

37. 二階建て構造等の複雑道路空間からの大気拡散に関する研究

－数値モデルとプリームモデルの比較－

A Study of Air Pollutant Dispersion from Roadways with Complex Structure

－A Comparison with Numerical and Gaussian Plume Model－

東海林孝幸*、北田敏廣*

Takayuki TOKAIRIN*, Toshihiro KITADA*

ABSTRACT ; A two-dimensional numerical simulation for wind and concentration field near roadways was carried out using a $k-\varepsilon$ turbulence model(CFX4). The roadways often consist of a double-decked structure with and without fences for sound isolation. This paper numerically investigated the effects of these complex road structures on ambient air quality. Validity of commonly used plume model for environment impact assessment was checked by comparing with our numerical simulations.

KEYWORDS ; CFD、プリームモデル、沿道環境、大気拡散

1. はじめに

大都市とその近傍では複雑な空間構造が形成され、そのことが沿道大気環境に大きな影響を与えている。複雑道路構造が沿道環境に与える影響を評価し、それを軽減する空間デザインが必要と考えられる。本研究では第一ステップとして鉛直面内の2次元構造を想定し大気流れと大気拡散のシミュレーションを行なった。二階建道路構造を含め、いくつかの道路断面を想定しフェンスの有無による影響を評価した。さらに、正規分布型プリーム式による結果と $k-\varepsilon$ モデル(CFX4)によって得られた流れ場・拡散場の下での計算濃度場を比較・検討した。

2. 計算方法

計算は2つの方法で行なった。一つは数値流体力学(CFD)による流れ場、濃度場、もう一つはプリームモデルである。大気安定度は中立とした。

2.1 数値(CFD)モデル

流れ場および拡散場は、標準 $k-\varepsilon$ モデルにより計算し、それらの場の下で大気拡散を数値シミュレーションした。計算機コードはCFX4¹⁾を用いている。方程式系を以下に示す。計算は空間2次元の定常状態を想定した。

2.1.1 基礎方程式系

$$\text{連続の式} : \quad \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式} : \quad U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

$$\text{汚染物質の拡散方程式} : \quad \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j C - \rho \cdot \Gamma_t \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = S \quad (3)$$

$$k \text{ 方程式} : \quad U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{ここに } P \text{ はシアーによる生成項} : \quad P = \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\text{乱れの消散速度 } \varepsilon \text{ 方程式} : \quad U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

ここに $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_\mu=0.09$ を用いた。

*豊橋技術科学大学エコロジー工学系 Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580, Japan

渦動粘性係数 ν_t :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

さらにスカラー量に対する $\Gamma_t = \nu_t$ と仮定した。

2.1.1 境界条件

境界条件は以下のである。

(i) 流入面

速度 :

$$U_{in}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (7)$$

ここに、 κ 、 u_* 、 z_0 はそれぞれカルマン定数(=0.4)、摩擦速度(m/s)、表面粗度(m)である。
乱れの運動エネルギー k : 入口速度の平均値として

$$k_{in} = 0.02 \overline{U_{in}}^2 \quad (8)$$

乱れの消散速度 ε :

$$\varepsilon_{in} = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{\kappa z} \quad (9)$$

(ii) 地面および構造物表面

速度 : 地表面、構造物表面で速度は0の滑りなし壁とする。

$$U_{wall} = W_{wall} = 0.0 \quad (10)$$

乱れの運動エネルギー k :

$$k_{wall} = \frac{\tau}{\sqrt{C_\mu} \cdot \rho} \quad (11)$$

ここに τ は壁面でのせん断応力である。

乱れの消散速度 ε :

$$\varepsilon_{wall} = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{\kappa z_n} \quad (12)$$

ここに z_n は壁面から一番近いグリッドまでの距離を表す。

(iii) 流出面および上端

流れ場の流出面と上端において U 、 k 、 ε 、および C についてそれぞれの面への垂直勾配は0とした。

$$\frac{\partial U_i}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \quad (i=1,2) \quad (13)$$

2.2 プリュームモデル

プリューム式(式(14))の排出強度 $Q(g/s)$ を $q \, dy$ (q : 線源強度 $g/m \cdot s$) で置き換え、 y 方向について $-\infty$ から $+\infty$ まです積分することにより得られる式 (15) を用いた。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left\{ -\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (14)$$

$$C(x, z) = \frac{q}{\sqrt{2\pi} u \sigma_z} \left[\exp \left\{ -\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (15)$$

