

TiO₂光触媒によるNO_x除去がストリートキャニオン内の 大気質に与える影響のCFD解析および経済性評価 CFD Analysis and economic evaluation of the impact of NO_x removal due to TiO₂ photocatalyst on air quality in street canyon

○中川 雅也 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)
嶋寺 光 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Masaya NAKAGAWA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

In urban area, roadside air pollution in street canyon still exists. In order to reduce NO_x concentration in the canyon, NO_x removal using TiO₂ photocatalyst is sometimes proposed. In this study, the effectiveness of installation of TiO₂ photocatalyst was assessed by using CFD simulations and economic evaluation. In this study, a CFD model was used to simulate roadside air quality in idealized street canyon. I conducted a set of air quality simulations using the CFD model with different installation position and range of TiO₂ photocatalyst panel, and economic evaluation of the influence of them on air quality in the street canyon was conducted. The results showed that the highest concentration of NO_x occur on the wall surface facing the emission source and located on the windward side. In addition, cost benefits of air purification by TiO₂ photocatalyst are smaller than the installation cost in all cases.

はじめに

都市部沿道では、ストリートキャニオンと呼ばれる高い建물에 囲われた換気の悪い形状と自動車排出により、周辺よりも大気が汚染されている¹⁾。都市部沿道の大气浄化のため、光触媒によってNO_xを沈着除去する技術がある²⁾。一方で、光触媒の設置は比較的高コストな手法であるため、設置に先立って費用対効果を見積もることが望ましい。

光触媒に関する研究では、TiO₂光触媒を建築物に設置し、NO_x除去性能を求める研究が行われてきた。しかし、いずれについても、TiO₂光触媒が効果的に作用するための設置範囲やその範囲について検討されておらず、またその費用便益についても評価していない。

そこで本研究では、数値シミュレーションによってストリートキャニオン内の大气汚染物質の動態解析を行いTiO₂光触媒による沈着除去量を推定し、沈着除去量の貨幣価値および設置費用を比較することで光触媒設置の費用対効果を推計した。また、キャニオン内の濃度分布を考慮することで、光触媒の効果的な設置位置を検討した。

1. 計算条件

1.1 計算領域

計算領域は、Fig. 1, 2に示すようにx, y, z方向に460 m, 460 m, 240 m, 解析領域は、計算領域中央のx, y, z

方向に160 m, 160 m, 80 mの範囲とした。総要素数は749,232である。建物は全て幅40 m, 奥行き40 m, 高さを40 mとした。建物間に南北方向に伸びる幅24 mの車道を配置した。排出源は車道のみとし、排出高さは0~0.5 mとした。また、光触媒を設置する場合の計算ケースでは、光触媒はFig. 1に示すように、解析領域内の建物側面に設置した。

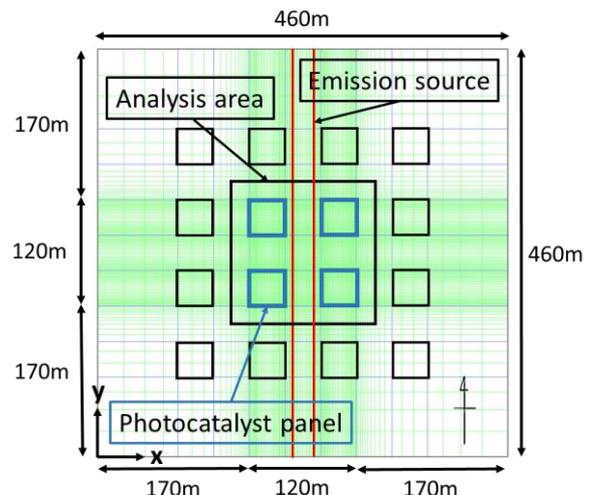


Fig. 1 Calculation area (x-y)

