

ソース・レセプター関係を用いた既設空調の最適制御手法の推定

## Estimation of Optimal Operation Control of Established Air Conditioner by Using Source-Receptor Relationship

○ルディ 愛 (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)

Mana LUEDI\*1 Tomohito MATSUO\*1 Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1

\*1 Osaka University

**Abstract:** In this study, to optimize blowout temperatures of air conditioners for a comfortable thermal environment, this study used the modified source-receptor (SR) method, which assume a linear relationship between the blowout temperature and the indoor temperature field. For reducing errors in the methods caused by nonlinearity due to buoyancy, a correction approach based on linear interpolation was developed. To evaluate the effect of the correction, a set of numerical experiments was conducted using three kinds of SR methods, and second CFD simulations were performed by giving the optimized blowout temperatures. Compared the SR methods with the second CFD simulations, the results did not show the superiority of the SR method with correction at the prediction accuracy compared to the SR methods without the correction. To obtain more obvious results, conditions for computation should be modified.

### はじめに

空調を制御することで快適な温熱環境を構築することが求められている。目標温度分布を再現できるように様々な空調吹き出し温度を変更して計算する方法は計算量が膨大になる。一方、目標温度分布から逆推定することで計算量を減らすことができる。松尾ら[1]は実在の講義室での測定実験をもとに計算流体力学 (CFD) モデルを作成し、ソース・レセプター (SR) 関係を用いて、室内温度分布を目標温度分布に近づけるような空調吹き出し温度を決定する逆解析を行った。従来の SR 法は線形関係を仮定しているが、熱源と温度分布の関係は線形ではない問題点がある。そこで本研究では、SR 法において浮力による誤差を減らす手法を提案し、その効果を評価することを目的とする。

### 1. 研究手法

#### 1.1. 従来の SR 法

従来の SR 法は、熱源発熱量(本研究においては空調吹き出し温度)の変化量と、室内各点における温度変化の間に線形関係を仮定する。SR 関係を式 (1) に示す。

$$A\Delta Q = \Delta T \quad (1)$$

ここで  $A$  は SR 関係を表す因果行列、 $\Delta Q$  は空調吹き出

し温度の変化量を表すベクトル、 $\Delta T$  は観測点での室温変化量を表すベクトルである。行列  $A$  が既知となると、温度上昇量 $\Delta T$ が与えられた際、式(1)を解くことで吹き出し温度ベクトルである  $\Delta Q$  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吹き出し温度ベクトル  $Q$  を求めた。

ここで、式(1)の残差を用いて評価関数  $I$  を式(2)のように定義する。

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

式(3)に示す最急降下法により吹き出し温度  $Q$  を求める。

$$\Delta Q_{k+1} = \Delta Q_k - \left. \frac{\partial I}{\partial Q} \right|_{\Delta Q = \Delta Q_k} \quad (3)$$

#### 1.2. 浮力の影響を考慮した場合の SR 法

しかし、実際には吹き出し温度の変化により浮力の大きさが変わり流れ場に変化が生じるため、この線形関係は成り立たない。そこで本研究では、複数の吹き出し温度に応じて SR 行列を複数作成し、それらの SR 行列の線形補間(補外)により最適吹き出し温度の最適化を行うように手法を修正した。行列  $A$  を補正する手法においては、最急降下法のステップごとに推定された $\Delta Q$  を用いて行列  $A$  を補正しながら計算を行った。

## 2. SR法の適用方法

### 2.1. SR法の評価の流れ

本研究におけるSR法の適用の流れは以下のとおりである。まず、室内温熱環境の基準となるケースと基準ケースから空調吹き出し温度を変更したケースの計算を複数行い、吹き出し温度変化に伴う観測点での室温変化の応答を得る。本研究では、+2°Cケースと+4°CケースのそれぞれについてSR行列を得た。次に、目標温度分布を決定し、式(2)~(3)の適用により最適吹き出し温度  $Q$  を決定する。同時に、そのときの各観測点の温度分布が得られる。SR法による予測温度分布の検証のため、推定された最適吹き出し温度  $Q$  を入力値としてCFDシミュレーションを行い、得られた温度分布とSR法による予測値の比較を行う。

