

CFD とソース・レセプター関係を用いた室内希薄ガス濃度制御のための発生器の最適配置・最適制御手法の開発

Development of a Method to Optimize the Location and Operation of Indoor Trace Gas Generators to Control Its Concentration by Using CFD and Source-Receptor Relationship

○鈴木 絢子 (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)

Ayako SUZUKI*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

In order to diffuse trace gas such as fragrance into a room with an appropriate concentration distribution, it is necessary to control the conditions of the gas generators. This study used the Source-Receptor (SR) method to determine the optimum source placement and intensity to satisfy the target concentration. The SR method made it possible to optimize the source intensity of source candidates. In addition, the method successfully determined the optimum arrangement by selecting the optimum three sources out of eight source candidates.

はじめに

薬剤などの希薄ガスを居住域に散布させる際には、その濃度分布を適切に制御する必要がある。しかし、室内には空調や換気による気流が存在するため、室内の濃度分布を制御するためには、それらの影響を加味して発生源の位置と発生量を決定する必要がある。また、目標とする濃度分布に対して最適な発生源の配置と最適な制御を求める計算は逆問題であり、一般に不良設定問題であるため、解くためには特別な工夫を要する。本研究では以下に述べるようにSR法 (Source-Receptor 法) を利用した。

発生源の推定に発生源とある場所での濃度との線形関係を仮定した手法が用いられることがある。Cai ら¹⁾は、発生源のもともとの位置が既知の場合、複数発生源の推定は可能であり、汚染物質放出源の推定にSR (Source-Receptor) 関係を用いて、同時に放出される複数の汚染源を特定する手法を提案した。また、加藤ら²⁾はCRI (Contribution Ration of Indoor Climate: 室内温熱環境形成寄与率)を開発した。これは該当する熱源の発熱量から空間の温度分布がどれほど上昇・下降するかをデータとし保持し、それぞれの熱源が複数同時に発熱・吸熱をした際に室内の温度分布を推定する手法である。筆者ら³⁾は室内温熱環境の推定手法とし

てSR法を利用した。上記の加藤らが熱源分布から室内温度分布を予測するのに対し、SR法は観測された温度から室内の熱源分布を推定する、いわゆる逆解析である。この手法を室内濃度制御に適用し、目標の濃度分布に応じた発生源の条件を逆推定することを本研究の目的とする。また、逆推定された発生源条件の精度検証のために数値流体力学 (CFD) によるシミュレーションを行い、目標濃度分布とSR法を用いて求めた発生源分布による目標点度分布を比較する。

1. SR法について

本研究で用いたソース・レセプター関係は式 (1) で表される。ここで、 A はソース・レセプター関係を表す因果行列であり、 ΔS は各発生源における発生量 0 ppm/s からの変化量を示す発生源ベクトルである。 ΔC は目標点における発生量 0 ppm/s を基準としたときの濃度上昇量を示すベクトルである。発生源の数を N 、目標点の数を M とすると、行列 A は $M \times N$ の行列となる。式 (1) から事前のCFD計算によって行列 A が算出される。行列 A が既知である場合、濃度上昇量 ΔC が与えられた際、式 (1) を解くことで発生源ベクトルである ΔS が求められる。式 (1) の残差を用いて評価関数 I を式 (2) の

ように定義し、最急降下法を用いて I を最小化する ΔS を式 (3), (4) から求めた.

$$\mathbf{A}\Delta S = \Delta C \quad (1)$$

$$I = \|\mathbf{A}\Delta S - \Delta C\|^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial I}{\partial S} = 2(\mathbf{A})^T(\mathbf{A}\Delta S - \Delta C) \quad (3)$$

$$\Delta S_{k+1} = \Delta S_k - \frac{\partial I}{\partial S} \Big|_{\Delta S = \Delta S_k} \quad (4)$$

ここで、 ΔS_k は k 回目の繰り返し計算における ΔS である.

