

2. 高活性炭素繊維を充填した通風式フェンス による沿道大気浄化手法の開発 ー風洞実験によるNO_x除去性能の解明ー

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豊橋技術科学大学 エコロジー工学系（〒441-8580 豊橋市天伯町宇雲雀ヶ丘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

NO_x除去に有効な高活性炭素繊維（ACF, Activated Carbon Fiber）を充填した通風式フェンスは、新たな沿道大気浄化手法として注目されている。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、一定気流条件下でのACFフェンスの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、沿道大気拡散を模擬した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とスリット型通風式フェンスのNO₂除去率とNO除去率を評価し、ACF装着条件やフェンス配置条件の違いによるNO_x除去性能やNO_x除去メカニズムを明らかにした。

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

1. はじめに

都市幹線道路周囲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局所的に取り除くことが重要である。NO_x除去作用を有する高活性炭素繊維（ACF, Activated Carbon Fiber）を充填した通風式フェンス（ACF フェンス）を沿道に設置する方法は、近年、新たな沿道大気浄化手法として注目されており、福岡市や大阪市の幹線道路沿いで実証試験が実施され^{1),2)}、関東エリアでも導入が検討されている状況にある。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、洗浄により再生も容易であるため、環境面からも運転コストの面からも有望視されている。今後、新規導入時にACFフェンスの設計を行うためには、風向・風速が時間的に変化しない一定気流条件下でのNO_x除去性能やACFの適切な装着条件を明らかにすることが必要である。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、通風式フェンス周囲の沿道拡散場を風洞内に再現し、フェンス周囲のNO_x濃度を測

定することにより、ACFフェンスのNO_x除去性能やそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. ACFフェンスの特徴

ACFフェンスは、ACFの充填方法の違いにより、パネル型とスリット型の2種類のフェンスが提案されている。図1に示すように、パネル型通風式フェンスは、道路側面方向に繊維状ACFが均一に装着されており、スリット型通風式フェンスは、道路側面に垂直な方向のスリット内部にフェルト状ACFが装着されている。スリット型フェンスはスリット間に隙間が形成されるため、パネル型フェンスに比べて通気性が高い。最近の実証試験では、通気性を考慮してスリット型フェンスが多く使用されている。一方、パネル型フェンスは通気性が低い¹⁾がNO_x除去性能が良い¹⁾との報告もあるが、フェンス周囲のNO_x除去メカニズムや定量的なNO_x除去性能は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、パネル型フェンス模型を作製して風洞実験を実施し、NO_x除去性能を明らかにした。また、スリット型フェンスの実証試験用ユニッ

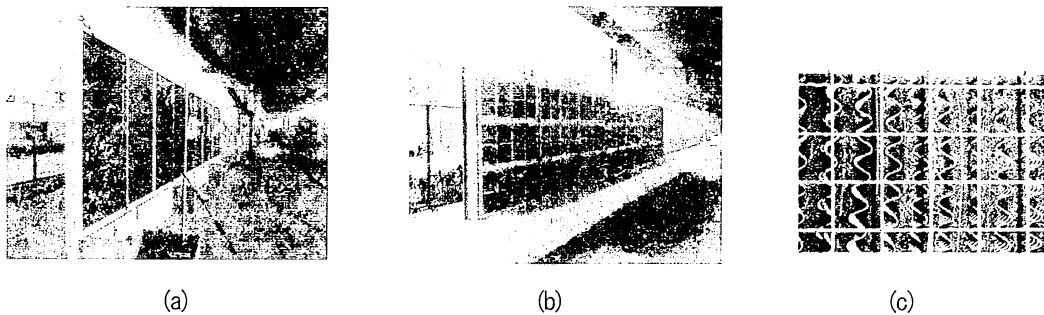


図-1 通風式フェンスの種類 (a)パネル型フェンス¹⁾, (b)スリット型フェンス²⁾, (c)スリット型フェンスの内部

トを使用して風洞実験を実施し、NO_x除去性能を明らかにした。なお、実験で使用した通風式フェンス模型及び実証試験用ユニットには、予めNO_x除去作用があることを確認した³⁾ピッチ系ACF (SY-H800) を充填した。

