

光触媒を利用した膜構造建築物の NO_x 除去性能の可視化

吉野 達矢 *
阿部 和広 **
親川 昭彦 ***

梗概

酸化チタン光触媒の NO_x 除去性能は、ある一定量までの範囲においては、その対象となるガスに含まれる NO_x の量に比例した特性を示すことがわかっている。したがって、酸化チタン膜材料も同様な特性を有していることが想定できる。

そこで、酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能を求めることを目的に、この特性を考慮した酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能関数を定義した。また、この関数を導入した CFD 解析により、酸化チタン膜構造建築物の形状に依存した NO_x 除去性能の推定を試みた。

1. はじめに

汚染物質の一つである窒素酸化物（以下、 NO_x ）は、呼吸器疾患など健康に影響を及ぼすばかりでなく、光化学スモッグや酸性雨の原因となっている。この NO_x に係る環境基準¹⁾は「1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内又はそれ以下であること」と規定されている。しかし、環境基準の達成状況²⁾は、平成14年度で、一般環境大気測定局では99.1%、自動車排出ガス測定局では83.5%であり、自動車 $\text{NO}_x \cdot \text{PM}$ 法³⁾や自動車排出ガス規制⁴⁾のように NO_x などの排出を規制しているが、環境基準を達成できていないのが現状である。したがって、 NO_x 濃度の低減対策として、発生源を抑える方法だけでなく、排出された後に除去する方法が必要とされている。

酸化チタン光触媒^{5,6)}は光照射下で防汚、防曇、抗菌、脱臭、汚染物質の分解・除去などの機能を有していることが知られている。この酸化チタン光触媒をコーティングした膜材料も同様な特性を有していることから、排出された後に NO_x を除去する方法にこの膜材料が含まれる。

酸化チタン光触媒による NO_x 除去に関する研究には竹内^{6,7)}、村田ら^{8,9)}の研究がある。これらの研究によれば、酸化チタン光触媒の NO_x 除去性能は供給するガ

スに含まれる一酸化窒素（以下、 NO ）量に条件付で比例することが示されている。これは曲面形状の自由度が高い膜構造建築物にとって、重要な特性である。つまり、曲面形状の膜構造建築物はその形状から膜面上の流速は周囲の風速とは一致せず、流速が速くなる場合もある。したがって、酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能は、単に、単位面積除去性能と膜材料の表面積の積ではなく、形状に依存した値になる。

著者らは酸化チタン光触媒をコーティングした膜材料A種（以下、酸化チタン膜材料）を対象として NO_x 除去性能の評価を行った。試験方法は光触媒材料の窒素酸化物除去性能を評価する日本工業規格 JIS R 1701-1:2004¹⁰⁾（以下、JIS 試験法）である。これにより、酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能を確認することができた。

そこで、本報告では、酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能の推定を目的に、1) 酸化チタン膜材料表面を通過する NO_x 量に依存した NO_x 除去性能関数を定義する。この関数を用いて、2) バス停のシェルターを対象として、酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能の推定を行う。なお、CFDの解析ソフトウェアにはCradle社のSCRUYU/Tetra Ver.5を用いる。

* 太陽工業株式会社 空間技術研究所 博士（工学）
** 太陽工業株式会社 空間技術研究所
*** 太陽工業株式会社 技術企画室

2. JIS 試験法による酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能

光触媒材料の NO_x 除去性能の評価方法として、JIS 試験法が規定されている。ここで対象とする酸化チタン膜材料についても、JIS 試験法により性能を評価したので、その結果を示す。ただし、試験で供給するガスに含まれる NO_x は NO だけであるが、試験体表面においては、酸化チタンの作用により、 NO は二酸化窒素（以下、 NO_2 ）へ、 NO_2 は硝酸（以下、 HNO_3 ）に変化する。したがって、供給する窒素酸化物は NO だけであるが、 NO および NO_2 が除去されることから、 NO_x の除去性能と呼ぶ。

まず、JIS 試験法の概略を以下に示す。試験装置の内、試験片が取り付けられる光照射容器の例を図1に、試験条件を表1に示す。光照射容器には、体積濃度 1.0volppm 、流速 $3.0\ell/\text{min}$ で NO を含むガスを注入する。中央部には幅 50mm 、長さ 100mm の酸化チタン膜材料が取り付けられており、波長 $300 \sim 400\text{nm}$ の紫外線を照度 $10\text{W}/\text{m}^2$ で5時間照射する。

