

9. ACF(Activated Carbon Fiber)装着フェンスによる道路空間構造と 沿道の NO_x 除去効率に関する研究

Removal of Ambient Air Pollution by Activated Carbon Fiber (ACF) installed in flow-through fence: Numerical Evaluation of its Performance in Realistic 3D Space

北田敏廣^{*}、長野 誠^{*}、下原孝章^{**}、市川 陽一[#]、神崎 隆男[#]

Toshihiro KITADA^{*}, Makoto NAGANO^{*}, Takaaki SHIMOHARA^{**}, Yoichi ICHIKAWA[#], Takao KANZAKI[#]

ABSTRACT ; Mechanism of NO_x removal by porous fences filled inside with activated carbon fiber (ACF) was numerically investigated in detail. It was found: (1) NO_x removal efficiency is highly dependent on flow structure formed by the fences. For example, ACF fence on the upstream side is more effective than that on the downstream side, because a circulating flow over the road space tends to form high concentration zone close to the ACF fence on the upstream side, the pollutants which can be readily removed by the fence. (2) The pollutants are removed both inside and on the ACF fences.

KEYWORDS ; Roadside environment, Activated carbon fiber, NO_x, Natural wind, Flow-through fence

キーワード : 沿道環境浄化、自然風利用、高活性炭素繊維、フロースルーフェンス

1. はじめに

交通量の多い道路沿道の大気環境の劣悪なことから、二酸化窒素 (NO₂) を酸化チタン塗布のフェンスによる酸化除去や土壌層を通して除去する方法が研究されているが、これらの試みには、汚染空気と浄化媒体 (例えば酸化チタン塗布フェンス) の接触効率が悪いこと、強制採気して接触させる場合 (例えば、土壌層を通す) は採気のためのエネルギー消費、巨額のランニングコストがネックであることなどの問題がある。本研究は ACF が高い浄化能力を持つことと繊維状であることを利用し、ACF を装着したフロースルーフェンスを自然風により駆動する汚染物質除去装置として道路上の汚染大気を浄化するものであり、これを数値シミュレーションにより性能評価を行ったものである。

本研究は道路空間上の汚染大気を自然の流れにより道路沿いに設置した ACF フェンスを通過させ浄化するものである。先の研究によるシミュレーション結果からは、ACF フェンスは、除去作用のないフェンスと比較して、フェンスの 10m 下流において 20-50%の濃度低減^{1,2,3)}が示された。しかし、実験結果から得た ACF の流れに対する抵抗特性は極めて大きいと考えられ、それをモデル化したこのシミュレーションにより得られた結果についても、フェンスを通過する流速は遅く、通過する流量は僅かであるといえる。本報告では、ACF フェンスを通過する流量が僅かであると考えられるわりには良好な除去作用を示したことに関連して、ACF フェンス構造による除去のメカニズムについて考察した。

2. 基礎方程式系

ACF を装着したフロースルーフェンスを設置した道路沿道領域を対象に、3次元空間での流れと NO_x を想定した汚染物質濃度分布の検討を行った。詳細な支配方程式系については、これまでの地球環境シンポジウムで発表した⁴⁾ので、ここでは本報の議論で部分のみ以下に示す。

^{*}豊橋技術科学大学 エコロジー工学系 Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan; ^{**}福岡県保健環境研究所 環境科学部大気課 Atmospheric Air Division, Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences, Japan; [#]電力中央研究所環境科学研究所 Central Research Institute for Electric Power Industry, Japan

Momentum equation :

$$K_{jk} U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t K_{jk} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \right) + B_i \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

where drag by the porous media :

$$B_i = - \gamma R_c \cdot U_i \quad (2)$$

Diffusion equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_{ij} U_j C - \rho \Gamma_i K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = - \gamma k \rho C \quad (3)$$

Eddy diffusivity :

$$\Gamma_i \cong \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Parameters :

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \text{and} \quad C_\mu = 0.09 \quad (5)$$

