

5. 高活性炭素繊維 (Activated Carbon Fiber) を装着したフロースルーフェンスによる沿道大気浄化：現実的な3次元空間での数値的性能評価

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 ; Numerical investigation of NO_x removal by activated carbon fiber (ACF) set within porous fences was performed in a realistic 3D situation. The fence units were placed along road with a fixed interval so that they cover the road side by about 50%; that is one possible way to reduce use of now expensive ACF. Then, how much the ACF fences can decrease ambient NO_x concentrations was evaluated. Obtained results showed: (1) NO_x concentration, for example, at 10m downstream from the road can be reduced as much as 20% even by the ACF fences which cover the road partially. (2) this removal efficiency without excess energy consumption should be very promising as a tool for sustainable preservation of urban environment.

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

1. はじめに

高活性炭素繊維 (ACF) は工場等での高濃度煙道排ガス中の SO₂、NO₂ 等の浄化方法として研究されてきたが、最近、煙道排ガスよりはるかに低濃度である一般環境大気に適用する研究が始まった。一方、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) につき酸化チタン塗布のフェンスによる酸化除去やオゾンやプラズマによる NO₂ への酸化を経て土壌層を通し除去する方法が研究されているが、思うような結果が得られていないのが現状である。これまでの沿道大気浄化の試みが、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とそれにともなう巨額のランニングコストがネックであることを考え、本研究では、ACF が極めて高い浄化能力を持つこととそれが繊維状であることを利用して、ACF を内部に装着したフロースルーフェンスを考案した。自然の流れにより ACF 装着のフェンスを通過した道路上の汚染大気を浄化するものである。筆者らは、このアイディアを先の本地球環境シンポジウム等^{1, 2, 3, 4)}で発表した。今回は現実的な3次元空間でフェンスを設置した場合の流体力学的な特性も考慮して、このフェンスの効果を検討したものである。なお、ほぼメンテナンスフリーで長期間利用できること、および NO₂ だけでなく、SO₂、ベンゼン、トルエン等芳香族炭化水素、SPM も除去できることから、完成すれば発展途上国での大気環境改善にも有用であると考えられる。

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。定常状態を想定した支配方程式系は、次のように与えられる。

^{*}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

The continuity equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} U_j) = 0 \quad (1)$$

Momentum equation :

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

where drag by the porous media :

$$B_i = - \gamma R_c \cdot U_i \quad (3)$$

Diffusion equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_{ij} U_j C - \rho \Gamma_t K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = - \gamma k \rho C \quad (4)$$

Equation for turbulent kinetic energy :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} U_j k - \frac{\nu_t}{\sigma_k} K_{ij} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \gamma P - \gamma \epsilon \quad (5)$$

Equation for dissipation of turbulent kinetic energy :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} U_j \epsilon - \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} K_{ij} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \gamma C_1 \frac{\epsilon}{k} P - \gamma C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

Eddy diffusivity :

$$\Gamma_t \cong \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

Parameters :

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad \text{and} \quad C_\mu = 0.09 \quad (8)$$

ここに式(3)-(6)中の 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。そこで本研究では、 $\gamma = 0.9 \sim 0.95$ と仮定した。式(1), (2), (4)-(6)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。 $k-\epsilon$ モデルのパラメータ値としては標準的なもの(式(8))を用いた。式(6)の P は乱れの運動エネルギー k のシアー生成項を表わす。

3. ACFによるNOx除去反応速度係数

ACFによる環境大気中の窒素酸化物除去試験は下原ら⁵⁾により行われ、大気汚染測定車にて、日射量、相対湿度、気温、環境大気中のNO、NO₂、SO₂およびSPMの各濃度を測定している。採取された大気はACFが充填された内径8～10mmのガラス管内を300ml/分(線速度6m/分)で通過し、ACF通過前後においてNOx濃度を計測している。本研究では内径8mmのガラス管にACFがそれぞれ0.100および0.300g充填された場合の実験結果を使用して、一次反応を仮定し、その速度係数を定めた^{1, 2, 3)}。 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。

4. ACF充填層による流れに対する抵抗

ACFによる流れに対する抵抗は(2)式中の B_i であるが、この B_i を(3)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(9)式で表わされる⁶⁾。

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho L} = \alpha v V + \beta V^2 \quad (9)$$

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 は通過流速、 v 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、(9)式の係数は次のように決められた。

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho L} = R_c V \quad \text{with } R_c \equiv \alpha v \cong 3700 \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

