

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**

学生会員 ○中川 雅也 (大阪大学) 正会員 松尾 智仁 (大阪大学)
正会員 嶋寺 光 (大阪大学) 正会員 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 was conducted. The results showed that the highest surface concentration of NO_x occur on the wall 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物に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⁾。都市部沿道の大気浄化のため、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。

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

計算領域および解析領域を Fig. 1 に示す。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。

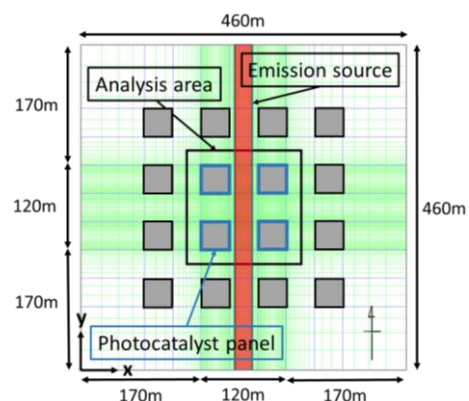


Fig. 1 Calculation area (x-y)

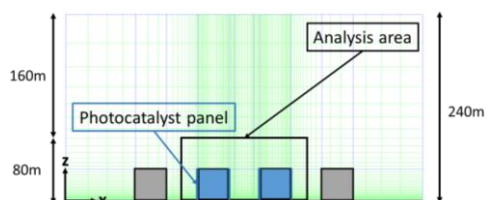


Fig. 2 Calculation area (x-z)

1.2 計算条件

計算には OpenFOAM 4.1 を適宜修正して用いた。非圧縮性定常流れ、等温場を仮定した。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

風速の境界条件は式 (1) に示すべき乗則を用いて決定

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。

NO_x 排出量は、JATOP³⁾による2010年の排出インベントリデータベースを基に大阪市の NO_x 排出量を求め、車道全体から一様に49.7 ppb/sで与えた。

また、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 沈着量、 NO_x 除去便益および TiO_2 光触媒設置費用を、それぞれ以下の式(2-4)に示す。

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

$$\begin{aligned} & \text{NO}_x \text{ 除去便益 [万円]} \\ & = \text{NO}_x \text{ 沈着除去量 [g]} \times \\ & \quad \text{貨幣評価原単位 [万円/g]} \end{aligned} \quad \text{式 (3)}$$

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

ここで、 NO_x の貨幣評価原単位を 292×10^{-6} 万円/g⁴⁾、 TiO_2 光触媒施工単価を0.5 万円/m²とし、また光触媒耐用年数を15年と仮定した。費用対効果分析では、気象庁⁵⁾による2010年の大阪市周辺の半旬ごとでの平均風速および最多風向をもとに、風速および風向の頻度分布で NO_x 除去便益の重み付けを行った。シミュレーションを行っていない風向に関しては、それぞれシミュレーションを行ったものの面対称として考えた。また光触媒表面における濃度はシミュレーションによって得る。本研究における NO_x の TiO_2 光触媒への沈着速度は、 TiO_2 による NO_x 除去速度を沈着速度としてモデル化した。また TiO_2 による除去のみを考慮し、他の表面への NO_x の沈着除去は無視した。 TiO_2 による NO_x の除去速度について、 NO と NO_2 で除去速度が異なるが、道路から排出された NO_x のうち、 NO は大気中の O_3 により速やかに NO_2 に酸化されると仮定し、 NO_2 の除去速度を用いた。 NO_2 の除去速度は0.4 cm/s⁶⁾とした。

1.3 計算ケース

風速風向の変化による NO_x 除去量の変化を見るため、風速風向を変化させてシミュレーションを行った。式(1)の基準高さ(Z_R)を23mとし、風速(V_R)を2, 3, 4 m/s、風向を西、西南西、南西、南南西、南とそれぞれ変更して解析を行った。また、 n は4とした。光触媒パネルの設置位置はTable 1に示すように2通りを検討した。各計算

ケースについて、シミュレーションによって得られた建物壁面近傍の NO_x 濃度を用いて式(2-4)によって NO_x 沈着除去量およびその貨幣価値を計算した。

Table 1 Overview of cases

Case name	Photocatalyst installation location and range
PP All	Whole wall (40 m from the ground)
PP All Quarter	Lower quarter of the wall (40 m from the ground)

