

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.

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。

$$A\Delta S = \Delta C \quad (1)$$

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

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

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

ここで、 $\Delta\mathbf{S}_k$ は k 回目の繰り返し計算における $\Delta\mathbf{S}$ である。

以上の計算により、任意の目標点濃度分布に対して、最適な発生量分布が求められる。

2. 計算対象領域

計算領域と発生源候補の位置、そして目標点の配置を 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 点の目標点を配置した。この目標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 $k-\varepsilon$ 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と仮定した。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量変化 $\Delta\mathbf{S}$ に対する目標点濃度変化 $\Delta\mathbf{C}$ を計算することで式 (1)

より因果行列 \mathbf{A} を得る。次に室内の目標濃度分布 $\Delta\mathbf{C}$ と因果行列 \mathbf{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、発生源の発生量 (発生源ベクトル $\Delta\mathbf{S}$) を決定する。そして、得られた発生量をもとに推定される目標点濃度分布を得る。数値実験では、目標点濃度分布と推定濃度分布を比較し、ばらつき具合を評価する。目標点濃度分布はすべての目標点で 1 ppm とした

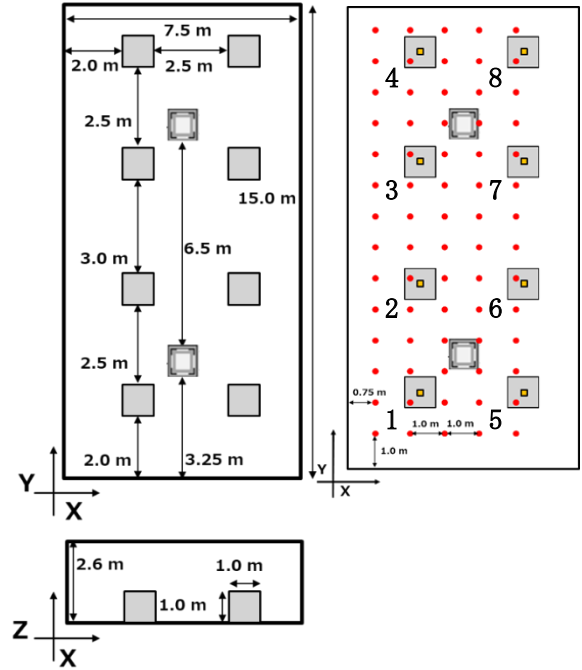


Fig. 1 Calculation domain (left) and Candidates of generators and objective points (right)

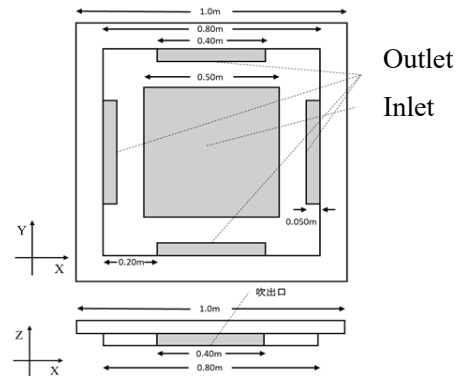


Fig. 2 The size of AC (Air Conditioner)

5. 計算ケース

計算ケースを以下に示す。

- D30S2.64: 基準のケース
- D60: 吹き出しを下向き 60° に変更したケース
- S1.32: 風速が (a) の半分のケース

Table 1 Boundary condition

Boundary		(a)	(b)	(c)
Inlet	Velocity	2.64 m/s	2.64 m/s	1.32 m/s
	Angle to ceiling	30 °	60°	30 °
	Temperature	293 K	293 K	293 K
Outlet	Guage pressure	0 Pa	0 Pa	0 Pa
Walls	Velocity	No slip	No slip	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、目標点濃度分布を出力した。

また、目標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、二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) を用いた。RMSE は目標点 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。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (C_i - C'_i)^2} \quad (5)$$

6. 結果と考察

6.1 流れ場の比較

各ケースの流れ場の様子を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。

(a) の流れ場について、空調から 4 方向に空気が流れ、高さ 0 m のところまで気流が届き、部屋全体で空気の流れがある。(b) では、吹き出し角度が 60° になったので大きな空気の対流が起こり、Base ケースに比べて空気がよく混ぜられていることがわかる。

(a) に対して、(c) では、風速が半分になったため、気流が弱くなり、気流が発生しているところとしていないところがある。

次に、各発生源から一様に発生量を与えた場合の濃度分布を Fig. 5 に示す。各ケースで濃度が高くなっているところがだいたい発生源の配置に一致している。(a)、(b)、(c) それぞれで濃度が高くなっているところに違いがある。(a) は発生源 1, 3, 4, 5, 7, 8 付近、(b) は 1, 2, 3, 6 付近、(c) は 1, 3, 5, 6, 7, 8 付近で高濃度になっている。流れ場が違うため、拡散されやすい発生源が計算ケースによって違うことがわかる。また、(c) では、全体的に高濃度となって

いるが、これは風速が弱くなっているために、換気量が少なくなり、ほかのケースに比べて濃度が高くなっていると考えられる。

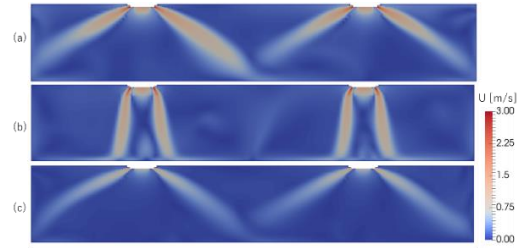


Fig. 3 Comparison of flow field (X=3.75)