3. パネル型通風式フェンスのNO_x除去性能

(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 (試験セクション寸法: 幅 3.0m×高さ 1.7m×長さ 17m) にパネル型通風式フェンス模型を設置した。フェンス模型は、高さ 220mm×幅 130mm×長さ 1040mmのアルミ製であり、内部に 200mm×長さ 1000mmのステンレス製金網を 2枚固定し、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 2 に示す。また、フェンス周囲に二次元的な気流場を形成させるために、フェンス幅と等間隔で高さ 1m のアクリル板を 2 枚設置した。

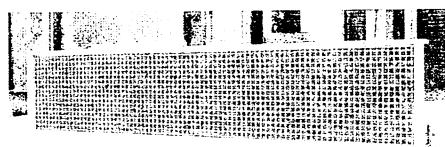


図-2 パネル型フェンス模型の外観

本実験では、フェンスを道路片側に設置した場合とフェンスを道路両側に設置した場合を想定し、図 3 に示すようにフェンス②をラインソースの風下 0.2m の位置に設置した場合と、フェンス①②をそれぞれラインソースの風上 0.2m および風下 0.2m の位置に設置した場合の 2 種類のフェンス配置条件に対して実験を行った。NO_x 除去実験では、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 ガスおよび NO ガスを放出後、風下側に設置したフェンス②前 (風上側) とフェンス②後 (風下側) で濃度測定を行い、NO_x 除去性能を評価した。表 1 に示すように気流風速、フェンス配置、充填厚

さの異なる 8 ケースについて NO_x 除去実験を行った。図 4 にケース E の実験の様子を示す。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 2 に示す。

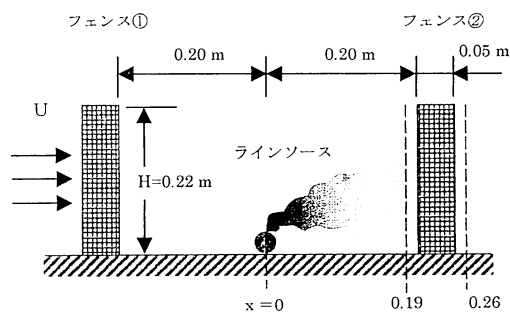


図-3 フェンス模型とラインソースの配置

表-1 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	1	—	○	40
E	3	○	○	20
F	1	○	○	20
G	3	○	○	40
H	1	○	○	40

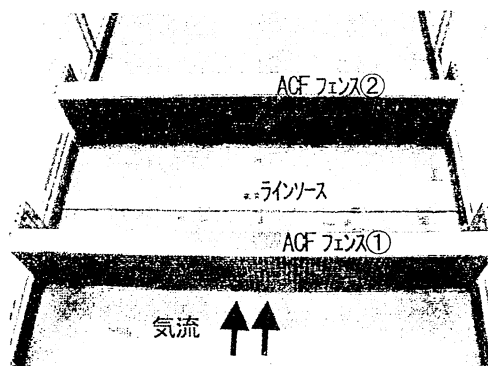


図-4 実験の様子 (ケース E)

表-2 実験条件

	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 m/s	—
ACF 厚さ	L=0.02, 0.04 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	C2H4: 純ガス, 67 ml/s NO ₂ : 5 ppm, 170 ml/s NO: 5 ppm, 170 ml/s	—

風洞内に大気中と類似の気流場を形成するために、試験セクション入口に乱流格子、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。周囲流風速はフェンス模型を気流が十分通過するよう 0.5 m/s と 1.0 m/s に設定した。ラインソースから放出された NO_x ガスは、フェンス周囲では大気拡散による希釈と ACF の吸着により濃度が減少する。ACF の吸着による濃度減少を正確に評価するため、予め 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、つぎに ACF によって吸着除去される NO, NO₂ をラインソースより放出し、NO_x 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

