

熱源と観測温度の線形関係を仮定するデータ同化法を用いた室内熱源分布の逆推定

Inverse Estimation of Indoor Heat Source Distribution by Using Data Assimilation Method Assuming Liner Relationship between Heat Sources and Observed Air Temperature

学生会員 ○柿花 諒太郎 (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)
Ryotaro KAKIHANA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

The estimation of indoor thermal environment is crucial for creating a comfortable environment. The indoor temperature distribution depends on the location of heat sources and their heat generation. In this study, a data assimilation method called SR method was proposed for source estimation of heat sources, and its applicability was validated by a set of numerical experiments. The data assimilation method uses Cause-Effect matrix to estimate heat source distribution from the observed air temperature data. In the experiments, some Cause-Effect matrices are used, one is constructed the same heat generation as estimation target and the others are not. The result indicated that Cause-Effect matrix should be constructed by high heat generation.

1. はじめに

快適な室内温熱環境の構築するためには、室内に存在する熱源の位置・発熱量を把握し、適切に空調や発熱量を制御する必要がある。室内において想定される熱源としては、人、照明器具、電気製品、暖房器具などが挙げられるが、これらの位置と発熱量を事前に把握することは難しい¹⁾。

本研究では、室内温熱環境を把握するため、データ同化法を用いて未知の熱源の発熱量を高精度に推定することを目的とする。データ同化とは観測値を用いて数値シミュレーションを修正する手法であり、本研究では観測された温度から熱源の位置と発熱量を逆推定した。熱源と観測された温度との間の線形関係を仮定した推定手法は複数あり¹⁻⁵⁾、呼び名も様々である。本研究においては、熱源と観測された温度との線形関係をソース・レセプター関係と呼び、そのソース・レセプター関係の仮定に基づく逆推定手法をSR法と呼ぶ。

SR法にはソース・レセプター関係を表す因果行列が用いられており、本研究では作成方法の異なる因果行列の熱源推定に対する影響を検証した。

2. 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。

$$Aq = \Delta T \quad (1)$$

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、 q は熱源分布を表すベクトル、 ΔT は観測点のある位置における熱源が無い場合を基準としたときの温度上昇を表すベクトルである。行列 A は熱源の数を N 、温度センサの数を M とすると、 $M \times N$ の行列となる。

式(1)から熱源がない場合の温度分布、および熱源1つだけが1単位の発熱をした場合の温度分布をCFDシミュレーションによって求めることで、行列 A を求めることができる。

行列 A が既知である場合、未知の熱源の組み合わせ q' とそのときの温度上昇 $\Delta T'$ の関係は、式(2)で表される。式(2)を解けば q' が得られる。そこで、式(3)のように評価関数を定義し、式(4)に示す最急降下法により評価関数を最小化する熱源の組み合わせを繰り返し計算により探索する。式(4)中の勾配は、式(5)により求められる。

$$Aq' - \Delta T' = 0 \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{2} (Aq' - \Delta T')^T (Aq' - \Delta T') \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial I}{\partial q'} \Big|_{q'=q'_k} = (A)^T (Aq'_k - \Delta T') \quad (5)$$

ここで、 $(\cdot)^T$ は行列またはベクトルの転置を意味しており、 q'_k は k 回目の繰り返し計算における q' である。

SR法の適用では、行列 A の算出のために $N+1$ 回のCFD

シミュレーションを行う必要がある(N 個の熱源のそれぞれ1つだけが存在する場合と、熱源の存在しない場合)。

一方、 A が算出された場合、任意の ΔT から CFD 計算を必要とせず速やかに q' を求めることができる。つまり、事前計算を行っておくことで、観測点から温度情報を得ると、速やかに熱源ベクトルを推定することができる。

本研究での観測データから未知の熱源分布と室内の温度分布を推定するための手順を以下に示す。

- 1) 未知の熱源のそれぞれについて、熱源が無い場合と熱源1つだけが1単位の発熱をする場合について CFD シミュレーションを行い、式(2)より行列 A を求める。
- 2) 室内の温度観測データからベクトル $\Delta T'$ を求め、式(5)より未知の熱源分布 q' を推定する
- 3) 推定した熱源分布を用いて CFD シミュレーションを行い、温度分布を求める。

3. 数値シミュレーション

3.1 計算対象領域

発熱量未知の熱源が設置された3次元室内空間を対象に、SR法によって得られた温度情報から各熱源の発熱量について逆推定を行った。

対象領域を Fig.1 に示す。領域は 7.5m 四方、高さ 2.6m である。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。

