

# 化学反応モデルと放射モデルを組み込んだ CFD モデルを用いた ストリートキャニオン内の大気質の解析

## Analysis of Air Quality in Street Canyon by Using CFD Model Coupled with Chemistry and Radiation Models

学生会員 ○澤田 真吾 (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)

Shingo SAWADA\*<sup>1</sup> Tomohito MATSUO\*<sup>1</sup> Hikari SHIMADERA\*<sup>1</sup> Akira KONDO\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka University

In urban area, roadside air pollution still exists. In order to evaluate the roadside air pollution, it is required to consider the both of chemical reaction and radiation. In this study, a CFD model coupled with a chemical reaction model and radiation model was used to simulate roadside air quality in an idealized street canyon. I conducted a set of air quality simulations using the chemistry and radiation coupled CFD model and evaluated the influence of them on air quality in the street canyon. The results showed that NO titration was more dominant phenomenon on the O<sub>3</sub> concentration than the photolysis of NO<sub>2</sub>. In addition, It was found that the NO<sub>x</sub> concentration decreased by performing the radiation calculation.

### はじめに

都市部では、沿道大気汚染がいまだ存在している。わが国では、高度経済成長期に大気汚染が顕著になり、さらに自動車が普及したため複合的な大気汚染が生じた。これに対し、環境基準の設定など公害防止対策が施され、硫酸化物による汚染は大幅に改善された。しかし、道路沿道では自動車排ガス由来の窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や粒子状物質 (PM) による大気汚染がいまだに存在している<sup>1)2)</sup>。

大気汚染に関する研究で広く使用されている化学反応、放射計算を含む大気質モデルの多くは、メソスケール領域に適応しているため、格子解像度が 1~数十 km と粗く、沿道大気汚染を評価することが出来ない。一方、数値流体力学 (CFD) モデルでは、高い空間分解能で都市ブロック規模の気流と大気濃度シミュレーションを行うことができる。しかし、従来の CFD モデルの多くは化学反応、放射計算を考慮していない。

本研究では、ストリートキャニオン内における NO<sub>x</sub> やオゾン (O<sub>3</sub>) といった汚染物質の動態をシミュレーションするために、CFD ツールボックス OpenFOAM に化学反応モデル CBM-IV<sup>3)</sup>を組み込んだモデルを開発した。<sup>4)</sup> また、そのモデルに放射モデルを組み込んだ。ストリートキャニオンを対象に放射計算の影響評価することを目的とした。

### 1. 放射モデル

OpenFOAM には形態係数を用いた放射モデルが搭載されているが、このモデルでは、固体の放射率や反射率を考

慮できない。そこで本研究では、反射率を考慮することのできる分配係数放射モデルを利用した。

形態係数は式(1)によって定義され、ある面 j から出射される全放射流束のうち、別の面 i に到達する放射流束の割合を表す。また Fig.1 に定義を示す。

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \phi_j \cos \phi_i}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

ここで  $F_{ji}$  は形態係数、 $A_i$  [m<sup>2</sup>] は面 i の面積、 $\phi_j \cdot \phi_i$  [rad] は面 i、面 j を結ぶ直線と法線のなす角度、 $r$  [m] は面 i、面 j の距離である。

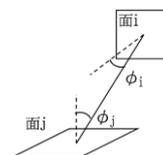


Fig.1 angle of  $\phi$  in formula (1)

分配係数放射モデルでは、形態係数を用いて分配係数を算出する。このモデルでは、放射、吸収、反射、透過、外部から入る放射の5つの成分を考慮することが出来る。本研究では長波放射のみを対象とするため、放射、吸収、反射の3つを考慮している。

放射率が変動しないと仮定し、式(2)、(3)に示す関係式から吸収率、反射率を算出した。式(4)は面 i から出射され

る放射熱流束を表している。式(5)は面  $i$  に入射する放射熱流束を表している。式(6)に示すように面  $i$  が受け正味放射熱流束は式(4)と式(5)の差で表される。

式(5)で使用した  $D_{ji}$  が分配係数行列であり、式(7)はその定義式を表している。この式は、反射による影響が定常になるまで繰り返し計算を行うことが必要である。式(8)は反射放射熱流束の算出、式(9)は反射係数行列の算出を示している。式(9)においても式(7)同様の繰り返し計算が必要である。分配係数を利用した場合に考慮される放射について Fig.2 に示す。

