステムの構築* (第3報, 交通流モデルとの統合化)

吉川 康雄^{*1}, 國見 均^{*2}, 貴志 泰久^{*3}
香月 伸一^{*3}, 石澤 静雄^{*4}

Numerical Simulation Model for Predicting Air Quality along Urban Main Roads (3rd Report, Incorporation of Traffic Flow Model)

Yasuo YOSHIKAWA, Hitoshi KUNIMI, Yasuhisa KISHI,
Shinichi Katsuki and Shizuo ISHIZAWA

A simulation model for predicting air quality along urban main roads is being studied. The previous reports dealt with the development of atmospheric diffusion model and a photochemical reaction model as well as traffic flow model. The present report describes the incorporation of the atmospheric diffusion model and the traffic flow model, which enables simulation of the effect of traffic parameters on air quality along the main roads. Emission mass from each vehicle is calculated by the traffic flow model using instantaneous velocity and acceleration of the vehicles. Then, the emission data is converted into increase of concentration, and passed into the atmospheric diffusion model for its source term. A case study was conducted using the incorporated model, in which some traffic parameters were studied to show their influence on traffic flow and air quality around the road.

Key Words: Environmental Engineering, Computational Fluid Dynamics, Air Quality, Simulation Model, Traffic Flow, Street Canyon

1. はじめに

大都市圏における大気質の悪化は、重要な環境問題の一つである。大気質の悪化の原因となる排気排出源には、自動車、大規模の工場、中小の工場や事業所、その他が挙げられ、それぞれに対して様々な排気規制が課せられてきている。しかし、このような従来からの努力にもかかわらず、1995年度で、常時監視測定局では2.5%、自動車排出ガス測定局(自排局)では30%が、二酸化窒素の環境基準を満たしていない^{(1), (2)}。

自排局測定値に示される沿道の大気質の悪化は、道路の両側にビルが立ち並ぶ凹型のストリートキャニオン⁽³⁾と呼ばれる空間や高架道路にはさまれた空間等の気流の比較的淀みやすい形状をした地域に顕著である。そして、その発生には、車両からの排気のみならず、

道路周囲空間の幾何的構造や渋滞等の交通現象、さらに気象等、様々な要素が影響していると考えられる。

本研究では、道路の幾何的構造のみならず、交通や光化学反応等、沿道での様々な現象の影響の評価が可能な大気質予測シミュレーションシステムを構築し、沿道大気質の改善方策検討ツールとして供することを目的としている。これまでに、システムの基礎となる成分濃度移流拡散モデルの開発⁽⁴⁾、沿道での光化学反応モデルの開発⁽⁵⁾、またミクロスケールの交通流モデルの開発⁽⁶⁾を行ってきた。

本報では、成分濃度移流拡散モデルと交通流モデルとの統合化を行ない、交通流が大気質に与える影響の予測が可能なモデルを構築したので報告する。従来の沿道大気質のシミュレーション研究では、このような試みは、ほとんどなされていない。

2. 記号

A_{max} : 車両の最大加速度
 C_s : サブグリッドスケールモデル中の定数(式(6))
 c : 追従走行モデル中の定数(式(12))

* 原稿受付 1998年3月13日。

^{*1} 正員、日産自動車(株)技術システム部(☎237-8523 横須賀市夏島町1)。

^{*2} 正員、日産自動車(株)総合研究所。

^{*3} 日産自動車(株)総合研究所。

^{*4} 正員、群馬工業高等専門学校機械工学科(☎371-0845 前橋市鳥羽町580)。

c_i : i 番目の成分の濃度 g : 重力加速度
 K : 成分濃度拡散係数 NO_x : NO_x 排出係数
 m : 追従走行モデル中の定数 (式(12))
 P_r : Prandtl 数 ($=\nu/\kappa$) p : 圧力
 S_c : Schmidt 数 ($=K/\nu$)
 $S_{c'}$: 成分濃度拡散係数モデル中の定数 (式(9))
 S_{c_i} : c_i の生成速度 S_{ij} : 変形速度
 T : 温度 T_0 : 基準温度
 t : 時間 u_i : i 方向速度成分
 V_{max} : 車両の最大速度 V : 車両速度
 X : 車両位置 x_i : i 方向位置座標
 β : 体積膨張率 Δ : 代表格子サイズ
 Δ_i : i 方向格子サイズ
 ΔK : 走行風起因する成分濃度拡散係数の増加分
 Δt : 計算時間ステップ、反応遅れ時間
 δ_{ij} : Kronecker のデルタ κ : 熱拡散係数
 ρ : 密度 ν : 動粘性係数
 ν_{mol} : 分子動粘性係数 ν_T : 乱流動粘性係数
添え字
 L : 先行車 S : 自車