室内には 1m 四方の熱源が 4 つあり、天井中央には 4 方向吹きの空調機室内機がある。境界条件を Table.1 に、観測点の配置を Fig.1 に示す。観測点の X・Y 方向の配置は間隔が均等になるよう 24 点設置した。Z 方向の配置は床から 1.2m, 1.6m, 2.0m, 2.4m の 4 通りとした。なお、観測誤差はないものとした。

なお、数値シミュレーションでは熱源 1、熱源 2、熱源 3、熱源 4 が個別に発熱しているケースを計算しそれぞれケース 1、ケース 2、ケース 3、ケース 4 とした。

3.2 計算条件

CFD シミュレーションには、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 2.3 を適宜修正して用いた。非圧縮性定常流れを仮定し、ブシネスク近似により浮力を表現した。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、熱の保存式である。対流項の離散化には 2 次精度風上差分法(線形風上法)を、拡散項の離散化には 2 次精度中心差分法を用いた。速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法を用いた。

本研究では推定対象と異なる発熱量から作成した因果行列と推定対象と同じ発熱量から作成した因果行列を用いて熱源推定を行った。熱源は 300W で発熱していると、100W, 300W, 600W で発熱した場合に作成した行列

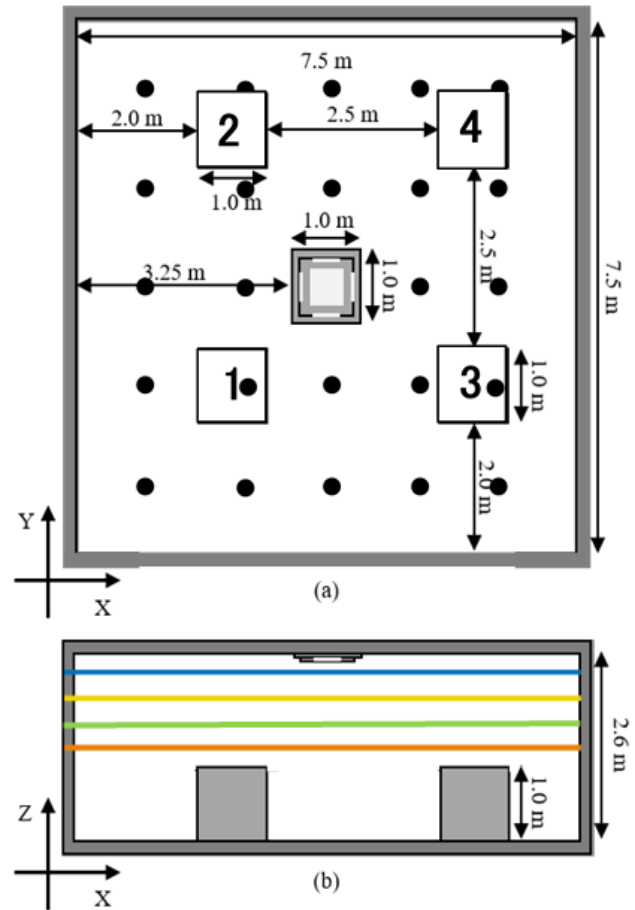


Fig.1 Calculation domain and observation points

Table.1 Boundary conditions

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity: 0.99 m/s
	Angle to ceiling: 45°
	Temperature: 293K
Outlet	Gauge pressure: 0 Pa
Walls	Velocity: No slip
	Temperature: 303K
Hot boxes	Velocity: No slip
	Heat generation: 300 W

A (それぞれ matrix $A(100W)$, matrix $A(300W)$, matrix $A(600W)$ とする)を用いて熱源推定を行った。

4. 結果

Fig.2 - 4 に推定精度の良いケース 4 を、Fig.5 - 7 に悪いケース 1 について結果を示す。ケース 4 において、300W の行列 A 用いた推定では、どの高さの観測値を用いても概ね精度よく推定でき、600W の行列 A を用いた場合でも総発熱量に関しては正確値とほぼ等しくなっている。

一方 100W の行列 A を用いた場合は発熱していない箇所での発熱量や吸熱量が大きく、推定精度は低下した。

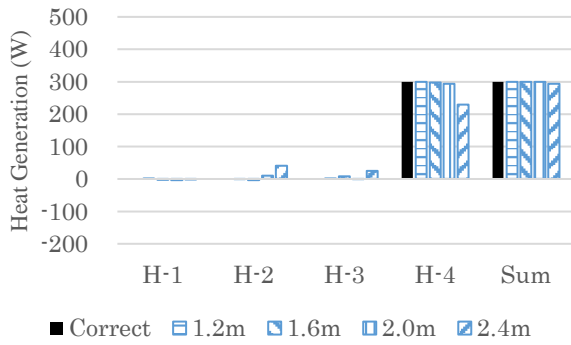


Fig.2 Estimation result of Case4 using matrix A (300W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

