

ソース・レセプター関係を用いた 空調機群の最適制御手法の逆推定

Inverse Estimation of Optimum Control of air conditioners by Using Source-receptor Relationship

○正 松尾 智仁^{*1}, 鹿山 和真^{*1}

嶋寺 光^{*1}, 近藤 明^{*1}

Tomohito MATSUO^{*1}, Kazumasa SHIKAYAMA^{*1},
Hikari SHIMADERA^{*1} and Akira KONDO^{*1}

^{*1} 大阪大学 Osaka University

In order to provide a comfort thermal environment to each occupant whose clothing and thermal sensitivity are different, it is necessary to make a proper temperature gradient in a room. In this study, an inverse method using source-receptor (SR) relationship was used to estimate optimal inlet temperature of each air conditioner to make temperature field close to objective field. To validate the method, the method was applied on an existing class room. The SR relationship was calculated by CFD simulation, and the optimal inlet temperature to approximate temperature field to objective field was estimated by using SR relationship. Though the method worked well, the improvement was small in the numerical experiment, because of spatially weak relationship between the inlet temperature and indoor temperature field.

Key Words : Indoor environment, Thermal comfort, Inverse estimation, CFD, Air conditioner.

1. 結 言

多人数が在室する講義室などの広い室内には、通常複数の空調室内機が設置されている。各室内機の制御設定が同一であっても、壁面貫流熱や在室者、機器の分布のばらつきによって各空調室内機の負荷は異なる。加えて、室内に多数の在室者がいる場合、その代謝、着衣量、温冷感の個人差などによって、そもそも目指すべき温熱環境が異なる場合がある。そのような場合、例えば室内に意図的に温度分布を設定し、エリアごとに冷暖房の強度を調整することで、在室者の熱的快適性を高めることができる考えられる。本研究では、従来の天井カセット形の空調の吹き出し温度のみを制御することで、室内の温度分布を一定程度制御する手法について検討する。

目標とする温度場から遡って機器の制御を最適化する手法は逆推定手法であるが、逆推定手法についてはいくつかの手法が提案されている。本研究では、その中で計算量が少ない、ソース・レセプター関係 (SR 関係) を利用する手法を用いる。SR 関係とは、発生源における発生強度と目標点における物理量の間の線形関係を指す。熱源発熱量が変化したとき、発熱量の変化量と周辺の温度上昇量が比例すると仮定するのが SR 関係である。加藤らは、室内熱源が周辺温度分布に及ぼす寄与率として CRI という指標を提案した⁽¹⁾。本研究ではこの熱源と温度分布の関係を逆推定に用いる。

本研究では、実在の講義室を対象として測定実験を行った。測定した条件を用いて CFD シミュレーションを行い、CFD モデルの再現性を確認した。その後、CFD 計算上で SR 関係を算出し、得られた 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ための空調吹き出し温度を求めた。

2. 方 法

2・1 測定実験の概要

測定実験は大阪大学吹田キャンパスの M3 棟 211 講義室を対象とした。講義室の形状を図 1 に示す。講義室は西側が前方であり、後方に行くにつれて床面が高くなっている。北側が廊下、南側が建物外に面しており、西側

は建物外壁，東側は隣室である．室内には4機の4方吹カセット型空調があり，南側に4箇所の全熱交換器の吹き出し口，北側4箇所に吸い込み口がある．

測定実験は2021年3月12日の夜間に行われた．講義室内に図2に示すように温度センサを設置した．加えて，空調機，全熱交換器の吹き出し口，吸込み口に温度センサ（RTR-503，T&R Corp.）を設置した．空調機1台あたりの風量はカタログ値で12.5 m³/min，設定温度は北側が28℃，南側が20℃とした．全熱交換器の吹き出し口1箇所あたりの風量はカタログ値で325 m³/hである．室内温熱環境がおおむね定常になるまで空調機・全熱交換器を運転させた．実験中は講義室を無人とし，窓，出入り口の戸は締め切った．また，ブラインド，カーテンは閉め，照明もオフにしていた．実験直後に室内の壁面温度，天井，床面温度を放射温度計を用いて測定した．