5. 計算条件

本研究は、道路に沿って ACF 充填のフロースルーフェンスを設置する提案であるが、ACF は現在のところ高価であり（約 3 万円/kg であり、現在の充填方法では厚み 10cm の ACF フェンス 1 m² あたり約 8 万円；むしろ、需要が増えれば価格は下がる）、ACF フェンスを両側にびっしりと設置するのは現実的ではない。現実にはさまざまな設置法が考えられる。例えば、設置・非設置を繰り返し、道路側帯の半分を ACF フェンスでカバーすることも考えられる。本報はこのような設置法で大気の流れがどう変わり、NO_x の沿道濃度分布がどう減少するかを数値シミュレーションにより推定したものである。フェンスの厚さは 10cm、高さ 4 m、幅 4 m を単位としている。

5.1 計算領域および流れ場

3次元計算領域の説明のために、図 1 a, b にフロースルーではないソリッドなフェンスを設置したときの水平および鉛直平面内の流線図を示す。

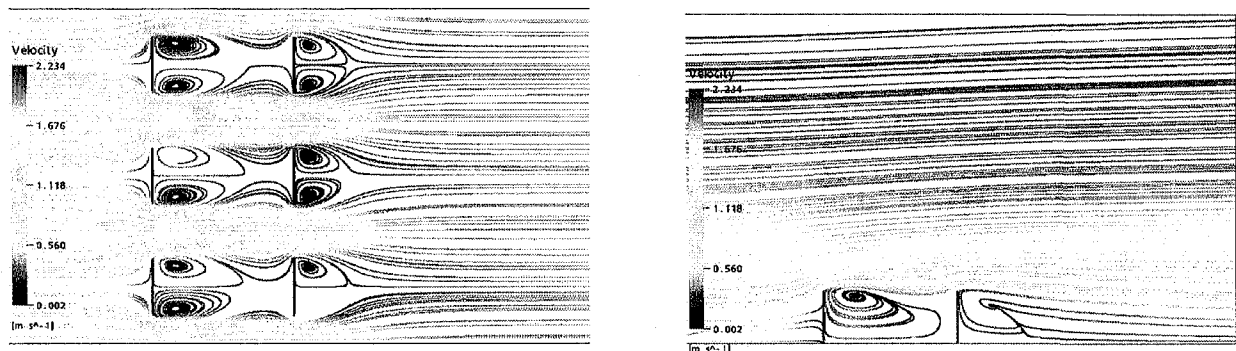


図 1 ソリッド・フェンス：(a) 平面流線図(左)（高さ $z=2\text{m}$ の位置）と(b) 鉛直面流線図（右）（流れに直角方向 $y=12\text{m}$ の位置；フェンスの真ん中）。

図 1 で、流れ方向に x 軸、流れに直角水平方向に y 軸、鉛直上向きに z 軸をとっている。 y 軸に平行に 10m 幅の道路があり、道路沿いの両側に 4m 置きに 4m 長さのフェンスを設置している（図 1 (a)）。したがって、道路側帯の半分にフェンスが設置されていることを意味する。フェンスの高さは 4m（図 1 (b)）。フェンスの背後に回りこむ流れにより一対の渦が、風上、風下のいずれのフェンスの背後にも形成されている（図 1 (a)）。

フェンスをフロースルーにした場合、流線図の概形には変化が無いものの、風上側フェンス（道路内空間）に入り込む空気量の増加が示唆されている。

5.2 道路近傍の NO_x 濃度場

図 1 のように、ACF 装着のフロースルーフェンスを配置した場合、濃度をどの程度削減できるかを検討した。図 2 は、シミュレーションで得られた地表面での NO_x 濃度の水平面分布である。図 2 (a)、(b)、(c) がそれぞれ