試験の結果、 NO_x 除去量は $0.65\mu\text{mol}/(50\text{cm}^2 \cdot 5\text{h})$ であった。つまり、

$$\begin{aligned} &0.65\mu\text{mol}/(50\text{cm}^2 \cdot 5\text{h}) \\ &=2.17 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \text{s}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、分子量は NO の $30\text{g}/\text{mol}$ を用いて算出した。なお、この試験結果に関する詳細は別報にて示すため、ここでは省略する。

3. NO_x 除去性能関数

竹内^{6,7)}、村田ら^{8,9)}の研究によると、酸化チタン光触媒の NO_x 除去性能は供給するガスに含まれる NO 量に比例する。ただし、ある量を超えると非線形性が表れてくる。この特性は酸化チタン膜材料においても同

表1 試験条件

項目	試験条件
試験片の大きさ	幅 50mm 、長さ 100mm
供給ガスの流量	$3.0\ell/\text{min}$
供給ガスの温度	$25 \pm 2.5^\circ\text{C}$
供給ガスの NO 体積濃度	1.0volppm
供給ガスの水蒸気濃度	$1.56\text{vol}\%$
紫外線照度	$10\text{W}/\text{m}^2$
紫外線照射時間	5hr

様であると考え、次に示す仮定の基に CFD 解析用 NO_x 除去性能関数を定義する。

- 1) 濃度とは、体積濃度を示す。
- 2) NO_x 濃度は NO 濃度と NO_2 濃度の和とする。
- 3) NO_x のモル質量を NO の $30\text{g}/\text{mol}$ で計算する。
- 4) NO_x 除去性能は供給するガスに含まれる NO_x 量に常に比例する。
- 5) JIS 試験法において、酸化チタン膜材料表面の流速に対する抵抗を無視し、流れに直交する断面においては、流速を一定と仮定し、平均流速で考える。よって、幅方向の濃度分布は一定となる。（一般には壁面抵抗により、壁面では流速ゼロとなり、速度分布は一定とならない。したがって、膜表面の流速を定義することは問題を難しくすることになるため、抵抗を無視した）。

酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能関数 D は

$$D = D_{JIS} \frac{\rho d A v C}{\rho d A v_{JIS} C_{JIS}} = D_{JIS} \frac{v C}{v_{JIS} C_{JIS}} \quad (2)$$