風下側のフェンス②のみを設置し、気流風速を U=3m/s, ACF 充填厚さを L=20mm としたケース A の測定結果を図 5 に示す。図 5 (a), (b) はフェンス前後の C₂H₄, NO および NO₂ の鉛直方向濃度分布である。図の縦軸はフェンス高さ (Hf=220mm) で無次元化した高さ z/Hf, 横軸は気流風速 U とガス放出流量 Q で基準化した正規化濃度 CU/Q の値を示す。NO 濃度と NO₂ 濃度は、風洞流入気流

中に含まれるバックグラウンド濃度を差し引いて示した。C₂H₄ 濃度はフェンス前後でほぼ等しく、このケースでは風上側気流が大量にフェンスを通過していることを裏付けている。また、NO_x 濃度はフェンス前後で減少し、ACF フェンスにより除去されていることがわかる。つぎに、ACF フェンスの NO_x 除去性能を詳細に調べるために、フェンス前後の C₂H₄ 濃度分布、NO 濃度分布、NO₂ 濃度分布から、次式で表される 3 種類の NO_x 除去率を評価した。

① フェンス風上側 NO_x 除去率: R_u

$$R_u = [1 - (C^*_{u, NO_x} / C^*_{u, C_2H_4})] \times 100 \quad (1)$$

② フェンス風下側 NO_x 除去率: R_d

$$R_d = [1 - (C^*_{d, NO_x} / C^*_{d, C_2H_4})] \times 100 \quad (2)$$

③ フェンス前後の NO_x 除去率: R*

$$R^* = [1 - (C^*_{d, NO_x} / C^*_{u, NO_x})] \times 100 \quad (3)$$

ここで、C_{u,i}, C_{d,i} はそれぞれ

C_{u,i}: フェンス風上側 i 成分正規化濃度

C_{d,i}: フェンス風下側 i 成分正規化濃度

である。フェンス鉛直方向中央付近の z/Hf=0.23, 0.45, 0.68 において (1) ~ (3) 式により評価した NO₂ 除去率、NO 除去率の分布を図 5 (c), (d) に示す。NO₂ 除去率はフェンス風上側除去率が R_u=33~53%, フェンス風下側除去率が R_d=100%, フェンス前後の除去率が R*=100%であった。一方、NO 除去率はフェンス風上側除去率が R_u=0~11%, フェンス風下側除去率が R_d=21~37%, フェンス前後の除去率が R*=26~55%であった。

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=1m/s, ACF 充填厚さを L=20mm としたケース B の測定結果を図 6 に示す。フェンス前後の C₂H₄ 濃度分布から、風速が減少したことにより、風上側気流がフェンスを通過しにくくなり、フェンスを乗り越える流れによってトレーサガス (C₂H₄) の一部が風下側に輸送されていることがわかる。NO と NO₂ の濃度分布は z/Hf ≤ 1.1 で C₂H₄ 濃度分布より減少しており、ACF フェンスによって除去されていることが明らかである。NO₂ 除去率はフェンス風