### 2.2. CFD計算条件

CFDシミュレーションには、OpenFOAMを用いた。

室温の制御を行う点として、66の観測点を設定した。

計算領域と観測点の位置をFig.1に示す。

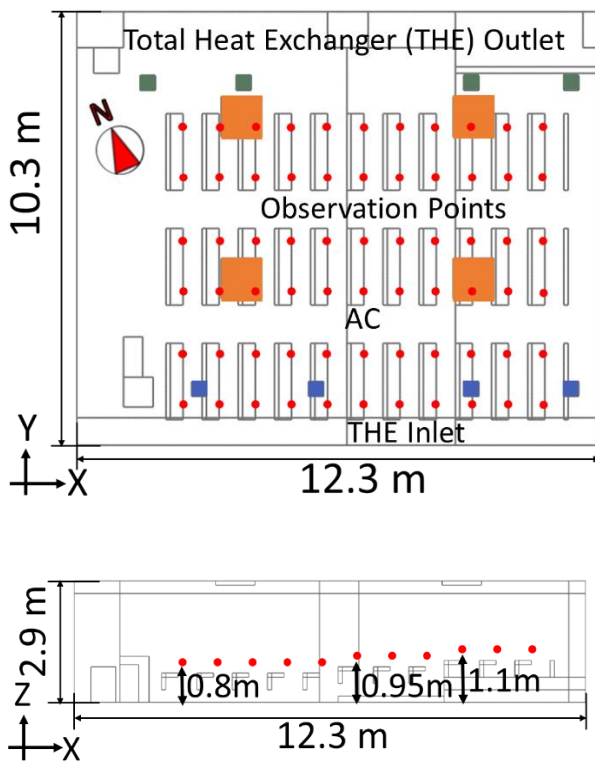


Fig.1 Observation Points and Computation Field

計算領域は大阪大学吹田キャンパスの講義室を模擬している。計算条件は夏季を想定した。室内には4つの空調機(風量 18.5 m<sup>3</sup>/min)があり、天井に平行な向きを0°として54°で下向きに吹き出す設定とした。全熱交

換器(風量 10.8 m<sup>3</sup>/min)からは31°Cの外気が吹き出されていることとした。Fig.1の南側に全熱交換器の吹き出し口、北側に吸い込み口それぞれ4つずつある。

すべての空調機の吹き出し温度が22°Cのケースを基準とし、基準ケースから吹き出し温度が2°C高いケースと4°C高いケースを計算した。基準ケースからの変化量から2°C変化時のSR行列 $\alpha$ と4°C変化時のSR行列 $\beta$ を作成した。Fig.2から基準ケースの平均室温は24.97°Cになり、冷風は観測点まで到達した。

