

ソース・レセプター関係を用いたデータ同化法による空調の最適運転制御御

Optimal operation control of air conditioning by data assimilation using source-receptor relation

○鹿山 和真 (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)

Kazumasa SHIKAYAMA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Optimized control of air conditioners (AC) is an essential factor to create a comfortable indoor environment. In this study, a data assimilation method called Source-Receptor (SR) method was used for AC control. The SR method assumes the linear relationship between the heat source and the temperature at reference points. The SR method was utilized to determine the blow-out temperature of AC from the target temperature. Computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed using the obtained air-conditioning blow-out temperature. The target temperature and the CFD-simulated value at the reference points well agreed, suggesting that AC can be properly controlled using the SR method.

はじめに

人々は平均して生活の90%を屋内環境で過ごしている¹⁾。良好な屋内環境は、優れた生産性、空室率の低下、健康の向上に不可欠である²⁾。そのため快適な室内環境を構築する必要がある。

室内温熱環境の制御のために、熱源とある場所での温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。加藤らはCRI (Contribution Ration of Indoor Climate: 室内温熱環境形成寄与率)を開発した³⁾。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。笹本らはこのCRIを用いて室内温熱環境の制御を行った⁴⁾。また、松尾らはデータ同化法の一つであるSR法 (Source-Receptor 法)を利用して室内温熱環境の推定を行った⁵⁾。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手法である。本研究では熱源となる空調吹き出し温度の推定を行うので、このSR法を空調制御に利用する。任意の点での目標温度に応じた空調の吹き出し温度を逆推定することを本研究の目的とする。また、逆推定された吹き出し温度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、ある地点における目標温度とSR法を用いて求めた計算値の比較を行う。

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。

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

ここで、 A はソース・レセプター関係を表す因果行列、 q は空調吹き出し温度を表す熱源ベクトル、 ΔT は空調の吹き出し温度が22°Cである場合を基準としたときの温度上昇量を表すベクトルである。ここで行列 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)から事前に複数の空調吹き出し温度をCFDシミュレーションによって計算しておくことで、行列 A が算出される。

行列 A が既知である場合、温度上昇量 ΔT が与えられた際、式(1)を解くことで熱源ベクトルである q が求められる。

本研究においては最急降下法による解法により q を求めた。そこで、式(2)のように評価関数を定義する。

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

q が I を最小化するとき、 I の q に対する勾配は0になる。 I を最小化する q を求めるためには式(3)を満たす q を求める必要がある。

$$\frac{\partial I}{\partial q} = 2(A)^T(Aq - \Delta T) = 0 \quad (3)$$

ここで $(\cdot)^T$ は転置行列または転置ベクトルである。

式(3)を満たす q を式(4)に示す最急降下法を用いて探索する。

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

ここで q_k は k 回目の繰り返し計算における q である。
 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。

2. 数値シミュレーション

2.1 計算対象領域

計算領域を 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。格子解像度は 0.05m であり格子数は約 117 万である。室内には 1m 四方の発熱体が 4 つあり、天井中央に 1m 四方の 4 方向吹き出しの空調機がある。Fig.2 に詳細な空調機の寸法を示す。また、観測点の配置を Fig.3 に示す。Z 方向 1.2m, 1.6m にそれぞれ 4 点の合計 8 点の観測点を配置した。観測点付近（目標地点）の温度を変えるために空調の制御を行った。本研究は CFD による数値実験のため各観測点で得られる観測値は仮想的であり、観測誤差はないものとした。

2.2 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 4.0 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）を用いた。速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法を用いた。

境界条件を Table.1 に示す。室内中央の空調からは、一定温度の吹出風が、天井に平行な向きを 0° として 30° の角度で下向きに吹くものとした。壁面はすべりなし条件とし、部屋の壁面は温度固定、それ以外の固体表面は断熱とした。熱源は表面から均一に放熱しており、発熱量の合計は 300W である。

Table.1 Boundary condition

Boundary	Boundary condition
Outlet	Velocity: 3.0 m/s
	Angle to ceiling: 30°
	Temperature: 293K
Inlet	Guage pressure: 0 Pa
Walls	Velocity: No slip
	Temperature: 303K
Hot boxes	Velocity: No slip
	Heat generation: 300 W