2. 計算対象領域

計算領域と発生源候補の位置、そして観測点の配置を Fig. 1 に示す. 領域は X 方向 7.5 m, Y 方向 15.0 m, Z 方向 2.6 m である. 格子解像度は 0.05 m であり, 格子数は約 234 万 (X=150 Y=300 Z=52) である. 室内には 1 m 立方の箱が 8 個あり, その上に 0.2 m 立方の箱型の発生源が設置されている. また, Z 方向 1.5 m に 70 点の観測点を配置した. この観測点の濃度を目標の濃度にするために発生源の制御を行った. 天井中央に 4 方向吹き出しの空調が 2 個ある. Table 1 に空調または計算領域の境界条件を示す. Fig. 2 に詳細な空調機の寸法を示す. 本研究では, 空調吸い込み口にて吸い込んだ空気は排気され, 吹き出し口からは濃度 0 ppm の新鮮空気が給気される.

3. 計算条件

CFD 計算には, オープンソース CFD ツールボックスである OpenFOAM のバージョン 4.0 を適宜修正して用いた. 非圧縮性定常流れを仮定し, 乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた. 支配方程式は運動方程式, 連続の式である. 速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法を用いた. 希薄ガスの輸送は流れ場に影響を与えないため, 流れ場ははじめに一度だけ計算し, 以降は固定された流れ場における物質の移動のみを計算した. 境界条件を Table 1 に示す. 放出される物質の分解や沈着は考慮しない.

4. SR 法による最適制御の流れ

本研究における SR 法を用いた発生源最適制御の

流れは以下の通りである.

まず, CFD 計算により任意の発生源変化 ΔS に対する目標点濃度変化 ΔC を計算することで式 (1) より因果行列 A を得る. 次に室内の目標濃度分布 ΔC と因果行列 A を用いて, 任意の数の発生源に対して, SR 法を適用することで, 発生源の発生源 (発生源ベクトル ΔS) を決定する. そして, 得られた発生源量をもとに CFD 計算を行い, 観測点濃度分布を得る. 数値実験では, 観測点濃度分布と目標濃度分布を比較し, ばらつきの度合いを評価する. また, 目標濃度分布はすべての観測点で 1 ppm である.

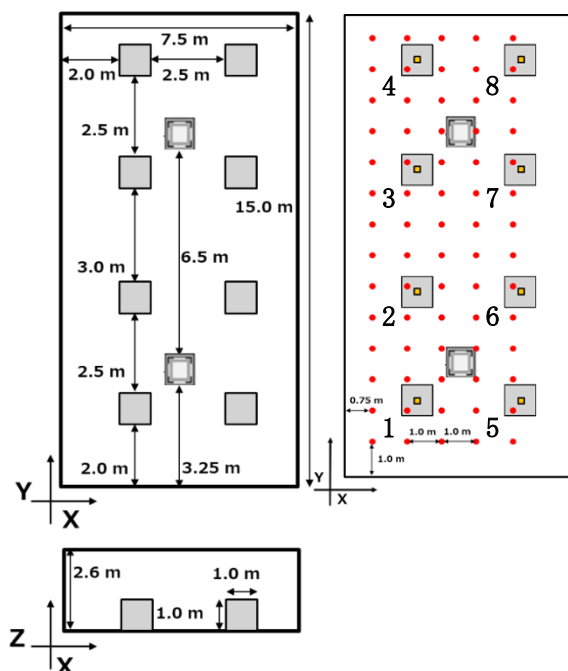


Fig. 1 Calculation domain (left) and Candidates of generators and objective points (right)

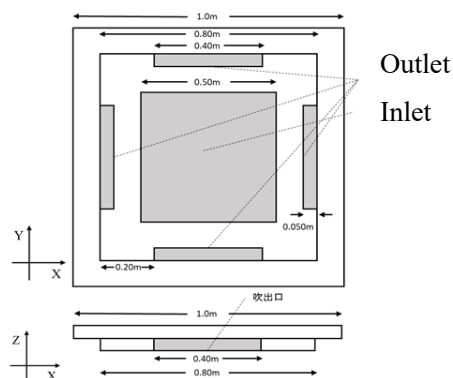


Fig. 2 The size of AC (Air Conditioner)

5. 計算ケース

計算ケースを以下に示す.