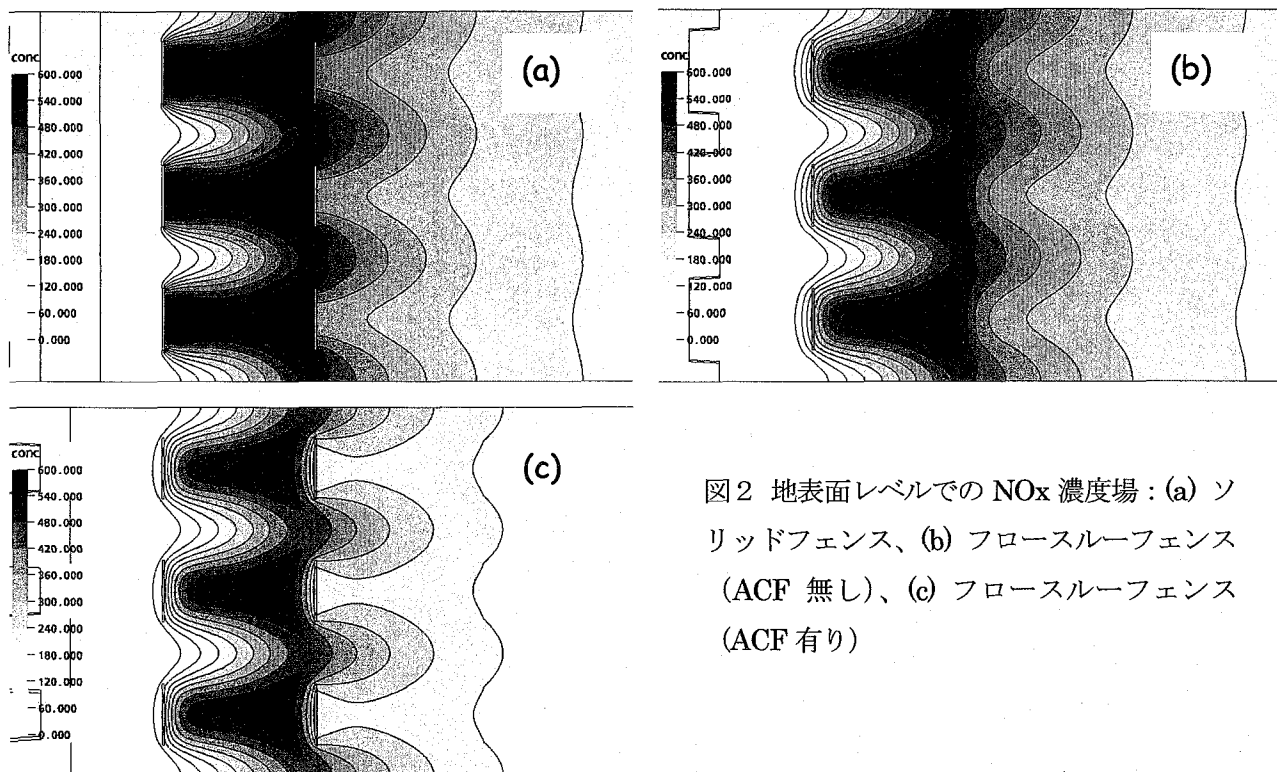


図2 地表面レベルでのNO_x濃度場：(a) ソリッドフェンス、(b) フロースルーフェンス (ACF 無し)、(c) フロースルーフェンス (ACF 有り)

れソリッド、フロースルー (ACF 無し)、フロースルー (ACF 有り) のケースを示す。

図2bは、フェンスのフロースルー性が、道路内の汚染物質の排除性を若干良くするが、そのことは逆に、ソリッドフェンスの場合と比べて道路の風下側の環境濃度をやや押し上げること示唆している。一方、ACF装着のフロースルーフェンス (図2(c)) は、フェンス内を通過する汚染物質を除去することによって道路外の風下側濃度かなり減らす効果が期待できることを示唆する。フェンスの切れ目から相対的に汚染濃度の高い空気が流出するが、道路端から風下方向に10m以上離れれば (道路幅が10mであることに注意)、今回のケース (フェンス間のスリットが4m) では、濃度が平均化されることが示されている。