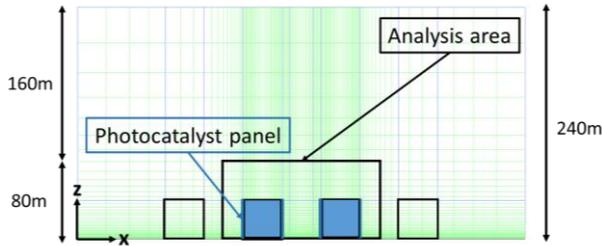


Fig. 2 Calculation area (x-z)

1.2 計算条件

式 (1) に示すべき乗則を用いて、風速の境界条件を決定した。風向は東向きに固定した。

$$V_Z = V_R (Z/Z_R)^{\frac{1}{n}} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 V_Z 、 V_R はそれぞれ地上からの高さ Z [m]、 Z_R [m]における風速を表し、 n は大気安定度によって変化する。本研究では、基準高さ (Z_R) は 10 m、その高さでの風速 (V_R) は 3 m/s とし、 $n=4$ とした。

NO_x 排出量は、JATOP³⁾の排出インベントリデータベースから大阪府梅新南交差点周辺の 2010 年 1 月 1 日～12 月 31 日の NO 、 NO_2 について毎月の平均をそれぞれとり、その合計値を NO_x 排出量とした。その結果、 NO_x 排出量は 49.7 ppb/s であった。また、本研究における沈着条件について、 O_3 が過多である場合、 NO は NO_2 にただちに酸化され、ベースラインの沈着速度を 0 と仮定し、 NO_x の TiO_2 光触媒への沈着速度を、 NO_2 の沈着速度である 0.4 cm/s とした⁴⁾。

また本研究では、光触媒による大気質改善効果を評価するため、費用便益分析を行った。 NO_x 除去便益、 NO_x 沈着量および TiO_2 光触媒設置費用を、それぞれ以下の式 (2, 3) に示す。貨幣評価原単位とは、人口密集地区 (DID 地区) における汚染物質排出による被害費用である。なお、 NO_x の貨幣評価原単位を 292×10^{-6} 万円/g⁵⁾、 TiO_2 光触媒施工単価を 0.5 万円/m²⁷⁾ とし、また光触媒耐用年数を 15 年と仮定した。

$$\begin{aligned} \text{NO}_x \text{ 削減便益 [万円]} \\ = \text{NO}_x \text{ 沈着除去量 [g]} \times \text{貨幣評価原単位 [万円/g]} \end{aligned} \quad \text{式 (2)}$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_x \text{ 沈着除去量 [g]} \\ = \text{沈着速度 [m/s]} \times \text{光触媒面積 [m}^2\text{]} \times \text{光触媒表面における濃度 [g/m}^3\text{]} \times \text{光触媒耐用時間 [s]} \end{aligned} \quad \text{式 (3)}$$

$$\begin{aligned} \text{TiO}_2 \text{ 光触媒設置費用 [万円]} \\ = \text{TiO}_2 \text{ 光触媒設置単価 [万円/m}^2\text{]} \times \text{光触媒面積 [m}^2\text{]} \end{aligned} \quad \text{式 (4)}$$

1.3 計算ケース

各計算ケースの概要を Table 1 に示す。設置場所やその範囲を変更してシミュレーションを行った。計算領域や境界条件など、 TiO_2 光触媒の設置場所とその範囲についての変更点以外の計算条件については PP None と同じ条件を用いた。PP None 以外のケースに関しては、光触媒は Fig.1 に示すように解析領域内の建物側面に設置した。

Table 1 Overview of cases

ケース名	光触媒の設置場所とその範囲
PP None	光触媒設置なし
PP All	壁面全体 (地表から 40 m)
PP All Half	壁面下半分 (地表から 20 m)
PP All Quarter	壁面下部 1/4 (地表から 10 m)
PP East	東側建物の壁面全体 (地表から 40 m)
PP West	西側建物の壁面全体 (地表から 40 m)
PP West Quarter	西側建物の排出源に面した壁面下部 1/4 (地表から 10 m)