1. Source8_Uniform: 8 個の発生源候補に同量の発生量を与えた。
2. Source8_SR: 8 個の発生源候補に対して SR 法を適用し、適切な発生量を与えた。
3. Source3_SR_Highest3: Source8_SR で与えられた発生量のうち発生量が大きかった 3 つの発生源を選択し、最適配置を決定したのちに、その 3 つの発生源に対して SR 法を適用し、適切な発生量を与えた。
4. Source3_SR_RoundRobin: 8 個の発生源候補のうち 3 つを選ぶ組み合わせすべてに対して適切な発生量を与えた。

Table 1 Boundary condition

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity: 2.64 m/s Angle to ceiling: 30 ° Temperature: 293 K
Outlet	Guage pressure: 0 Pa
Walls	Velocity: No slip

これらの発生源情報を入力条件とする CFD 計算を実施し、観測点濃度分布を出力した。

また、観測点濃度分布と目標濃度分布の誤差を定量的に評価するため、平均絶対誤差 (Mean Absolute Error: MAE) を用いた。MAE は観測点 i における目標濃度を C_i 、計算値を C'_i とし、式 (5) で定義される。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |C_i - C'_i| \quad (5)$$

6. 結果と考察

6.1 事前計算の結果

まず、因果行列 A の作成のための事前計算の結果を Fig. 4 に示す。発生源 2, 3, 6 と 8 では物質が滞留せず拡散している。一方で、発生源 1, 4, 5 と 7 では比較的物質が発生源近くに滞留している。つまり、気流場の影響により後者の発生源からは物質が周囲にあまり輸送されない。

6.2 得られた発生量

Source8_Uniform と Source8_SR と Source3_SR_Highest3 の発生量を Table 2 に示す。

6.3 Source8_Uniform と Source8_SR の比較

二つのケースの観測点濃度分布を Fig. 4 に示す。MAE は Source8_Uniform が 0.263 ppm, Source8_SR が 0.206 ppm であった。Fig. 5 に示す観測点濃度分布と MAE の値より, Source8_SR の方が濃度分布のばらつきが小さいという結果になった。これによって, SR 法による最適制御の決定は有効であると言える。

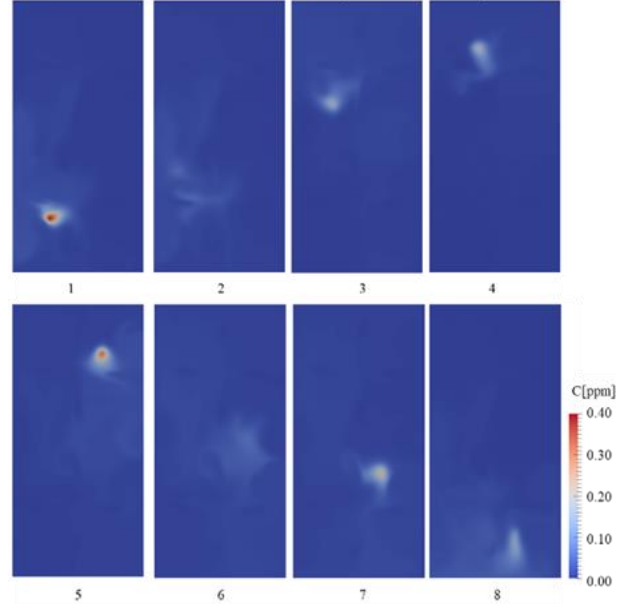


Fig. 3 Concentration distribution calculated by pre-calculation (Height 1.50 m) (The number below each panel indicates the source number)

Table 2 Amount of emission (ppm/s)

Source	Source8_Uniform	Source8_SR	Source3_SR_Highest3
1	10.18	0.130	
2	10.18	18.80	26.0
3	10.18	4.11	
4	10.18	32.34	36.5
5	10.18	2.22	
6	10.18	18.35	25.7
7	10.18	2.77	
8	10.18	11.37	

6.4 Source3_SR_RoundRobin の結果

すべての発生源組み合わせの観測点濃度分布の MAE と観測点濃度分布を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より, MAE の値が最も小さく目標濃度分布に近い発生源の配置は 2, 4, 6 の結果になった。