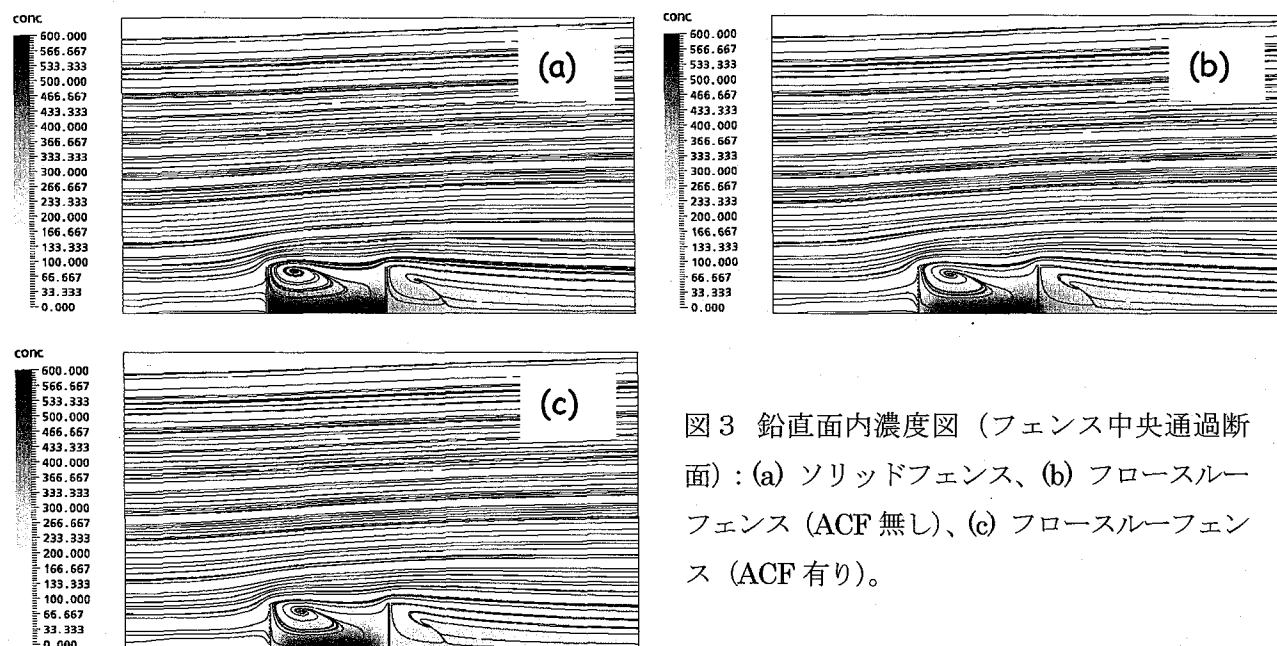


図3 鉛直面内濃度図 (フェンス中央通過断面)：(a) ソリッドフェンス、(b) フロースルーフェンス (ACF 無し)、(c) フロースルーフェンス (ACF 有り)。

図3はフェンス中央を通過する鉛直面、また図4はフェンスとフェンスの間を通る鉛直面内の濃度場を表わす。鉛直面内の循環流もACFフロースルーフェンスの除去率の向上に寄与することが示唆されている (図3)

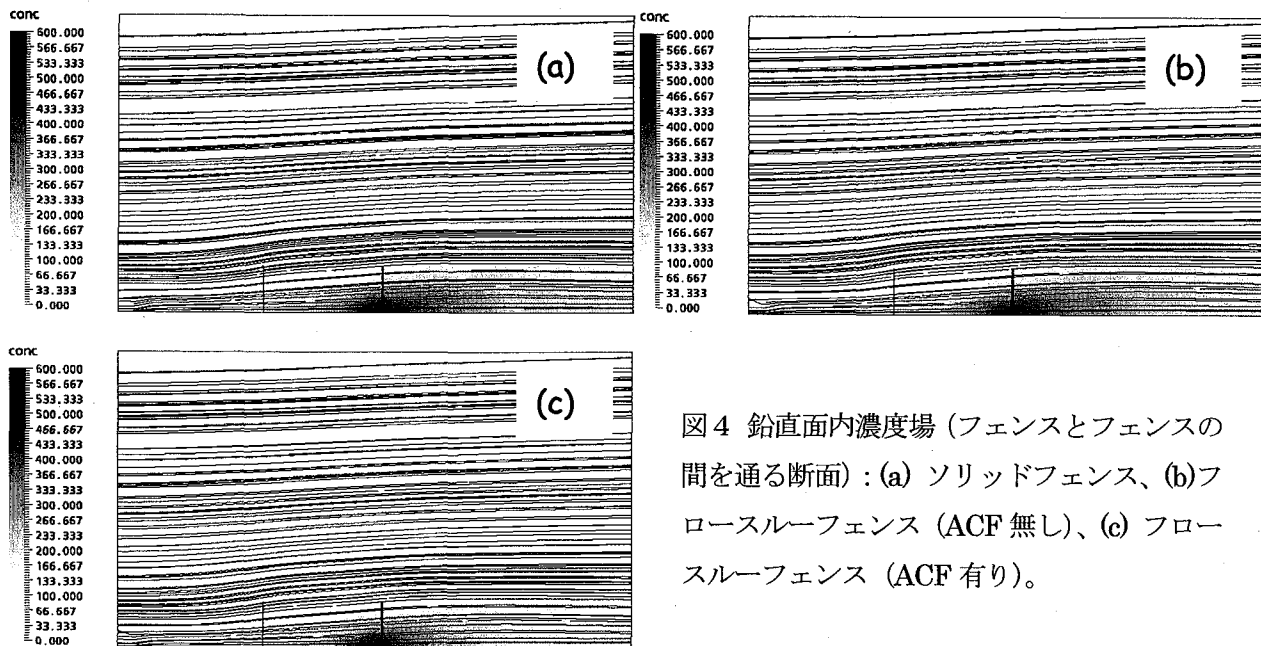


図4 鉛直面内濃度場 (フェンスとフェンスの間を通る断面) : (a) ソリッドフェンス、(b) フロースルーフェンス (ACF 無し)、(c) フロースルーフェンス (ACF 有り)。