$$\epsilon = \alpha \quad (2)$$

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3)$$

$$Q_{Ei} = \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (4)$$

$$Q_{Ii} = \frac{A_i}{A_j} D_{ji} Q_{Ej} \quad (5)$$

$$Q_{Ni} = Q_{Ii} - Q_{Ei} \quad (6)$$

$$D_{ji} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (7)$$

$$Q_{Ri} = \frac{A_i}{A_j} R_{ji} Q_{Ej} \quad (8)$$

$$R_{ji} = \rho_j F_{ij} \left( 1 + \sum_{k=1}^N R_{jk} \right) \quad (9)$$

ここで  $\epsilon$  は放射率、 $\alpha$  は吸収率、 $\rho$  は反射率、 $\sigma$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)] はステファンボルツマン定数、 $T$  [K] は温度、 $Q_{Ei}$  [W/m<sup>2</sup>] は面  $i$  から出射する放射熱流束、 $Q_{Ii}$  [W/m<sup>2</sup>] は面  $i$  に入射する放射熱流束、 $Q_{Ni}$  [W/m<sup>2</sup>] は面  $i$  が受け取る正味放射熱流束、 $A_i$  [m<sup>2</sup>] は面  $i$  の面積、 $D_{ji}$  は分配係数行列の転置、 $F_{ij}$  は形態係数行列、 $Q_{Ri}$  [W/m<sup>2</sup>] は面  $i$  での反射放射熱流束、 $R_{ji}$  は反射係数行列である。

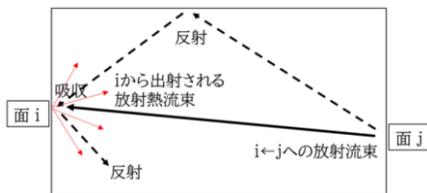


Fig.2 Radiation element in consideration of distribution coefficient

## 2. 計算概要

### 2.1 計算領域

計算領域は、Fig.3 に示すように  $x, y, z$  方向に 1000m, 100m, 800m, 解析領域は、計算領域中央の  $x, y, z$  方向に 80m, 100m, 100m の範囲とした。1つの建物は幅 40m, 奥行き 100m, 高さを 40m とした。建物は計算領域内に 16 棟配置し、建物の間に南北方向に幅 40m の道路

を配置した。また、南北方向の中央 20m を車道とし、その両端 10m を歩道とした。汚染物質の排出は、西から 9 個目の道路の車道部分とし、排出源高さは 1.5m とした。

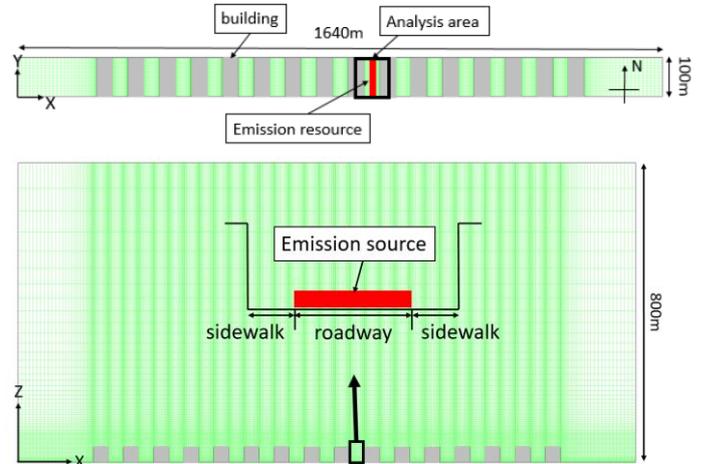


Fig.3 Calculation area

### 2.2 計算条件

風速の境界条件をべき乗則 (式(10)) を用いて決定した。風向は東向きに固定した。

$$V_Z = V_Z(Z/Z_R)^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

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、 $n$  は地表面粗度によって変化する。ここでは、 $V_Z = 10$  m、 $n = 0.25$  とした。

排出量は、JATOP の排出インベントリデータベース<sup>4)</sup> から大阪府梅新南交差点周辺の 2010 年 7 月～8 月の時間別排出量から算定した。道路における NO<sub>x</sub> 排出強度の時系列変化を Fig.4 に示す。

汚染物質の側面境界濃度は、大気質モデル CMAQ の計算結果<sup>5)</sup> をもとに、2010 年 7 月 1 日～2010 年 8 月 31 日の期間の CMAQ の鉛直第 1 層の 1 時間値の平均値から算定した。NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 濃度の時間平均値の時系列変化を Fig.5 に示す。側面境界濃度は鉛直方向に一様とした。また排出量、側面境界濃度には午前 9 時のものを使用した。