3. シミュレーションモデルの概要

3.1 成分濃度移流拡散モデル

沿道における成分濃度の移流拡散の表現には、既報のモデル⁽⁴⁾を用いた。支配方程式は、以下の連続の式、Boussinesq 近似を用いた運動量保存式、エネルギー保存式および成分濃度移流拡散式である。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \beta (T - T_0) g \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = K \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + S_{c_i} \quad (4)$$

式(4)の成分濃度移流拡散式中の生成速度項には、3.3 節の排出ガスによる成分濃度の発生速度が入る。乱流粘性係数の評価には、以下のサブグリッドスケールモデルを用いた。

$$\nu = \nu_{mol} + \nu_T \quad (5)$$

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 \left(\frac{S_{ij} S_{ij}}{2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (8)$$

成分濃度拡散係数は、ストリートキャニオン内で車両が発生する走行風による拡散の促進を考慮し、

$$K = \frac{\nu}{S_{c'}} + \Delta K \quad (\text{ストリートキャニオン 内側}) \quad (9a)$$

$$\frac{\nu}{S_{c'}} \quad (\text{ストリートキャニオン 外側}) \quad (9b)$$

と与えた⁽⁴⁾。成分濃度拡散係数と熱拡散係数は、

$$P_r \cdot S_c = 1 \quad (10)$$

の関係を仮定した。

3.2 ミクロスケール交通流モデル

幹線道路の交通流の表現には、米国製交通流シミュレータ TRAF-NETSIM⁽⁷⁾ (© 米国連邦道路庁) をベースとし、国内交通への適応を図るために開発した「路上駐車車両影響モデル」を統合化した既報のミクロスケール交通流モデル⁽⁶⁾を用いた。

このモデルは、リンク(車線)、ノード(リンクの端点、通常は交差点)から成る道路ネットワーク上に存在する車両の挙動を一台毎に再現するミクロシミュレータであり、一定時間(1秒)毎にタイムスキャンを行ない、各車両の位置、速度、加速度を更新する。ネットワークの幾何形状、リンクの車線数、ノードの信号現示設定等の細かい条件の入力が可能であり、渋滞改善方策検討に適している。また、車頭間隔、運転車特性などの分布をもつ量は、実測ないし経験から与えられる分布特性をもとに確率統計的手法を用いて各車両に与える。

車両の移動は、前方に先行車がない場合には、式(11)の自由走行モデルで与えられる。

$$\ddot{X}_s(t + \Delta t) = \min \left[\frac{\dot{X}_s(t) - V_{max,s}}{\Delta t}, A_{max} \right] \quad (11)$$

前方に先行車や停止信号等があり自由走行ができない場合には、次式の追従走行モデルを用いる。

$$\ddot{X}_s(t + \Delta t) = \min \left[c \frac{\dot{X}_L(t) - \dot{X}_s(t)}{(X_L(t) - X_s(t))^m}, A_{max} \right] \quad (12)$$

前方に停車車両がある場合には、通行可能な車線有効幅に応じて、隣接車線への「車線変更」、車線をまたいで駐車車両を通過する「割り込み」、自車線内を通行する「並走」の3つの挙動を選択する路上駐車車両

回避モデルを用いる⁽⁶⁾。

3.3 交通流モデルと成分濃度移流拡散モデルとの統合化

幹線道路の交通と沿道の大気質においては、交通は排出ガスによって大気質に影響を与えるが、大気質の変化が交通に与える影響は微小であると考えられる。そこで、交通流モデルと成分濃度移流拡散モデルとの統合化にあたっては、交通流モデルから成分濃度移流拡散モデルへの一方のデータの流れとした。

