

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04385

研究課題名（和文）非定常CFD逆解析を用いた居住域の温熱環境制御に関する研究

研究課題名（英文）Study on thermal environment control in occupied areas using unsteady CFD inverse analysis

研究代表者

河野 良坪（Kono, Ryohei）

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90572222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、随伴変数法を非定常CFD解析に適用することで、熱的条件が時間変化する状況下での居住域温度について逆解析的な制御を試みる。特に、空調機器の制御を想定の上で投入・除去熱量を設計変数とし、随伴変数法を時間遅れの少ない制御として役立てる手法を確立する。人間の体感温度は空気温度以外の要因も大きい。随伴変数法による逆解析を複数用いて体感温度（SET\*）の最適化を試行する。

（1）「単純形状居室を対象とした吹き出し温度の動的制御」、（2）「単純形状居室を対象とした吹き出し気流の動的制御」、（3）「躯体熱容量を考慮した室温分布の非定常予測」、（4）「SET\*の最適化を目的とした逆解析」

研究成果の学術的意義や社会的意義

随伴変数法をCFD解析に適用することで、最適設計法での活用が期待できるが、既往の研究では定常CFD解析を対象とした検討がほとんどであった。随伴変数法の適用にあたり、日射の影響などの時刻変化する外部条件を無視できない場合には、定常解析を前提とした方法で適切に予測制御することは難しい。非定常CFD解析を対象とすることで、外部条件の時刻変化を前提とした上での室温制御や人間の温冷感の調整等に役立てることが可能となるであろう。本研究結果により随伴変数法で算出される非定常感度から時間遅れの少ない制御が現実的に可能であることを示し、その特徴や課題点を示すことに、学術的意義および社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we apply the adjoint variable method to unsteady CFD analysis to attempt inverse analysis control of the temperature in the occupied zone under conditions where thermal conditions change over time. In particular, when the amount of heat input and removed is used as a design parameter, a method will be established that uses the adjoint variable method to control air conditioning with little time delay. An attempt is made to optimize the sensible temperature (SET\*) by using multiple inverse analyses using the adjoint variable method.

(1) Dynamic control of outlet temperature for a simple room. (2) Dynamic control of outlet airflow for a simple room. (3) Unsteady prediction of room temperature distribution taking into account the heat capacity of the building. (4) Inverse analysis aimed at optimizing SET\*

研究分野：建築環境工学

キーワード：随伴変数法 逆解析 非定常CFD解析 空調制御 ファン制御 室温調整 吹き出し 熱容量

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

逆問題の解決法の一つに、随伴変数法（AVM: Adjoint Variable Method）がある。風速や温度などの物理量の空間分布を計算する CFD 解析への適用もなされており、目的関数を適切な値とするためにはどの位置の設計変数をいずれの方向に変更させるべきであるかを、「感度（目的関数の変化量/設計変数の変化量）」の空間分布として算出する。例えば、室内のある領域を目標温度にするためには、何処の吹き出し口で、風量や投入（除去）熱量を増減させるべきかといった予測制御に役立てることも可能である。

既往の研究では、定常 CFD 解析を対象とした検討がほとんどであるが、機械工学の分野では非定常 CFD 解析を対象とした基礎研究も実施されている。ただし、理論構築と簡易モデルでの実証にとどまり、現実的な活用方法が未だ見出されていないのが実情である。

随伴変数法の活用方法について、定常 CFD 解析を対象とした場合と異なり、日射の影響などの時刻変化する外部条件を無視できない場合には、定常解析を前提とした方法で適切に予測制御することは難しい。非定常 CFD 解析を対象とすることができれば、外部条件の時間変化を前提とした上での室温制御や人間の温冷感の調整等に役立てることが可能ではないかと考えられる。このとき風速・温度などの空間分布を扱う解析のもとで、時系列的に連続して算出される感度から時間遅れの少ない制御が現実的に可能であるかが、本研究の問いである。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまで主に定常 CFD 解析に適用してきた随伴変数法を非定常 CFD 解析に適用することで、熱的条件が時間変化する状況下での居住域温度について逆解析的な制御を試みる。本研究期間では特に、空調機器の制御を想定の上で投入・除去熱量を設計変数とし、随伴変数法を時間遅れの少ない制御として役立てる手法を確立する。