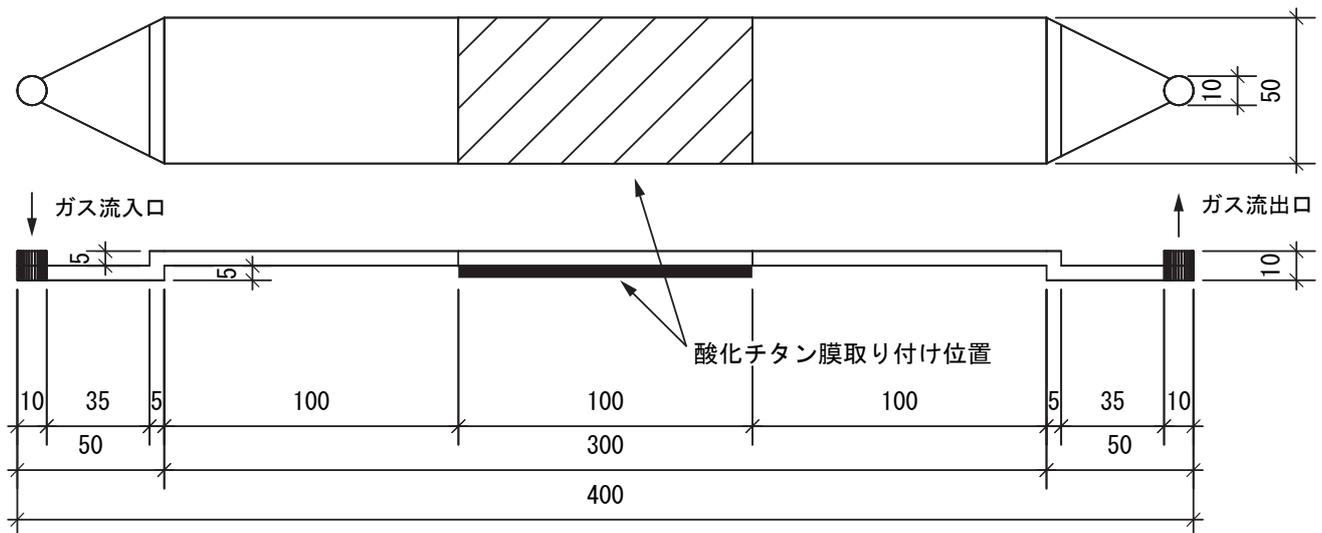


図1 光触媒容器

ここに,

- C NO_x 濃度 (CFD 解析における変数)
- v 流速 (CFD 解析における変数)
- dA 酸化チタン膜材料の表面上の微小断面積
- C_{JIS} JIS 試験時の平均 NO_x 濃度 ($= 0.991 \times 10^{-6}$)
- v_{JIS} JIS 試験時の平均流速 ($= 0.2 \text{ m/s}$)
- D_{JIS} NO_x 除去性能 ($= 2.17 \times 10^{-10} \text{ kg/(m}^2 \text{ s)}$)
- ρ NO_x の単位体積重量 ($= 1.227 \text{ kg/m}^3$)

となる。なお、 C_{JIS} は以下の手順で求めた。JIS 試験法において、供給する NO 量は、 25°C の空気 24.45 l/mol より、

$$\frac{30 \text{ g/mol}}{24.45 \text{ l/mol}} \times 3 \text{ l/min} \times 1 \text{ ppm} = 6.135 \times 10^{-11} \text{ kg/s} \quad (3)$$

また、酸化チタン膜材料の除去量は

$$0.217 \times 10^{-10} \text{ kg/(m}^2 \text{ s)} \times 50 \text{ cm}^2 = 1.084 \times 10^{-12} \text{ kg/s} \quad (4)$$

であることから、除去率は、

$$\frac{1.084 \times 10^{-12}}{6.135 \times 10^{-11}} = 0.018 (1.8\%) \quad (5)$$

となる。したがって、光照射容器の出口における NO_x 濃度は 0.982 ppm となる。

JIS 試験法における流れの方向 x に対する NO_x の濃度変化を次式で仮定する。ただし、 $\ell = 1 \sim 0.1 \text{ (m)}$ 。

$$C(x) = Ae^{-Bx} \quad (6)$$

ここで、 $C(x=0) = 1.0 \times 10^{-6}$ 、 $C(x=0.1) = 0.982 \times 10^{-6}$ であることより、 $A = 10^{-6}$ 、 $B = 0.0182$ となり、

$$C(x) = 10^{-6} e^{-0.0182x} \quad (7)$$

となる。したがって、膜面上の平均 NO_x 濃度 C_{JIS} は、

$$\begin{aligned} C_{JIS} &= \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} C(x) dx \\ &= \frac{1}{0.1} \int_0^{0.1} C(x) dx \\ &= \frac{1}{0.1} \int_0^{0.1} 10^{-6} e^{-0.182x} dx \\ &= \frac{10^{-6}}{0.1} \left[\frac{1}{-0.182} e^{-0.182x} \right]_0^{0.1} \\ &= 0.991 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。

以上で、酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能関数 D に必要な定数を求めることができた。

4. 酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去効果の可視化

JIS 試験法に基づいて、酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能関数 D を示した。そこで、この NO_x 除去性能を考慮した CFD 解析を行い、膜構造建築物の NO_x 除去効果の可視化を試みる。バス停のシェルターを対象として、酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能の推定を行う。シェルター形状は平面形と円弧形の 2 種類を対象とした。