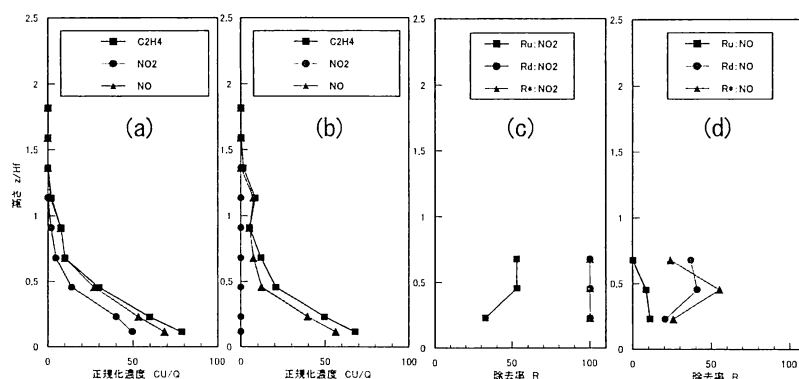


図-5 ケース A の測定結果 (a) フェンス前の濃度分布 (b) フェンス後の濃度分布 (c) NO₂ 除去率 (d) NO 除去率

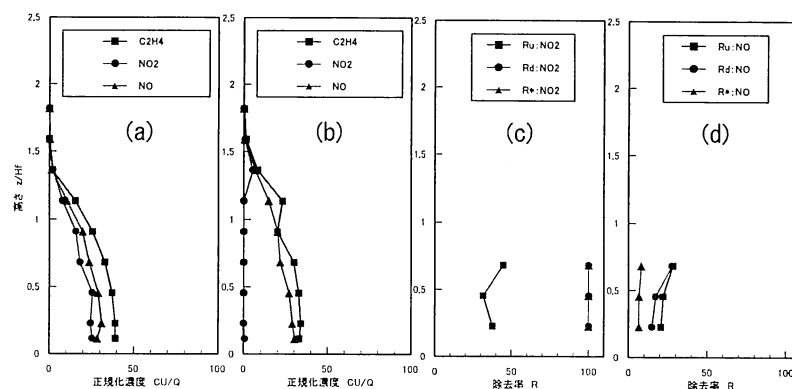


図-6 ケース B の測定結果 (a) フェンス前の濃度分布
(b) フェンス後の濃度分布 (c) NO₂ 除去率 (d) NO 除去率

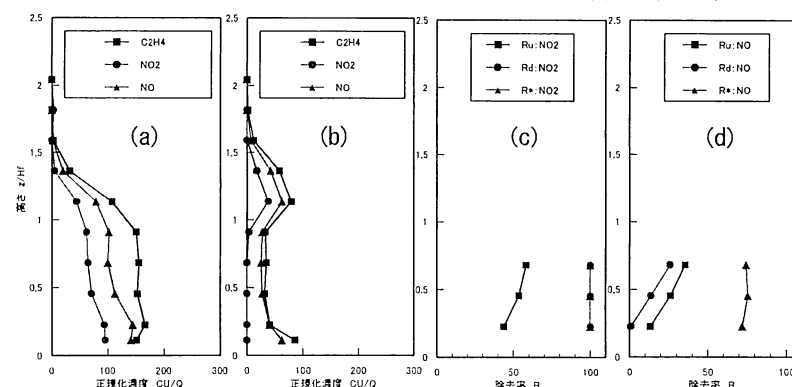


図-7 ケース E の測定結果 (a) フェンス前の濃度分布
(b) フェンス後の濃度分布 (c) NO₂ 除去率 (d) NO 除去率

上側除去率が $R_u=31\sim45\%$ 、フェンス風下側除去率が $R_d=100\%$ 、フェンス前後の除去率が $R^*=100\%$ であった。また、NO 除去率はフェンス風上側除去率が $R_u=21\sim28\%$ 、フェンス風下側除去率が $R_d=15\sim28\%$ であり、フェンス前後の除去率は $R^*=7\sim8\%$ と低く評価された。ケース B のように気流がフェンスを通過しにくい場合、フェンス前後の NO_x 除去率 R^* のみの評価では ACF の NO_x 除去性能を過小評価する可能性があり、フェンス風上側、風下側で局所的な NO_x 除去率を評価することが重要である。

c) 実験ケース E の測定結果

道路両側にフェンス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 $L=20\text{mm}$ としたケース E の風下側フェンス②前後の濃度分布を図 7 に示す。フェンス②風上側の C₂H₄ 濃度分布から、道路風上側フェンス①の存在により、フェンス①②間の領域は気流が弱まり、ラインソースから放出されたトレーサガスがフェンスを通過しにくくなり、フェンス風上側に高濃度で存在し、フェンスを乗り越える気流によってフェンス風下側上部に輸送されていることがわかる。フェンス②風上側では、NO₂ 濃度、NO 濃度は C₂H₄ 濃度より減少し、ACF フェンス風上側表層をトレーサガスが通過することにより NO_x が除去されていることがわかる。NO₂ 除去率はフェンス風

