

6. 高活性炭素繊維を充填した通風式フェンスの NO_x除去性能に関する風洞実験による解明

神崎 隆男^{1*}・市川 陽一¹・北田 敏廣²・下原 孝章³・吉川 正晃⁴

¹電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²環豊橋技術科学大学 エコロジー工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

³福岡県保健環境研究所 大気科学部 (〒818-0135 福岡県太宰府市向佐野39)

⁴大阪ガス株式会社 エネルギー技術研究所 (〒554-0051 大阪府大阪市此花区西島6-19-9)

* E-mail: kan@criepi.denken.or.jp

高活性炭素繊維 (ACF, Activated Carbon Fiber) は優れたNO_x浄化性能を有し、通風式フェンスに充填して沿道に設置すれば、都市域のNO_x除去に有効な手法となる。本研究では、ACFを利用した通風式フェンスを設計する上で重要となる、実用レベルのACF装着条件下におけるNO_x除去性能を明らかにするために、ACFフェンスのプロットタイプを作製し、風洞実験を実施した。実験結果から、パネル型通風式フェンス設置時のNO₂除去率とNO除去率を評価し、風速条件やフェンス配置の違いによるNO_x除去率変化やNO_x除去メカニズムを明らかにした。さらに、実証試験で使用されているスリット型通風式フェンス設置時のNO₂除去率とNO除去率を評価し、風速条件に対するNO_x除去率の変化とNO_x除去メカニズムを明らかにした。

Key Words : *activated carbon fiber, ventilated fence, NO_x removal, wind tunnel experiments*

1. はじめに

都市の大気環境を改善するためには、大気汚染物質の主な発生源である自動車から排出される窒素酸化物を何らかの方法で取り除くことが重要である。高活性炭素繊維 (ACF, Activated Carbon Fiber) は優れた大気浄化性能を有し、通風式フェンスに充填して沿道に設置すれば、NO_x除去に有効である。この方法は、自然風を利用するため、NO_x除去時に動力が必要なく、再生も容易であるため、環境面からも沿道大気汚染の軽減策として、効率的かつ有効な方法のひとつである。これまで、自然風を利用したACFフェンスのNO_x除去性能については、室内実験・沿道での現地観測・数値計算などで評価されてきた^{1), 2)}。しかし、通風式フェンスに充填する際のACFの最適装着条件については十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、一定の風向・風速条件を再現できる(財)電力中央研究所の大型拡散風洞を使用して、数種類のACFについてNO_x除去性能を明らかにし、それらの結果から選択したACFを用いてパネル型通風式フェンス模型を作製した。このフェンス模型のNO_x除去性能とフェン

ス周囲の大気拡散場を調べることにより、NO_x除去のメカニズムを明らかにすることを第1の目的とした。さらに、実証試験で使用されているスリット型通風式ACFフェンスユニットを使用してNO_x除去実験を実施し、NO_x除去性能やNO_x除去のメカニズムを明らかにすることを第2の目的とした。

2. 風洞実験によるACFのNO_x除去性能の解明

(1) 実験装置と実験方法

通風式フェンスに充填するACFを選定するため、入手可能な4種類のACFを用いてNO_x除去実験を実施した。(財)電力中央研究所の大型拡散風洞(幅3.0m×高さ1.5m×長さ17m)内に、図1に示す幅0.2m×高さ0.2m×長さ1.2mの亚克力製の小型風路を設置した。小型風路入口には、図2に示すようにガス供給部が装備され、格子状に配置されたガス放出口から、予め濃度を調整された試験ガス(NO, NO₂)を風路内に均一に供給した。小型風路中央部に図3に示すACF充填セクションを設置