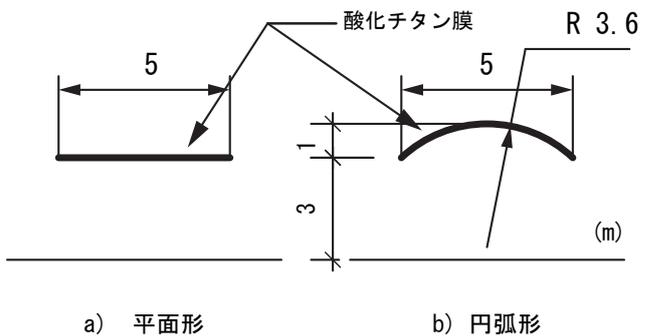


図 2 酸化チタン膜の形状

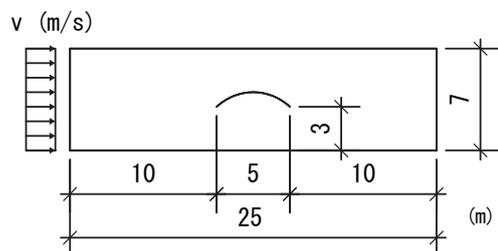


図 3 円弧形の解析モデル立面図

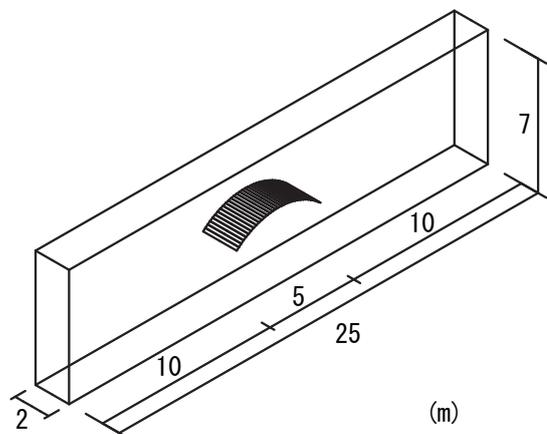


図 4 円弧形の解析モデル透視図

解析対象とする酸化チタン膜構造の形状を図2に示す。なお、酸化チタン光触媒がコーティングされている面は図の上側のみとする。解析空間は $25 \times 2 \times 7\text{m}$ とし、中央部に酸化チタン膜構造を配置する。円弧形の解析モデルを図3,4に、解析条件を表2に示す。ただし、平面形の場合も同様な解析モデルとする。図5にCFD解析用メッシュを示す。なお、関数の検証のために、円弧形の風速 1.0m/s のみ、 NO_x 濃度 2.0volppm についても解析を実施する。

解析の結果、 NO_x 除去性能を表3に、図6,7に風速 1.0m/s 、 NO_x 濃度 1.0volppm の場合の流速分布および NO_x 濃度を示す。

表から、平面形および円弧形のそれぞれにおいて、 NO_x 除去性能は風速および NO_x 濃度に比例していることがわかる。また、平面形と円弧形を比較すると、単位面積あたりの NO_x 除去性能は平面形に比べ円弧形は約1.8倍有していることがわかる。これは、図6,7の

表2 解析条件

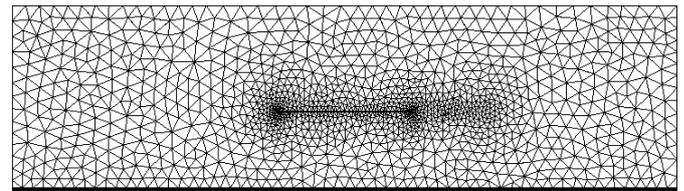
項目	解析条件
供給ガスの流速	1.0m/s 、 2.0m/s
供給ガスの NO_x 濃度	1.0volppm ただし、円弧形の 1.0m/s のみ 2.0volppm
酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能関数	$D = D_{JIS} \frac{vC}{v_{JIS}C_{JIS}}$ ただし、 $v_{JIS} = 0.2\text{m/s}$ 、 $C_{JIS} = 0.991 \times 10^{-6}$
乱流モデル	標準 $k-\varepsilon$ 方程式
供給ガスの乱流エネルギー	$4.05 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$
供給ガスの乱流消失率	$6.06 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^3$

比較からわかるように、円弧形の場合、膜面上の流速が速く（最大 2.0m/s ）なっているためである。

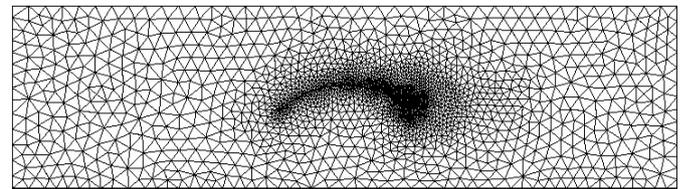
5. まとめ

酸化チタン膜材料の NO_x 除去性能をCFD解析用 NO_x 除去性能関数として定義し、JIS試験法によって得られた結果から関数に用いる定数を求めた。また、CFD解析にこの関数を導入し、酸化チタン膜構造建築物（ここでは、バス停のシェルター）の NO_x 除去性能を求めた。この結果、形状の違いによる NO_x 除去性能を定量的に求めることができることを示した。