2. 結果と考察

2.1 ストリートキャニオン内の風速ベクトル、濃度分布および壁面における濃度

まず PP None について、解析領域における $z = 1.25$ m (歩行者レベル)、 $y = 210.5$ m (排出源に垂直な南側壁面およびそれらに挟まれたストリートキャニオン)、 $y = 190$ (南側の建物の中心) の風速ベクトルと濃度分布を、それぞれ Fig. 3 ~ 5 に示す。Fig. 3 より、V字型に高濃度が発生している。これは、西から流入した風と、Fig.5 のようにキャニオン内で渦巻き、Fig.3 のようにキャニオン内から西へ放射状に吹き出した風が衝突するためであると考えられる。また Fig.4, 5 より、キャニオン内では風速が小さくなり、地表付近で高濃度が発生している。

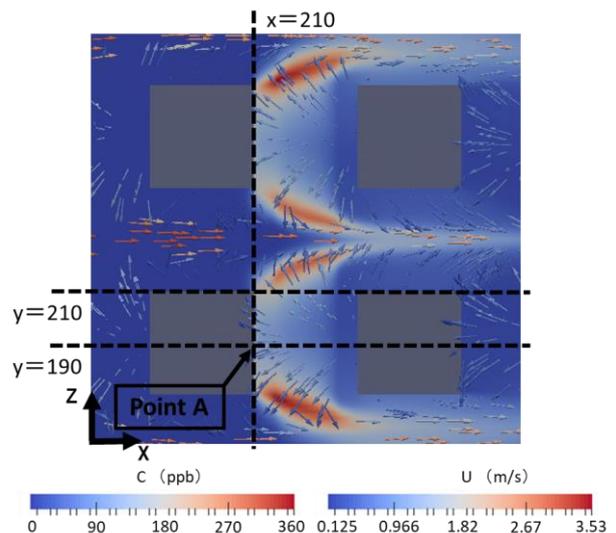


Fig. 3 Wind vector and concentration ($z = 1.25$)

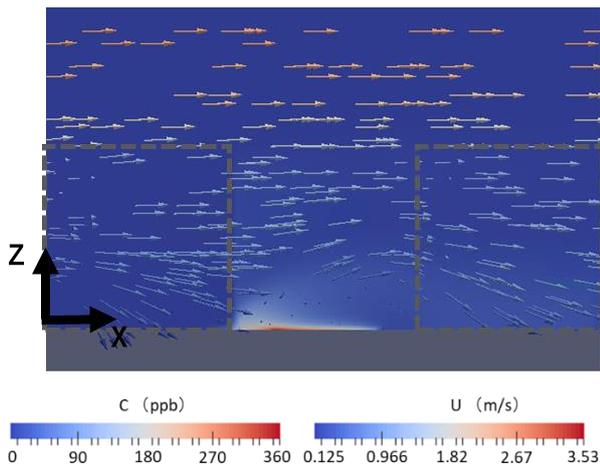


Fig. 4 Wind vector and concentration (y = 210.5)

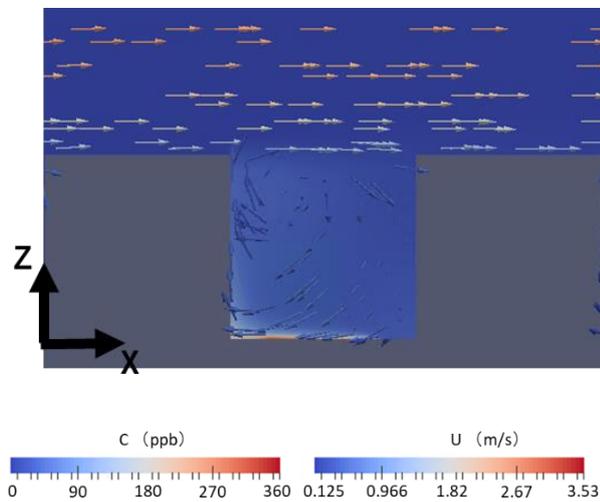


Fig. 5 Wind vector and concentration (y = 190)

