

建設技術研究開発助成制度

高活性炭素繊維を用いた自然風駆動の効率的NO_x浄化装置の開発

研究代表者：北田 敏廣（豊橋技術科学大学エコロジー工学系）

1. はじめに

格段に強化された車の単体規制をもってしても、大都市やその近郊において自動車交通が集中する地点では、NO₂等による局地的な大気汚染の改善が難しい。これまで、この局地的なNO_x汚染を解決するためにいくつかの方法が提案されテストされているが、多額のランニングコストを要する、汚染大気と除去表面との接触効率が低いなど、それぞれの理由により、沿道大気中のNO₂濃度を意味あるほどに下げることが成功していない。本研究は、高活性炭素繊維（Activated Carbon Fiber、ACF）が高いNO_x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（通風性フェンス）を作成し、自然風駆動であってポンプによる吸引、送風等なしに、沿道大気中のNO₂濃度を20～50%削減できる沿道大気浄化装置のプロトタイプを作成することを目的とするものである。

研究は、(1)NO_x浄化能を最大限に引き出すACFの形状およびACF再活性化に関する研究、(2) ACFモジュールを用いたフロースルーフェンスの流体力学的特性把握に関する研究、(3)上記(1)、(2)の研究を統括するために、実験室および野外で行ったACFモジュールの化学特性実験と風洞等で行ったモジュールの流体力学特性実験によって得られたACFフェンスモジュールの基礎性能（流れに対する抵抗特性およびNO_xに対する除去反応特性）を組み込んだ数理モデルを開発し、現実に道路端にACFフェンスを設置した場合の沿道NO_x濃度の削減効果、設置の仕方による削減率の違いを明らかにする、という3本の柱を立て最終目標を達成することを目指した。以下、この(1)～(3)の順で、得られた結果と研究全体の結論を記す。

2. NO_x浄化能を最大限に引き出すACFの形状およびACF再活性化に関する研究

PAN(ポリアクリロニトリル)を直毛状に紡糸したACFを充填したパネル型フェンスモジュールおよび、より通風性の良いスリット型フェンスモジュールを考案し試験した。

繊維状ACFを充填したパネル型フェンスモジュールの基礎特性（NO_x除去反応特性および流れに対する抵抗特性）を、沿道大気を通気した実験から、抵抗特性（ $\bar{R}_c = \gamma \rho R_c$ 、後述） $\bar{R}_c = 3700 \text{ kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ 、NO_x除去反応速度係数（後述） $k_c = 1 \sim 3 \text{ s}^{-1}$ と求めた。

スリット型モジュールは、PAN系およびピッチ系の薄いフェルト状ACFを用いてスリット型に整形した通気性の良いNO_x除去モジュールである。通気性を良くすることは、NO_xとACFの接触時間を短くすることにつながり局所的な除去能率は落ちるものの道路上の汚染空気を速やかに処理できることが期待される。後に、第4章で示すように、通風性を抑えて除去反応速度係数を大きくしたフェンスモジュール（おもに繊維状ACFによるパネル型）、逆に除去反応速度係数を少し犠牲にして通風性を上げたフェンスモジュール（おもにスリット型）は、それぞれに適した設置法があると考えられる。スリット型のフェンスモジ

ールは、図1に見られるようにユニット内に7mm厚の薄いフェルト状ACFを8mm程度の間隔をおいて平行に並べ、間隙の空気の流通を良くしたものである。フェルト状のACFを固定する方法としてテストの結果、スリット内に金網の波板を入れる方法を用いた。福岡市博多区内の道路分離帯に設置した仮小屋内に導入した沿道大気を用いて、このスリット型の通風-除去特性の実験を繰り返し、モジュール長、スリット幅、フェルト厚などのパラメーターによる除去性能基礎データを得たが、このときの結果の一例を図2に示す。図2(1)は、ファンによりスリット型モジュールに通風した前後のNO_x濃度測定に基づくNO、NO₂除去率と通過風速の関係、相対湿度とNO除去率の関係等を示す。また、図2(2)はこれらの生データである。これらの図より、通過風速が遅い(汚染空気とACF接触時間が長い)ほどNO、NO₂ともに除去率が上がることで、NO₂の除去率は常に高く安定しているが、NOの場合は相対的に低く、また相対湿度が高いほど浄化率が低くなるのが推察される。環境大気中では一般に共存するオゾンのためにNOは速やかにNO₂へ酸化されるため、除去効率を論じるときは、NO_x(=NO + NO₂)について論じるべきと考える。図2を基にして得た接触時間に対するNO_x除去率のプロットから、NO_x除去反応速度係数 $k_c = 1 \text{ s}^{-1}$ 程度と計算できる。なお、PAN系ACFとピッチ系ACFについて、ピッチ系の方が相対的にNOに対する除去効率が高かった。また、別途のおこなった通風時の圧力損失と通過風速の関係から、流れに対する抵