ここで定義した NO_x 除去性能関数は流速および NO_x 濃度に常に比例することを仮定した。しかしながら、酸化チタン光触媒の NO_x 除去性能は一定以上の流速、または、 NO_x 濃度に達した段階で、非線形性が表れることが既往の研究からわかっている。したがって、酸化チタン膜材料も同様であることが予想されるため、酸化チタン膜材料の非線形特性を明らかにし、非線形性を考慮した NO_x 除去性能関数を定義することにより、実際の酸化チタン膜構造物の NO_x 除去性能により近い NO_x 除去性能を求めることが可能となる。



(a) 平面形

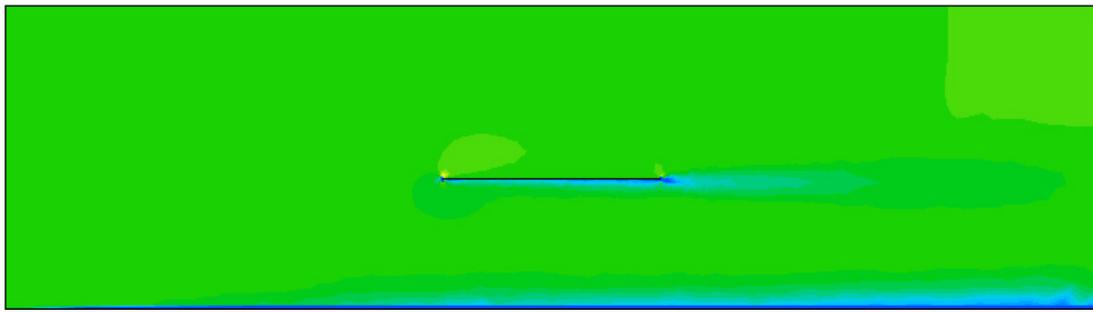


(b) 円弧形

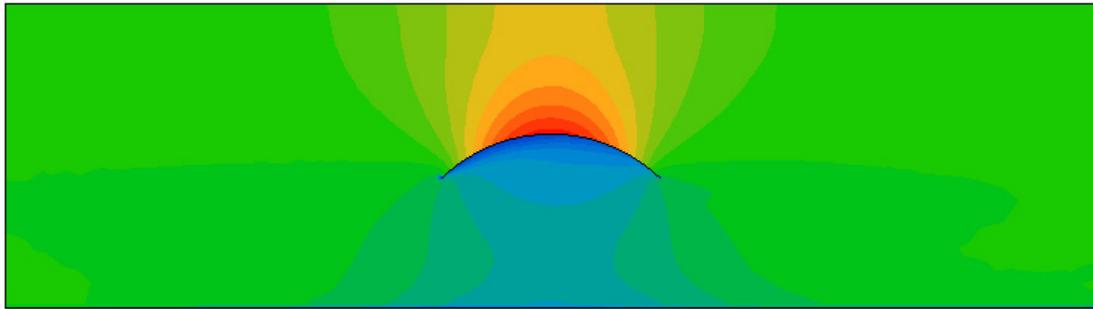
図5 CFD解析用メッシュ

表3 酸化チタン膜構造建築物の NO_x 除去性能

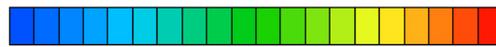
膜面形状	-	平面形		円弧形		
膜表面積	m^2	10.00		11.03		
風速	m/s	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0
NO_x 濃度	volppm	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0
供給 NO_x 量	kg/s	1.6600E-05	3.3200E-05	1.6600E-05	3.3200E-05	3.3200E-05
通過 NO_x 量	kg/s	1.6591E-05	3.3183E-05	1.6583E-05	3.3167E-05	3.3167E-05
NO_x 除去量	kg/s	8.6164E-09	1.7233E-08	1.6732E-08	3.3464E-08	3.3464E-08
NO_x 除去性能	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$	8.6164E-10	1.7233E-09	1.5172E-09	3.0343E-09	3.0343E-09
性能比率	-	100%	200%	176%	352%	352%