人間の体感温度は空気温度以外の要因も大きい。これまでに検討した随伴変数法による逆解析を複数用いて体感温度（SET\*）の最適化を試行する。

本研究における具体的な検討対象を以下に示す。

- (1) 「単純形状居室を対象とした吹き出し温度の動的制御」
- (2) 「単純形状居室を対象とした吹き出し気流の動的制御」
- (3) 「躯体熱容量を考慮した室温分布の非定常予測」
- (4) 「SET\*の最適化を目的とした逆解析」

### 3. 研究の方法

- (1) 「単純形状居室を対象とした吹き出し温度の動的制御」

非定常逆解析により算出される非定常温度感度を現在時刻の吹き出し制御に適用することで、空調吹き出し温度の動的制御が可能について検討する。

解析モデルを図 1 に示す。熱負荷として室全体に 1, 200 秒周期で  $\pm 500\text{W}/\text{m}^3$  の発熱を与える。

非定常逆解析の設計変数は吹き出し温度とし、目的関数は評価領域内の温度を  $25^\circ\text{C}$  一定に近づけることとする。逆解析を行い、非定常温度感度を算出する。解析フローを図 2 に示す。本研究では非定常温度感度から算出した吹き出し温度を次時刻に適用する「解析フロー1」と、現在時刻に遡り適用する「解析フロー2」の 2 通りの解析を行った。

- (2) 「単純形状居室を対象とした吹き出し気流の動的制御」

非定常逆解析により算出される非定常流速感度を用いることにより、空調の吹き出し風速及び風向を制御した場合に、時間遅れの少ない室温調節が可能であるかについて検討を行う。

解析モデルを図 3 に示す。熱負荷として、発熱・吸熱を室全体に一様に与える。室中央の評価領域内温度を常に目標温度に近づけるべく、非定常流速感度を基に吹き出し気流（風速もしくは風向）を制御する。以下 2 通りの検討とする。

① 居室の冷房（負荷として  $+600\text{W}/\text{m}^3$  から  $+100\text{W}/\text{m}^3$  までの発熱を周期的に付与。）もしくは暖房（負荷として  $-600\text{W}/\text{m}^3$  から  $-100\text{W}/\text{m}^3$  までの吸熱を周期的に付与。）を想定する。非定常逆解析により、吹き出し風量を適切に可変させることで室温を目標温度（冷房時  $25^\circ\text{C}$ 、暖房時  $20^\circ\text{C}$ ）に維持することが可能であるかを検討する。非定常流速感度の 3 成分（U, V, W）のうち吹き出し面の法線方向となる U 成分を用いて、吹き出しの風速制御を行う。吹き出し温度は冷房時  $10^\circ\text{C}$ 、暖房時  $40^\circ\text{C}$  で固定値とする。

② 居室の上下温度差が極端に大きく経時変化する状況下を想定し、発熱量は、 $+500\text{W}/\text{m}^3$  から  $-500\text{W}/\text{m}^3$  までの吸発熱を周期的に与えている。このような場合に、風向を変化させることで吹き出し気流が評価領域に到達し易くなるような制御が可能であるかについて検討を行う。非定常流速感度の 3 成分のうち上下方向となる W 成分を用いて、吹き出しの風向制御を行う。風向を固

定とした場合の解析結果を比較対象とする。目標温度、吹き出し温度はともに 25℃とする。

(3) 「躯体熱容量を考慮した室温分布の非定常予測」

躯体の熱容量の影響を考慮した場合に、非定常逆解析により建物壁面に設置した強制換気用ファンを制御することで、時間遅れの少ない室温調整が可能であるかについて検討を行う。

解析領域全体および計算格子を図 4、図 5 に示す。対象モデルには、ファンと開口、室中央に評価領域を設ける。夏期を想定して日射量を経時変化させる屋外解析とする。熱負荷として 8 月 1 日における日射熱を壁・屋根に与える。外気温は 25℃一定とする。躯体の熱容量を 3 通り、ファンの最低風速を 2 通りとし、計 6 ケースを行う。この評価領域内温度を常に目標温度 (26℃) に近づけるべく、逆解析から算出した非定常流速感度を基に吹出気流を制御する。制御を変更するインターバルは 12 分とする。

(4) 「SET\*の最適化を目的とした逆解析」

随伴変数法による逆解析を用いて、SET\*を快適な温度帯に導くように空調の吹出気流を制御する方法を試行する。定常 CFD 解析を対象に、1 度の逆解析で算出される感度値を用いて、吹出口の空気温度と気流速度を同時に最適化することを試みる。