このプリューム式中の拡散幅 (σ_z) には以下の式を用いた²⁾。

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} + 0.31L^{0.83} \quad (16)$$

ここに σ_{z_0} は鉛直方向の初期拡散幅 (m) であり、フェンスの有無により次の値が与えられている。

- ・ フェンスなしの場合 : $\sigma_{z_0} = 1.5$
- ・ フェンスがある場合 : $\sigma_{z_0} = 4.0$

また L は道路端からの距離(m)を表し、次式で与えられている。

- ・ $L = x - W/2$

ここに、 x は道路中央を原点とした風下距離、 W は道路幅を表す。ただし $x < W/2$ の場合、 $\sigma_z = \sigma_{z_0}$ とする。

3. シミュレーション

計算領域は水平方向に 180m、鉛直方向に 60m を取り(図 1)、この領域中に図 2 に示す道路構造物を配置した。

- ケース 0：遮音壁なしの平面道路
- ケース 1：平面道路両側にフェンス(遮音壁)を設置してあるもの(図 2(a))
- ケース 2：上空に高架道路のような構造物を配置したもの(図 2(b))
- ケース 3：高架道路両側にフェンスを設置したもの(図 2(c))

図 1 に例示するように、平面道路幅は 30m、フェンス高さは 6m とした。また、数値モデルの場合には発生源は道路上に道路幅全体にあわせて与えた。一方、プリュームモデルでは、フェンスのある場合、道路中央でフェンスより 1m 高いところに y 方向に無限に続く線源を仮定した。

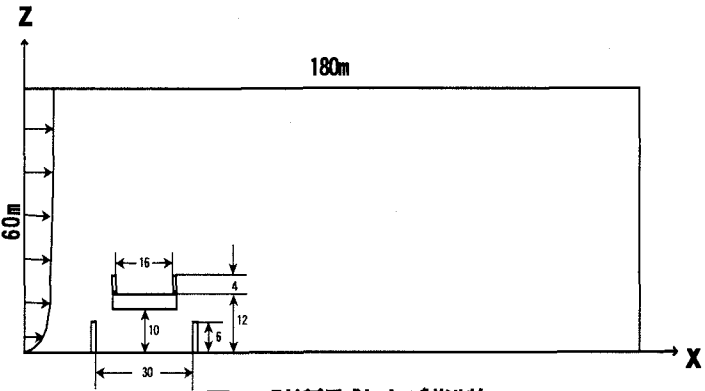


図 1 計算領域および構造物

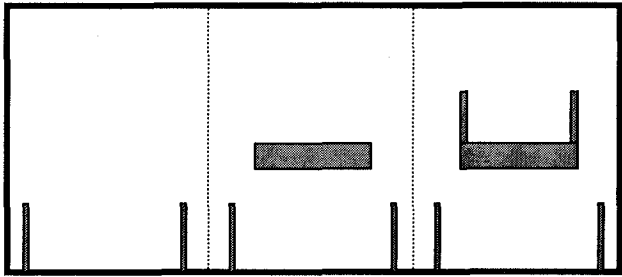


図 2 想定した道路構造

4. 計算結果および考察

風速は入口上端で 5m/s、2m/s の 2 ケースを考えた。濃度場については、汚染物質の排出強度 $q(\text{mg/s})$ を 1.0 と仮定した。プリューム式の計算における風速 U は、数値モデルで得た発生源位置の速度場の平均値を使用した。ただし、平均速度が 1 m/s 以下の場合、プリュームモデルでの比較は行っていない。以下に各ケースについて風速場、濃度場の計算結果を示す。