ここに、 γ は体積空隙率を表わし、微小なセル内で流れが通過できる空隙の容積を表わす。ACF の密度は $1.7 \sim 2.2 \text{ g cm}^{-3}$ 程度であり、これを 1.7 g cm^{-3} と仮定するならば、ACF の充填密度 0.066 g cm^{-3} に対して、 γ は $0.96 (\cong 1 - 0.066/1.7)$ 程度となる。本研究では、 $\gamma = 0.9 \sim 0.95$ と仮定した。式(1)、(3)の K_{ij} は対象行列であり、多孔質媒体内での流れの方向性を規定するものであるが、本研究ではいずれの方向にも同じ重みである単位行列を仮定した。 $k-\varepsilon$ モデルのパラメーター値としては標準的なもの(式(5))を用いた。

3. ACF 充填層による NOx 除去反応速度係数および流れに対する抵抗係数

ACFによる環境大気中の窒素酸化物除去特性^{4,5)}に関して、一次反応を仮定し、その速度係数を定めた⁶⁾。 k 値は $2.3 \sim 6.2 \text{ s}^{-1}$ 程度の値となり、平均値は 4 s^{-1} であった。本研究では、この平均値 $k=4 \text{ s}^{-1}$ を用いた。

ACFによる流れに対する抵抗は(1)式中の B_i であるが、この B_i を(2)式のように表わした。一般に多孔質体を流れが通過するときの抵抗は(6)式で表わされる⁷⁾。

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho L} = \alpha \nu V + \beta V^2 \quad (6)$$

ここに、 p_1, p_2 は厚さ L の多孔質層を流れが通過する前後の圧力を表わす。また、 V は充填層の断面平均通過流速、 ν は空気の分子粘性係数、 α, β は係数である。実験の結果、現在の ACF 充填条件に対して、(6)式の係数は次のように決めた。

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho L} = R_c V \quad \text{with} \quad \rho R_c \equiv \rho \alpha \nu \cong 3700 \text{ (kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}) \quad (7)$$

5. 計算条件

これまで、筆者らは道路に沿って設置した ACF 充填のフロースルーフェンスによる NOx 除去効率を検討してきた。これらのフェンスによる環境濃度の削減率は、風下道路端から 10m の地点で 20 - 50% と高効率であった。しかし、ACF 充填フェンスによる流れに対する抵抗はかなり大きく、 40 cm s^{-1} 程度の風速に対してフェンス内部の通過流速は 1 cm s^{-1} 程度と大きくはない。にもかかわらず、上に述べた高効率の濃度削減

の得られるのはなぜか、その機構を検討した。

5.1 計算領域

図1に計算領域の設定を記す。図1のように、風上側境界から10 mの位置に幅10 mの道路を設置し、その両側に高さ4 mのフェンスを設置する。汚染物質は、一様な面源として、道路面から排出されると仮定した。

図2は、計算のための格子点網の概略を示す。ACFフェンスの厚味は10 cmであり、数値計算では、この厚味を水平方向に5分割して、ポーラスフェンス内の流れ、拡散係数、濃度場を計算している。格子長はフェンスから風下方向に遠ざかるにしたがって粗くし、最長は1 mである。また、高さ方向には、地面からフェンスの高さ(4 m)を越えるところまで、ほぼ20 cmの格子長とし、それより上空ではやはり高くなるにしたがって格子長を大きくし、最大で1 mとしている。