ピッチ系SY-H800 No. 101

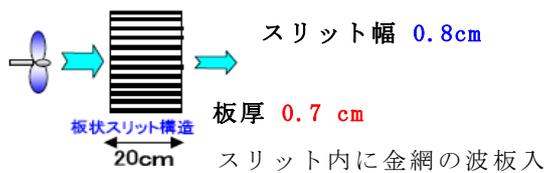


図1 スリット型ACFモジュール

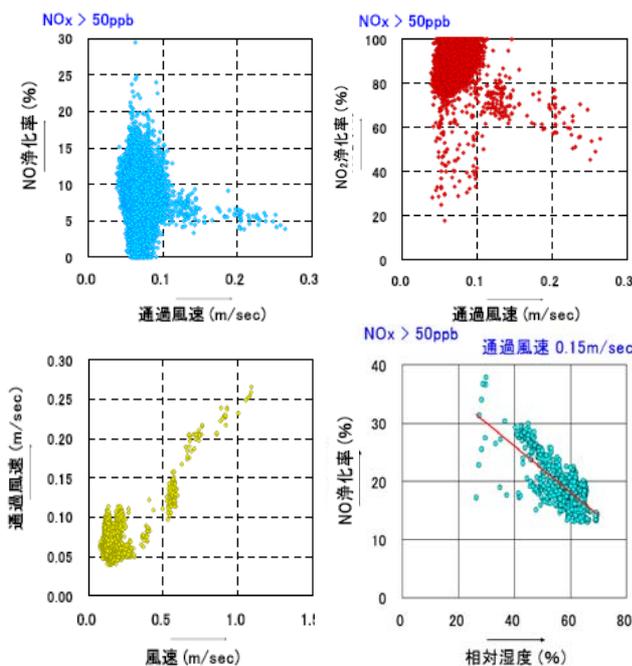
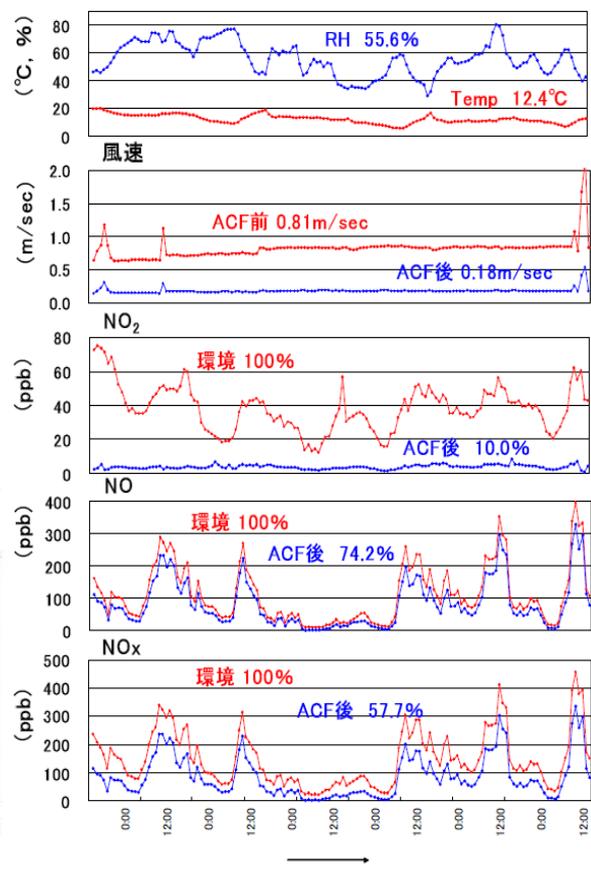


図2(1) 各成分の散布図



2007年11月15日-21日

図2(2) ユニットの通過風速とNO_x浄化率

抗係数 $\bar{R}_c = 400 \text{ kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$ 程度と推定された。