4.1 風速場

以下に CFX4 によって得たベクトル風速場(ケース 1、2、3)を図示する。

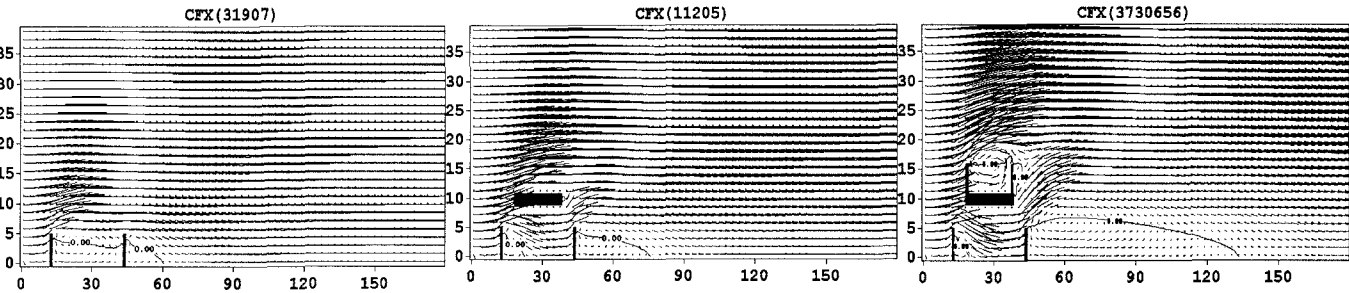


図 3(a) ケース 1

図 3(b) ケース 2

図 3(c) ケース 3

図 3 中の等高線“0”は水平風の風向が逆転する境界を表す。ケース 1 (図 3(a)) はフェンスに挟まれた道路空間およびフェンスの下流端側後方に上空の流れとは逆方向の循環流が形成されている(等高線“0”参照)。ケース 2 (図 3 (b)) は道路端から下流部については風下側フェンスによる循環流がケース 1 の約 2 倍の大きさとなり、道路上空スラブの有無が道路外の風速場にも影響を与えていることがわかる。ケース 3 (図 3(c)) ではさらに風下側フェンス後方の循環流の大きさが、ケース 1、2 と比べ広範囲にわたっている。また、1 階側道路のフェンスの間から上方への“吹き出し”も強く、下流側流れへの影響範囲を広げている。

4.2 濃度場

プリュームモデルと数値モデルの濃度鉛直分布図を示す。風下側の道路端から下流方向数地点で比較した。

4.2.1 平面道路(ケース 0)

図 4 は入口上端速度が 5m/s、道路上 1m 高さの平均風速は 2.4m/s、図 5 は入口上端速度が 2m/s、道路上 1m 高さの平均風速は 1.1m/s の場合の濃度の鉛直分布である。

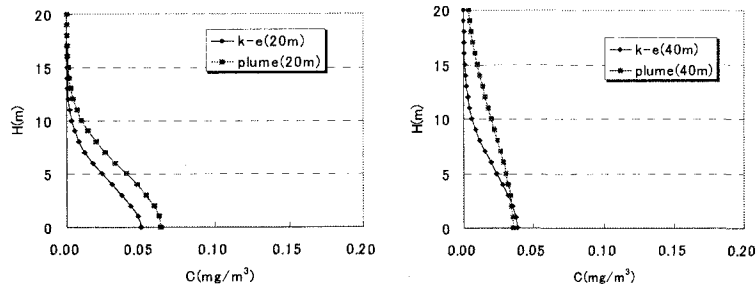


図4 (a) 濃度鉛直分布 (風下距離 20m) (b) 濃度鉛直分布 (風下距離 40m)

図より道路端からの距離が大きくなるに従い、地上付近の濃度は両モデルともよく一致している (図4(a)(b))。下流 40m 以降の各点でも同様である。また道路近傍から 20m 付近まではプルームモデルが数値モデルより濃度を高く予測している。次に入口上端速度が 2m/s の場合 (図5(a),(b),(c)) を以下に示す。

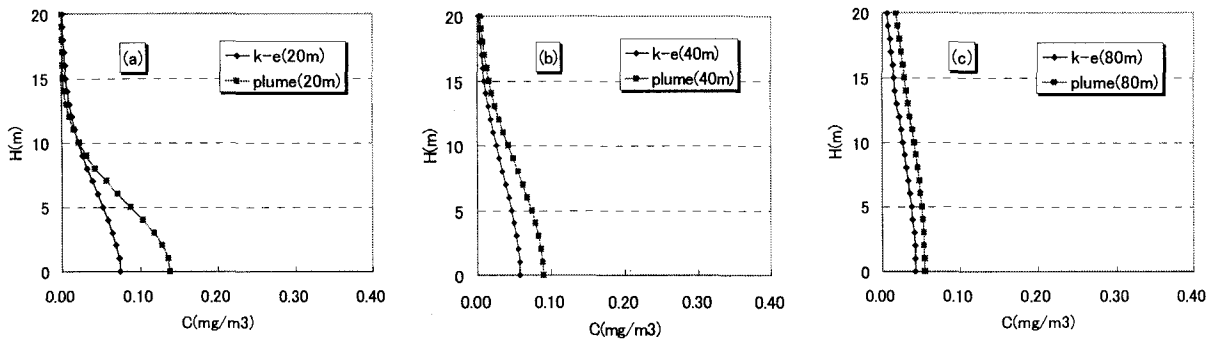


図5 (a)濃度鉛直分布 (20m) (b)濃度鉛直分布 (40m) (c)濃度鉛直分布 (80m)