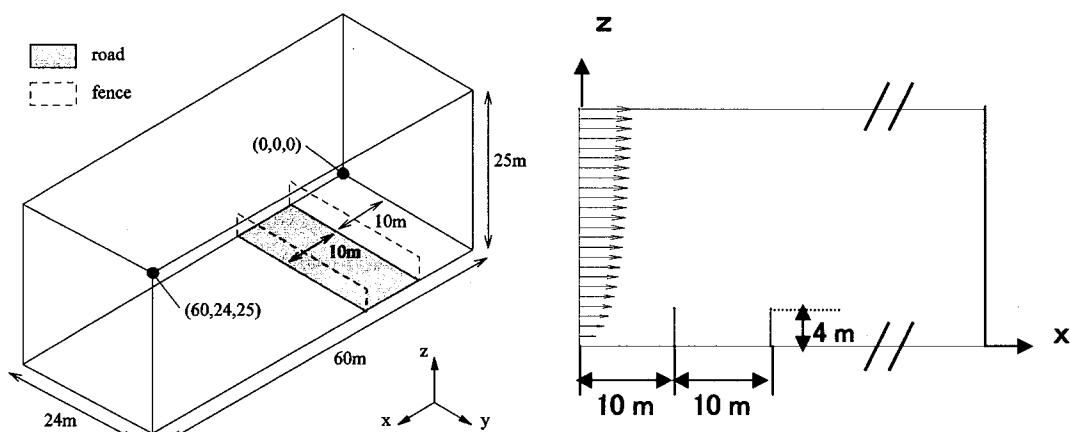


Fig. 1 計算領域。左：3次元空間。右：X-Z断面。風上側の領域端から10 mの位置に幅10 mの道路を設置。高さ4 m（標準）のフェンスを道路両側に隙間なく置く。