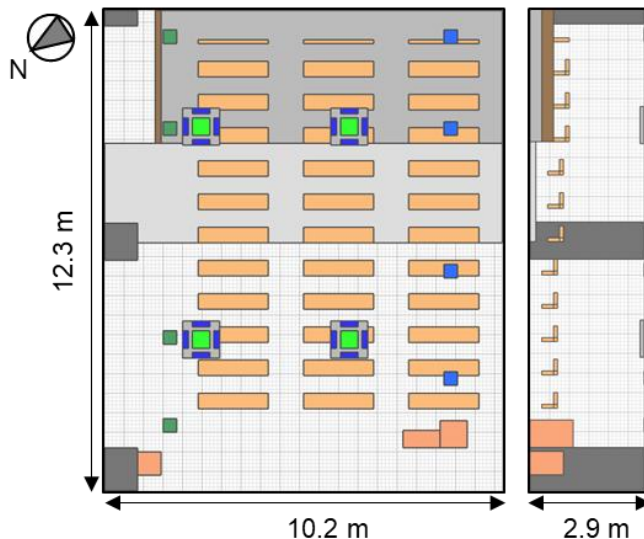


Figure 1. Target room.

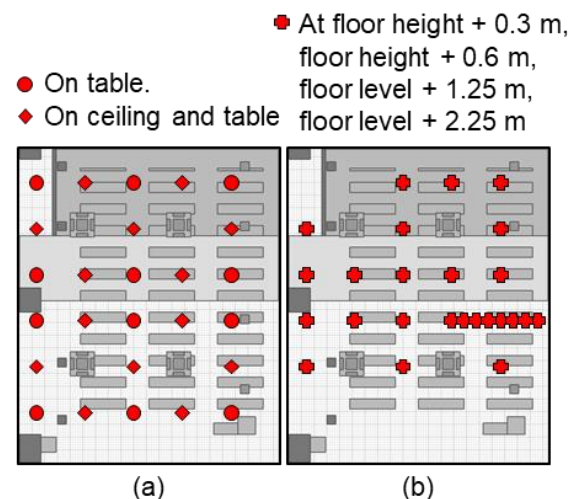


Figure 2. Sensor location (a) ET9-RHT (Itec Corp.) (b) RTR-503 (T&R Corp.)

2・2 CFD 計算の概要

本研究では，CFD 計算に 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，浮力を考慮するためにブシネスク近似を導入した．乱流モデルには標準 k-εモデルを用いた．支配方程式は運動方程式と連続の式，熱の保存則である．対流項，拡散項の離散化にはそれぞれ風上補間，中心補間を用いた．速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法を用いた．形状モデルは図 1 の講義室を再現した．壁面の境界条件として，速度は滑りなし条件，温度は実験時の測定値を固定値として与えた．机の表面など，表面温度を測定していない箇所は断熱条件とした．空調，全熱交換器の吹き出し温度は測定値を用いた．吹き出し風向は事前に測定した主流風向をもとに決定した．

2・3 SR 計算の概要

今回の条件において，暖房運転している空調室内機の吹き出し風は熱源と見なすことができる．空調機の吹き出し温度を変更して CFD 計算を行い，結果を比較することで，空調機の吹き出し温度が変化したときに，室内の温度分布がどのように変化するかを調べることができる．吹き出し温度の変化が室内の流れ場に与える影響が十分に小さいと仮定すると，各空調吹き出し温度の変化量と室内温度分布の変化量の間に線形関係（SR 関係）を仮定することができる．

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

ここで， A は SR 関係， Δq は各空調室内機の吹き出し温度変化をまとめたベクトル， ΔT は室内各点における温度変化をまとめたベクトルである．

CFD 計算により SR 関係 A を求めることできる。式 (1) 任意の温度変化量 ΔT を代入して解くと、任意の温度変化量 ΔT を与える吹き出し温度ベクトル Δq を求めることができる。ただし、この計算は逆計算であるから、解の存在が保証されない。そこで、式 (2) ~ 式 (3) に示すように式 (1) の残差の 2 乗を評価関数 I として定義し、 I を最小化するような吹き出し温度ベクトル Δq を再急降下法により探索する。

$$I = (A\Delta q - \Delta T)^2 \tag{2}$$

$$\Delta q_{k+1} = \Delta q_{k+1} + \frac{\partial I}{\partial q} \Big|_{q=q_k} \tag{3}$$