統合化したシステムの計算およびデータの流れを図1に示す。まず、各時刻における各車両の挙動を管理している交通流モデル中にルーチンを付加し、計算時間ステップ毎に各車両の位置、速度、加速度を出力させる。次に、このデータと、別途用意する車両の速度、加速度に対する排気成分排出係数の原単位表とから、テーブルピックアッププログラムによって、各車両位置における当該時間ステップ中の排気成分排出速度を求める。さらに、移流拡散モデルで用いる計算格子の位置データから、編集プログラムによって、当該時間ステップ中の各計算格子点位置での排気排出速度データを求める。この段階では、交通流モデルの計算時間ステップ毎のデータであるので、これを移流拡散モデルの時間スケールに適した時間間隔に積算し平均化することで、計算格子点毎の排気成分排出速度データが得られる。これをさらに、各格子点が代表するセル空間の体積を計算しこれと除することで、セル空間の排気濃度の増加速度が得られる。これを、式(4)中の成分濃度の生成項として与える。

3.4 数値解法

成分濃度移流拡散モデルの支配方程式(1)~(4)は、移流項には3次精度風上差分を、拡散項および圧力勾配項には2次精度中心差分を、時間項には1次精度の準陰解法を用いて離散化した。収束のための反復計算にはSOR法を用いた。交通流モデルの支配方程式(11)、(12)は、反応遅れ時間を計算時間ステップと等しいとにおいて時間進行させた。

4. ケーススタディ

この大気移流拡散と交通流の統合化モデルを用いてケーススタディを行なった。ここでは、この統合化モデルによって、交通パラメータが交通流およびストリートキャニオン内外の大気質に与える影響の検討が可能であることを示すことを主眼とし、単純化したケースを用いた。

Fig. 1 Calculation and Data Flow of Integrated System of Traffic Flow Model and Atmospheric Advection / Diffusion Model

4.1 ケーススタディの概要

図2に、ケーススタディに用いたストリートキャニオンの様子を示す。計算対象とした領域は、道路方向に200 m、道路と直交する方向に400 m、高さは地上90 mまでとする。幅40 mの道路の両側に幅50 m、高さ30 mのビルが並び、ストリートキャニオンを形成する。ビルの片側には、高さ15 mの低層ビル群を設ける。また、道路と直交する図中上から下方向に、上空で2.0 m/sの一樣風が吹いているとする。

Fig. 2 Layout of Imaginary Street Canyon
Used in the Case Study

Table 1 Parameter Setting Used in the Case Study

Case	In-Flow Traffic vehicle / h	Signal Setting		
		Cycle Length s	Blue Signal	
			Length s	Ratio %
Case_Q0500	500	75	30	40
Case_Q1000	1 000			
Case_Q1500	1 500			
Case_Q2000	2 000			
Case_Q2000SP50			38	50
Case_Q2000SP60			45	60

このストリートキャニオン中の幹線道路の図中左から右に向かう片側2車線のリンクの交通流に着目する。検討対象とする交通パラメータには、交通需要のパラメータとしてこのリンクへの流入交通量を、交通制御のパラメータとして下流側交差点の信号現示設定のうちの青時間比を取り上げる。これらのパラメータを表1の様に变化させる。

このリンクを走行する車両のNOx排出係数には、乗用車について速度のみの関数として整理された原単位表⁽⁸⁾をもとにした以下の実験式を用いた。

$$\text{NOx} = 5.92 \times 10^{-4} + 2.68 \times 10^{-5} V + 4.00 \times 10^{-7} V^2 + 1.76 \times 10^{-8} V^3 \quad (13)$$

4.2 流入交通量の影響

信号現示設定を固定し、流入交通量を500台/時間から2000台/時間まで変化させたCase_Q0500～Case_Q2000の場合の交通流の変化を、図3(a)に示す。同図上段は、着目している信号の赤現示に起因して発生するリンク内の停車車両の位置で表わされた渋滞長を示す。中段は、このリンクを10 m毎の区間に分割し

各区間内の車両の速度を台数、時間にわたって平均して求めた区間平均速度の分布を示す。下段は、各区間内の車両からの窒素酸化物(NOx)排出量を台数、時間にわたって積算し、区間長、時間で除して求めたNOx排出速度の分布を示す。