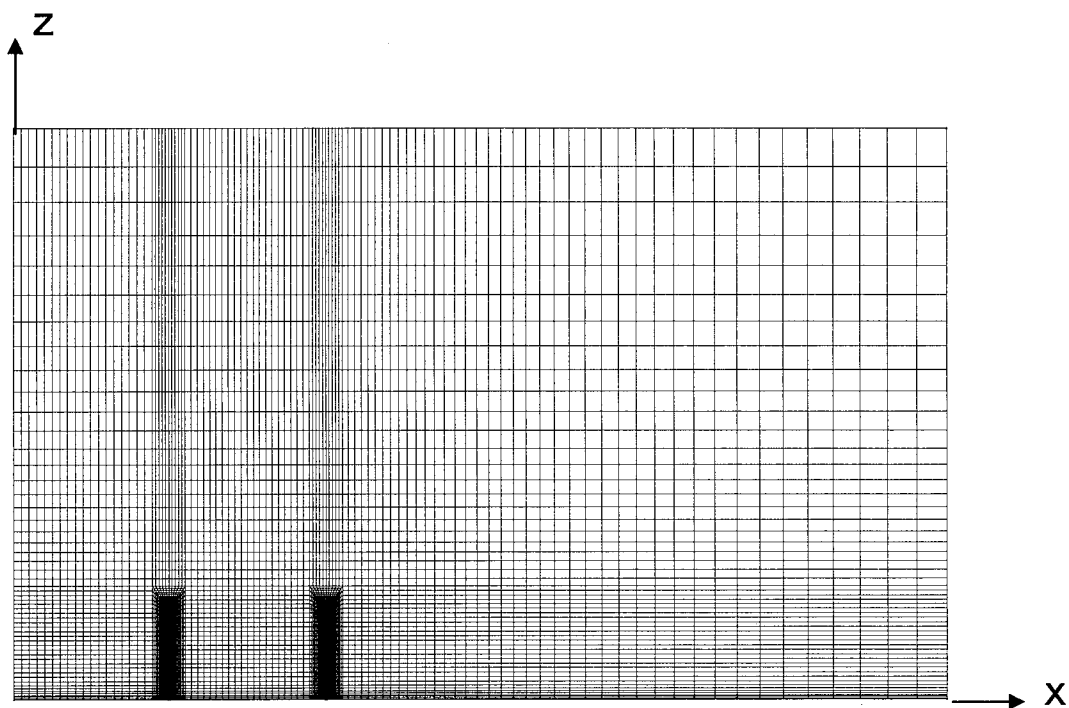


Fig. 2. X-Z断面内の格子点網。フェンスのX方向厚味を5分割（格子長2 cm）、高さ方向（Z）にはほぼ20 cmの格子長としている。

5.2 拡散係数の場

図1, 2に示すように、この計算領域内には、接地境界層内の乱流と考えられる大気部分と、ポーラスフェンス内の空気のように分子粘性が大きな意味を持つ部分が共存する。接地境界層では、図1の右パネルに示すように風上境界での流入風速を対数則で与え、領域内でも基本的にこれが維持されるような状況設定が必要である。一方、フェンスの内部は分子拡散が重要な役割を果たす部分と考えなければならない。これらを満足させるために、計算ではフェンスの外部領域では、乱流拡散係数(渦動粘性係数)の最小値を約 $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と設定し、厚さ 10 cm のフェンス内では最小値が分子拡散係数につながるように設定した。なお、実際の計算の過程では、フェンス内の拡散係数の最小値は分子拡散係数の数倍にあたる $8.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度となった。

6. 計算結果

風上側、風下側、フェンスの表面、内部など、道路両側の ACF フェンスのどの部分で NO_x の効果的な除去が起きているのかを調べるために、フェンス内の ACF 活性をシステマティックにオン・オフし検討した。

6.1 計算ケース

先述のように風上側、風下側のフェンスはいずれも厚さ 10 cm であり、計算上、それぞれが5分割されている。したがって、フェンスは厚さ 2 cm の層、5層分からなる。この5層の ACF 層について、 NO_x 除去の反応活性の有無を図3のように場合分けした。Case 1 が5層全部に活性を付与する場合で基準となる場合である。Case 2 はフェンスの表面にだけ活性がある場合、Case 3, 4 は逆にフェンスの内部にだけ活性を与える場合 Case 5, 6 はフェンスのいずれかの表面にだけ活性を考える場合に相当する。さらに、フェンスは道路の両側に設置されているため、それぞれ風上側、風下側のフェンスにのみ活性を仮定する場合、両側のフェンスに活性を与える場合(標準)とに分類した。