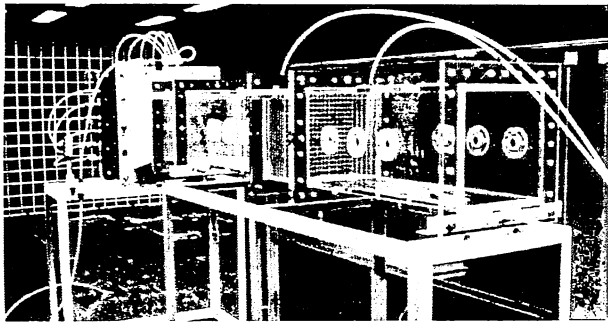


図-1 小型風路の概要

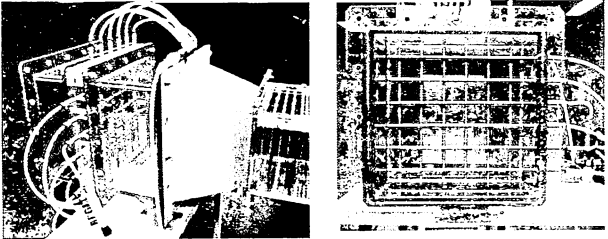


図-2 ガス供給部

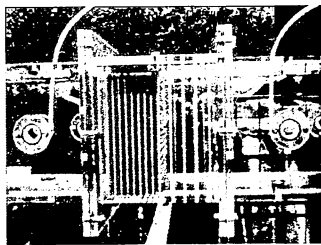


図-3 ACF 充填部

し、所定の充填密度、充填厚さで4種類のACF（2種類のピッチ系繊維状ACF、PAN系繊維状ACF、セルロース系フェルト状ACF）を充填した。大型拡散風洞から一定風速の気流を供給し、ACF通過前とACF通過後のNOx濃度をNOx分析計（HORIBA製 APNA360）で測定することにより、NOx除去性能を明らかにした。試験ガスは5ppmのNOガスと5ppmのNO₂ガスを所定濃度に希釈して使用した。実験条件は表1に示すように、充填密度 ϵ 、充填厚L、流入風速Uを変化させて測定を行った。

表-1 実験条件①

実験条件	範囲
ACF風上側風速	U= 0.30~1.85 m/s
ガス放出濃度	NO : 5 ppm (標準ガス) NO ₂ : 5 ppm (標準ガス)
ガス放出流量	Q= 5.0~20.0 l/min
ACF充填率	$\epsilon = 4.5 \times 10^{-3}, 9.0 \times 10^{-3}$
ACF充填厚さ	L= 30 mm

(2) 実験結果

4種類のACFに関するNOx除去実験の結果を表2に示す。実験で使用した4種類のACF（2種類のピッチ系繊維状ACF、PAN系繊維状ACF、セルロース系フェルト状ACF）全てのケースでNO₂を最高100%除去することができた。一方、NOはピッチ系繊維状ACF（SY-H800）のみによって5~31%の範囲で除去することができた。これらの結果か

ら、NO₂とNOの両方を除去できるピッチ系繊維状ACF（SY-H800）を使用して通風式フェンス模型を製作することとした。

表-2 NOx除去実験結果

ACFの種類	NO ₂ 除去率	NO除去率	備考
ピッチ系繊維状	~100%	5~31%	SY-H800
ピッチ系繊維状	~100%	0	OG-5A
PAN系繊維状	~100%	0	
セルロース系フェルト状	~100%	0	

3. ACFを充填したパネル型通風式フェンスのNOx除去性能の実験的解明

(1) 実験装置と実験方法

（財）電力中央研究所の大型拡散風洞内にパネル型通風式フェンス模型を設置し、床面に設置したラインソースから予め濃度を5ppmに調製したNO₂ガスとNOガスを放出後、フェンス周囲の濃度測定を行い、NOx除去性能を評価した。パネル型フェンス模型は、高さ220mm×幅130mm×長さ1040mmのアルミ製である。内部に200mm×長さ1000mmのステンレス製金網を2枚固定し、2枚の金網間にACFを所定の条件で充填することにより通風式フェンスを形成する。金網の設置間隔とACFの充填量を変えることにより、ACFの充填厚さと充填密度を設定することが可能である。ACFを充填した状態のフェンス模型の外観を図4に示す。