上側除去率が $R_u=44\sim58\%$ 、フェンス風下側除去率が $R_d=100\%$ 、フェンス前後の除去率が $R^*=100\%$ であった。NO 除去率はフェンス風上側除去率が $R_u=13\sim36\%$ 、フェンス風下側除去率が $R_d=1\sim26\%$ であった。ここで、フェンス前後の除去率は $R^*=72\sim76\%$ と高く評価されているが、これはフェンス風下側の NO 濃度が低いことに起因しており、ACF フェンスの除去効果のみによる影響ではない。これらの結果から、パネル型通風式フェンス周囲の拡散場は ACF 充填条件や風速条件、フェンス配置により大きく変化し、その結果 NO_x 除去率も変化しており、フェンス近傍での NO_x 除去性能評価を行う上では、NO_x の局所除去率の評価が重要であることが明らかになった。

d) NO_x 除去率の評価結果

実験ケース A～H に対する 3 種類の NO_x 除去率（フェンス風上側 NO_x 除去率 R_u 、フェンス風下側 NO_x 除去率 R_d 、フェンス前後の NO_x 除去率 R^* ）を実験条件とともに表 3 に示した。なお、除去率は、フェンス鉛直方向中心部分の 3 点 $z/H_f=0.23, 0.45, 0.68$ で評価した値の平均値を表中に示した。また、表中にカッコ () で示したケース F の結果は、風下側 NO_x 濃度値が低く、参考値である。ACF フェンスを道路片側に設置したケース A～D で

表-3 NO_x 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 充填 厚さ L [mm]	NO ₂ 除去率[%]			NO 除去率[%]		
		風上 側①	風下 側②		Ru	Rd	R*	Ru	Rd	R*
A	3	—	○	20	46	100	100	6	33	35
B	1	—	○	20	38	100	100	24	20	7
C	3	—	○	40	33	100	100	35	17	8
D	1	—	○	40	42	100	100	31	18	21
E	3	○	○	20	52	100	100	25	14	74
F	1	○	○	20	45	(80)	(97)	16	(57)	(96)
G	3	○	○	40	44	—	—	16	—	—
H	1	○	○	40	57	—	—	14	—	—

は、NO₂ 除去率は風上側除去率 Ru=33～46%、風下側除去率 Rd とフェンス前後の除去率 R*はいずれも 100%であった。また、フェンスを気流が通過しにくいケース B～D でもフェンス風上側で 33～42%の NO₂ が除去されていることが明らかになった。一方、NO 除去率は風上側除去率 Ru=6～31%、風下側除去率 Rd=17～33%、フェンス前後の除去率 R*=7～35%であった。フェンスを気流が通過しやすいケース A では、風上側除去率は Ru=6%であったが、風下側除去率は Rd=33%、フェンス前後の除去率 R*=35%と比較的高い除去率が得られた。一方、フェンスを気流が通過しにくいケース B～D では、風上側除去率は Ru=24～35%であり、風下側除去率 Rd=17～20%に比べて高い値が得られた。ACF フェンスを道路両側に設置したケース E～H では、NO₂ 風上側除去率は Ru=44～57%であり、ケース A～D よりも高い除去率が得られた。これはラインソースから放出された NO および NO₂ がフェンス間の領域に滞留してフェンス②風上側で高濃度が生じることに因る。また、風下側除去率も Rd=80～100%と高く、本実験で実施した条件の範囲内では ACF フェンスにより NO₂ を 100%近く除去できることが明らかになった。フェンス前後の除去率は R*=97～100%であった。NO 風上側除去率は Ru=14～25%とケース A～D に比べて低く、NO₂ と比べて約 30%低い値であった。