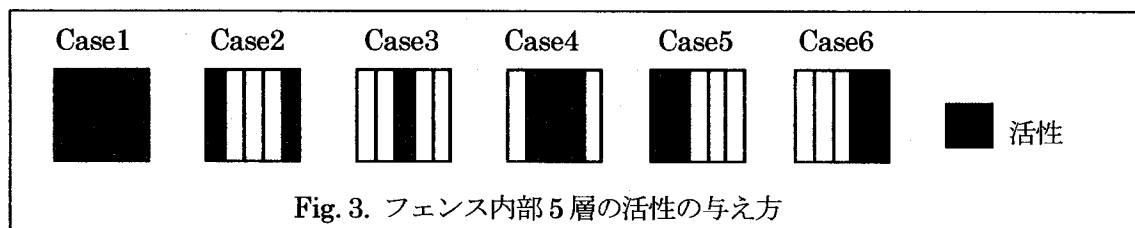


Fig. 3. フェンス内部5層の活性の与え方

6.2 流れ場および濃度場

ACF フェンスは通風性を持つが、このフェンス周辺の流線図を図4に示す。通風性フェンスであるため、道路空間内の循環流は固体壁の場合に比べて相対的に弱い。

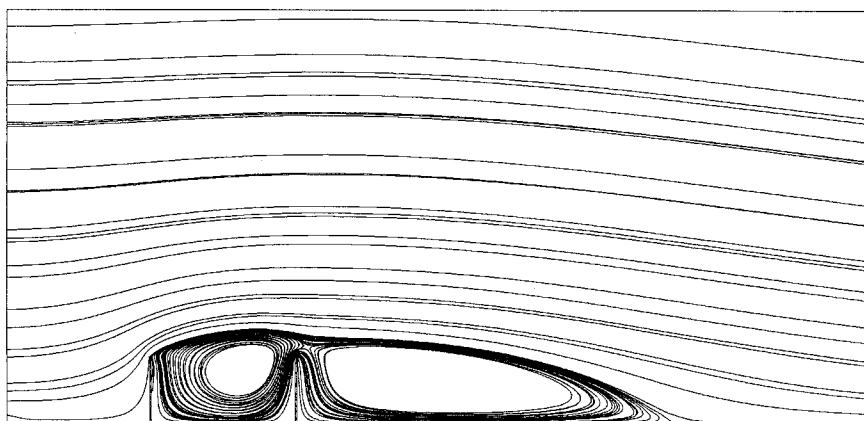
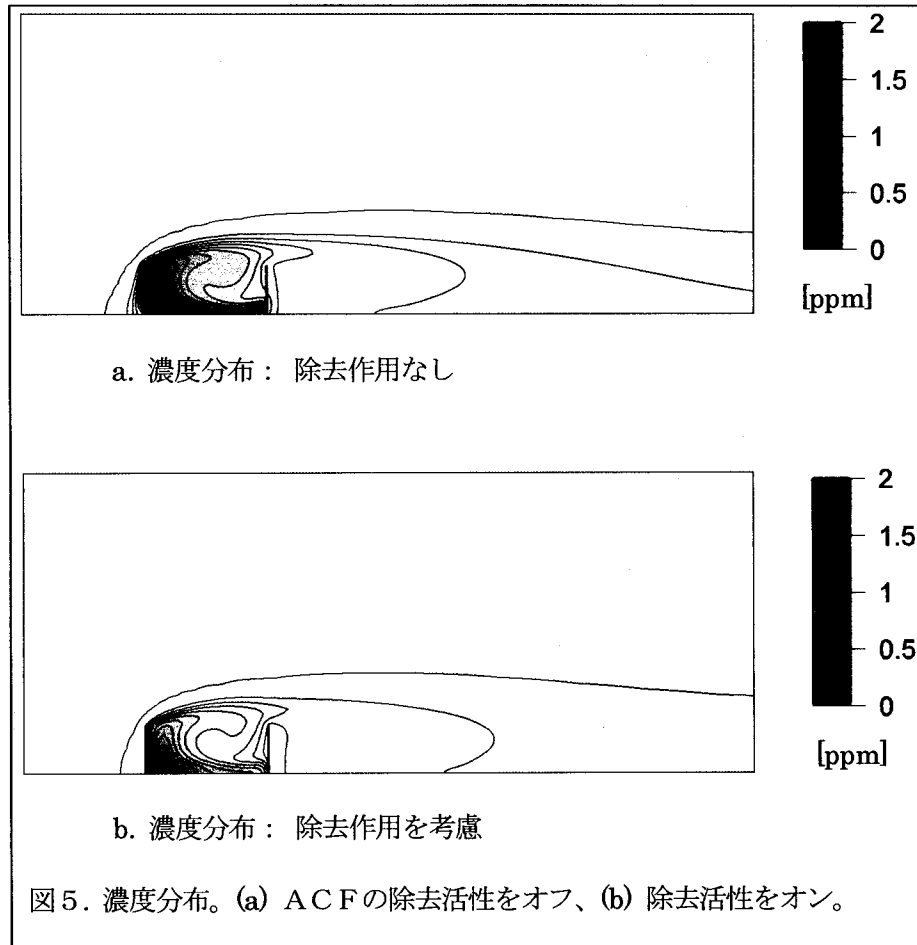


Fig. 4. ACF フェンス周辺の流れ場。

この流れ場の下での濃度場を図5に示す。図5aは、ACFフェンスの通風性はあるが、NO_xの除去性能をオフにした場合、図5bは、NO_x除去の活性も付与した場合の濃度分布を示す。以下のことがわかる：(1) 図5aと5bの比較より、NO_x除去の活性を仮定した場合のほうが道路風下側で極めて低いことが知られる。特に、風下側フェンスの風下面および風上側フェンスの風上面では濃度がゼロに近い。(2) 道路を挟んだ2枚のフェンスの設置により生じた道路空間内の循環流は、排出された汚染物質の道路内滞留時間を増し、ACFフェンスによる除去効率を上げる可能性を示す。(3) この循環流により、一般風向の風上側フェンス下層に高濃度部が形成される。