プルームモデルが道路端風下 40m 付近まで高く予測する。80m地点からは両モデルは比較的良く一致している。

4.2.2 平面道路と遮音壁(ケース1)

図6は下流側フェンスから風下方向の何点かでの濃度の鉛直分布の比較を示している。

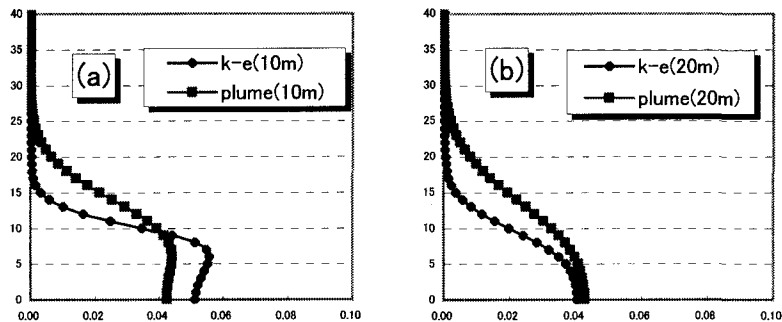


図6 濃度の鉛直分布 (a)遮音壁下流 10m (b)遮音壁下流 20m

図3(a)の風速場よりフェンスによって作り出される特有の流れの構造が影響して下流 10m 付近までは地表付近の濃度が高くなる (図6(a))。遮音壁後方の循環流の影響がなくなる 20m 付近(図6(b))からはフェンスの影響は相対的に小さくなり、プルームと数値モデルの結果はほぼ一致する。

4.2.3 遮音壁を持つ道路上空に屋根様のスラブを持つ構造 (ケース2)

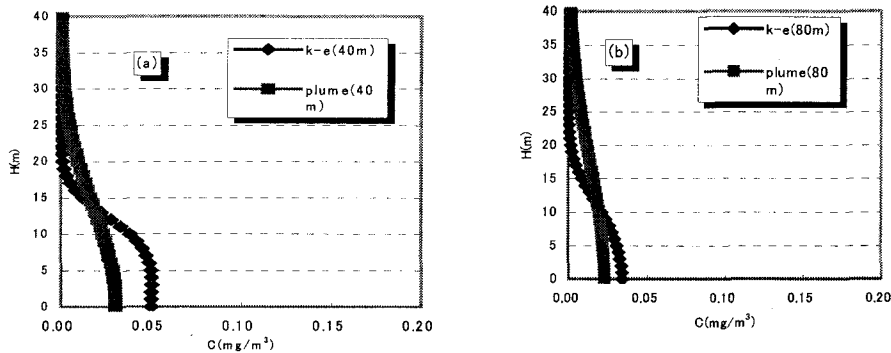


図7 濃度の鉛直分布 (a)遮音壁下流 40m

(b)遮音壁下流 80m

図7はケース2についての数値モデルとプルームモデルの比較である。ケース1と異なり、下流方向80mに渡って数値モデルがプルームモデルを超える地表濃度を予測する(図7(b))。道路構造物背後の循環流内への汚染物質の取り込みと道路構造物を乗り越えた流れの下降流がこのような結果をもたらすと考えられる。

4.2.4 遮音壁つきの2階構造道路(ケース3)

図8は、ケース3における鉛直濃度分布の比較を表す。風下方向100mにわたって数値モデルのほうが高い値を示す。フェンス背後の循環流および地表への下降流(ダウンドラフト)が数値モデルの相対的な高濃度化をもたらしている。