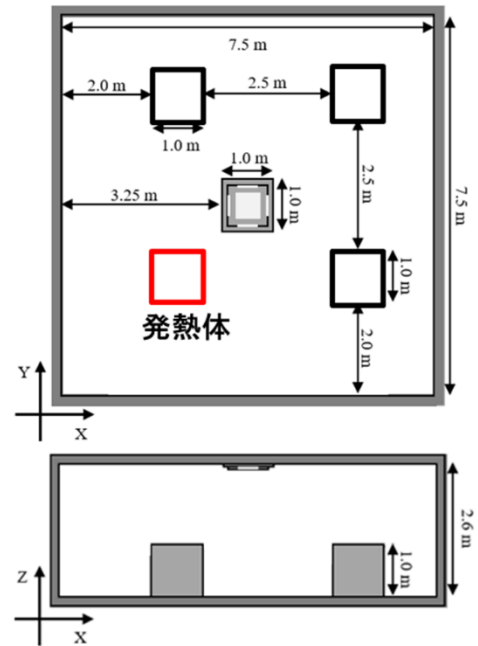


Fig.1 Calculation domain

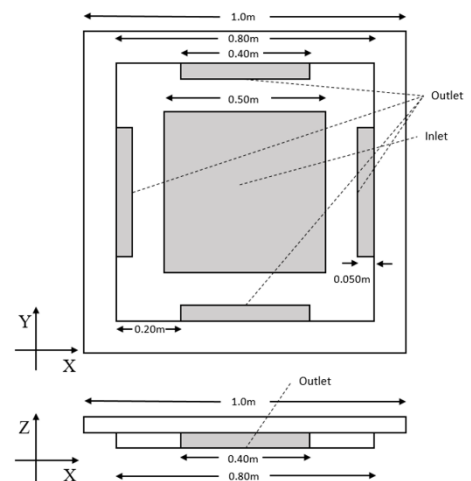


Fig.2 The size of AC

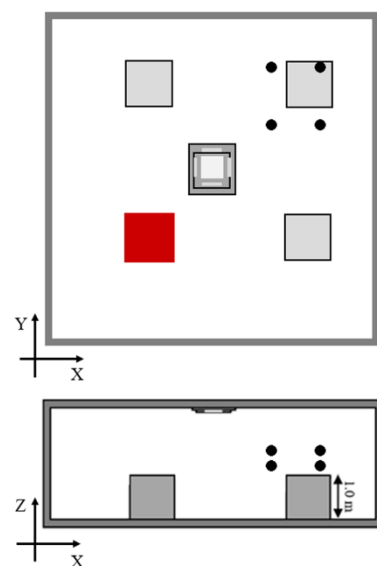


Fig.3 Observation points

2.3 SR 法による空調運転制御の流れ

本研究における SR 法を用いた空調吹き出し温度推定の流れは以下のとおりである。

- 1) 因果行列を作成する際に基準となる吹き出し温度 22°C と計算ケースの吹き出し温度（本研究では 20°C および 24°C）の数値計算を行い、吹き出し温度変化にともなう温度変化量を得る。これにより SR 関係を得られ、因果行列 A を得ることができる。
- 2) 室内の温度観測データから ΔT を求め、SR 法を適用することで空調吹き出し温度（熱源ベクトル q ）を決定する。
- 3) 決定された空調吹き出し温度（熱源ベクトル q ）を入力値として CFD シミュレーションを行い、目標温度と計算値との比較を行う。

3. 結果と考察

3.1 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示す。因果行列 A を作成するための基準となる吹き出し温度 22°C と計算ケースとなる吹き出し温度 20°C、24°C の場合のシミュレーションを行った。Fig.4 に吹き出し温度 20°C の場合の $z=1.2\text{m}$ における温度分布図と基準となる吹き出し温度 22°C との差を示す。Fig.5 に吹き出し温度 24°C の場合の $z=1.2\text{m}$ における温度分布図と基準となる吹き出し温度 22°C との差を示す。

また、吹き出し温度 20°C、24°C の場合の観測点 8 点の平均温度はそれぞれ 24.978°C で、27.171°C であった。それぞれの吹き出し温度における計算ケースを以下に示す。