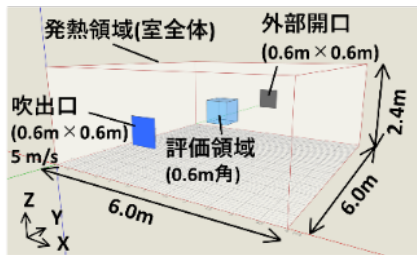


図 1 解析モデル(1)

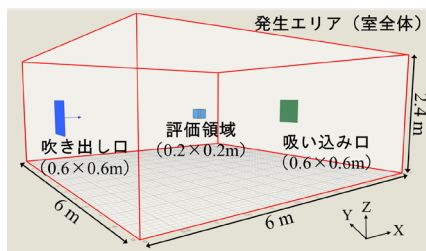


図 3 解析モデル(2)

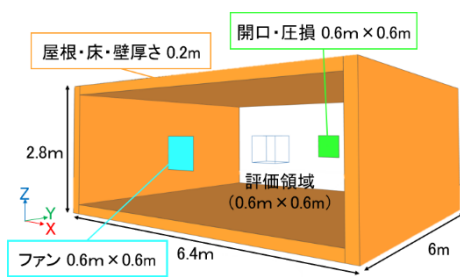


図 4 解析モデル(3)

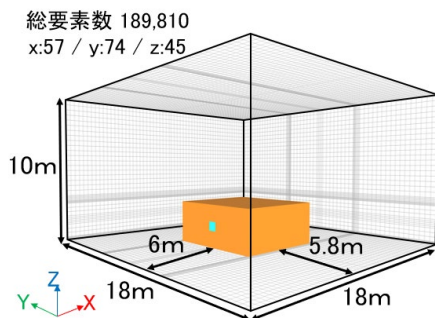


図 5 解析格子(3)