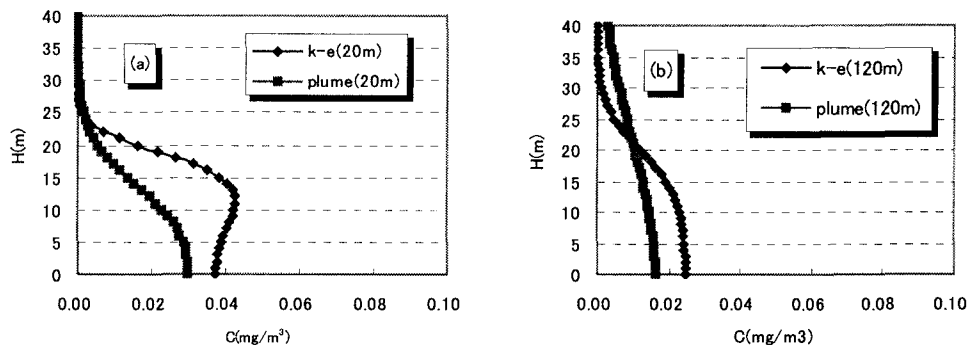


図8 濃度の鉛直分布 (a) 遮音壁下流 20m

(b) 遮音壁下流 120m

4.3 各ケースの濃度分布比較

前節までは数値モデルとプルームモデルの比較を行なった。構造物の存在は、第一義的に地表付近の平均風速を減速する効果がある(図9(a)(b)参照)。一般的にこの平均風速の減速は汚染物質の流下方向への拡散速度を遅らせ、濃度の上昇をもたらすと推測できる。しかしながら、本節で示すように構造物が作る空間構造によっては水平風の減速が特定の場所での上昇流の増加に転換され、それが汚染物質の上方輸送を促進して地表濃度を軽減する可能性も考えられる。以上を前提として、本節では道路空間構造が拡散に与える影響を詳細に見るために数値モデルで得た結果を比較した。

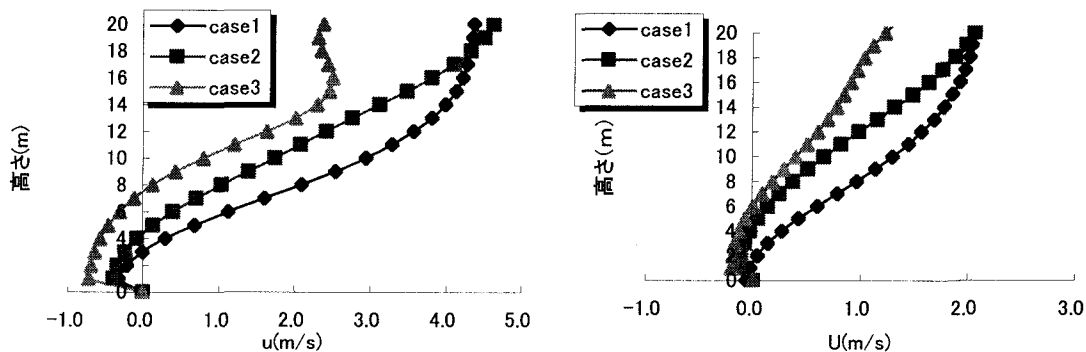


図9 (a) 入口上端速度 5m/s

(b) 入口上端速度 2m/s

図10は入口上端流速が5m/s、図11は2m/sの場合の数値モデルによって得た下流方向の幾つかの地点での濃度の鉛直分布を3ケースについてプロットしたものである。

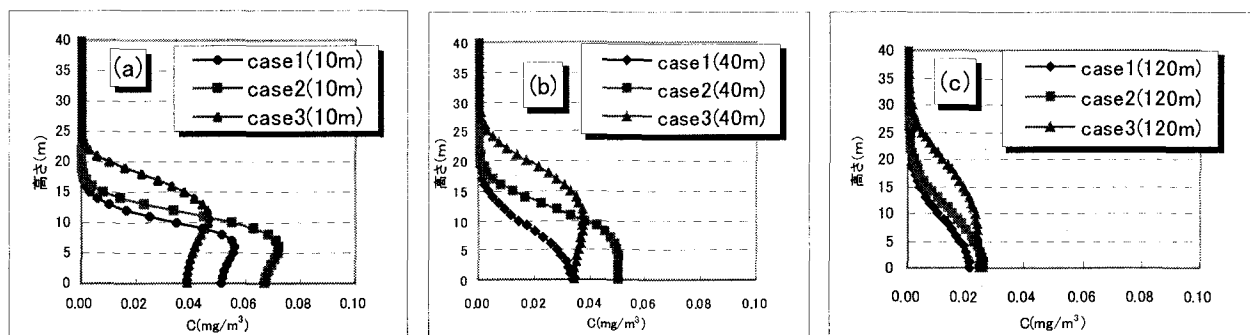


図 10 (a) 遮音壁下流 10m (b) 遮音壁下流 20m (c) 遮音壁下流 120m

図 10 より風下方向 40m(図 10(b))付近まで地表濃度がケース 2 場合に最も高く、続いてケース 1、そしてケース 3 で最も低いことである。図 10 は次のことを示唆している。すなわちケース 1 とケース 2 の比較について、ケース 2 のほうが高濃度を示すのは道路空間上のスラブの存在により平均風速が減速すると同時に、スラブが薄くスラブ上面の上空を通過した水平風が循環流の高さ方向への発展を抑えていることによると考えられる。またケース 3 の場合、平均風速は三つのケースの中でもっとも遅く(図 9 参照)、したがってもっとも高濃度になるはずであるが、二階部分のフェンス背後の低圧部に吹き込む形で平面道路空間風下部からの上昇流が強化され、汚染物質の上方への輸送が促進されたことを意味する。