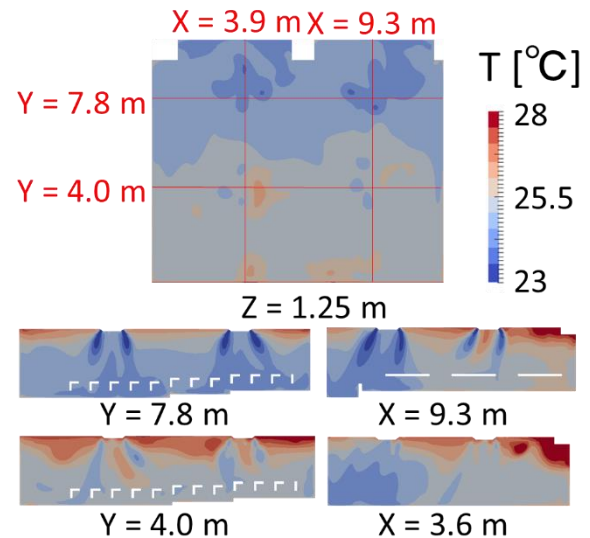


Fig.2 Base Case Temperature

### 3. SR法を用いた吹き出し温度推定

目標温度分布(Fig.3)を北側44点は26°C、南側22点は28°Cの分布とした。

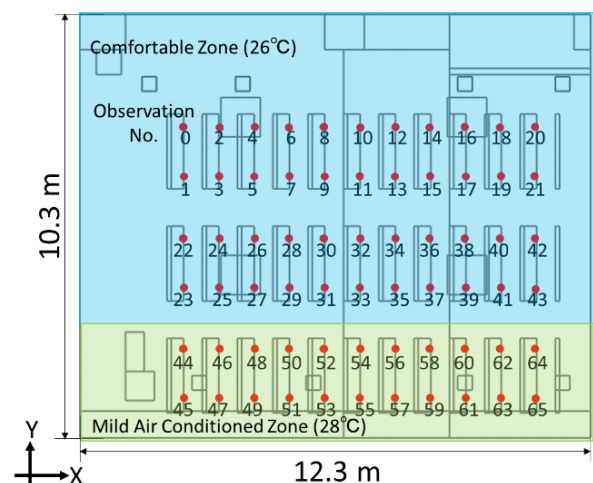


Fig.3 Target Temperature Field

SR行列の修正の効果を評価するため、以下のSR法 $\alpha$ ~SR法 $\gamma$ の3通りの逆推定を行い、予測精度を比較する。

SR 法  $\alpha$  : SR 行列  $\alpha$  のみを用いる

SR 法  $\beta$  : SR 行列  $\beta$  のみを用いる

SR 法  $\gamma$  : 吹き出し温度に応じて SR 行列  $\alpha$  と SR 行列  $\beta$  を線形補間して用いる

目標温度分布から SR 法を用いて最適吹き出し温度の逆推定を行った。逆推定によって得られた吹き出し温度を Fig.4 に示す。



Fig.4 Optimal blowout temperature from SR method

SR 法  $\beta$  と  $\gamma$  から求めた最適吹き出し温度の高さは  $01 > 02 > 04 > 03$ , SR 法  $\alpha$  から求めた吹き出し温度は  $01 > 04 > 02 > 03$  となっており, SR 法  $\beta$  と  $\gamma$  は似た傾向があるが, SR 法  $\alpha$  は傾向が異なることが見て取れる。

#### 4. 結果と考察

SR 法の逆推定によって求められた最適空調吹き出し温度を空調機の境界条件として与え, 再度 CFD 計算を実行した (Fig.5)。

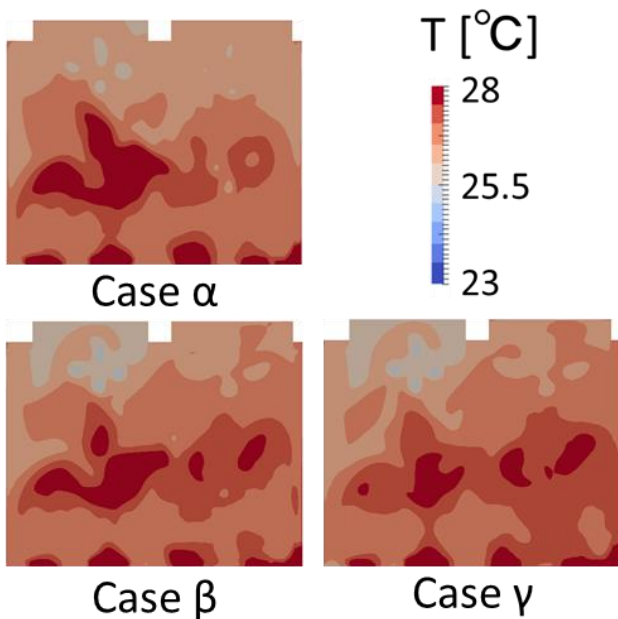


Fig.5 Temperature of Recalculation Cases (Z = 1.25 m)