6.3 道路両側2枚のACFフェンスの汚染物質除去に対する寄与

図6は道路両側に設置されたACFフェンスによるNO_x除去がどのように、どの場所で行われているのかをみるために、風上側、風下側のACFフェンスに図3に上げたやり方でNO_x除去活性（以下、“活性”と記述）のオン、オフを仮定して計算した結果である。いずれのグラフも風下側道路端から10mの地点での濃度の鉛直分布を示す。図6aは、風上側フェンスにのみCase 1-6の活性を仮定した場合を、図6bは同じく風下側フェンスにのみ各種の活性を仮定した場合を、また、図6cは、両方のフェンスに活性を付与した倍いの結果である。また、図6dは、図6a, b, cに上げた場合の比較を容易にするために、すべての結果をプロットしたものである。なお、参照のために、図6a, b, cの各々にACFフェンスの通風性は持つが、除去活性が持たないと仮定したケース（図5aがこのケースの濃度場）の鉛直濃度分布を実線で示している。

図6より以下の事が推論できる。

- (1) まず、予想されるように両側のフェンスに活性を付与した場合（図6c）が、風上側（図6a）あるいは風下側（図6b）のいずれか一方に活性を付与したケースに比べて濃度の削減率が高い（図6d参照）。
- (2) 今の場合（すなわち、両側に設置した2枚のフェンスによって道路空間内に図4のような循環流が形成される場合）、付近の濃度が高くなる風上側のフェンスによる除去効率の方が風下側フェンスによるそれ

よりも高い (図 6d 参照)。

(3) ACF 活性を付与した Case 1-6 のいずれの場合も、かなりの NOx 除去率を示す。例えば、ACF フェンスの中央の 1 層にのみ活性を付与した Case 3 (図 3 参照) であっても、10% (風下側の 1 枚フェンス: 図 6b の実線と菱形の鉛直濃度分布の地表面での比較) から 30% (2 枚フェンス: 図 3c) の削減率をしめす。

(4) ACF フェンスの表層と内部に活性を付与する場合について、それらの除去効率に大きな違いはない。例えば、図 6a (風上側フェンスにのみ活性を与えた場合) の Case 2, 4, 6 はほとんど同じ濃度削減率を示す。ただし、表層に活性を付与する場合、その面が高濃度汚染に接している方が除去に有利である。例えば、図 6a の Case 5 (横向き三角) と Case 6 (下向き三角) を比較すれば、Case 6 の方が除去率は大きい。

(5) 図 6a, b, c いずれの場合も、全層に活性を与えた場合 (丸印) の濃度削減が、表層に活性を与えた場合 (Case 2, 5, 6) と内部の層に活性を与えた場合 (Case 3, 4) から予想されるような大きな削減率になっていないのは、除去に関して、化学活性の程度ではなく、ACF 層と汚染物質の接触効率が律速であることを示唆する。ただし、この数値実験では、一次反応で評価した ACF 層による除去能力を $k=4 \text{ s}^{-1}$ とした場合と