3. 測定実験と CFD 計算の比較と SR 計算結果

3.1 測定実験と CFD 計算の比較

測定実験と CFD 計算の結果について、測定点における散布図、および CFD 計算における南側の空調機を中心をとる断面での温度分布を図 3 に示す。測定結果では 0.3 m から 1.25 m にかけて、温度差があまり見られないのに対し、計算結果は温度を大きく過大評価している点がある。これは、暖かい空調吹き出し風が実際には 1.25 m 以下に到達していない一方で、CFD 計算上は吹き出し風が到達しているためだと考えられる。そこで、空調吹き出し流量を 70% に修正した場合について計算を行った、このとき、空調機からの供給熱量を維持するため、吹き出し温度を上昇させる修正を行った。修正した CFD 計算の結果を図 4 に示す。修正前に比べ RMSE の値はわずかに増加したが、相関係数は大幅に増加した。これは、1.25m 以下の測定点における温度の再現性が向上したためであると思われる。同時に、2.8 m 高さでの再現性もやや向上した。

修正後の CFD 計算の方が測定実験時の室内温熱環境を良く再現していると思われるため、以降の計算では修正後の CFD 計算をベースとする。

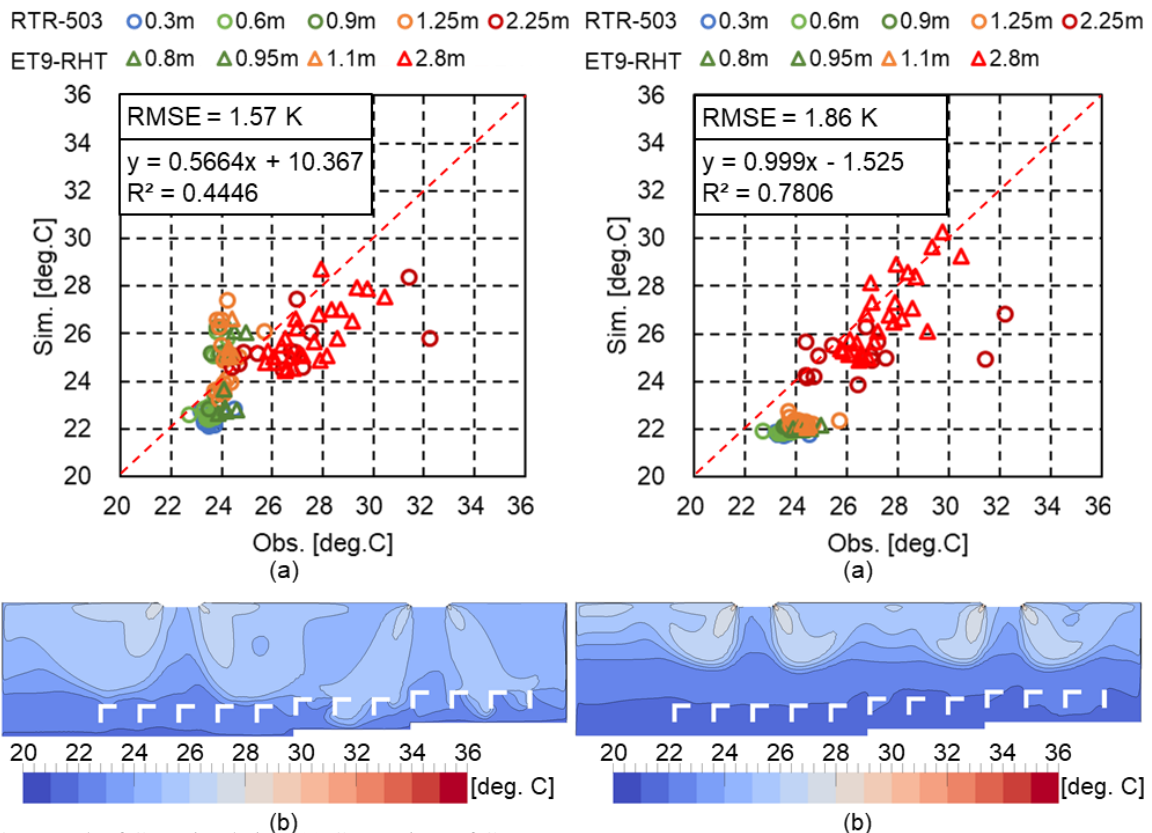


Figure 3. Result of CFD simulation. (a) Comparison of CFD v.s. Observation (b) Temperature field at southern ACs.