また PP None において、各壁面における濃度を示す。壁面における濃度とは、壁面に隣接したセル（壁面から 1.2 m まで）の濃度である。壁面の番号を Fig. 6、その各壁面における濃度を Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示す各壁面における濃度は、Fig. 6 に示す同じ番号の壁面における濃度の平均値である。

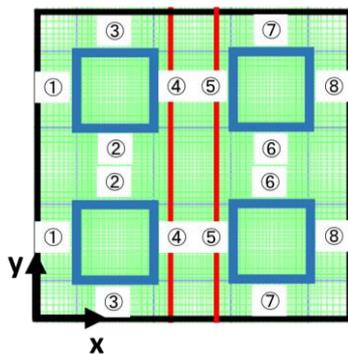


Fig. 6 Wall number

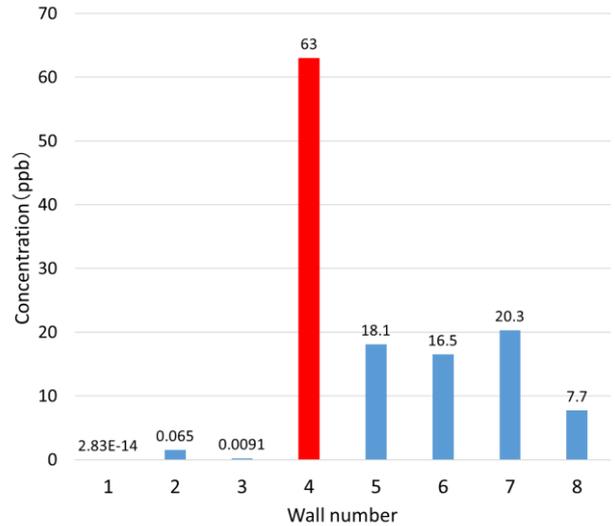


Fig. 7 Concentration of pollutants on each wall number

さらに、Fig. 7 において、高濃度が発生している壁面 4 の中心である $(x, y) = (210, 190)$ 地点 (Fig. 3 での Point A) での z 方向による濃度の変化を Fig. 8 に示す。汚染物質は地表から 10 m までに集中している。

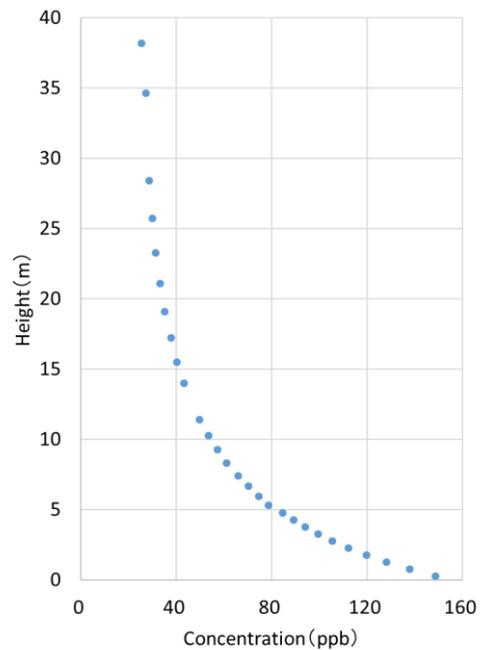


Fig. 8 Concentration of pollutants of vertical profile at Point A

2.2 TiO₂光触媒による大気質改善効果とその経済性評価

PP None 以外の光触媒を設置した計算ケースにおける NO_x 除去量および光触媒面積を Table 2 に示す。また PP None 以外の光触媒を設置した計算ケースにおける NO_x 除去便益および TiO₂ 光触媒設置費用を Table 3 に示す。これらのケースの中で、TiO₂ 光触媒面積に対する NO_x