5.3 ACF フロースルーフェンスによる NOx 除去の定量的評価

今回対象とした道路端側端の全面ではなく半分をカバーする ACF フェンスによってどの程度の NOx 除去が見込め、それがどの程度環境濃度を下げることにあるかを定量的に示す。図5は風下側の道路端から下流方向に 10 m の地点での鉛直濃度分布を表わす。図5 (a)がフェンスの中央を下流方向に下った地点、また図5 (b)がフェンスとフェンスの間を 10 m 下った地点での分布である。図中、丸印がソリッドフェンスを、四角がフロースルーフェンス (ACF 無し) を、ダイヤモンドが ACF 有りのフロースルーフェンスを表わす。濃度レベルは、いずれのケースも、フェンスの切れ目の部分でフェンス中央部下流よりも 10%程度高いが (図5 (b))、大きな差は無い。これらの図から、道路側線を図1に示すようなやり方で 50%程度カバーする ACF フェンスによって沿道 NOx 濃度を 20%強削減できる可能性が示されていると考えられる。自然通風を利用することで、ランニングのためのエネルギーを必要としないで環境濃度をこれだけ削減できることは極めて有意義であるとする。

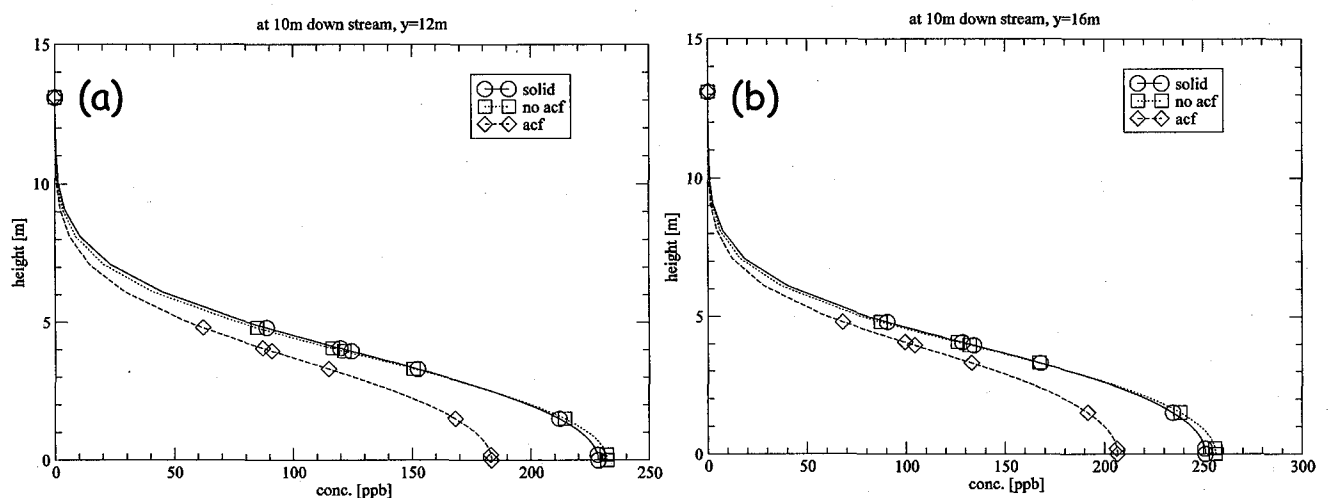


図5 道路の風下端から 10 m 下流での NOx 濃度の鉛直分布 : (a) フェンス中央の下流、(b) フェンス切れ目の下流。○ ソリッドフェンス、□ フロースルー (ACF 無し)、◇ フロースルー (ACF 有り)