基準ケースと比べると(Fig.6), SR 法による温度分布のほうが目標温度分布に近いが, 空間の室温分布に差をつけるという点だけを考慮すると基準ケースのほうが優れる結果となった。

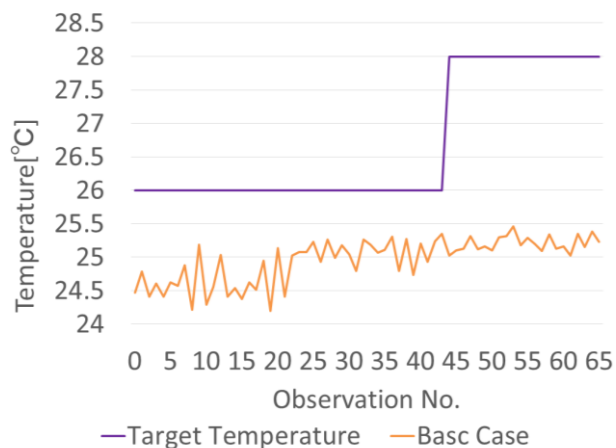


Fig.6 Target Temperature and Base Case

最適吹き出し温度から SR 法を用いて求めた室温について (Fig.7), 快適ゾーンではばらつきが大きいものの  $26^{\circ}\text{C}$  を含めて温度が分布した。一方, 弱冷ゾーン ( $28^{\circ}\text{C}$  を目標とする) ではばらつきが小さいものの, 目標より下回った温度となった。

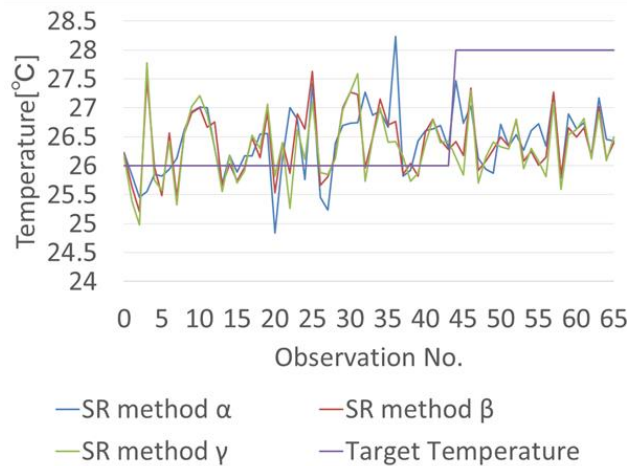


Fig.7 Target Temperature and Temperature from SR method

CFD 再計算ケースから, 観測点室温を抽出し, Fig.8 にプロットした。再計算ケースのほとんどの観測点での室温は快適ゾーンの目標と弱冷ゾーンの目標の間に分布しており, 目標温度は分布に含まれていなかった。また, SR 法と再計算のどちらにおいても快適ゾーンの観測点での室温は弱冷ゾーンの観測点での室温よりばらついた。

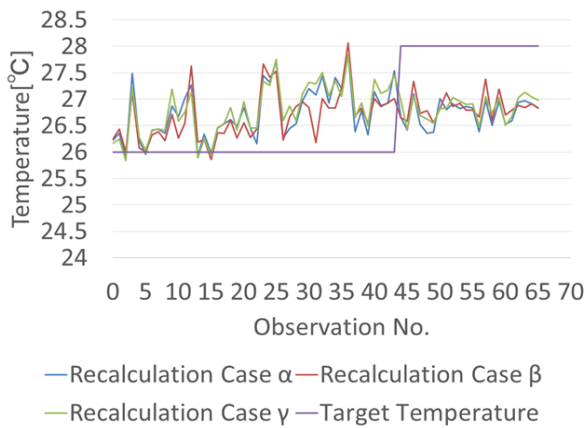


Fig.8 Target Temperature and Recalculation Cases

再計算によって得られた室温  $T$  と式 (1) に最適吹き出し温度を与え SR 法によって得られた室温  $T'$  の差から式 (4) を用いて二乗平均平方根誤差 (RMSE) を求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} (T_i - T'_i)^2} \quad (4)$$