さらに、このNOx排出速度から求めた道路風下側の高さ30 mにおけるNOx濃度分布を図3(b)に示す。

4.2.1 渋滞長 流入交通量が少ないCase_Q0500、Case_Q1000では渋滞長は共に89 mであるのに対し、Case_Q1500では157 mと増大し、Case_Q2000ではリンク端まで渋滞しさらに上流側まで伸びる。このことから、Case_Q0500～Case_Q2000の信号設定では、交通流はCase_Q1500で臨界状態に近く、Case_Q2000では過飽和状態となっていることが考えられる。

4.2.2 区間平均速度 区間平均速度からも、渋滞の様子が確認できる。Case_Q0500およびCase_Q1000では、リンク中の上流側3/4の部分で約30 km/h以上の平均車速となっており、円滑な交通流であることがわかる。Case_Q1500では、上流側1/2の部分ではCase_Q0500およびCase_Q1000と同様の平均車速分布を示しているが、下流側1/2の部分では平均速度の低下が発生しており、やや渋滞していることがわかる。Case_Q2000では、全域で約5 km/h程度であり、過飽和状態の厳しい渋滞であることがわかる。

4.2.3 NOx排出速度 NOx排出速度は、平均車速と対照的な分布をしている。Case_Q2000では道路全域で相対的に非常に大きいNOx排出速度を示すのに対し、Case_Q0500～Case_Q1500では相対的にかなり小さい値を示している。詳細に見れば、Case_Q0500、Case_Q1000は下流側交差点50 m程度でやや増加を示すのに対し、Case_Q1500では100 m程度から増大するという差はあるが、いずれもCase_Q2000に比べると排出速度はかなり小さい。

4.2.4 NOx濃度分布 道路の上空および風下側におけるNOx濃度は、Case_Q0500～Case_Q1500はほぼ同程度のレベルであるのに対し、Case_Q2000は相対的に非常に高くなっている。これは、NOx排出速度の分布に対応している。詳細に見れば、Case_Q0500～Case_Q1500では、下流側交差点近傍でNOx排出速度が大きくなっており、これに対応して道路上空のNOx濃度も下流側交差点近傍で高くなっている。この濃度分布が、道路に直交して吹く風の主流によって道路にはほぼ平行に輸送されるとともに、拡散によって同心円状にも拡がっている。一方、Case_Q2000では、他ケースに比べ道路全域で大きいNOx排出速度を示しているのに対応し、道路上空のNOx濃度も、全域で

Fig. 3 Effect of In-Flow Traffic on Traffic Flow and Air Quality

Fig. 4 Effect of Signal Split on Traffic Flow and Air Quality

Case_Q0500 ~ Case_Q1500 と比べ高レベルとなっており、風下側にはほぼ平行に輸送されている。

4.2.5 流入交通量の影響の評価 以上の比較から、Case_Q0500 ~ Case_Q2000 の場合においては、流入交通量を 1500 台/時間以上に増加させると、交通流が過飽和状態となり、厳しい渋滞、大きい NOx 排出速度そして風下側における高い NOx 濃度分布を引き起こすことがわかる。

4.3 信号青時間比の影響

4.2節において、Case_Q0500 ~ Case_Q2000 の信号設定の場合、流入台数 2000 台/時間の Case_Q2000 では、過飽和状態となることがわかった。次に、この状況を改善するために、下流側信号設定の内の青時間比を Case_Q2000 の 40% から 60% まで変化させた Case_Q2000SP50、Case_Q2000SP60 の場合の交通流の様子を図 4 (a) に、NOx の濃度分布を図 4 (b) に示す。

4.3.1 渋滞長 青時間比を増加させることによって渋滞長は大幅に減少する。Case_Q2000SP50 で過飽和状態は緩和され、Case_Q2000SP60 では Case_Q1000 とほぼ同程度まで渋滞が解消されることがわかる。

4.3.2 区間平均速度 区間平均車速でも、Case_Q2000SP50 は Case_Q1500 と、Case_Q2000SP60 は Case_Q1000 と、ほぼ同様の分布パターンとなっており、青時間比の増加によって、渋滞が解消され交通流の円滑化が図れることがわかる。