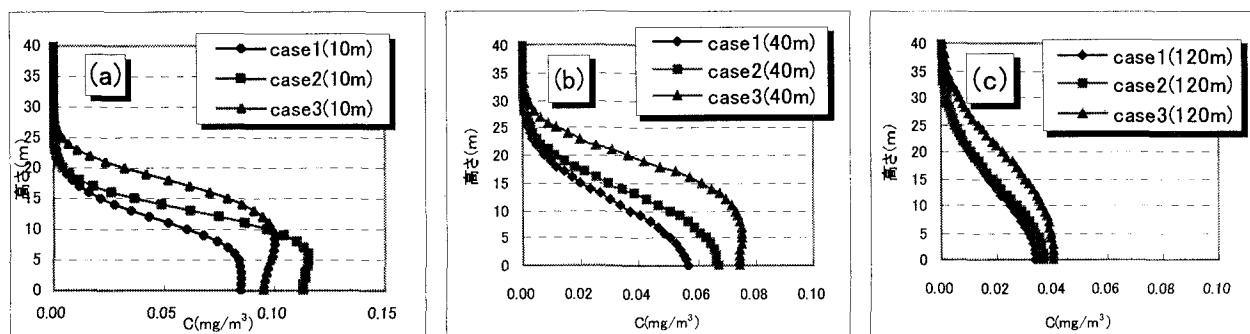


図 11 (a) 遮音壁下流 10m (b) 遮音壁下流 40m (c) 遮音壁下流 120m

図 11 は入口上端風速が 2m/s の場合を示しているが、各ケースの比較で 40m 付近(図 11 (b))でケース 3 が他のケースよりも高い値を示している。弱風のために鉛直上方への輸送が小さくなりかつ、図 9 (b) に示されるように構造物背後の平均流も小さいために濃度が高くなるものと考えられる。

5. 結論

二層構造など、いくつかの道路構造を想定し、これが流れ場、乱れ場に与える影響を CFD により検討し、道路からの大気拡散に与える影響を調べた。また、このような場合常用されるプリュームモデルと比較する形で数値モデルによる結果の特徴を検討した。モデル間の比較ではあるが以下に示す結果が得られた。

(i) フェンスを持つ平面道路(ケース 1): 地上付近に限りフェンス近傍を除いて比較的両モデルの結果は一致した。風下側のフェンス背後に循環流が生じ、道路のごく近くではプリュームモデルに比べて高い地表濃度をもたらすが、少し風下でこの違いは解消される。

(ii) フェンスを持つ平面道路上空にスラブが存在する場合(ケース 2): フェンスだけの場合(ケース 1)に比べて構造物の地上高さが倍になり道路風下側の循環流は強化される。したがって、道路風下側で流下方向の平均流は減速し、道路から排出された汚染物質の輸送も遅くなって濃度が高くなる。循環流の形成は、道路風下方向での上層から地表方向の沈降流(ダウンドラフト)の存在を意味し、この面でも汚染物質の上方への拡散が阻害される。プリュームモデルはケース 2 の場合でも数値モデルに比べて地表付近の濃度を低く予測する結果となっている。

(iii) 二層構造の道路の二階部分にもフェンスがある場合(ケース 3): 道路構造物の高さはさらに高くなり、道路風下側の循環流は高さも長さもケース 2 に比べてはるかに大きくなる。したがって、流下方向への平均流の減速もケース 2 よりも大きくなり、このこと自体は汚染物質の風下方向輸送速度を遅らせて沿道濃度を上昇させる原因となるはずであるが、同時に、鉛直方向への輸送が強化されて高度方向への拡散が増すため、地表面付近の濃度は逆にケース 2 よりも低くなり得ることが示された。風のシアを完全には表現できないプリュームモデルは、数値モデルよりも低い値を予測した。

(参考文献)

- 1) AEA Technology: CFX4-2 Solver manual, AEA Technology (1997)
- 2) (財)道路環境研究所編: 道路環境影響評価の技術手法 第 2 巻, (財)道路環境研究所 (2000)