4. スリット型通風式フェンスのNO_x除去性能

(1) 実験装置と実験方法

吉川、下原ら⁴⁾は実証試験用スリット型通風式フェンスユニットのスリット幅や ACF 厚さを変えて大阪市国道 43 号沿いの実証試験地点で野外実験を行い、従来型よりも NO_x 除去性能の高い ACF ユニットの提案している（以後、改良型ユニットとよぶ）。実証試験で使用されている ACF ユニットの NO_x 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 NO_x 除去率を明らかにすることが重要である。ここでは、実証試験で使用されている改良型ユニットの断面積を 4 分の 1 に縮小したユニ

ットを使用し、(財)電力中央研究所の大型拡散風洞内に再現した大気境界層中にユニットを設置し、NO_x 除去実験を行うことにより、改良型ユニットの NO_x 除去性能を明らかにした。図 8 に実証試験用ユニットの外観と NO_x 除去実験の様子を示す。改良型ユニットは幅 0.25m×高さ 0.25m×長さ 0.2m であり、8mm 間隔のスリットに厚さ 5mm のピッチ系フェルト状 ACF (SY-H800) が貼付けられている。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、NO_x 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。風洞内の風速を設定後、図 8 に示すようにラインソースから 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 NO_x 除去率を評価した。風速条件は沿道での実証試験時の観測結果と同等の U=0.5, 1.0m/s とした。また、NO_x 濃度測定には、NO_x 分析計（HORIBA 製 APNA360）を使用した。

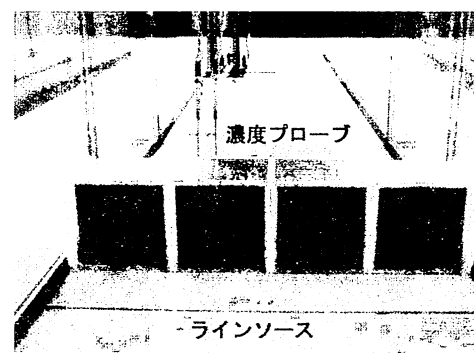
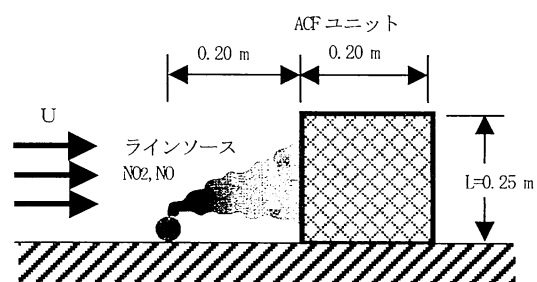
図-8 改良型 ACF ユニットの NO_x 除去実験の様子