(a) D30S2.64, (b) D60, (c) S1.32

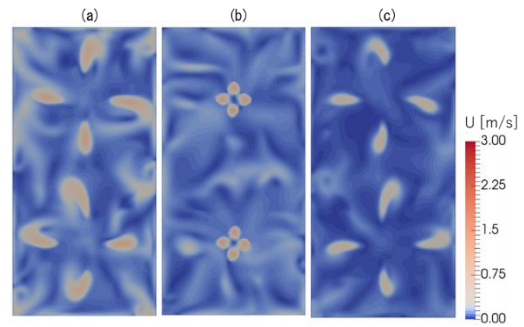


Fig. 4 Comparison of flow field (Z=1.5)

(a) D30S2.64, (b) D60, (c) S1.32

6.2 各ケースの RMSE の結果

すべての発生源組み合わせに対して SR 法で最適化を行い、推定目標点濃度分布を出力した。また発生源数ごとに最も RMSE の数値が小さかった値をプロットし、発生源数の数と RMSE の関係について調べた。最後に、最も RMSE が小さかった時の発生源の組み合わせから、それぞれの計算条件に最適な発生源配置はどれなのか調査した。

各ケースの RMSE を Fig. 5 に示す。グラフから、発生源数が増えるにつれて RMSE の値は指数関数的に減少している。発生源数をひとつ増やした時の RMSE の改善量が 5% 以下になる発生源数を最適な発生源数とした。(a) では発生源数が 4 個、その時の RMSE の数値は 0.258 ppm, (b) では発生源数 7 個、RMSE の値は 0.162 ppm, (c) では発生源数は 4 個で、RMSE の値は 0.168 ppm であった。

これら 3 つのケースから、最適配置時の誤差の大きさ、および必要な発生源数は流れ場に依存することが分かった。本研究で用意したケースすべてにお

いて、発生源候補数の 8 個より少ない発生源数で、8 個で最適化を行った場合と同程度の精度を実現することができた。

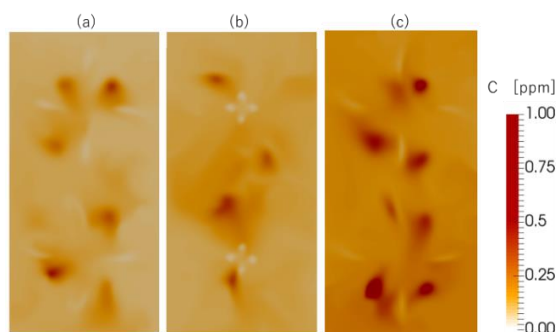


Fig. 5 Comparison of flow field (Z=1.5 m)

(a) D30S2.64, (b) D60, (c) S1.32

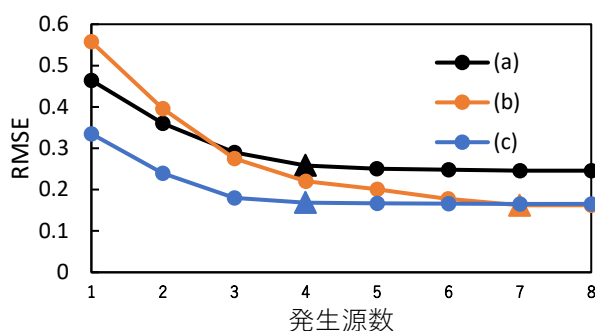


Fig. 6 RMSE for each case

(a) D30S2.64, (b) D60, (c) S1.32

6.6 発生源の配置について

次に、発生源の配置について比較していく。各ケースのすべての組み合わせの中で、最適発生源数の時の発生源の配置と発生量を Fig. 7 に示す。最適な発生源の配置と数は、計算領域の流れ場によって、異なるが分かった。その理由として、気流の違いにより希薄ガスが拡散されやすいところとされにくいところが存在し、発生源候補の中で拡散されやすい発生源配置が選択されていると考えられるが、Fig. 5 と比較してみても拡散されやすいところと選択された最適配置との関連性はあまり見られなかった。この問題の検証については今後の課題としたい。

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、推定された目標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。すべての発生源の組み合わせに対してこの操作を行い、発生源数ごとに最も小さい RMSE から、どのような違いがあるのか調査し、各ケースで比較した。その結果、最適な発生源数と発生源配置は、室内の流れ場に応じて変わることが分かった。また、今回対象とした 3 つのケースのいずれにおいても、発生源候補数の 8 個より少ない発生源数で、8 個で最適化を行った場合と同程度の精度を実現することができた。一方、流れ場と発生源と最適配置の関連は今回ではわからなかったため、今後の課題とする。

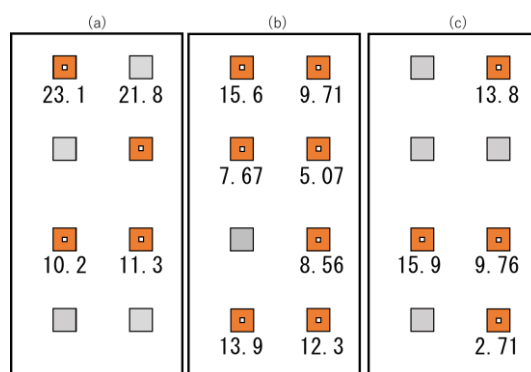


Fig. 7 Optimized source placement and generation for each case

(a) D30S2.64, (b) D60, (c) S1.32

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