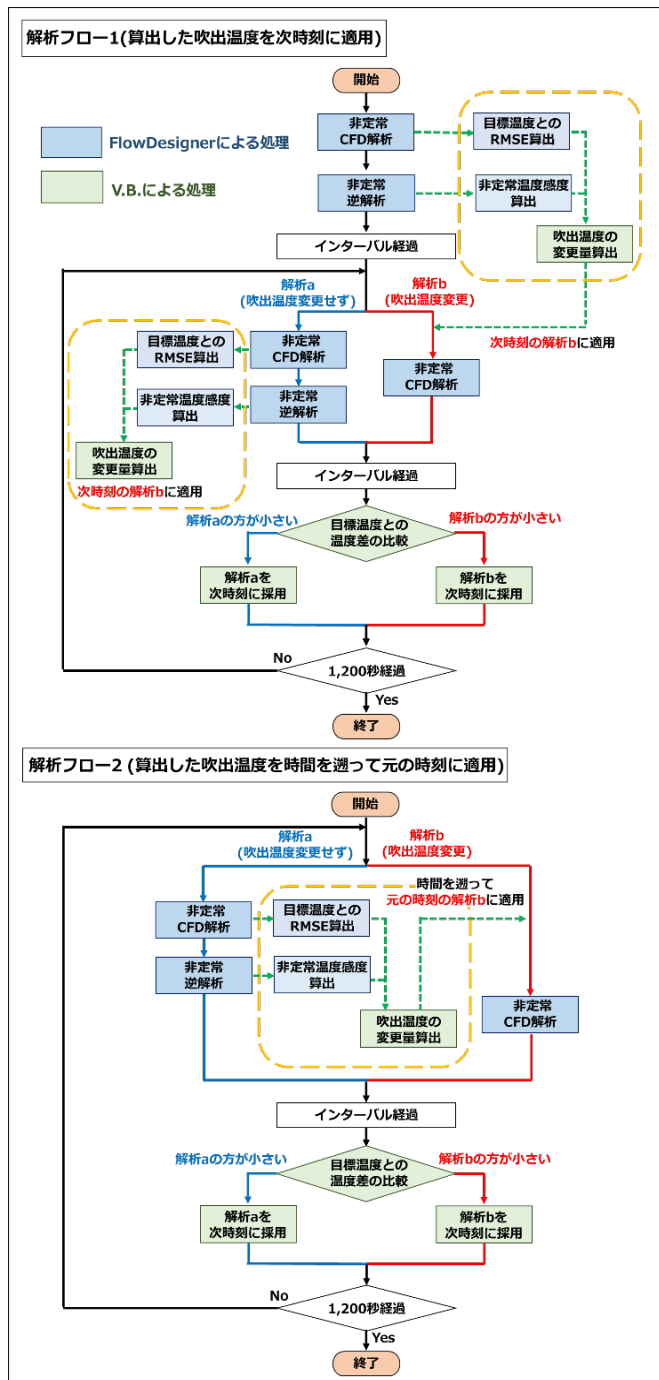


図 2 解析フロー

CFD解析モデルを図6、7に示す。評価領域を吹出口と吸込口の中央に配置している。評価領域の大きさは人体の体表面積(1.8 m<sup>2</sup>)と同等とする。SET\*を1°C上昇させることを試みる。このうち、評価領域内の空気温度の改善でSET\*を0.5°C上昇させて、気流速の改善で残りの0.5°C上昇させることを狙いとする。検証Ⅰでは温度場を対象とした逆解析により算出した温度感度からSET\*を0.5°C、検証Ⅱでは速度場を対象とした逆解析により算出した流速感度からSET\*を0.5°Cの改善を試みる。複数の感度から種類の異なる設計変数を同時に変更した場合に、適切な改善が成されるとは限らない。検証Ⅲでは2つの逆解析を並列適用した場合を検証する。

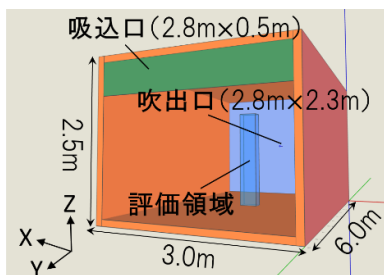


図6 解析モデル

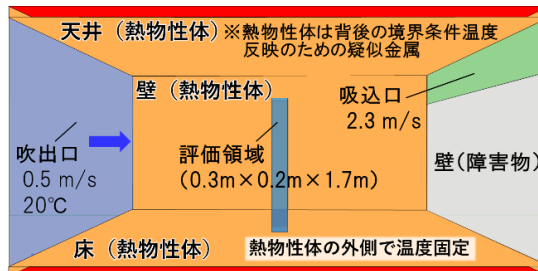


図7 解析モデル(X断面図)と物性値

#### 4. 研究成果

##### (1) 「単純形状居室を対象とした吹き出し温度の動的制御」

解析フロー1では、目標温度25°Cに対して、評価領域内温度はほぼ±2°C以内に収まった。一方、解析フロー2では目標温度25°Cに対してほぼ±1°Cの範囲にほとんど収まった。更に吹き出し温度の変更量に、解析結果をもとに算出した補正倍率を組み込んだところ、解析フロー2ではRMSEが0.22°Cとなり精度の高い制御が可能となった。また、吹き出し温度変更の間隔が小さいほど明確に目標温度との誤差が小さくみられた。解析結果を図8に示す。

現在時刻に遡って吹き出し温度を制御すること(解析フロー2)で、時間遅れの変更よりも目標温度に近い値となり、空調による室温制御の精度が向上した。以降の検討(2)、(3)においては解析フロー2をもとにしたロジックを構築している。

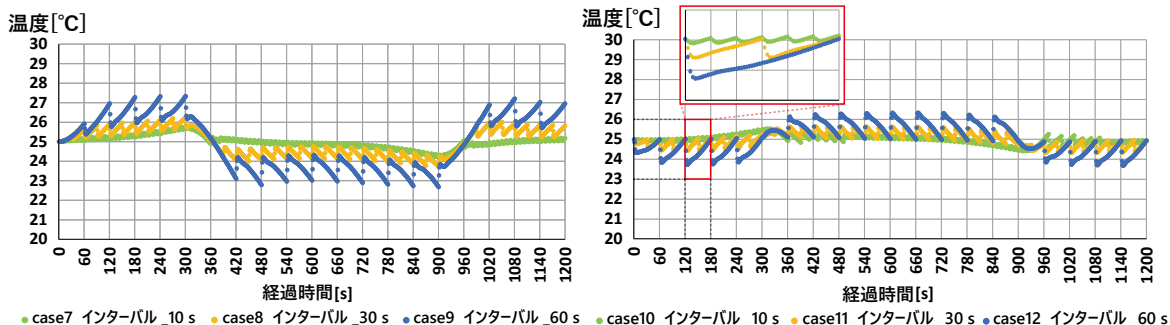


図8 解析フロー1の評価領域内温度の経時変化

[ 左：解析フロー1：(case7～9) 右：解析フロー1：(case10～12) ]

