

ME2 熱源に対する気温の線形応答を仮定するデータ同化法を用いた 室内温熱環境の逆推定

Inverse estimation of indoor thermal environment by using data assimilation method assuming linear response of temperature to heat sources.

指導教員 近藤明教授・共生環境評価領域

28H18017 柿花諒太朗 (Ryotaro KAKIHANA)

Abstract: It is important for better occupants' health and productivity to keep the indoor thermal environment comfortable. In order to appropriately control the indoor thermal environment, the heat source intensity of each indoor heat sources should be known. In this study, a data assimilation method called Source-Receptor (SR) method was proposed for the estimation of heat source intensities. SR method estimates heat source intensities from indoor temperature field under the assumption of linearity between heat source intensity and temperature field. However, the relationship between heat source intensity and temperature field is nonlinear because of the existence of buoyancy, and it is unclear how the nonlinearity affects the estimation accuracy of SR method. In this study, the influence of nonlinearity on estimation accuracy was assessed by a set of numerical experiments. In numerical experiments, heat source intensities are estimated by some cause-effect matrices. The results indicated that the impact of nonlinearity is large for the estimation of small heat source intensity because small variant of heat intensity has relatively larger effects on buoyancy in those cases, and that an acceptable heat intensity difference can be evaluated by using Archimedes-number.

Keywords: Data Assimilation, CFD, Indoor Thermal Environment, Linear Relationship, Archimedes-number

1. 背景と目的

居住者の健康と生産性の維持のため、室内温熱環境を快適に保つことが重要である。室内温熱環境を快適に制御するためには、室内の熱源の位置・発熱量を把握することが望ましい。室内の熱源分布と温度分布を推定手法として、熱源に対する気温の線形応答を仮定するデータ同化法であるソース・レセプター (SR) 法と呼ばれる手法がある。同手法は線形応答を仮定するため浮力による非線形性の影響が大きい領域では推定精度が低下すると言われているが、この非線形性がどれほど SR 法の推定精度に影響を与えるのかは明らかではない。本研究では、室内温熱環境の推定に SR 法を用いる際、その適用範囲と推定精度に対する非線形性の影響について数値実験により検討した。

2. 数値実験

計算領域を図1に示す。領域は7.5m 四方、高さ2.6m であり、東西を X 方向、南北を Y 方向、鉛直方向を Z 方向とし、床面南西端に原点を取った。室内に熱源は4つあり、部屋の中央に空調機を設置した。観測点高さは観測点の X・Y 方向の配置の間隔が均等になるよう24点、Z 方向の配置は床から1.2m、1.6m、2.0m、2.4m の4点の計96点とした。

2.1 SR 法

SR 関係は式(1)で表される。A は SR 関係を示す因果行列、S は熱源分布を示すベクトル。 ΔT は観測点における熱源がない場合を基準としたときの熱源による温度上昇量を示すベクトルである。熱源数を N 、観測点の数 M とすると、行列 A は $M \times N$ の行列となる。熱源がある発熱量で発熱したときの温度上昇量を計算することで、式(1)から因果行列 A を求めることができる。SR 法では、温度の観測値から ΔT を求め、式(1)の残差を用いて式(2)により評価関数 I を定義し、最急降下法を用いて I を最小化する S を求める。

$$AS - \Delta T = 0 \quad (1)$$

$$I = \| AS - \Delta T \|^2 \quad (2)$$

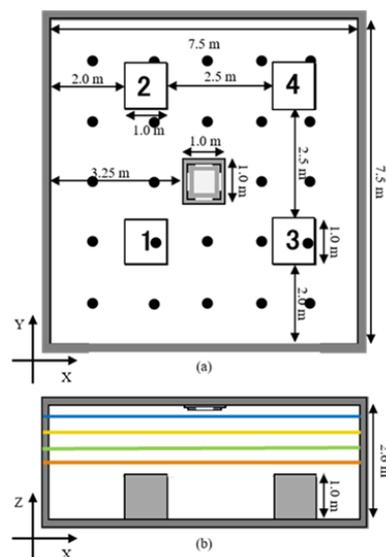


図1 計算領域

2. 2 数値実験の流れ

熱源 4 が 400W で発熱するケースを正解ケースとし、因果行列を作成するときの発熱量を 100W ずつ変更して発熱量推定を行ったところ、正解ケースとの発熱量の差が大きいほど発熱量推定の精度が低下することがわかった。その後、発熱量推定の精度が最大と最小のケースについて推定発熱量を用いて再度 CFD 計算を行い温度分布と風速分布を比較した。