長期間使用のACFは、NO_x除去に対する劣化が生じる。ACFは、1gに対して量1000枚(1800m²)程度の表面積を持ち、NO_xの環境濃度(例えば、100ppb程度)では、数年の寿命があると考えられるが、長期間の使用ではむしろ劣化する。ACFにトラップされたNO_xはほとんどが酸化され硝酸の形で蓄積するため、この再活性化の方法として、ACFフェンスの水洗を検討した。室内での実験結果より、水洗・通気により、破過の起こるのを防げることを示された。すなわち、オンサイトでのACFフェンスの水洗により簡便に70~80%の再活性化(能力回復)できることが示された。

3 ACFモジュールを用いたフロースルーフェンスの流体力学的特性把握に関する研究

風洞内にACFフェンスモジュールを設置し、パネル型およびスリット型モジュールの流れに対する抵抗特性を測定するとともに(この結果は、先の2の課題で得たものと合わせて \bar{R}_c 値としてまとめている)、風洞内にパネル型とスリット型のACFフェンスモデルを設置し、NO_xの除去試験を行った。道路に見立てた線源からNO₂、NOを放出、フェンス風下側での濃度を測定し、現実に近い形でACF

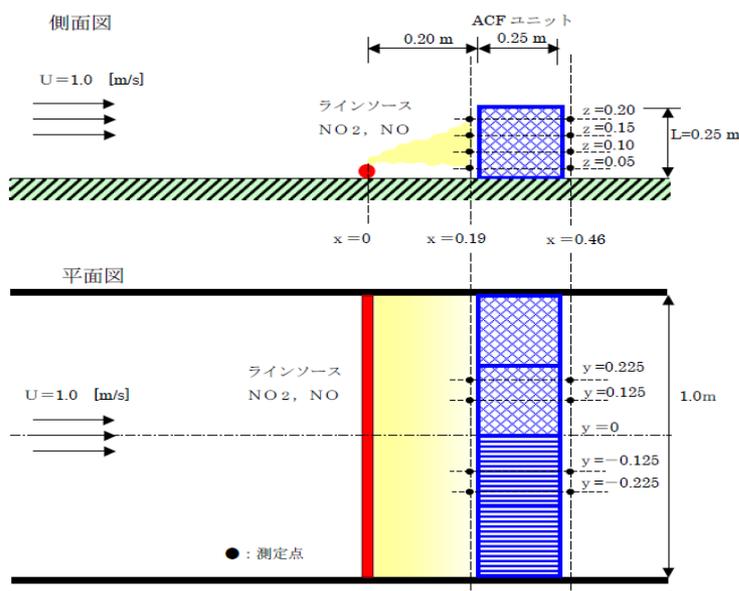


図3(1). ACFユニットを使用したNO_x除去実験

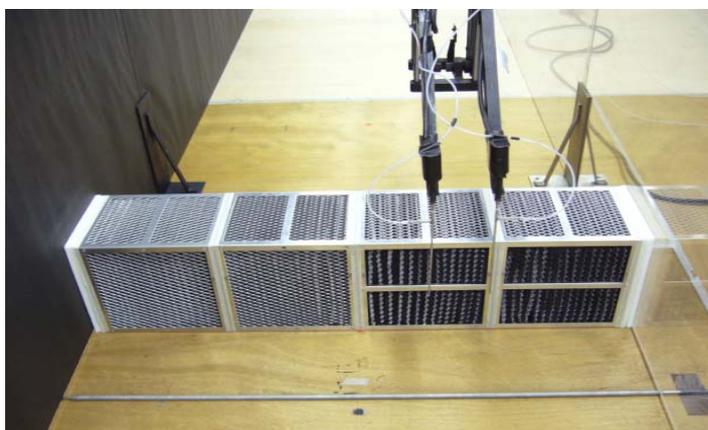


図3(2). 実験に用いたスリット型ACFモジュール

フェンスによるNO_x濃度削減の効果を検討した。

そのうち、図3(1)はスリット型ACFモジュールを風洞内に設置し、NO_x除去効果を調べた実験の配置図であり、図3(2)は、その時のモジュールの写真である。結果の一例を図4に示す。図4(1)はNO₂、図4(2)はNOに対する結果である。いずれの図もACFモジュールの風上側(直前)と風下側(モジュール直後)での濃度の鉛直分布をプロットしている。