Figure 4. Result of modified CFD simulation. (a) Comparison of CFD v.s. Observation (b) Temperature field at southern ACs.

3・2 SR 計算結果

SR 計算では、図 5 に示す目標点を設定し、南側半分の座席と北側半分の座席で 1.0°C の温度差を作ることを目標に吹出し温度の最適化を試みた。

前節で求めた修正後の CFD 計算をベースケースとし、各空調室内機の吹出し温度を 2°C 上昇させた場合の CFD 計算を行うことで吹出し温度と室内温度の間の SR 関係を求めた。その結果を図 6 に示す。本研究の条件では、空調吹出し空気は浮力により目標点高さまで到達できておらず (図 4)、換気風に巻き込まれる形での対流、および拡散によって熱を目標点高さまで伝えている。そのため、空調の位置と室内温度分布の間に空間的な対応関係は見られず、どの空調機の吹出し温度を上昇させても、室内が均一に加熱される傾向があった。

修正後の CFD 計算では、目標点の平均気温は 22.3°C であった。そこで、平均温度をあまり変えないまま南北で温度差を付けることを目標に、北側の目標点の目標温度を 22.0°C 、南側の目標温度を 23.0°C に設定し、SR 法の適用を行った。その結果、北東、南東、北西、南西の空調機の吹き出し温度をそれぞれ $+0.6^{\circ}\text{C}$ 、 $+4.3^{\circ}\text{C}$ 、 $+5.9^{\circ}\text{C}$ 、 -1.8°C 変化させることで、北側平均温度を 22.3°C 、南側平均温度を 22.5°C にできると計算された。目標温度から乖離があるのは、今回の条件では各空調機の吹出し温度と室内温度分布と空間的な対応が少なく、吹き出し温度を最適化しても室温に空間分布を付けることが困難であるためである。

得られた空調吹き出し温度を用いて CFD 計算を行ったところ、北側平均温度は 22.3°C 、南側平均温度は 22.6°C となった。SR 法による結果とわずかに異なるが、これは SR 法では吹き出し温度の変化に伴う流れ場の変化をきちんと考慮していないためであると考えられる。

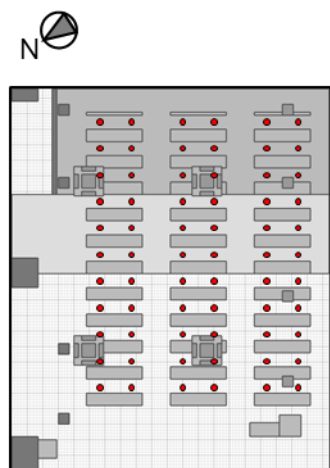


Figure 5. Location of objective points ($z=1.2\text{ m}$).

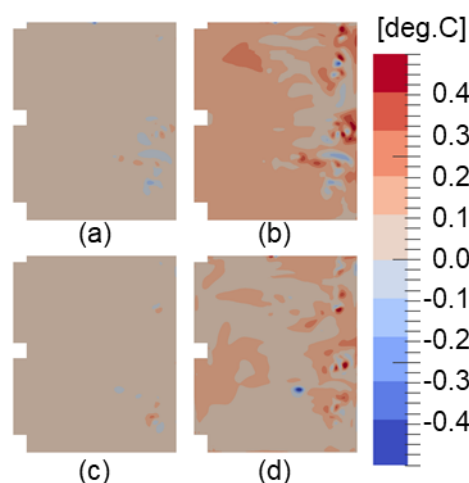


Figure 6. Temperature field at $z=1.2\text{ m}$ in case of 2 deg. C rising of inlet temperature of (a) northeast AC, (b) southeast AC, (c) northwest AC, and (d) southwest AC.

7. 結 語

本研究では、実在の講義室での測定実験をもとに CFD モデルを作成し、作成したモデルについてソース・レセプター関係を仮定することで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手法の適用を試みた。その結果、わずかに温度分布を目標分布に近づける吹き出し温度設定を推定することができたが、今回の条件では吹き出し温度と室内温度分布の空間的な関連が弱く、十分な制御性は得られなかった。

文 献

- (1) 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