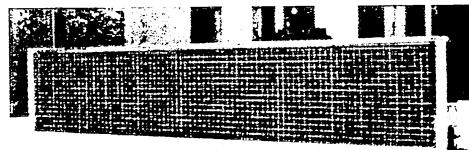


図-4 パネル型フェンス模型の外観

ここでは、①フェンスをラインソースの風下0.2mの位置に設置する場合と②フェンスをラインソースの風上0.2mの位置および風下0.2mの位置に設置する場合の2種類のフェンス配置条件に対して実験を行った。通風式フェンスにはピッチ系繊維状ACF（SY-H800）を充填し、気流風速、フェンス配置、充填厚さの異なる5ケース（表3）についてNOx除去実験を行った。フェンス配置の概略を図5に、ケースDの実験の様子を図6に示す。

表-3 実験ケース

実験 ケース	風速 U [m/s]	フェンス配置		ACF 充填厚さ L[mm]
		風上側①	風下側②	
A	3	—	○	20
B	1	—	○	20
C	3	—	○	40
D	3	○	○	20
E	1	○	○	20

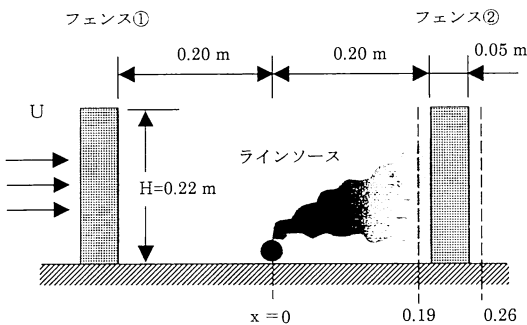


図-5 フェンス模型とラインソースの配置

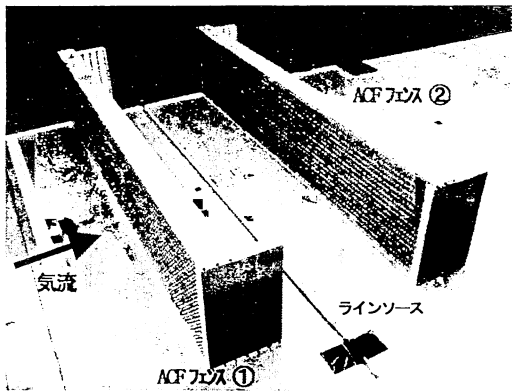


図-6 実験の様子（ケースD）

表-4 実験条件②

	風洞実験	想定した 実装置
模型縮尺	25 分の 1	—
フェンス高さ	0.22 m	5.5 m
道路幅	0.40 m	10 m
周囲流風速	$U=3.0 \text{ m/s}$	—
ACF 厚さ	$L=0.02, 0.04 \text{ m}$	0.5, 1.0 m
ACF 充填率	$\varepsilon = 2.25 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$	—
ガス放出条件	C ₂ H ₄ : 純ガス, 67 ml/s NO ₂ : 5 ppm, 170 ml/s NO: 5 ppm, 170 ml/s	—

フェンス模型の模型縮率は 25 分の 1 とし、実大気中に換算すると幅 10m の幹線道路沿いに高さ 5.5m の ACF フェンスが設置されるケースを風洞の中に模擬した。実験条件を表 4 に示す。風洞内に大気中と類似の気流場を形成するために、風洞入口に乱流格子、スパイア、アングルなどの乱流発生装置を設置し、十分発達した乱流境界層を模擬した。ACF フェンス周囲の気流分布は、第 2 章で使用了小型風路内のように一様ではなく、フェンスを通過する気流やフェンスを乗り越える気流が存在するため、複雑な大気拡散場が形成される。ここでは、ACF フェンス周囲の気流場と NO_x 除去性能の関係を詳細に調べるために、まず最初に ACF によって除去されないトレーサガスであるエチレン (C₂H₄) ガスをラインソースから放出し、ACF フェンス周囲の濃度分布を測定して大気拡散場を明らかにした。つぎに ACF によって除去される