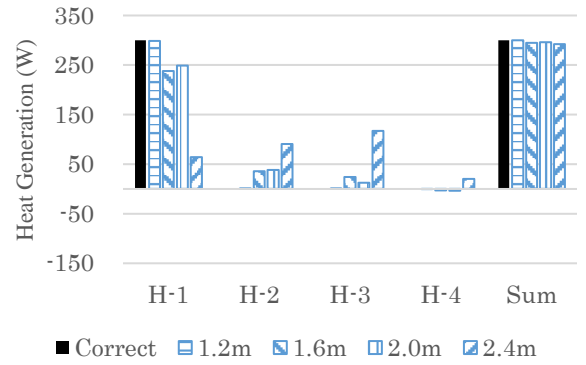


Fig.5 Estimation result of Case1 using matrix A (300W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

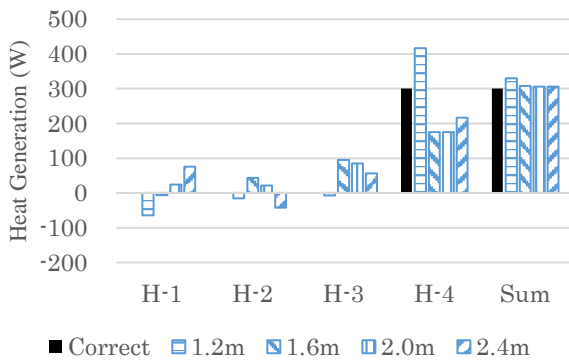


Fig.3 Estimation result of Case4 using matrix A (600W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

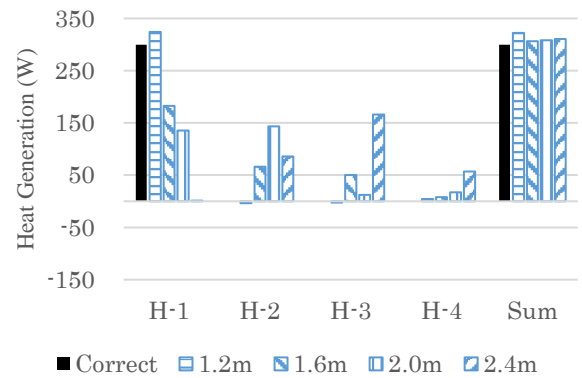


Fig.6 Estimation result of Case1 using matrix A (600W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

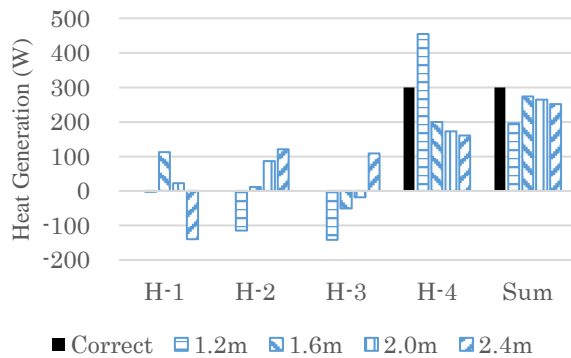


Fig.4 Estimation result of Case4 using matrix A (100W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

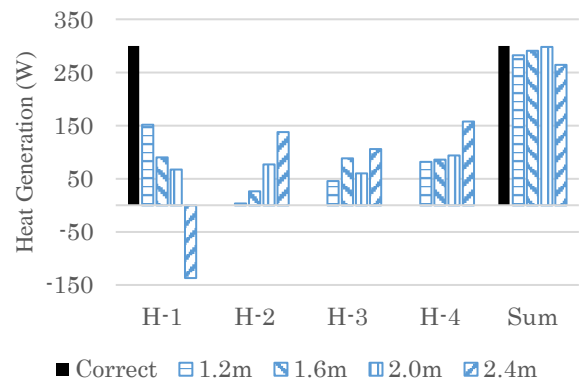


Fig.7 Estimation result of Case1 using matrix A (100W) with each observation height (The vertical axis shows the heat generation, the horizontal axis shows the heat source location. H means a heat source.)