除去量, TiO₂ 光触媒設置費用に対する NO_x 削減便益とも最も大きくなったのは, PP West Quarter であった。この理由は2点考えられる。まず Fig. 7 のように, 壁面4のような風の流入する西側建物の排出源に面した壁面上で高濃度が発生するためである。また Fig. 8 のように, 地表から 10 m の範囲に汚染物質が集中しているためであると考えられる。また, PP East と PP West で比較した場合, TiO₂ 光触媒面積に対する NO_x 除去量は PP East の方が大きくなった。これは Fig. 7 のように, 壁面4における濃度が最も高いが, 壁面1~3における濃度がかなり低いため, 東側と西側でそれぞれ合計すると東側の方が高くなったためであると考えられる。これらの計算ケースでは, NO_x 削減便益は TiO₂ 光触媒設置費用より小さくなったが, 今回の実験条件の中では特に PP West Quarter で NO_x 除去便益が最も TiO₂ 光触媒設置費用に近づいた。PP West Quarter の次に TiO₂ 光触媒設置費用あたりの NO_x 除去便益が高い PP All Quarter と比較すると, その値は約4倍向上した。さらに光触媒の沈着能を向上させたりすることで, NO_x 除去量およびその便益も高くなると考えられるため, TiO₂ 光触媒による NO_x 除去技術はストリートキャニオン内の大気質改善方法として期待できると言える。

Table 2 Amount of NO_x removal and photocatalyst area in each calculation case

Case name	Amount of NO _x removal (g)	Photocatalyst area (m ²)
PP All	1.10 × 10 ⁶	25600
PP All Half	7.67 × 10 ⁵	12800
PP All Quarter	5.23 × 10 ⁵	6400
PP East	5.73 × 10 ⁵	12800
PP West	5.31 × 10 ⁵	12800
PP West Quarter	2.42 × 10 ⁵	800

Table 3 Benefits of NO_x removal and costs of TiO₂ photocatalyst installation in each calculation case

Case name	Benefits of NO _x removal (×10 ⁴ yen)	Costs of TiO ₂ photocatalyst installation (×10 ⁴ yen)
PP All	322.4	12800
PP All Half	224.1	6400
PP All Quarter	152.8	3200
PP East	167.4	6400
PP West	155.0	6400
PP West Quarter	70.8	400

3. 結論

本研究では, 数値シミュレーションによってストリートキャニオン内の大気汚染物質の動態解析を行い TiO₂ 光触媒による沈着除去量を推定し, 沈着除去量の貨幣価値および TiO₂ 光触媒設置費用を比較することで光触媒設置の費用対効果を推計した。またキャニオン内の濃度分布を考慮することで, 光触媒の設置位置を検討した。

本研究の結論を以下にまとめる。

- キャニオン内で高濃度汚染が排出源に面した風上側壁面かつ地表近くで発生する。
- 高濃度汚染が発生する場所に TiO₂ 光触媒を設置することで, NO_x を効果的に除去できる。
- 今回の実験条件では, NO_x 削減便益は TiO₂ 光触媒設置費用より小さくなったが, 光触媒の沈着能を向上させたりすることで, NO_x 除去量およびその便益は高くなると考えられるため, TiO₂ 光触媒による NO_x 除去技術はストリートキャニオン内の大気質改善方法として期待できる。

参考文献

- 1) 島正之:自動車排出ガスによる大気汚染の健康影響, 千葉医学 81, 1-9, 2005
- 2) 竹内浩士: 光触媒による大気環境浄化と安全大気環境学会誌, 33, 6, 393-399, 1998
- 3) (一財) 石油エネルギー技術センター, JATOP 技術報告書「自動車排出量推計」JPEC-2011AQ-02-06
- 4) M. Palacios, L. Núñez, M. Pujadas, J. Fernández-Pampillón, M. Germán, B. S. Sánchez, J. L. Santiago, A. Martilli, S. Suárez, B. S. Cabrero, Estimation of NO_x deposition velocities for selected commercial photocatalytic products, WIT Transactions on The Built Environment 168, 729-740
- 5) 国土交通省, 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル (2012年改訂版)

(https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000040.html)