試験ガス (NO, NO₂) をラインソースより放出し、ACF フェンス周囲の NO 濃度分布と NO₂ 濃度分布を測定した。これらの結果から、NO_x 除去率を評価し、ACF フェンスの NO_x 除去性能を評価した。

(2) 実験結果と考察

a) 実験ケース A の測定結果

ラインソース風下側のフェンス②のみを設置し、気流風速を $U=3\text{m/s}$ 、ACF 充填厚さを $L=20\text{mm}$ とした場合（ケース A）のフェンス前後の濃度分布を図 7 に示す。図の縦軸は高さ、横軸は気流風速 U とガス放出流量 Q で基準化された正規化濃度 CU/Q の値を示す。風洞内の流入気流は外気を取り入れており、NO_x バックグラウンド濃度変化の影響を取り除くため、NO と NO₂ の濃度測定結果 C はバックグラウンド濃度 C_{bg} を差し引いて CU/Q の値で評価した ($C^* = C - C_{bg}$)。フェンス前後の C₂H₄ 濃度分布の測定結果は、フェンス高さより低い $z \leq 200 \text{ mm}$ の領域ではほぼ一致しており、実験ケース A の ACF 充填条件ではフェンス風上側の気流が ACF フェンス内部を通過し、フェンス風下側に到達していることを裏付けている。また、C₂H₄ ガスを床面に設置したラインソースから放出している影響により、C₂H₄ 濃度分布は高さが低いほど増加している。NO₂ の濃度分布はフェンス前（風上側）では C₂H₄ 濃度分布に比べて大幅に減少しており、ACF フェンスにより NO₂ が除去されていることが明らかである。フェンス後（風下側）も同様に NO₂ の濃度は C₂H₄ 濃度分布に比べて大幅に減少し、ACF フェンスにより NO₂ が除去されていることがわかる。フェンス後の $z \leq 250 \text{ mm}$ の領域では正規化濃度 $(C - C_{bg}) \cdot U/Q$ の値が負を示しているが、これは ACF フェンスによりラインソースから供給した NO₂ に加えて流入気流中に含まれる NO₂ も除去されていることを示している。NO 濃度の分布形状は C₂H₄ 濃度分布と同様の傾向を示している。しかし、フェンス高さより低い領域 $z \leq 220\text{mm}$ ではフェンス風上側・風下側いずれにおいても NO 濃度は C₂H₄ 濃度より減少しており、NO が ACF フェンスにより除去されていることが明らかである。

b) 実験ケース B の測定結果

風下側のフェンス②のみを設置し、気流風速を $U=1\text{m/s}$ 、ACF 充填厚さを $L=20\text{mm}$ とした場合（ケース B）のフェンス前後の濃度分布を図 8 に示す。フェンス前後の C₂H₄ 濃度分布の測定結果は概ねケース A と一致しているが、フェンス風下側の高さ $z=250 \text{ mm}$ 付近で濃度分布が増加している。これは、風速が低い場合、ケース A に比べて、気流がフェンス内部の ACF 層を通過しにくくなり、その結果フェンスを乗り越える流れが増加し、この流れによってトレーサガスである C₂H₄ が輸送されて