両図から、フロー付近高さ(地表面高さ)で、ACFフェンスモジュールの前後での濃度削減が、NO₂の場合43ppb(48ppb→5ppb)、NOの場合16ppb(40ppb→24ppb)であることが示されている。

また、パネル型フェンスモジュール(図5)の場合の、NO₂濃度分布の例を図6に示す。図中の凡例で、190、260 mmはいずれもラインソースから風下方向への距離を表し、190mmがフェンスの風上側直前、同じく260mmが風下側直後を表す。ピンク

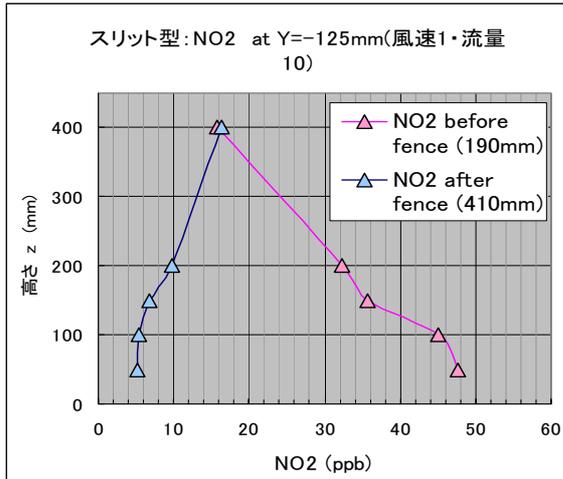


図4(1). スリット型フェンスモジュール (図3) の前後における高さ方向NO2濃度分布の比較。モジュール高さ：250 mm



図5 パネル型のACFフェンスモジュールを用いた道路両端の2枚フェンス

青)は、フェンス高さより下でNO2濃度が低く、フェンスを乗り越える流れのためフェンス・トップより少し上で極大値をもつ構造となっている。この特徴は第4章述べる数理モデルによる予測結果と一致する。以上、風洞実験では、ACFフェンスモジュールの流れに対する抵抗特性を第2章のモジュール開発実験と協力して求めるとともに、風洞内で縮尺のACFフェンス模型を再現し、沿道NOx濃度の削減効果を調べ、定性的にACFフェンスの効果を確認した。

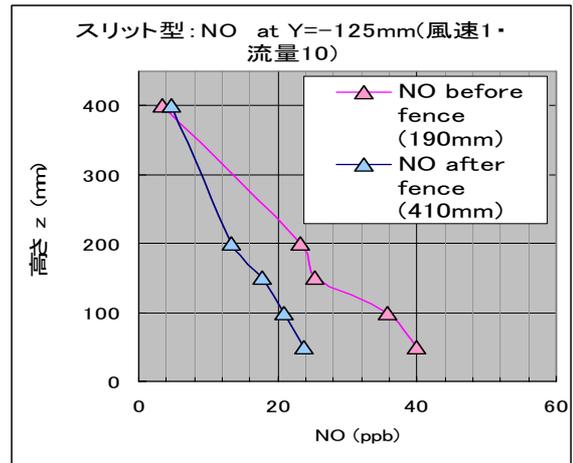


図4(2). 物質がNOであることを除いて図4(1)に同じ。

およびブルーのシンボルは主風向に平行なセンターラインから対称に125mmずつ隔たった位置を示す。図中、NO2濃度は約20ppbの風洞内バックグラウンド値を差し引いた値を示す。フェンスの風上側直前(260mmのピンクおよびブルー)の分布は、220mmのフェンス高さ以下で高濃度があること、また風下側直後(190mmの赤と