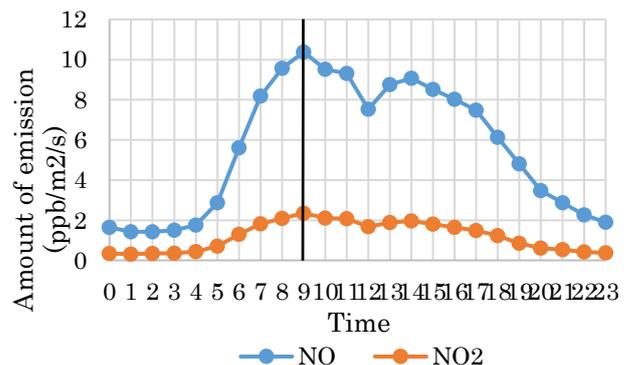


Fig.4 Average emissions per hour

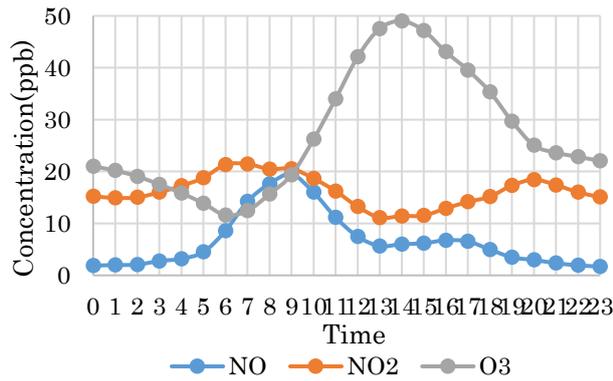


Fig.5 Average concentration of side boundary per hour

また温度については、空気、建物壁面ともに 298.15[K]とした。

### 2.3 計算ケース

今回は放射計算による違いを見るために上記の条件において放射計算を入れたものと入れていないもので比較を行った。

## 3. 結果と考察

今回の検証では、速度場、濃度場は定常状態となることが予想されたが、実際には周期的な変動を伴う準定常状態となったため、周期の数倍の期間で時間平均をとった結果を定常状態とみなして分析を行った。また、これから示す結果はすべて Y=50m、計算領域の Y 方向の中央、について示す。

### 3.1 流れ場

まず初めにそれぞれのケースでの流れ場の結果を Fig.6 に示す。図におけるキャニオン外の風は左から右に向かって吹いている。放射計算の有無にかかわらずキャニオン内で時計回りの渦ができていいることがわかる。

次に放射計算の有無での風速の差(有 - 無)を Fig.7 に示す。Fig.7 から放射計算を行っているケースは放射計算を行っていないケースと比べて風速が少し早くなっていることがわかる。

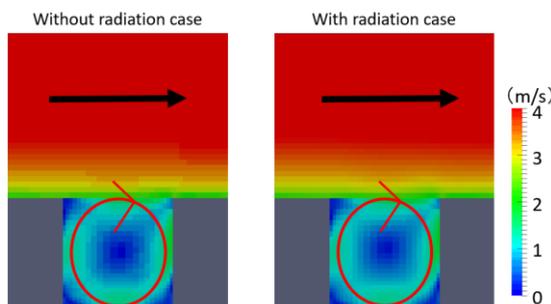


Fig.6 Flow field in without radiation case

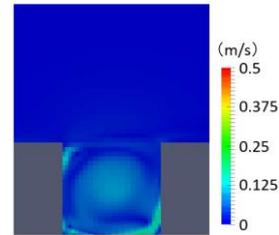


Fig.7 Difference flow field

### 3.2 汚染物質濃度比較

まず汚染物質濃度のコンター図を示す。各ケースの NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> について比較を行う。Fig.8、Fig.9、Fig.10 に NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> の濃度分布を示す。どちらのケースも NO 濃度は地上付近で高くなっていることがわかる。これは道路の中心から汚染物質が排出されており、キャニオン上部に比べてキャニオン底部には風があまり入ってきていないことによって拡散されないためであると考えられる。

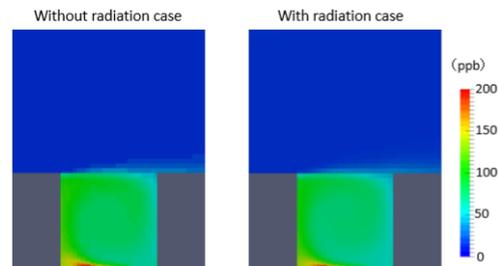


Fig.8 NO concentration

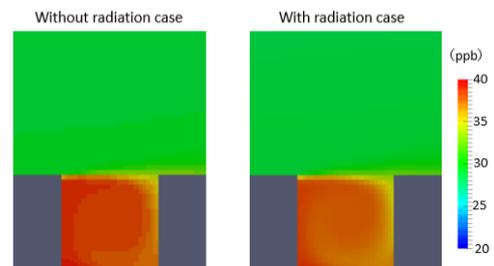


Fig.9 NO<sub>2</sub> concentration

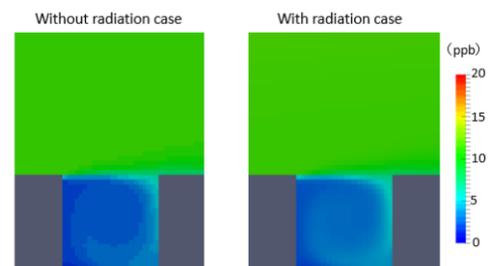


Fig.10 O<sub>3</sub> concentration

次にキャニオンの西側と東側の NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 濃度鉛直プロファイルを図.11、図.12 に示す。図.11 を見ると道路の西側では NO 濃度が高くなっていることがわかる。これはキャニオン内の渦が時計回りであるため建物の西