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 $V_R = 3$ m/s、西風の場合について、解析領域における $z = 1.25$ m (歩行者レベル)、 $y = 190$ m (南側の建物の中心)の風速ベクトルと濃度分布をFig. 3に示す。キャニオン内では風速が小さくなり、時計回りに渦巻く流れ場により地表付近の特に西側で高濃度が発生している。

次に風速を $V_R = 3$ m/sで固定し、風向を西、西南西、南西、南南西、南と変化させた。ここでは特徴的なものについて示す。西南西の風での $z = 1.25$ m、 $y = 190$ mの風速ベクトルと濃度分布をFig. 5, 6にそれぞれ示す。西風の場合と比較すると、車道に交差する道路に面する壁面にも汚染物質が拡散している。また西風ケースで見られたキャニオン内で時計回りに渦巻く流れ場は見られない。次に南南西の風での $z = 1.25$ m、 $y = 190$ mの風速ベクトルと濃度分布をFig. 7, 8にそれぞれ示す。南南西の風になると西側よりも東側で高濃度が発生している。風向を変化させても、キャニオン内で風速が小さくなり、地表近くで高濃度汚染が発生するという点で共通している。

さらに、 $V_R = 2$ m/s, 4 m/sの場合についても、風向を西、西南西、南西、南南西、南と変化させた。絶対値は違うものの、流れ場や濃度分布の形状はほぼ $V_R = 3$ m/sの場合と同じであった。ここでは西風の時の $V_R = 2$ m/s, 4 m/sの場合における風速ベクトルと濃度分布をFig. 8, 9にそれぞれ示す。

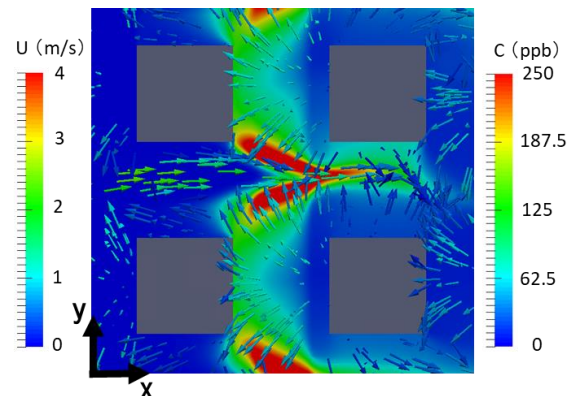


Fig. 3 Wind vector and concentration under $V_R = 3$ m/s and west wind

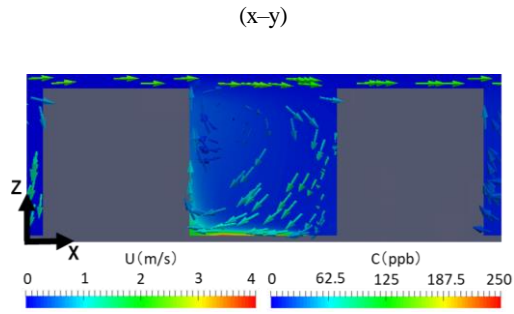


Fig. 4 Wind vector and concentration under $V_R=3$ m/s and west wind

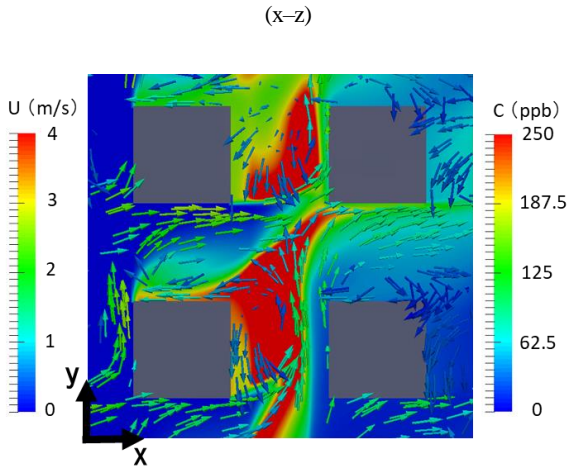


Fig.5 Wind vector and concentration under $V_R=3$ m/s and west-southwest wind (x-y)