いると考えられる。NO と NO₂ の濃度分布から、ケース A と同様に、ACF フェンスによって NO と NO₂ が除去されていることが明らかである。

c) 実験ケースDの測定結果

ラインソース風上側(前)、風下側(前)にフェンス①、フェンス②を設置し、気流風速を $U=3\text{m/s}$ 、ACF 充填厚さを $L=20\text{mm}$ とした場合 (ケースD) の風下側フェンス②前後の濃度分布を図 9 に示す。フェンス②風上側の C₂H₄ 濃度分布はケース A に比べて $z \leq 400\text{mm}$ の領域で大幅に増加している。これは、ラインソース前後に設置した 2 個の ACF フェンス間に循環流領域が形成され、ラインソースから放出された C₂H₄ がこの領域に滞留することによると考えられる。一方、フェンス②風下側の C₂H₄ 濃度分布は $z \leq 200\text{mm}$ の領域では低い値を示し、 $200\text{mm} \leq z \leq 400\text{mm}$ で緩やかなピークを示す。これは、フェンス②風上側ではフェンス①の影響によりケース A に比べて風速が低下してフェンスを通過する気流が抑制され、その結果フェンスを乗り越える気流により C₂H₄ がフェンス上部を通過してフェンス風下側に輸送されていると考えられる。NO₂ の濃度分布はフェンス②風上側、風下側でほぼ 0 を示した。ラインソースから放出された NO₂ は 2 個のフェンス間に形成された循環流動によりフェンス間に滞留し、その結果、ACF との接触時間が増大することにより放出された NO₂ のほとんどが除去されたと考えられる。ケースDでは、NO 濃度は $z=100\text{mm}$ でのみ測定された。フェンス②風上側の NO 濃度は C₂H₄ 濃度に比べて大幅に減少し、フェンス②風下側ではほぼ 0 を示している。この結果は、ACF フェンスによる NO 除去には ACF との接触時間を増やすことが効果的であることを示唆している。

c) NOx 除去率の評価

実験ケース A～E の測定結果から、次に定義される 3 種類の NOx 除去率を評価し、表 5 に示した。なお、NOx 除去率はフェンス高さ中央付近位置 ($z=100\text{mm}$) で評価した。

- ①Ru：フェンス上流側 NOx 除去率
- ②Rd：フェンス下流側 NOx 除去率
- ③R*：フェンス前後の NOx 除去率

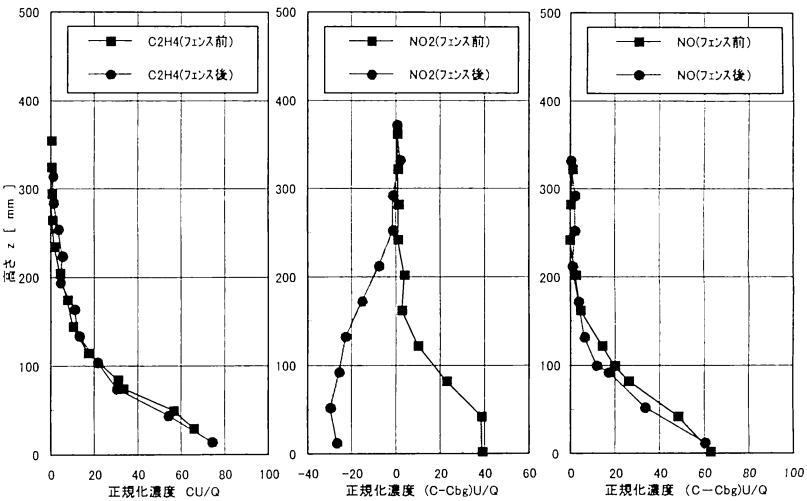


図-7 実験結果 (ケース A)

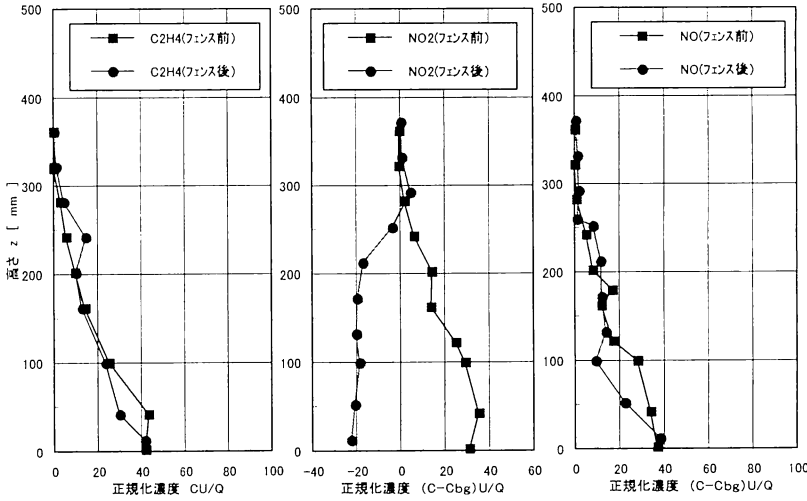


図-8 実験結果 (ケース B)