4.3.3 NOx 排出速度 渋滞の解消に対応して、NOx 排出速度も、Case_Q2000SP50 は Case_Q1500 と、Case_Q2000SP60 は Case_Q1000 と、ほぼ同様の分布パターンとなっている。

4.3.4 NOx 濃度分布 道路の上空および風下側における NOx 濃度も、Case_Q2000SP50 は Case_Q1500 と、Case_Q2000SP60 は Case_Q1000 と、ほぼ同様の分布パターンとなっており、青時間比の増加によって、大気質の改善が図れることを示している。

4.3.5 信号青時間比の影響の評価 以上の比較から、このケースにおいては、流入交通量が 2000 台/時間の場合でも、青時間比を 50% 以上とすることで、過飽和状態は緩和され、渋滞の解消、NOx 排出速度の低減そして風下側における NOx 濃度分布の低減が図れることがわかる。

4.4 ケーススタディのまとめ

統合化モデルによって、交通パラメータが幹線道路の交通流および沿道の大気質に与える影響の予測が可能であることを示した。これまでに、構成要素である交通流モデルおよび沿道大気質モデルは、それぞれ、実際の道路・沿道の複雑な場における交通流および大

気質の定量的な予測が可能であることを報告している。今回のケーススタディの結果から、この統合化モデルによって、実際の場における交通と大気質の関係の評価が可能であると考えられる。

5. おわりに

道路の幾何的構造のみならず、交通やまた光化学反応等、様々な現象の影響の評価が可能な沿道大気質予測シミュレーションシステムの構築の一環として、幹線道路の交通流を予測する交通流モデルと成分濃度移流拡散モデルとの統合化を行なった。統合にあたっては、交通流モデルによって計算される各車両の走行状態から排気排出量のデータを生成し、これを移流拡散モデルの生成項に変換して与えることとした。

統合化モデルを用いて、ケーススタディを行ない、流入交通量、信号青時間比という交通パラメータが道路上の交通流および沿道の大気質に与える影響を検討した。その結果、交通流の過飽和への遷移やその際の大気質の悪化等が予測できた。このケーススタディから、統合化モデルによって、交通パラメータが幹線道路の交通流および沿道の大気質に与える影響の予測が可能であることを示した。

今回のケーススタディは、比較的単純な交通流およびストリートキャニオン形状を用いたが、既報⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾に示すように、実際の道路上や沿道の状況を用いた計算も可能である。また、今回は気流、交通流とも定常条件に限定したが、非定常現象の予測も可能である。例えば、朝夕の交通流や気流が過渡的に変化する状況下における大気質の推移等の予測も可能である。

文 献

- (1) 環境庁大気保全局大気規制課、平成 7 年度一般環境大気測定局測定結果報告、(1996)、
- (2) 環境庁大気保全局自動車環境対策第二課、平成 7 年度自動車排出ガス測定局測定結果報告、(1996)
- (3) Johnson, W. B., Ludwig, F. L., Dabberdt, W. F., Allen, R. J., An Urban Diffusion Simulation Model for Carbon Monoxide, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23-6 (1973), 490-498
- (4) 吉川・國見・石澤、都市内幹線道路沿線における大気質予測シミュレーションシステムの構築 (第 1 報 大気拡散モデルの開発)、日本機械学会論文集、(B編)、63-611 (1997)、2507-2514
- (5) 吉川・國見・石澤、都市内幹線道路沿線における大気質予測シミュレーションシステムの構築 (第

- 2 報 光化学反応モデルの開発)、日本機械学会
論文集、(B編)、64-618 (1998)、640-647
- (6) 吉川・森田・香月・羽藤・貴志、市街地交通予測
のためのマイクロ交通流シミュレータの構築
(TRAF-NETSIM の国内交通への適用性の検討お
よび路上駐車影響モデルの開発)、日本機械学会
論文集、(B編)、63-610 (1997)、2252-2258
- (7) Rathi, A. K. and Santiago, A. J., Urban Network
Simulation : TRAF-NETSIM Program,
Transportation Engineering、116、(1992)、734-743
- (8) 環境庁大気保全局自動車公害課、実走行モードに
おける自動車排気ガスの原単位について、(1994)
-