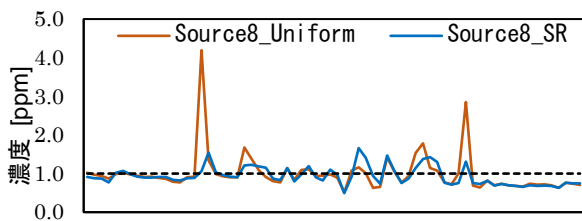


Fig. 4 Comparison of Source8_Uniform and Source8_SR

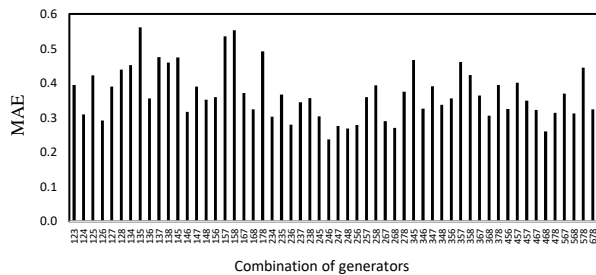


Fig. 5 MAE of all cases

6.5 Source3_SR_Highest3 と Source3_SR_RoundRobin の比較

Source3_SR_Highest3 の最適配置の決定の際に、Source8_SR で発生量の寄与が大きかった3つの発生源の 2, 4, 6 の発生源配置が選択された。一方、先に示した Source3_SR_RoundRobin より、もっとも目標濃度分布に近い発生源配置は 2, 4, 6 であった。よって、2つのケースで選択された最適な発生源配置が一致した。したがって、Source3_SR_Highest3 で、すべての発生源配置の組み合わせの中から最も精度の高い組み合わせが選択できた。したがって、SR 法による最適配置の決定は有効であったと言える。

6.6 Source8_SR と Source3_SR_Highest3 の比較

両ケースの観測点濃度分布の比較を Fig. 6 に示す。MAE は、Source3_SR_Highest3 が 0.237 ppm、Source8_SR が 0.206 ppm であった。観測点濃度分布と MAE を比較すると、Source8_SR の方がわずかに目標濃度分布に近い結果となったが、観測点濃度分布より、発生源数が 8 個と 3 個では似たような観測点濃度分布を得られた。

6.7 SR 法による最適制御の評価

上記の結果から SR 法による最適制御は有効であり、最適配置の決定は、今回の選択肢の中から最も

精度の高い配置を選択することができた。また、発生源の数に関しては、8 個と 3 個ではあまり濃度分布が変わらなかった。また、最適な発生源数の決定に関しては今回のケースだけでは比較ができないため、今後の課題としたい。

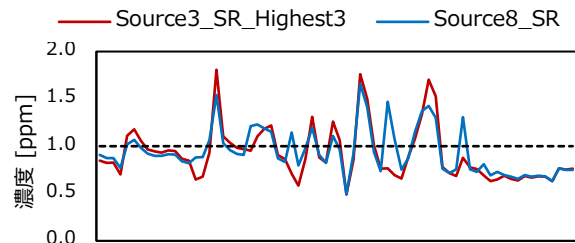


Fig. 6 Comparison of Source3_SR_Highest3 and Source8_SR

7. まとめ

室内濃度分布を制御するために SR 法を用いて発生源条件の逆推定を行った。そして、推定された発生量を入力値として CFD の再計算を行い、観測点濃度分布と目標濃度分布との比較を行い、推定結果の精度を評価した。その結果、SR 法による最適制御、最適配置の決定により、最適化を行わなかった場合よりも目標に近い観測点濃度分布が得られた。

参考文献

- 1) H. Cai, X. Li, Z. Chen, M. Wang, Rapid identification of multiple constantly-released contaminant sources in indoor environments with unknown release time, Build. Environ., 81, 7-19, 2014
- 2) 加藤信介, 小林光, 村上周三. 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究 第 2 報—CFD に基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発. 空気調和・衛生工学論文集, Vol.69, pp.39-47, 1998
- 3) 松尾智仁, 嶋寺光, 近藤明. 連続的データ同化法 (VCA 法) を用いた室内環境推定手法の開発 第 7 報 ソース・レセプター関係を用いた初期推定場の作成. 平成 30 年度空気調和・衛生工学会大会, 名古屋, 2018