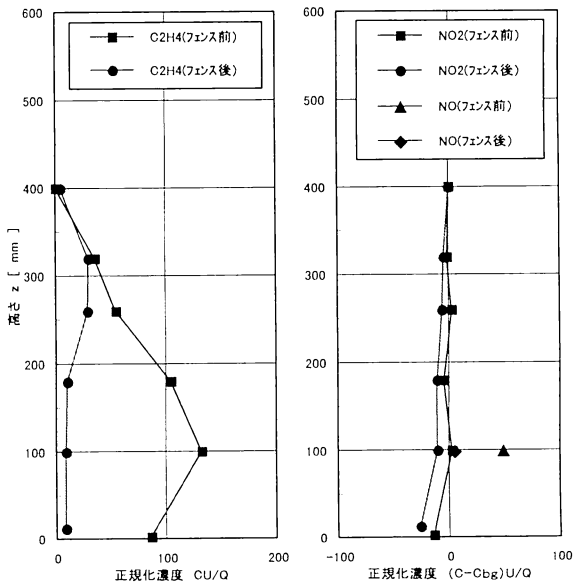


図-9 実験結果 (ケース D)

$$\begin{aligned}
 Ru &= 1 - (\text{フェンス上流側 NOx 濃度}) / (\text{フェンス上流側 C}_2\text{H}_4 \text{ 濃度}) \\
 Rd &= 1 - (\text{フェンス下流側 NOx 濃度}) / (\text{フェンス下流側 C}_2\text{H}_4 \text{ 濃度}) \\
 R^* &= 1 - (\text{フェンス下流側 NOx 濃度}) / (\text{フェンス上流側 NOx 濃度})
 \end{aligned}$$

表-5 NOx 除去率の評価結果

実験 ケース	風速 U [m/s]	フェンス配置		ACF L [mm]	NO ₂ 除去率 [%]			NO 除去率 [%]		
		①	②		Ru	Rd	R*	Ru	Rd	R*
A	3	—	○	20	24	100	100	5	48	45
B	1	—	○	20	—	100	100	—	58	67
C	3	—	○	40	—	—	33	—	—	40
D	3	○	○	20	98	100	100	69	67	90
E	1	○	○	20	89	50	44	—	—	—

実験ケースによっては実験データのバラツキから NOx 除去率を評価できないケースもあったが、ラインソース風上側，風下側にフェンス①，フェンス②を設置した実験ケースDが NO，NO₂とも除去率が高い結果が得られた。以上の結果から，つぎのことが明らかになった。

(1) ラインソース風下側にフェンスを設置した場合，気流が ACF フェンスを通過する充填条件を選べば，気流中の NO および NO₂を除去できる。本実験条件の範囲内では，パネル型通風式フェンスにより NO₂は最高 100%，NO は 45～67%除去された。

(2) ラインソース風上側，風下側にフェンスを設置した場合，2 個のフェンス間に形成される循環流の影響により ACF との接触時間が増加する結果，NO の除去率は増加する。

4. 実証試験用スリット型ACFフェンスユニットの NOx除去性能の実験的解明

(1) 実験装置と実験方法

ACF を充填した通風式フェンスの実証試験で使用されている ACF ユニットの NOx 除去性能を定量的に評価するためには，一定の風向風速条件下で NOx 除去率を明らかにすることが重要である。ここでは，大阪ガス㈱と福岡県保健環境研究所が実証試験用に開発したスリット型 ACF フェンス³⁾を 2 分の 1 に縮小したミニチュアユニットを(財)電力中央研究所の大型拡散風洞内に設置し，一定の風向風速条件下での実証試験用ユニットの NOx 除去性能を実験的に解明した。図 10 に実証試験用ユニットの外観と本ユニットを大型拡散風洞内に設置し，NOx 除去実験を実施している様子を示す。実証試験用 ACF ユニットの幅 0.25m×高さ 0.25m×長さ 0.2mであり，内部のスリットにピッチ系フェルト状 ACF (SY-H800) が貼付けられている。なお，ピッチ系 ACF (SY-H800) により NO および NO₂が除去されることは本研究により予め確認されている(第 2 章)。大型拡散風洞内に高さ 1.0mの二重壁(アクリル製)を 1.0m間隔で 2 枚設置し，NOx 除去試験用気流場を形成した。ラインソースから 0.2m下