(a) 平面形



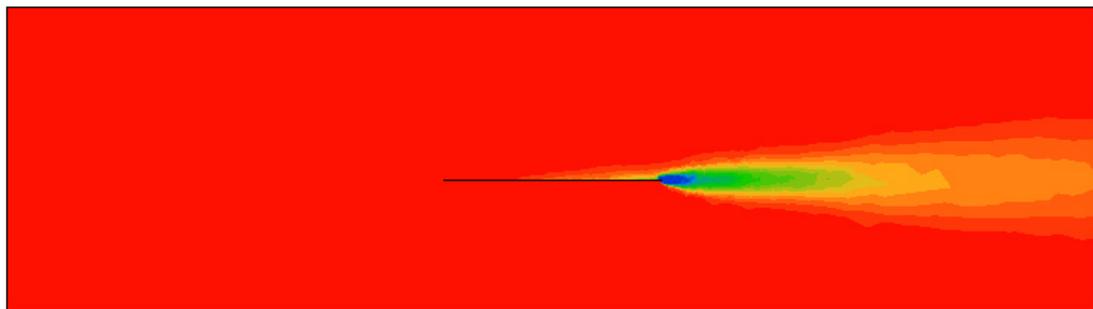
(b) 円弧形



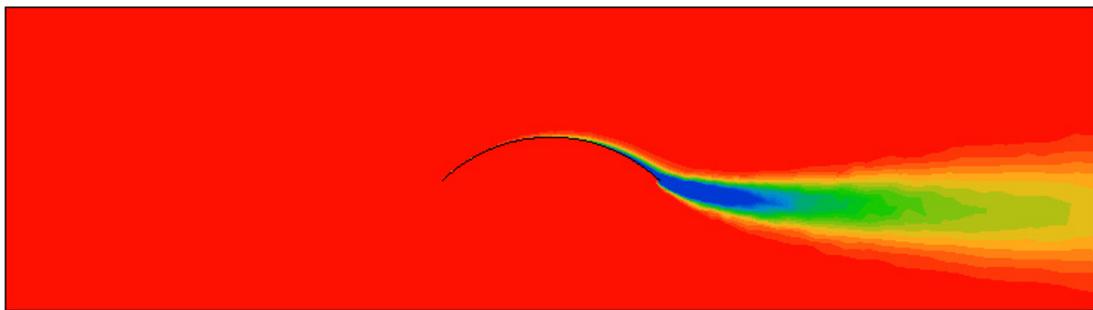
0.0m/s

2.0m/s

図6 流速分布（風速1.0m/s，供給ガスのNO_x濃度1.0volppm）



(a) 平面形



(b) 円弧形



0.99volppm

1.0volppm

図7 NO_x濃度分布（風速1.0m/s，供給ガスのNO_x濃度1.0volppm）

参考文献

- 1) 平成 8 年環境庁告示 74 号, 二酸化窒素に係る環境基準について, 平成 8 年 10 月 25 日
- 2) 公害防止の技術と法規編集委員会編: 五訂・公害防止の技術と法規 [大気編], 平成 17 年 4 月 10 日
- 3) 平成 17 年法律第 33 号, 自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法, 平成 17 年 4 月 27 日
- 4) 道路輸送車両の保安基準の細目を定める告示, 平成 17 年 12 月 2 日
- 5) 藤嶋昭, 橋本和仁, 渡部俊也: 光クリーン革命, シーエムシー, 1997 年 1 月
- 6) 竹内浩士, 村澤貞夫, 指宿堯嗣: 光触媒の世界, 工業調査会, 1998 年 4 月
- 7) 竹内浩士: 光触媒による環境大気の浄化・修復技術, 0 plus E, NO. 211, pp. 94-100, 1997 年 6 月号
- 8) 村田義彦, 飛内圭之: 光触媒を利用したセメント系材料の NO_x 除去性能測定方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 550 号, pp. 1-6, 2001 年 12 月
- 9) 村田義彦, 飛内圭之: 光触媒を利用した透水性インターロッキングブロックの NO_x 除去性能に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, pp. 9-15, 2002 年 5 月
- 10) 日本工業規格 JIS R 1701-1 : 2004, ファインセラミックスー光触媒材料の空気除荷性能試験方法ー第 1 部: 窒素酸化物の除去性能, 平成 16 年 1 月 20 日

VISUALIZATION OF NO_x REMOVAL PERFORMANCE FOR STRUCTURE USING PHOTOCATALYTIC MEMBRANE

Tatsuya Yoshino*, Hirokazu Abe**, Akihiko Oyakawa***

SYNOPSIS

The present study tries at visualization of NO_x removal performance of structures using TiO_2 photocatalyst membrane materials. TiO_2 photocatalyst membrane materials have the environment purifying capability.

This characteristic is in proportion to quantity of NO_x included in gas. First, the removal performance function based on the characteristic was defined. Second, about the structure using TiO_2 photocatalyst membrane materials, the NO_x removal ability is estimated by CFD analysis

* Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

** Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation.

*** Technical Planning & Coordination Department, Taiyo Kogyo Corporation