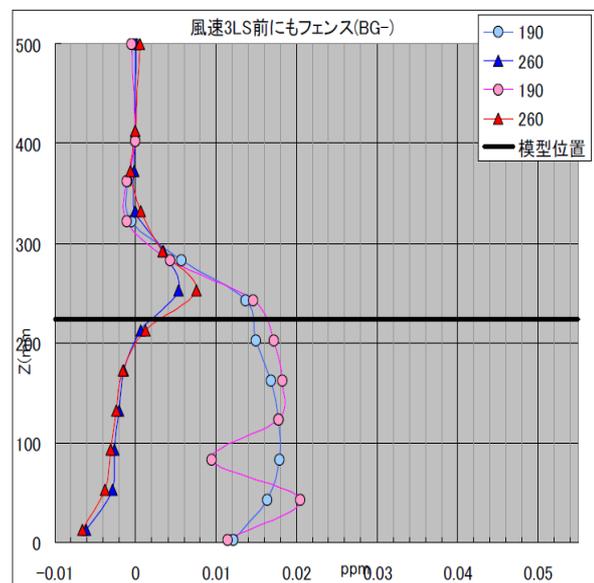


図6 パネル型ACFフェンスモジュール (図5)を用いたNO2濃度削減実験例：フェンスの風上側直前(190mm)、風下側直後(260mm)。

4 ACFフェンスの沿道環境浄化研究全体を統括する数理モデル研究

ACF層にNO₂、NOを含む汚染大気を導入した場合の優れた除去性能は第2章の室内実験等で明らかになっている。問題は、このACFフェンスの設置によってどの程度環境大気中のNO_x濃度を下げられるかである。どの程度の面積の設置がどれくらい沿道大気中のNO_x濃度を下げることができるかを明らかにする必要がある。このために、実験室および野外で行ったACFモジュールの化学特性実験と風洞で行ったモジュールの流体力学特性実験によって得られたACFフェンスモジュールの基礎性能（流れに対する抵抗特性およびNO_xに対する除去反応特性）を組み込んだ数理モデルを開発し、現実には道路端にACFフェンスを設置した場合の沿道NO_x濃度の削減効果や設置の仕方による削減率の違いを明らかにした。

非圧縮性流体の運動方程式に加えて標準的なk-εモデルを用いている。領域内に、10cm厚のACFフェンスを想定した透過性フェンスを2枚設置している。

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 Bi is the drag by the porous media:

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

Diffusion equation:

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

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の真密度は1.7~2.2 g cm⁻³程度であるから、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 (≡ 1 - 0.066/1.7)程度となる。本研究では、γ=0.9~0.95と仮定した。ACFフェンスの特性を表すパラメーターは、式(2)に見える流れに対する抵抗係数R_c (R_c ≡ γρR_cとして決定) および式(3)右辺のNO_x除去反応の速度係数k_cである。2種類のACFフェンスモジュール (ACFパネル型、スリット型) に対して、第2, 3章の実験結果を用いてこのR_cを次のように決めた。

$$\text{パネル型: } \bar{R}_c \equiv \gamma \rho R_c = \rho a v \cong 3700 \text{ (kg m}^{-3} \text{s}^{-1}\text{)}$$

$$\text{スリット型: } \bar{R}_c \equiv \gamma \rho R_c = \rho a v \cong 400 \text{ (kg m}^{-3} \text{s}^{-1}\text{)}$$

また、ACFのNO_x除去特性を一次反応として近似し、第2章の実験データを用いてk_c値の変動を求めた。その結果、k_c値は、NO_x (≡ NO + NO₂) に対して1~3 s⁻¹, NO₂に対して2~4 s⁻¹

とかなりの変動幅があることが分かった。そこで、本研究では、k_c値をパラメーターと見て、k_c: 0~4 s⁻¹の範囲で変化させて、道

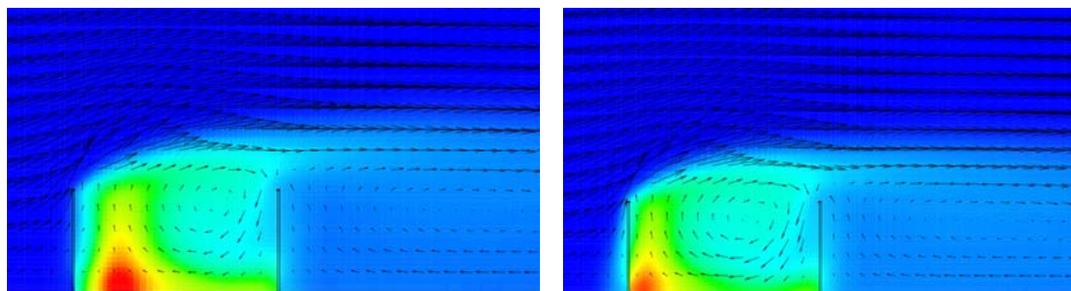


図7 ACFを想定した透過性の2枚フェンスの流れ場と濃度場。左：スリット型モジュールを想定。透過性大、R_c = 400 (kg m⁻³s⁻¹)、右：パネル型モジュールを想定。透過性小、R_c = 3700 (kg m⁻³s⁻¹)。ただし、ACFのNO_x除去性をオフ (k_c = 0 s⁻¹)。