図-9 ACF ユニットのラインソースの配置

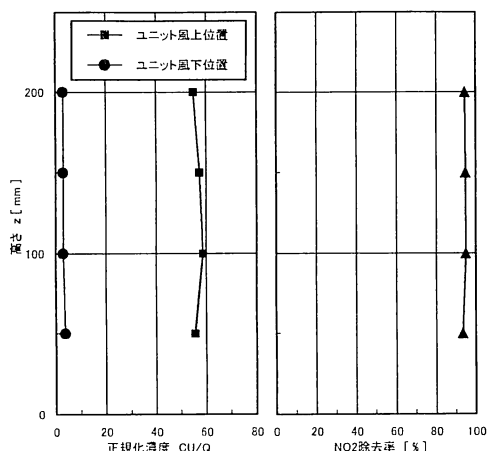


図-10 NO₂除去実験結果（改良型:U=1.0m/s）

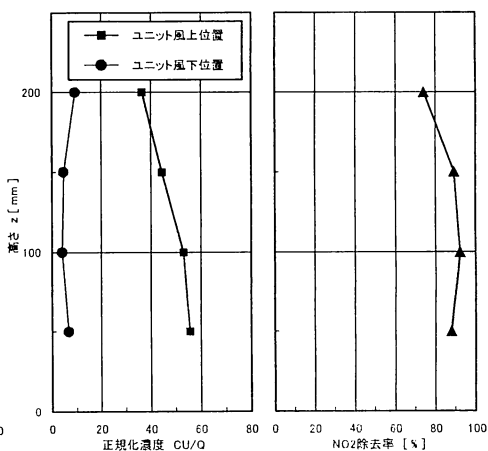


図-11 NO₂除去実験結果（従来型:U=1.0m/s）

(2) 実験結果と考察

図 10 に風洞内気流条件を $U=1.0\text{ m/s}$ に設定した場合の NO_2 除去率の測定結果を示す。また、比較のために従来型ユニット（ACF 厚さ 6 mm ，スリット幅 8 mm ）の測定結果³⁾を図 11 に示した。従来型ユニットでは， NO_2 除去率はユニット中央付近($z=0.1\text{ m}$)で約 90% であり，地上放出とフェンス周囲の気流の影響により，フェンス上部で NO_2 除去率が低い値を示しているが，改良型ユニットでは通風性が改善された結果，ユニット風上側濃度，風下側濃度はほぼ一定値を示し，除去率も約 94% のほぼ一定値であった。表 4 に従来型ユニットと改良型ユニットを使用した場合の NO_2 除去率と大阪市国道 43 号沿いで実施された野外実験結果を示した。本実験結果は野外実験結果と同様の傾向を示し，スリット型 ACF フェンスによる NO_2 除去には通風性を向上させることが有効であることが明らかになった。

表-4 スリット型 ACF エットの NO_2 除去率の評価結果

風速条件	従来型ユニット	改良型ユニット
$U=0.5\text{ m/s}$	82～87 %	86～93 %
$U=1.0\text{ m/s}$	88～92 %	94 %
野外実験 ⁴⁾	84 %	96 %

5. おわりに

新たな沿道大気浄化手法として注目されてい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，沿道大気拡散を模擬した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片側に設置した場合，フェンス内を通過する気流とフェンスを乗り越える

気流により NO_x が除去される，実験条件の範囲内では， NO_2 除去率はフェンス風上側で $33\sim46\%$ ，風下側ではほぼ 100% であり， NO 除去率はフェンス風上側で $6\sim35\%$ ，風下側で $17\sim33\%$ であった。

(2) パネル型通風式フェンスを道路両側に設置した場合， NO_x は風下側フェンスを通過しにくく，道路両側のフェンス間に滞留して風下側フェンス②の表面で除去される。実験条件の範囲内では，フェンス風上側の NO_2 除去率は $44\sim57\%$ ， NO 除去率は $14\sim25\%$ であった。

(3) スリット型通風式フェンスの通風性を向上した改良型ユニットの NO_2 除去率は従来型ユニットに比べて増加し野外実験結果と同様の傾向を示した。スリット型 ACF フェンスによる NO_2 除去には通風性を向上させることが有効である。

参考文献

- 1) Shimohara, T., Niiya, S., Yoshikawa, M., Kitada, T., Mochida, I.: A wide-area scavenging technology of air pollutants using activated carbon fiber. *Proc. 14th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment* (2008)
- 2) 松井敏彦，下原孝章，吉川正晃，新しい大気浄化技術を用いた局地汚染対策及び浄化性能評価，第 41 回（平成 20 年度）研究発表会発表論文集，（社）建設コンサルタント協会近畿支部（2008）
- 3) 神崎隆男，市川陽一，北田敏廣，下原孝章，吉川正晃：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，第 16 回地球環境シンポジウム講演論文集，73-78（2008）
- 4) 吉川正晃，下原孝章，北田敏廣，松井敏彦：沿道大気浄化向け活性炭素繊維ユニットの最適化. 第 49 回大気環境学会年会講演要旨集，239（2008）