また、浮力の影響を評価するためにアルキメデス数を算出し、発熱量推定精度との関係を求めた。アルキメデス数は式(3)で求めた。 Ar はアルキメデス数、 g は重力加速度、 β は体積膨張率、 $\Delta\theta$ は観測点位置が最も低い 1.2m と最も高い 2.4m の水平面の平均温度の差、 L は観測点高さ 1.2m と 2.4m の高さの差、 U は空調機の吹出速度である 1.0m/s とした。

$$Ar = \frac{g\beta\Delta\theta L}{U^2} \quad (3)$$

3. 結果と考察

発熱量推定の結果、発熱量の二乗平均平方根誤差 (RMSE) が最小、最大となるのは因果行列をそれぞれ 400W と 100W で作成した場合 (以下、matA400W、matA100W) であり、そのときの RMSE はそれぞれ 0.7W、141.8W であった。正解値と因果行列作成に用いた発熱量が異なると、浮力による非線形性が適切に考慮されないため、誤差は大きくなる。各発熱量推定結果を用いて再計算した結果を図 2 に示す。発熱量推定の誤差が大きかった matA100W ケースでは、温度・風速分布の誤差も大きく、特に熱源からの上昇気流が再現されていなかった。熱源からの上昇気流は室内の温度と風速分布に影響を与えることから発熱量が大きく違う因果行列を用いると推定精度が低下するとわかった。その後、熱源 4 が様々な発熱量で発熱するときのアルキメデス数を計算することで発熱量とアルキメデス数の関係を求め、浮力と発熱量推定誤差の関係を、正解値と因果行列作成におけるアルキメデス数の差と、そのときの正規化 RMSE (NRMSE) の関係で表した。NRMSE は各 RMSE を正解発熱量で規格化して求めた。図 3 に因果行列を 400W で作成したときの関係を示す。アルキメデス数の差が大きくなると発熱量推定の誤差も大きくなることとともに、目標とする推定精度について、許容されるアルキメデス数の差が求められるようになった。同様の分析を異なる発熱量で作成した因果行列についても適用したところ、発熱量が小さいときはわずかな発熱量の変化でも浮力による流れ場変化の影響が大きいため、許容される発熱量差が小さいことが明らかになった。

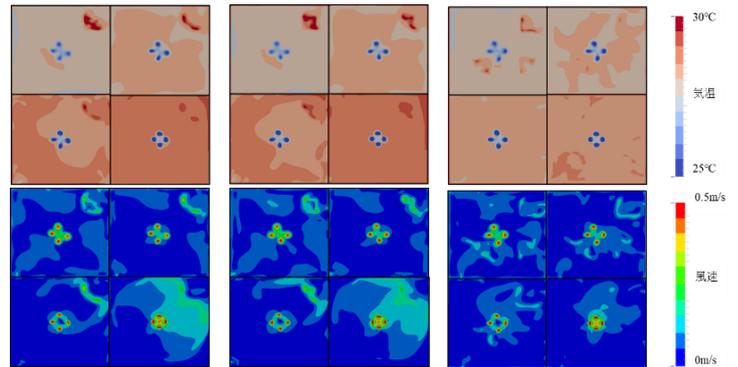


図 2 各観測点高さの水平温度分布と風速分布。左から順に正解値、matA400W の推定値、matA100W の推定値。各図左上、右上、左下、右下は高さ 1.2m、1.6m、2.0m、2.4m の水平面を示す。

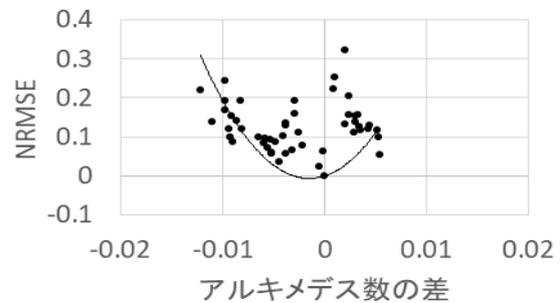


図 3 アルキメデス数の差と発熱量推定精度の関係 (実線は多項式近似による近似曲線)

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- SR 法の発熱量推定の精度は正解値発熱量と因果行列を作成する際の発熱量に近いほど高い。
- アルキメデス数を求めることで、必要な推定精度に対して許容される発熱量差を求められる。