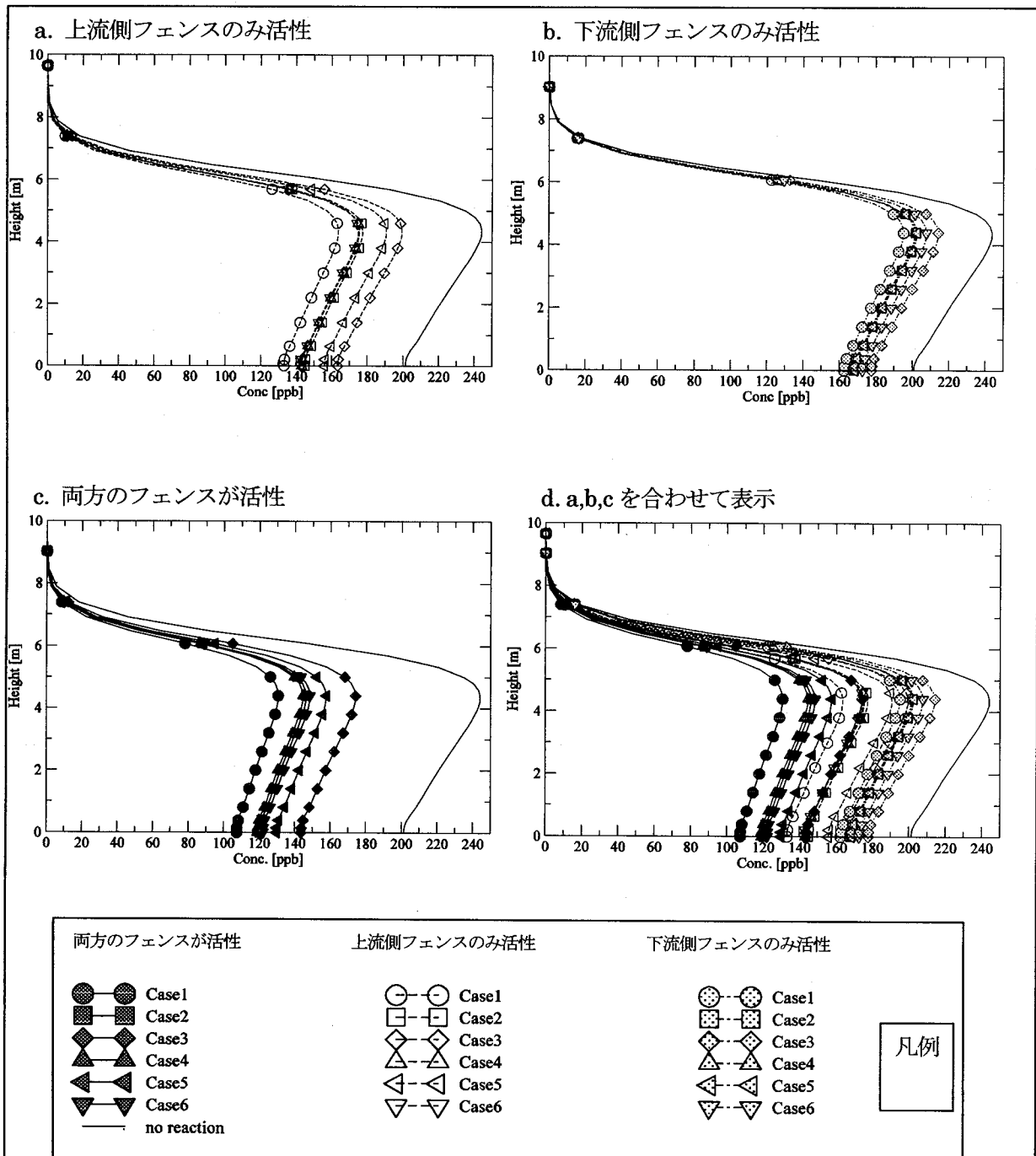


図 6. 風下側のフェンスから 10m 下流における鉛直方向の濃度分布。実線は除去活性のない場合。

いう条件の下での話であるが。

6. 4 ACFフェンスによる沿道 NOx 濃度の削減量

図 6 の結果を、地表面での濃度の削減量の形で整理したのが表 1 である。ACF フェンスへの活性の付与のしかた Case 1-6 については図 3 参照。表 1 では、さらに、風上（上流）側フェンスにのみ活性を与える場合、風下（下流）側フェンスにのみ活性を与える場合、両方のフェンスに活性を仮定する場合の 3 グループに分けている。

この表は以下の事を示唆する：（１）一次反応で評価した除去活性（ $k=4\text{ s}^{-1}$ ）を仮定すると、両側の ACF フェンスによって最高で 50% 近く沿道濃度を削減することができる。（２）同じフェンス構造であっても、風上側と風下側のフェンスで除去に対する効果が違う。すなわち、フェンスによる除去は周辺に形成される流れ場の構造に強く依存する。（３）道路を挟む 2 枚のフェンスによって形成されやすくなると考えられる道路内の循環流は、汚染物質の道路空間内滞留時間を増やし、また、フェンス近くに高濃度域を形成することによって、ACF フェンスによる汚染物質の除去効率を上げる可能性がある。なお、除去反応は一次反応（線形反応）であるため、濃度の削減量は k 値の値に比例すると考えてよい。すなわち、 k 値が半分であれば、削減量も半分になるという関係がある。