RMSE の値が小さいほどその SR 法は再計算ケースに近いと言える。Fig.9 に再計算ケースと SR 法の差から求めた RMSE を示す。

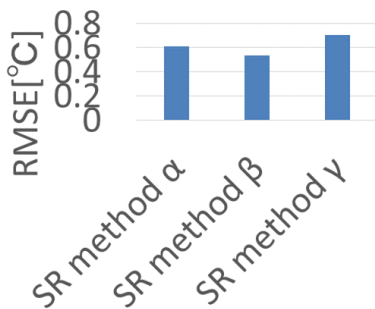


Fig.9 RMSE between Temperature of Recalculation Case and that of SR method

CFD 再計算による温度分布は SR 法によって得られた温度分布に比べ、より詳細な条件を用いた。したがって、右のグラフの RMSE が小さいほど、その SR 法はより実際に即した予測をしており、予測精度が高いと評価する。SR 法と CFD 再計算ケース間の RMSE はケース  $\beta$  で最も小さくなった。

式 (4) の  $T$  に各ケースの観測点室温を、 $T'$  に目標温度分布を代入し、RMSE を求めた。Fig.10 は RMSE が小さいほど、ケースと目標温度分布が近く、ケースが目

標温度分布を再現していることを表す。

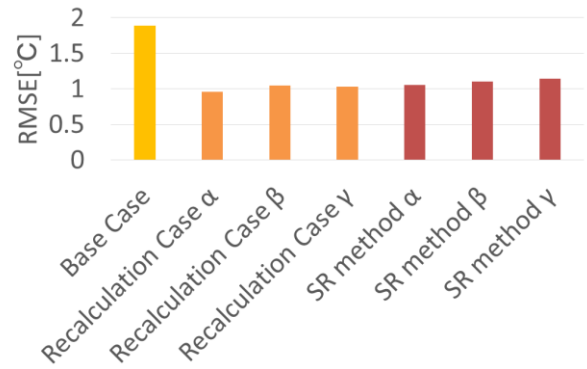


Fig.10 RMSE between Target Temperature and each case Temperature

CFD 再計算, SR 法どちらにおいてもケース  $\alpha$  が最も RMSE が小さかったが、基準ケースと比較すると他のケースと目標温度分布の差は十分に現れていないと考えられる。

## 5. まとめ

快適な温熱環境を構築するために、室内温度分布を目標温度分布に近づけるような空調吹き出し温度を決定する逆解析として、発熱量と温度分布の間の線形関係を仮定する SR 法の適用を検討した。本研究では SR 法において吹き出し温度に応じて SR 行列を線形補間して用いることで、浮力による誤差を減らす手法を提案し、その効果を評価した。3 通りの SR 法を用いて逆推定し、得られた最適空調吹き出し温度を空調機の境界条件として与え、再度 CFD 計算を実行した。今回の研究の条件では、吹き出し温度に応じて動的に SR 行列を変更した場合の SR 法の予測精度が最も高いという結果は得られなかった。また、基準ケースと比較して各ケースと目標温度分布の RMSE の差が明確に現れなかった。目標温度分布の条件を変更したり、より細かく多くの SR 行列を作成したりするなど改善の余地があると考えられる。

謝辞:本研究は JSPS 科研費 21K14303 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 松尾 智仁, 鹿山 和真, 嶋寺 光, 近藤 明, ソース・レシピター関係を用いた空調機群の最適制御手法の逆推定, 第 32 回環境工学総合シンポジウム(2022), pp. 2411-14-02, 高松, 2022 年 7 月 7~8 日