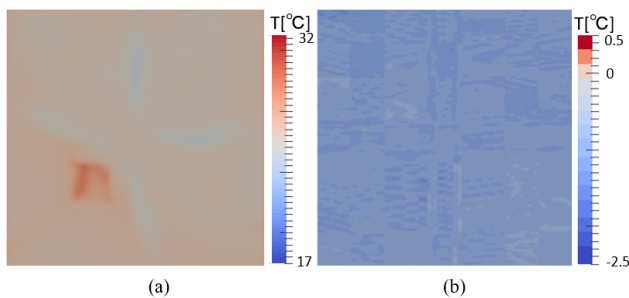


Fig.4 Temperature field of (a) precalculation with the blow-out temperature 20°C and (b) difference between precalculation and reference with the blow-out temperature 22°C

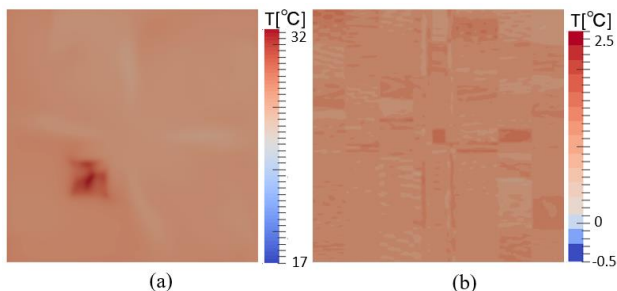


Fig.5 Temperature field of (a) precalculation with the blow-out temperature 24°C and (b) difference between precalculation and reference with the blow-out temperature 22°C

1 吹き出し温度 20°C の場合

- 1-1 観測点の平均温度を 24°C にするために必要な空調吹き出し温度を求める。
- 1-2 観測点の平均温度を 23°C にするために必要な空調吹き出し温度を求める。

2 吹き出し温度 24°C の場合

- 2-1 観測点の平均温度を 26°C にするために必要な空調吹き出し温度を求める。
- 2-2 観測点の平均温度を 25°C にするために必要な空調吹き出し温度を求める。

3.2 SR 法を用いた吹き出し温度推定結果

まず、それぞれのケースにおいて SR 法によって求められた吹き出し温度を Table.2 に示す。目標温度をおおむね 1-2°C 下げるために、空調吹き出し温度は 1.8-3.9°C 低下した。

Case	The blow-out temperature of AC [°C]
1-1	18.217
1-2	16.394
2-1	21.892
2-2	20.102

3.3 目標温度と計算値の比較

SR 法を用いて推定された空調吹き出し温度を入力値として CFD シミュレーションの再計算を行い、目標温度と計算値との比較を行った。Fig.6 に吹き出し温度 20°C における $Z=1.2\text{m}$ における温度分布図と SR 法用いて推定された空調吹き出し温度による再計算による $Z=1.2\text{m}$ における温度分布図を示す。ケース 1-1、1-2、2-1、2-2 におけるそれぞれ制御前と制御後の $Z=1.2\text{m}$ における温度分布図を Fig.6-9 に示す。また、制御前の 8 点の観測点における平均温度を T_0 、制御後の 8 点の観測点における平均温度を T 、両者の差分を ΔT 、平均絶対誤差 (Mean Absolute Error: MAE) を Table.3-6 に示す。

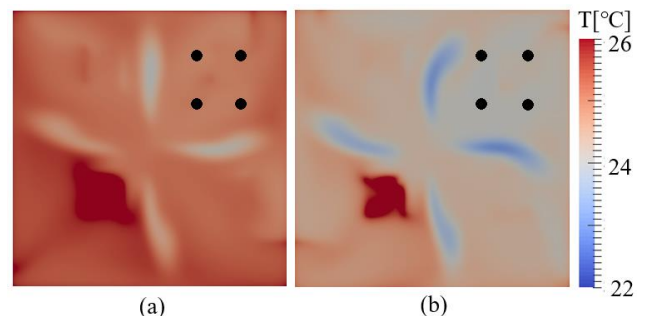


Fig.6 Comparison (a) before and (b) after control in case 1-1

Table.3 Calculation result of temperature in case 1-1

T_0 [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	MAE [°C]
24.978	24.054	0.054	0.087