側の壁にぶつかってうまく汚染物質をキャニオンの外に逃がすことができているからであると考えられる。また Fig12 から道路の東側では NO 濃度が低くなっていることがわかる。これはキャニオン内の渦が時計回りであるため NO が効率よく取り除かれたと考えられる。

Fig.11, Fig.12 からすべての観測点で NO<sub>2</sub>濃度と O<sub>3</sub>濃度がほとんど逆になっていることがわかる。これは、NO タイトレーション (式 11)) が原因であると考えられる。

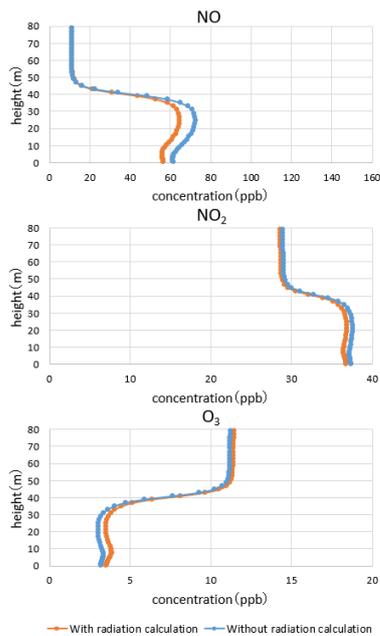


Fig.11 Vertical profiles of concentrations of pollutants on the west side

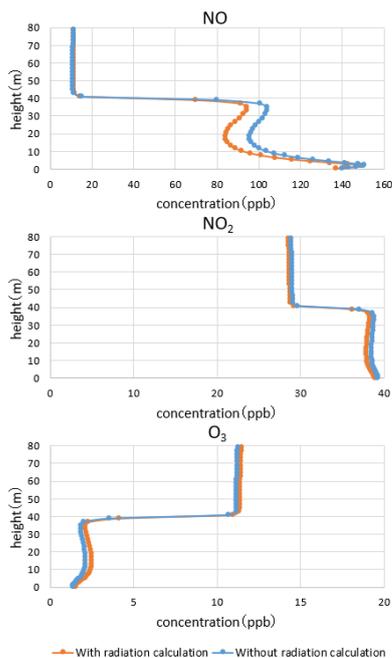


Fig.11 Vertical profiles of concentrations of pollutants on the west side



放射計算を考慮したところすべての観測点で NO 濃度が小さくなり、O<sub>3</sub>濃度が大きくなっていることがわかる。これはキャニオン内の風速が上がったことにより効率よく NO<sub>x</sub> を外に追い出せたことが原因であると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、道路沿道の大気質を詳細に評価するため、一般の大気質モデルよりも高い空間分解能を扱うことのできる CFD モデルに化学反応モデル、放射モデルを組み込み、その影響を評価した。

- NO<sub>x</sub> 濃度とは対照的に O<sub>3</sub>濃度はキャニオン内で低かったため、キャニオン内では NO<sub>2</sub>の光分解
- (式 (3)) よりも NO のタイトレーション (式 (4)) が支配的であった。



- 放射計算を組み込んだことで NO<sub>x</sub> 濃度が小さくなった。これはキャニオン内の風速が上がったことで効率よく外に追い出せたことが原因であった。

今回は、2次元のストリートキャニオンを対象に行ったが、今後は3次元ストリートキャニオンや実街区といったよりリアルなストリートキャニオンでの計算を行う必要がある。また、今回の境界条件は仮想的なものを想定したので境界条件に関しても風向、風速を変化させよりリアルにしていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) Zbigniew Bagiński: Traffic air quality index, Science of the Total Environment 505,606-614,2015.
- 2) Michael W. Gery, Gary Z. Whitten, James P. Killus, Marcia C. Dodge: A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling, Journal of Geophysical Research 94, D10, 12925-12956, 1989.
- 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, 2011.
- 4) 澤田 真吾, 松尾 智仁, 嶋寺 光, 近藤 明: 化学反応モデルを組み込んだ CFD モデルを用いたストリートキャニオン内の大気質の解析, 令和元年度空気調和・衛生工学会大会 (札幌)
- 5) 嶋寺 光, 深水 健吾, 松尾 智仁, 近藤 明: 大気質モデルによるオゾン濃度再現性の水平格子解像度依存性, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, P131, 2017.