路沿道の環境濃度に対する影響を調べた。

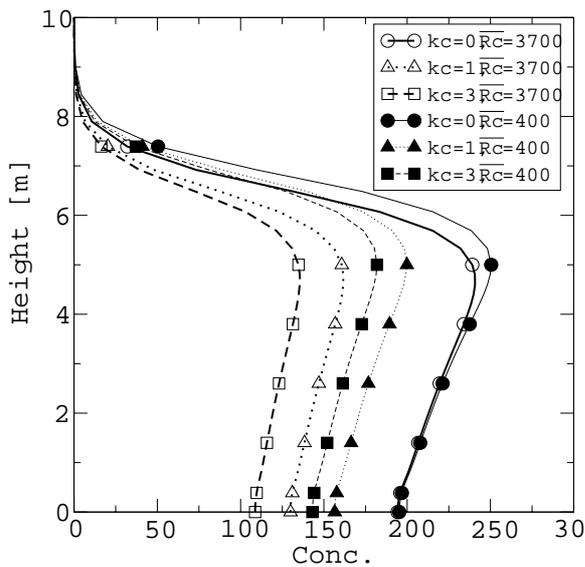


図-8 二枚ACFフェンス・ケース：道路端から風下10mでのNO_x濃度鉛直分布．通風性を示す抵抗係数 \bar{R}_c と除去反応速度係数 k_c をパラメータとした表示．

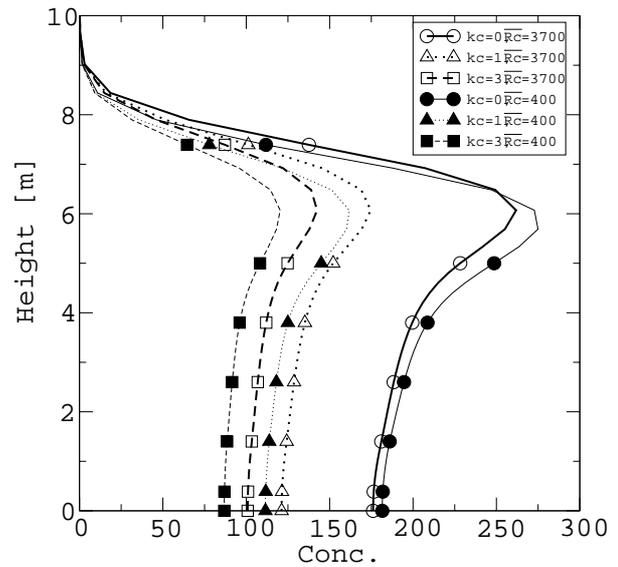


図-9 一枚ACFフェンス・ケース：道路端から風下10mでのNO_x濃度鉛直分布．通風性を示す抵抗係数 \bar{R}_c と除去反応速度係数 k_c をパラメータとした表示．

図7に2枚フェンスの場合の流れ場と濃度場を示す。左側が通風性の高いフェンス、右側が通風性の低いフェンスを想定している。ただし、いずれもNO_x除去反応性を0に設定している ($k_c=0 \text{ s}^{-1}$)。図より、道路空間内に形成される渦によって、道路内の汚染空気が風上側のフェンスに吹き寄せられること、通風性の高いフェンス（左）の場合、フェンスを通して（フェンス内通過風速 6.5 cm s^{-1} ）風上側道路外のクリーンな空気が道路内に導入されそれが道路空間内の汚染空気に風上側フェンスとの接触を妨げること等が推測される。このことが、風下側フェンスから下流10m地点での濃度が、むしろ通風性の良いフェンスについてNO_x濃度削減率の相対的低下をもたらしている（図8）。ただし、その場合であっても（かつ $k_c=1 \text{ s}^{-1}$ と除去活性を低く見積もっても）20%を越える濃度削減率が示されていることに注目すべきである。通風性を抑えたフェンスモジュールでは、約35%の濃度削減が見込める。

道路風下端に設置された1枚フェンスの場合（図9）は、逆に通風性を良くしたフェンスモジュール（スリット型）が、より高い濃度削減率を示す。例えば、NO_x除去の反応速度係数を低く見積もった場合 ($k_c=1 \text{ s}^{-1}$) でも、約39%のNO_x濃度削減率がある。一方、パネル型（通風性低）の場合は、これが約29%である。（ただし、フェンス内を通過する約 1 cm s^{-1} という低風速から接触時間が長くなることを見込んで、例えば、 $k_c=3 \text{ s}^{-1}$ とすれば、この濃度削減率は43%に上昇する。）