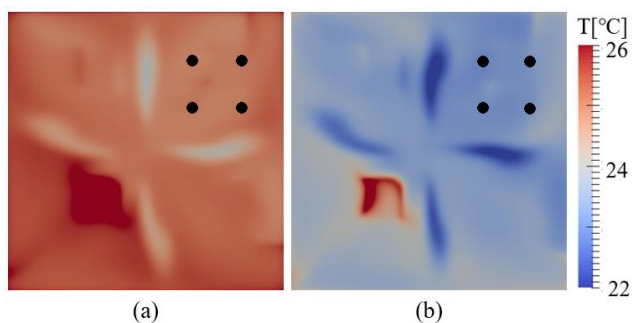


Fig.7 Comparison (a) before and (b) after control in case 1-2

Table.4 Calculation result of temperature in case 1-2

T_0 [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	MAE [°C]
24.978	23.143	0.143	0.156

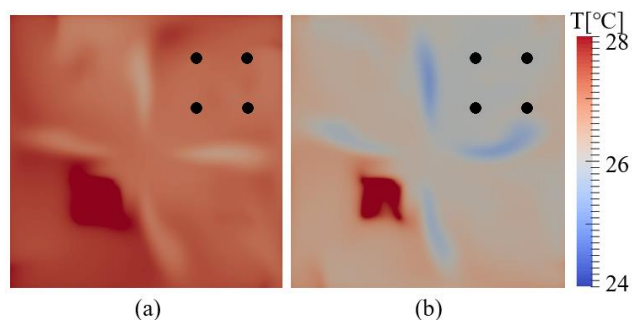


Fig.8 Comparison (a) before and (b) after control in case 2-1

Table.5 Calculation result of temperature in case 2-1

T_0 [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	MAE [°C]
27.171	25.978	-0.022	0.077

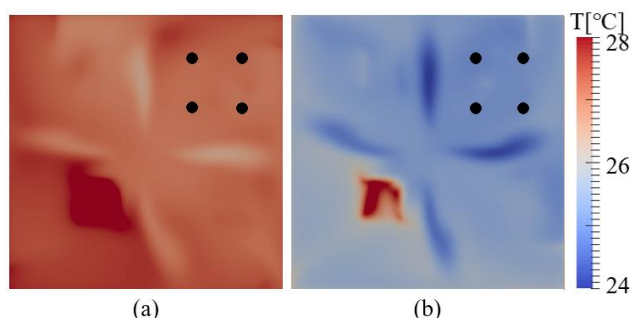


Fig.9 Comparison (a) before and (b) after control in case 2-2

Table.6 Calculation result of temperature in case 2-2

T_0 [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	MAE [°C]
27.171	25.036	0.036	0.087

Fig.6-9 および Table.3-6 から SR 法により推定された吹き

出し温度は目標温度を 0.2°C未満の誤差で正確に実現することができた。特にケース 2-1 では目標温度との差が 0.022 と目標温度とほぼ一致させることができた。

また、ケース 1-1 と 1-2 を比較するとケース 1-1 のほうが目標温度との差および MAE は小さく、よく制御することができた。同様に、ケース 2-1 と 2-2 を比較するとケース 2-1 のほうが目標温度をよく再現することができた。目標地点の温度変化量が大きいと空調制御の精度が下がることが分かった。このようになる理由は、熱源と観測点に仮定している線形関係からのずれが大きくなるからであると考えられる。

4. 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、空調の制御を行った。すべての計算ケースにおいて目標温度を正確に実現することができた。目標地点の温度変化量が大きくと空調制御の精度が下がることが分かった。これは、熱源と観測点に仮定している線形関係からのずれが大きくなるからであると考えられる。

しかし、今回の計算条件では空調が 1 つしかないので室内の温度分布は発熱体付近を除いてほとんど同じになっている。空調が 2 つ以上ある室内であればSR法を用いて、室内に空間温度分布をつけ快適な室内温熱環境を構築することも可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Yang, L., Ye, M., and He, B. J. . "CFD simulation research on residential indoor air quality." Sci. Total Environ., 472, 1137–1144,2014
- 2) Lajoie,P.,Aubin,D.b,Gingras,V.a,Daigneault,P.c, "The IVAIRE project—A randomized controlled study of the impact of ventilation on indoor air quality and the respiratory symptoms of asthmatic children in single family homes." Indoor Air, 25(6), 582–597.2015
- 3) 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
- 4) 笹本太郎, 加藤信介, 村上周三, 大森敏明,室内温熱環境形成寄与率(CRI)を利用した室内温熱環境制御に関する研究 : 第 1 報 温度センサーと制御対象点の関係を記述するための数学的定式化日本建築学会環境系論文集 69 巻 586 号 p. 33-38,2004
- 5) 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学会大会, 名古屋, 2018