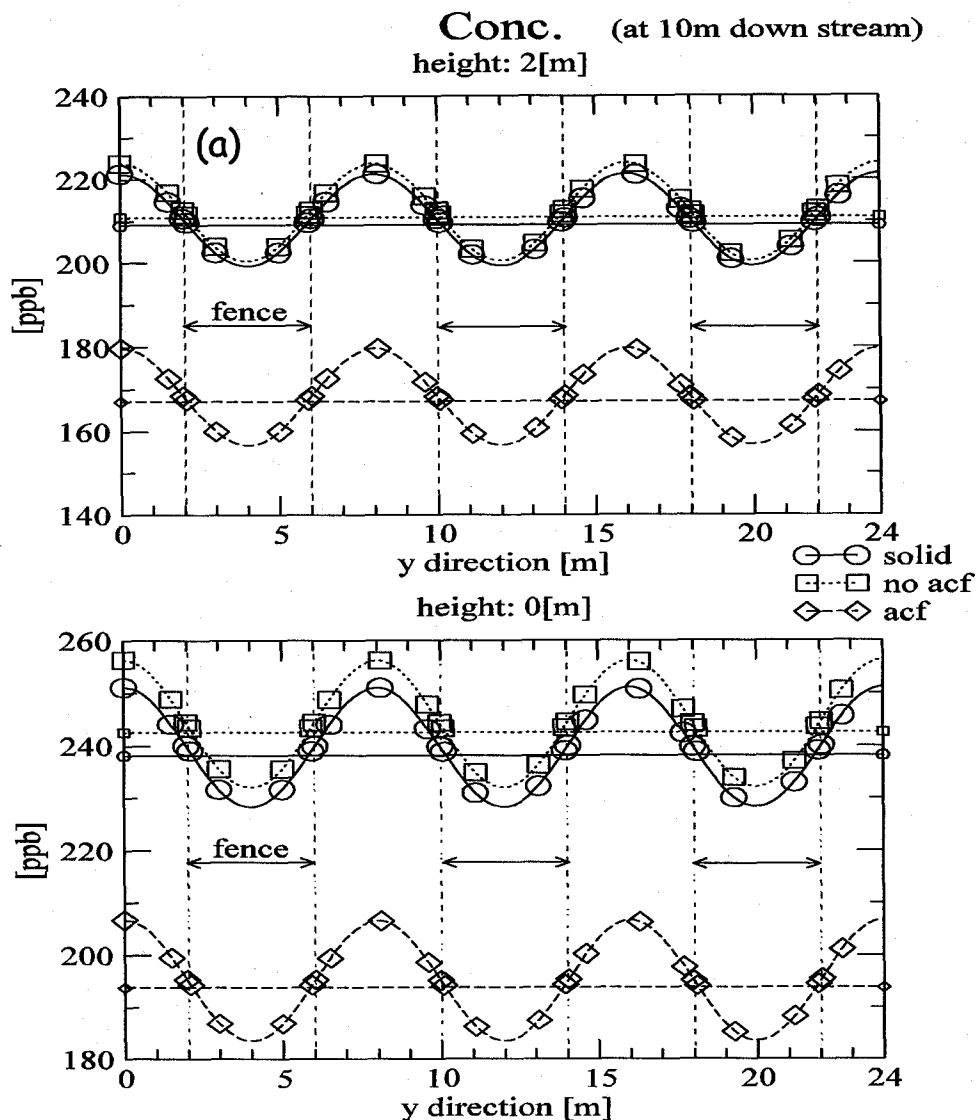


図6 風下側道路端から下流10mでのy方向(道路に平行な方向)へのNO_x濃度変化:(a) 高さ2m、(b) 地表面。○ ソリッドフェンス、□ フロースルー (ACF無し)、◇ フロースルー (ACF有り)

最後に図6は、下流10mでの道路に平行なy軸に沿っての濃度変化である。フェンス切れ目で濃度が高くなるが、変動幅は大きくないこと、道路側線50%カバーのACFフェンスが約20%環境濃度を削減すること等を示している。

6. 結論

道路側端の50%程度をカバーする現実的なACFフロースルーフェンスの設置条件で、流れ場と濃度場のシミュレーションを行い、沿道の環境濃度場(NO_x)に対する効果を評価した。その結果、道路端から10mの地点で濃度を20%強削減できる可能性が示された。自然通風によるエネルギー使用のないこの結果は、ACFフェンスの有効性を示すものと結論できる。

7. 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。

8. 文献 1) 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. 2) Kitada, T., et al.(2005) Proc. 9th-10th Joint Seminar of JSPS-MO Core Univ. Program on Urban Env., 337-347. 3) Kitada, T., et al.(2006) 28th NATO/CCMS ITM on Air Poll. Modelling, 338-339. 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