道路風下端に1枚置かれたACF通風性フェンスの場合は、通風性の良さが道路内汚染空気とACFフェンスの接触効率を高める方向にのみ作用するので、NO_x除去に関する同じ化学活性を仮定すれば、通風性の良いフェンスの方が効率よく沿道NO_x濃度を下げられることを意

味する。その他、ACF使用量を減らすために、フェンスの高さを半分にして道路両端に連続的にフェンスを設置するケースとフェンスの高さは変えずにフェンスの設置、非設置を交互に繰り返す方法の優劣も検討し、高さ半減・連続設置の方が有利であることも示した。

5. 結論

本研究は、“過度のエネルギー使用なしに交通量の多い沿道のNO_x濃度を30～50%下げる装置（高活性炭素繊維を用いた自然風によって動かされるNO_x浄化装置：通風性フェンス）の開発”を目的とした。高活性炭素繊維（Activated Carbon Fiber, ACF）を用いたパネル型、スリット型フェンスモジュールの開発研究を行いそれぞれの特性を確定した。また、ACFモジュールについて、再活性化の方法を実験検討し、オンサイトで水洗という簡便な方法が有効であることを示した。

ACFフェンスモジュール、ACFフェンスの試作品を用いて野外で沿道大気を吸引（送風）しNO_x(=NO+NO₂)濃度の削減実験を行った。吸引（送風）空気については、十分な能力を証明した。また、風洞内にACFフェンスの模型を作成しフェンスの流れに対する抵抗特性およびフェンスによる流れ場の変形を再現するとともに道路を模した線源からNO_xを放出し、ACFフェンスによる沿道NO_x濃度削減の観測を行った。この結果、ACFフェンスによる環境中のNO₂、NO濃度の削減が可能であることを定量的に示した。この場合、先のフェンスモジュールの化学特性実験で詳細に調べられているように、NO₂の除去がNO除去よりもその効率が高いことが示された。

以上の室内、野外、風洞におけるACFフェンスモジュールを用いた実験で得られた二つのパラメータを道路沿道の流れ、ポーラスなフェンスを通過する流れ、ACFとの接触により除去される効果を含んだ物質拡散等の方程式に組み込み、ACFフェンスが実際の場に置かれたときのNO_x濃度の減少を総合的に予測する方法を開発し、現実に道路端にACFフェンスを設置した場合の沿道NO_x濃度の削減効果、設置の仕方による削減率の違いを明らかにした。具体的には、道路両端にフェンスを設置した2枚フェンスの場合および分離帯等に設置する場合を想定した1枚フェンスの場合等について検討し、1枚フェンスの場合と2枚フェンスの場合では、モジュールを選択する場合に考慮すべき特性（通風性の良し悪し）に違いがあることを示した。また、ACFフェンスを設置することによって作り出される流れ場に基づく高濃度箇所を積極的に除去に利用できる設置法が優れていることを示した。いずれにしても、1枚フェンス、2枚フェンスいずれも、それぞれの場合について、除去速度係数 $k=1\text{ s}^{-1}$ という低い側の推定値を用いたとしても、沿道環境のNO_x濃度を約40%削減できることを示した。さらに、コストを考慮してACFフェンスの設置面積を減らす方法を検討した。その結果、例えば、ACFフェンス面積を50%削減する場合、フェンスの高さを変えないで道路両側での設置、非設置を繰り返してACF面積を半減するよりは、フェンス高さを半分にして両側で連続設置するほうが有利であることを示した。

以上、優れたNO_x除去特性を持ち、繊維状である高活性炭素繊維(ACF)という素材を生かし、通風性を持たせたフェンスのプロトタイプ（スリット型、パネル型モジュール）を作成、このフェンスの設置法を工夫することにより、ランニングのためのエネルギー使用なしに自動車起源の沿道NO_x濃度を40%程度削減できる可能性を示した。このACF通風性フェンスによる沿道NO_x濃度削減は、国土交通省近畿地方整備局のフィールド提供型新技術公募に採用され、大阪市内国道43号沿いでの試験設置が決まっている。