流位置に実証試験用ユニットを 4 個並べて設置した。ACF ユニットのラインソースの配置を図 11 に示す。大型拡散風洞内の風速を設定後，ラインソースから NO および NO₂を放出し，ユニット前後の濃度を測定した。測定結果から NOx 除去率を評価した。なお，風速条件は U=0.5，1.0m/s とした。また，NOx 濃度測定には，NOx 分析計(HORIBA 製 APNA360)を使用した。

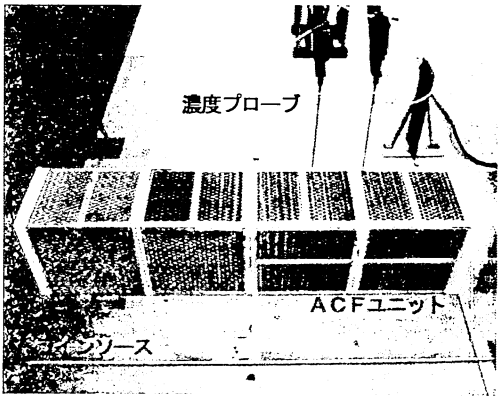


図-10 スリット型 ACF ユニットの NOx 除去実験の様子

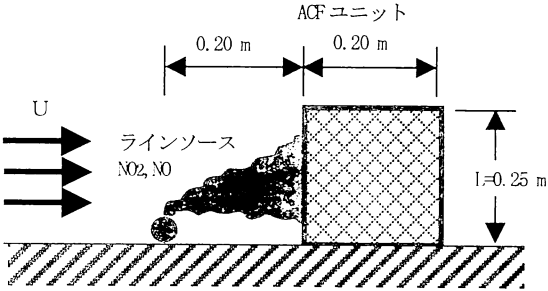


図-11 ACF ユニットの配置

(2) 実験結果と考察

図 12 に U=1.0m/s の場合の ACF ユニットの前後の NO₂濃度分布と NO₂除去率の分布を示す。また，図 13 に U=1.0m/s の場合のユニット前後の NO 濃度分布と NO 除去率の分布を示す。濃度値は上空風速 U と放出流量 Q で基準化した正規化濃度 CU/Q で示した。測定は数回実施し，その平均濃度分布を示した。また，高さ z < 200mm で評価された NOx 除去率を表 6 に示した。NO₂ 除去実験の結果では，ユニット入口 (x=0.19m) の NO₂ 濃度分布は測定位置が高いほど減少しており，これは NO₂ を床面