##### (2) 「単純形状居室を対象とした吹き出し気流の動的制御」

① 結果を図9に示す。冷房時における風速制御では、制御開始30s以降において、目標温度である25°Cの±1.7°C以内となり安定した室温調節が可能であった。一方で、暖房時における風速制御では、900s付近までは目標温度に近い室温調整が可能であったが、低負荷となる900s以降では室温調整が困難となった。この際、吹き出し風量が制御されて小さくなった結果、吹き出したのちの気流が浮力により天井面へと上昇した。流れ場が大きく異なり、直接気流が評価領域に直接到達し難いための結果であるだろう。

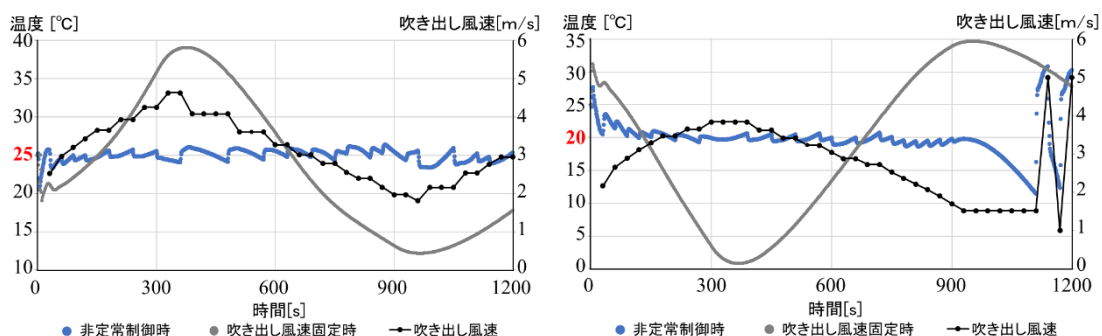


図9 評価領域内温度と吹き出し風速の経時変化(左：冷房時、右：暖房時)

② 図 10 に結果を示す。比較対象とする風向固定時の場合、発熱時は室温に対して吹き出し温度が相対的に低くなるため、気流は下降し、評価領域内温度は高くなる。発熱が最大となる 300s 時点で評価領域内温度は 54.1℃となった。逆に吸熱時は気流が上昇し、吸熱が最大となる 900s 時点で評価領域内温度は -2.8℃となった。風向を流速感度により制御した場合には、風向を制御することで評価領域に気流を到達させることが可能となり、評価領域内温度は発熱最大時で 40.4℃、吸熱最大時で 10.5℃と大きく改善された。

(3) 「躯体熱容量を考慮した室温分布の非定常予測」

ファンの最低風速を 1.0m/s とした場合、ファン風速を制御した結果、評価領域内温度は全て 25℃～27℃の範囲に収まっている。図 11 に結果を示す。一例として case2 (気泡コンクリート相当) の場合、ファンが稼働を始めた時間は 15 時 12 分以降での評価領域内温度は最大 26.13℃、ファンの最大風速は 2.89 m/s であった。熱容量が大きい場合の方が室温を調整し易い傾向がみられる。一方で、ファンの最低風速を 0.5m/s とした場合、ファン気流が室内の評価領域に直接到達し難いため、室温調整が低下する時間帯も見られた。

(4) 「SET\*の最適化を目的とした逆解析」

1 回の逆解析で、吹出温度を変更する「検証 I」と、吹出風速を変更する「検証 II」について、いずれの設計変数を感度に従い変更したところ、目標通り SET\*を約 0.5℃上昇させることが可能であった。これらの結果を図 12 に示す。吹出温度・吹出速度の変更を同時に行う「検証 III」でも、検証 I・II をほぼ足し併せた結果となり、SET\*を約 1.0℃上昇させることができた。気流場および温度場は非線形現象であるが、評価領域内の SET\*0.5℃改善させる程度の変更であれば微小変化であり、足し合わせが有効といえるであろう線形性が見られる結果となった。