ケース 1 では、ケース 4 と同じように 300W の行列 A

ではどの高さでも概ね精度よく推定できており、600Wの行列Aを用いた場合は観測点位置が低い際に推定精度は良く、総発熱量に関しても正解値にほぼ等しい。100Wの行列Aを用いた場合は発熱していない箇所の発熱量が大きく、推定精度は大きく低下した。

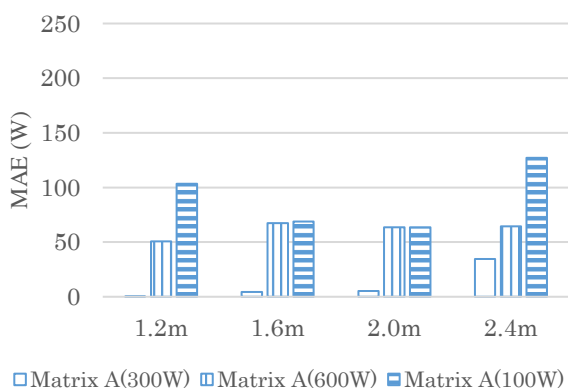


Fig.8 MAE between correct and estimated heat generations of Case 4 using each matrix A with each observation height

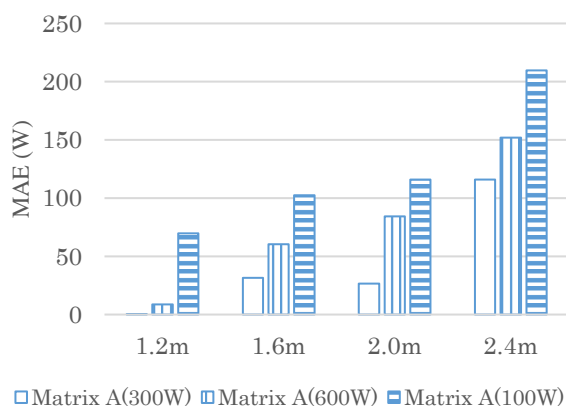


Fig.9 MAE between correct and estimated heat generations of Case 1 using each matrix A with each observation height

全組み合わせにおいて推定精度は観測点位置が高くなるにつれて低下する傾向にある。これは観測点位置が高くなるにつれ得られる温度分布が一様に近づき、熱源の寄与が見えにくくなるためであると考えられる。また、観測点位置が高く、100Wで作成した行列Aを用いて推定した場合、推定精度は大きく低下した。

Fig.8とFig.9にそれぞれケース4とケース1における正解値と推定値のMAEを示す。

Fig.8とFig.9より、300Wで作成した行列Aを用いると推定精度は良くなるのがわかった。また、600Wで作成した行列Aによる推定の方が100Wで作成した行列Aを用いた推定よりも推定精度は高かった。

これは推定対象からの浮力による上昇気流を100Wで作成した行列Aでは考慮できておらず、600Wで作成し

た行列では過度に考慮しているためであると考えられる。これにより、事前に因果行列である行列Aを作成する際、想定される発熱量の中でも高い発熱量を与えてから作成するべきであるとわかった。

5. まとめ

本研究ではソース・レセプター関係を仮定したデータ同化法であるSR法を用いて、4つの熱源がそれぞれ発熱している場合について熱源の発熱量と発熱箇所の推定を行った。その際、異なる発熱量で作成した因果行列を用いて推定を行い、因果行列の違いによる推定精度の違いを検証した。

数値シミュレーションの結果、発熱量と発熱箇所を概ね精度良く推定することができた。推定対象と同じ発熱量で作成した因果行列を用いた推定では精度がよく、MAEも小さい。

一方で用いた因果行列が推定対象よりも発熱量が小さい際に作成されたものであると推定精度は低下し、それに比べ推定対象よりも発熱量が大きい際に作成されたものであると推定精度はよかった。どちらの場合も浮力の影響を正しく考慮できていないと考えられるが、過少に考えた場合よりも過度に浮力は存在すると仮定した因果行列を用いた方が推定精度は高い。特に、推定対象の発熱量が因果行列を作成した際の発熱量より小さいとき、浮力による上昇気流が過少評価しているため観測点位置が高いほど更に精度も低下するとわかった。

以上より、事前に因果行列を作成する際は、発熱量を大きめに見積もっておくべきであると考えられる。

参考文献

- 1) Lei, L., Xue, Y., Zheng, W., Yang, J.: An inverse method based on CFD to determine the temporal release rate of a heat source in indoor environments, *Applied Thermal Engineering*, Vol 134, pp.12-19, 2018
- 2) 松尾智仁,近藤明,嶋寺光,塩地純夫,小松明. 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29年度空気調和衛生工学会大会, 名古屋, 2018
- 3) Lei, L., Wang, S., Zhang, T.: Optimal specification of target temperature points for inverse design of an indoor thermal environment, *Building and Environment*, Vol 92, pp 518-527, 2015
- 4) Lei, L., Wang, S., Zhang, T.: Inverse determination of wall boundary convective heat fluxes in indoor environments based on CFD, *Energy and Buildings*, Vol 73, pp 130-136, 2014
- 5) 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