表 1. ACF フェンスによる沿道 NOx 濃度の削減量 (ppb) および削減率(%) : 風下道路端から 10 m 地点での地表濃度による評価 ; ACF の化学活性を考慮しない場合の濃度 200 ppb からの削減量および 200 ppb に対するその割合を示す。

	上流側フェンス活性 (図 6a)	下流側フェンス活性 (図 6b)	両側フェンス活性 (図 6c)
Case 1*	68 (34 %)	38 (19 %)	91 (46 %)
Case 2	56 (28 %)	33 (17 %)	78 (39 %)
Case 3	38 (19 %)	23 (12 %)	54 (27 %)
Case 4	58 (29 %)	33 (17 %)	80 (40 %)
Case 5	45 (23 %)	33 (17 %)	69 (35 %)
Case 6	59 (30 %)	29 (15 %)	76 (38 %)

* Case 1-6 については、図 3 参照。

7. 結論

道路の両側に設置した ACF（高活性炭素繊維）通風フェンスについて、フェンスのどの部分が NOx 除去に寄与するのかについて基礎的検討を行った。その結果、以下の事が明らかになった。

（１）一次反応で評価した除去活性（ $k=4\text{ s}^{-1}$ ）を仮定すると、両側の ACF フェンスによって最高で 50% 近く沿道濃度を削減することができる。

（２）同じフェンス構造であっても、風上側と風下側のフェンスで除去に対する効果が違う。すなわち、フェンスによる除去は周辺に形成される流れ場の構造に強く依存する。

（３）道路を挟む 2 枚のフェンスによって形成されやすくなると考えられる道路内の循環流は、汚染物質の道路空間内滞留時間を増やし、また、フェンス近くに高濃度域を形成することによって、ACF フェンスによる汚染物質の除去効率を上げる可能性がある。今の場合（すなわち、両側に設置した 2 枚のフェンスによって道路空間内に図 4 のような循環流が形成される場合）、付近の濃度が高くなる風上側のフェンスによる除

去効率の方が風下側フェンスによるそれよりも高い（図6d 参照）。

（4）ACF フェンスの表層と内部に活性を付与する場合について、それらの除去効率に大きな違いはない。例えば、図6a（風上側フェンスにのみ活性を与えた場合）の Case 2, 4, 6 はほとんど同じ濃度削減率を示す。ただし、表層に活性を付与する場合、その面が高濃度汚染に接している方が除去に有利である。例えば、図6a の Case 5（横向き三角）と Case 6（下向き三角）を比較すれば、Case 6 の方が除去率は大きい。

なお、除去反応は一次反応（線形反応）であるため、濃度の削減量は k 値の値に比例すると考えてよい。すなわち、 k 値が半分であれば、削減量も半分になるという関係がある。

8. 謝辞：平成17，18年度の国土交通省建設技術開発研究助成に謝意を表します。また、一部、科学研究費基盤研究（B）17360256の支援も受けました。

9. 文献

- 1) Kitada, T., et al.(2005) Proc. 9th-10th Joint Seminar of JSPS-MO Core Univ. Program on Urban Env., 337-347.
- 2) Kitada, T., et al.(2006) 28th NATO/CCMS ITM on Air Poll. Modelling and Its Appl., 338-339.
- 3) 長野ら(2006)第14回地球環境シンポジウム講演論文集、53-58.
- 4) Shimohara, T. et al.(2006) Proc. 9th-10th Joint Seminar of JSPS-MO Core Univ. Program on Urban Env., 349-359.
- 5) 下原孝章（福岡県保健環境研究所）（2002）高活性炭素繊維を用いた沿道ガス削減技術に関する調査報告書
- 6) 東海林ら（2004）第12回地球環境シンポジウム講演論文集、273-278.
- 7) Perry, R.H. and Chilton, C.H.(1973) Chemical Engineers' Handbook, 5th edition, p. 5-54, McGraw-Hill.