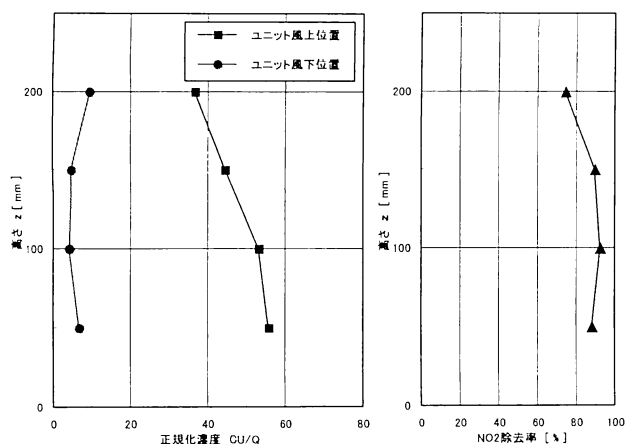


図-12 スリット型 ACF ユニットの NO_2 除去実験結果

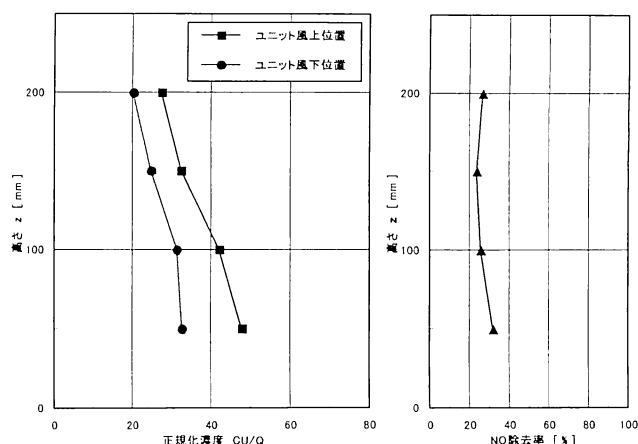


図-13 スリット型 ACF ユニットの NO 除去実験結果

表-6 スリット型 ACF ユニットの NO_x 除去率の評価結果

風速条件	NO_2 除去率	NO 除去率
$U=0.5 \text{ m/s}$	82~87 %	53~61 %
$U=1.0 \text{ m/s}$	88~92 %	24~31 %

に設置したラインソースから放出している影響による。ユニット出口 ($x=0.41\text{m}$) の NO_2 濃度分布はほぼ一定値を示し、 $U=0.5 \text{ m/s}$ の場合にも同様の傾向が見られた。 NO_2 除去率は $z=0.2\text{m}$ を除いて、 $U=1.0\text{m/s}$ の場合は 88~92 %、 $U=0.5 \text{ m/s}$ の場合には 82~87 % と評価され、風速が変化しても、ACF フェンスにより NO_2 を 80%以上除去できることが明らかになった。図 13 に $U=1.0\text{m/s}$ の場合の NO 除去実験時のユニット前後の NO 濃度分布と NO 除去率の分布を示す。ユニット入口 ($x=0.19\text{m}$) の NO 濃度分布は NO_2 濃度分布と同様にラインソースからの放出の影響により測定位置が高いほど減少している。ユニット出口では NO 濃度分布は入口濃度分布と同様に測定位置が高いほど減少する傾向を示した。NO 除去率は、 $U=1.0 \text{ m/s}$ の場合は 24~31%、 $U=0.5 \text{ m/s}$ の場合は 53~61% と評価され、風速が減少するほど NO 除去率は増加する傾向が見られた。このことは気流中の NO 除去には、ACF の接触時間をより長くすることが効果的であり、ACF による NO_2 除去のメカニズムと NO 除去のメカニズムには違いがあることを示唆している。

4. おわりに

都市大気中の窒素酸化物除去に効果的である高活性炭素繊維を充填した通風式フェンスの NO_x 除去性能を明らかにするために、風洞実験を実施した。その結果、以下

のことが明らかになった。

(1) パネル型通風式フェンスを道路風下側に設置した場合、実験条件の範囲内では NO_2 を 100%、NO を 45~67%除去できた。また、パネル型通風式フェンスを道路両側に設置した場合、フェンス間に形成される循環流の影響により、NO 除去率は大幅に増加した。

(2) 実証試験用スリット型通風式フェンスを使用した風洞実験により、実験条件の範囲内では NO_2 を 80%以上、NO を 20%以上除去できた。さらに、NO 除去には ACF との接触時間の増加が効果的である。

謝辞：本研究を実施するに当たり平成 17~19 年度の国土交通省建設技術開発研究助成の補助を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 北田敏廣，長野誠，下原孝章，市川陽一，神崎隆男：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 次元空間での数理性能評価. 第 14 回地球環境シンポジウム講演論文集, 53-58 (2006)
- 2) 下原孝章 (福岡県保健環境研究所)：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, 59p. (2007)
- 3) Yoshikawa, M., Shimohara, T., and Kitada, T.: Development of prevention technology of air pollution by activated carbon fiber. Proc. 13th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, 117-122 (2007)