なお、逆解析による平均放射温度の改善についても、仮想グローブ球を用いて検討を行ったが、要改善項目があり、今後の検討課題とする。現在、AI の活用を検討中である。

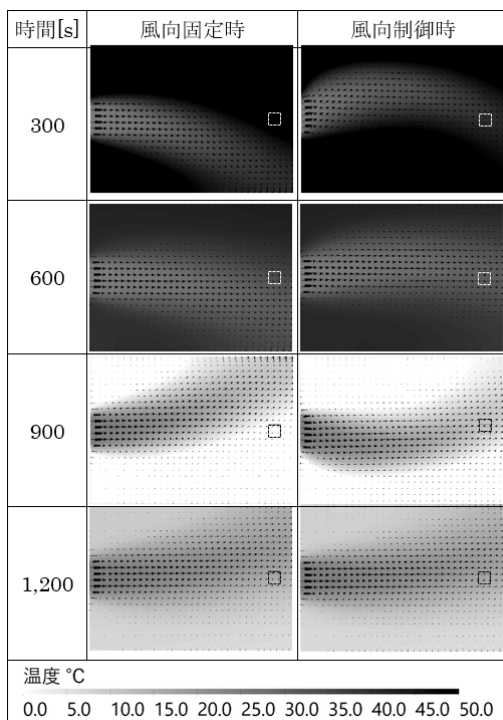


図 10 温度分布の経時変化 (室中央)

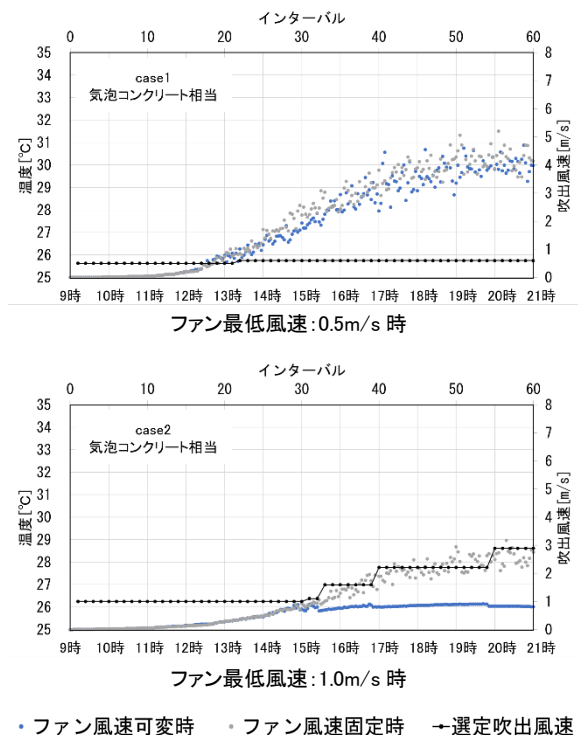


図 11 評価領域内温度の経時変化

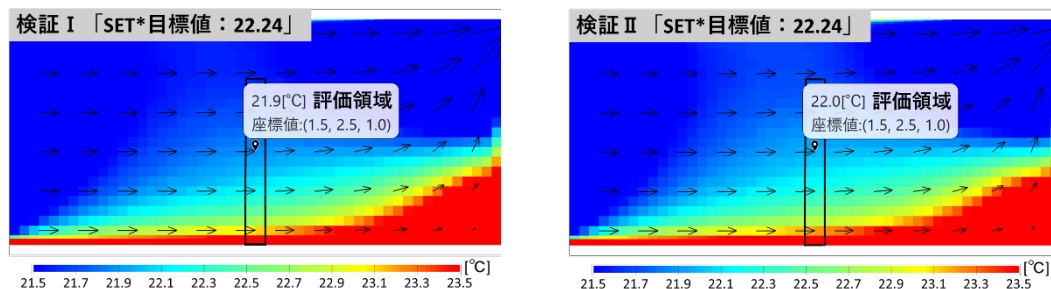


図 12 逆解析結果適用後における SET\*の分布 X=1.5m

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 河野 良坪, 井森 亮太, 桃瀬 一成, 中川 純, 桃井 良尚	4. 巻 88
2. 論文標題 IoT連携CFDによる室内空調システムの構築検討：室内空調時の非定常CFD解析におけるMomentum法の適用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 691-697
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.88.691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井 航平, 河野 良坪, 桃瀬 一成, 平木 康隆, 桃井 良尚, 中川 純
2. 発表標題 非定常CFD逆解析に基づく空調気流の動的制御法に関する研究（第1報）単純形状居室を対象とした吹き出し温度の動的制御
3. 学会等名 令和4年度空調和・衛生工学会大会（神戸）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	桃井 良尚 (Momoi Yoshihisa) (40506870)	福井大学・学術研究院工学系部門・准教授  (13401)	
研究分担者	中川 純 (Nakagawa Jun) (60875293)	東京都市大学・建築都市デザイン学部・准教授  (32678)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------