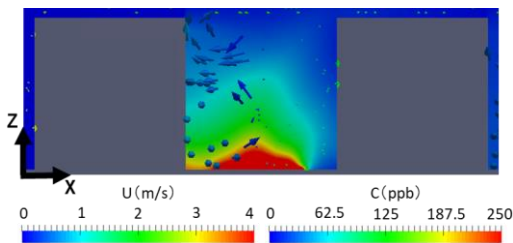


Fig.6 Wind vector and concentration under $V_R=3$ m/s and west-southwest wind (x-z)

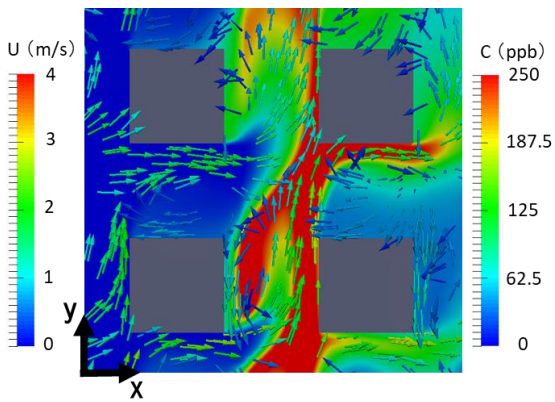


Fig.7 Wind vector and concentration under $V_R=3$ m/s and south-southwest wind (x-y)

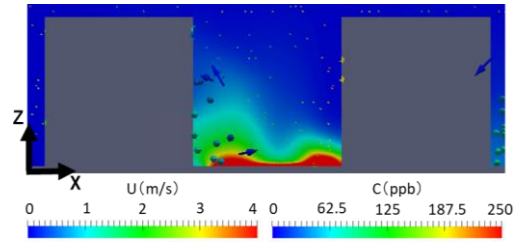


Fig.8 Wind vector and concentration under $V_R=3$ m/s and south-southwest wind (x-z)

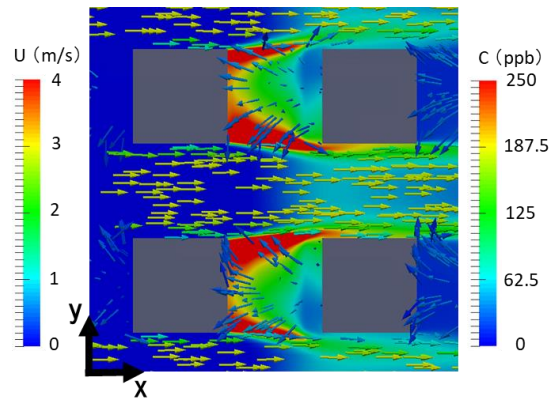


Fig. 9 Wind vector and concentration under $V_R=2$ m/s and west wind (x-y)

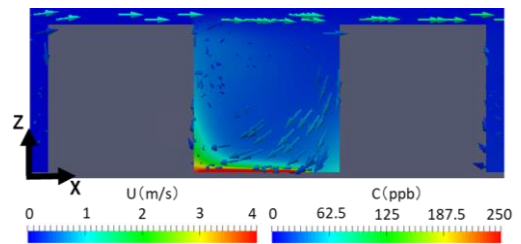


Fig. 10 Wind vector and concentration under $V_R=2$ m/s and west wind (x-z)

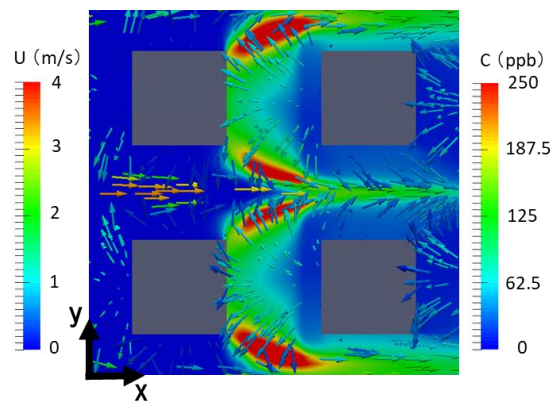


Fig. 11 Wind vector and concentration under $V_R=4$ m/s and west wind (x-y)

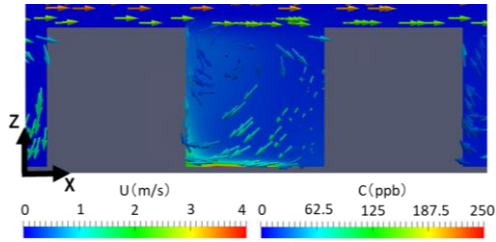


Fig. 12 Wind vector and concentration under $V_R = 4$ m/s and west wind (x-z)

2.2 TiO₂光触媒による大気質改善効果とその経済性評価

各光触媒表面での濃度を示すため、光触媒の番号を Fig. 13 に示す。また 2010 年の風速および風向の頻度分布を Fig. 14 に示す。Fig. 13 で示した各光触媒での風速および風向の頻度分布で重み付けした費用便益比

(B/C) を Fig. 15 示す。Fig. 15 より、Fig. 13 の Number 7 や 8 のように汚染物質排出源に面した西側壁面に光触媒を設置した場合に B/C 値は高い。逆に Number 1-4, 11, 15, 16 に設置した場合の B/C 値は極めて低い。また設置方法について PP All よりも PP All Quarter の方が B/C 値は大きい。これは、地表付近に汚染物質が集中しているためであると考えられる。したがって、交通量の多い車道に面した西側壁面の地表付近に光触媒を設置することで費用対効果は向上すると考えられる。今回の実験条件だと TiO₂ 光触媒による費用対効果は小さくなったが、先述のように光触媒の設置位置を改善することで、費用対効果のさらなる向上が期待できる。

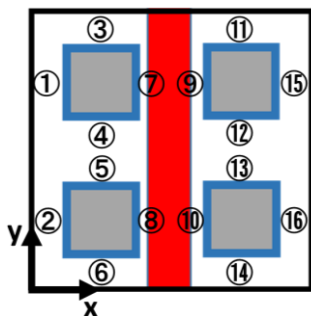


Fig. 13 Photocatalyst number

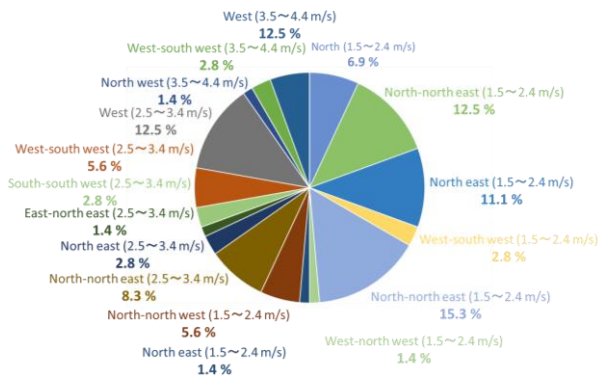


Fig. 14 Frequency distribution of wind speed and direction

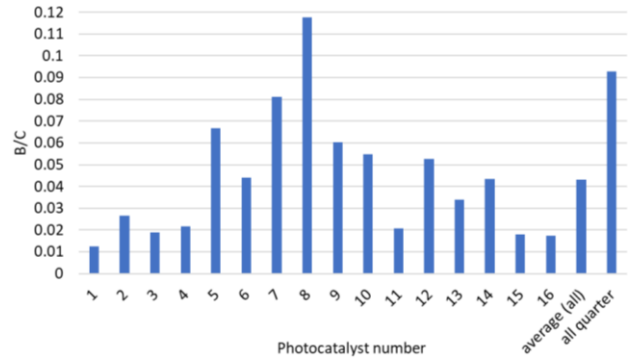


Fig. 15 B / C of each photocatalyst

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。

- 高濃度汚染はキャニオン内の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、光触媒の設置位置を改善することで費用対効果の向上が期待できる。

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) 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)
- 5) 気象庁, 過去の気象データ検索
(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/>)
- 6) 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