

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5報）空調機吸込み温度を用いた壁面貫流熱の推定  
Development of the Method to Estimate Indoor Environment using Variational Continuous  
Assimilation Method  
（Part 5） Estimation of heat transmission through walls by using AC outlet temperature

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）

Tomohito MATSUO\*<sup>1</sup> Hikari SHIMADERA\*<sup>1</sup> Akira KONDO\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka University

The variational continuous assimilation (VCA) method, which modifies the CFD calculation by minimizing the differences between the observed and the calculated values, can be used to estimate the unknown heat transmission through the window. In this study, the numerical experiment was performed to evaluate the availability of the method. In the numerical experiments, the unknown heat transmission through the window was estimated by assimilating the temperature field observed at the outlet of the air conditioner. The results indicated that the VCA method can estimate the heat transmission through the window.

#### はじめに

室内の温熱環境を適切に管理するためには、まず温熱環境を正確に把握する必要がある。特に、空調機器の制御において局所的な暑さ、寒さを検出するためには、領域全体を網羅的に把握することが望ましい。そのため、室内温熱環境の把握のためには、観測よりもCFDを用いた数値シミュレーションが有用であると考えられる。

しかし、数値シミュレーションにより室内温熱環境を精度よく把握するためには、モデル誤差の影響をできる限り排除する必要がある。モデル誤差のうち、丸め誤差および離散化による誤差などについては、昨今の計算機性能の向上および計算手法の洗練により、かなりの程度抑制することができるようになってきている。しかし、境界条件などのモデル外部から入力する情報に誤差が含まれる場合、数値シミュレーションがその誤差を抑制することは困難である。そして、住居やオフィスには照明や機器、人体などの熱源に加え、壁面や窓面からの貫流熱もが存在し、室内温熱環境推定の誤差要因となっている。

そこで本研究では、少数の観測データを数値シミュレーションに融合することで数値シミュレーションの修正を行う「データ同化」という手法の一種である連続的データ同化法（VCA法）を用いて、室内の熱源分布を推定する手法を提案し、その手法の妥当性を数値実験によって検証する。

本研究の最終的な目標は、室内のすべての熱源について、その発熱量を推定することであるが、本報ではその前段階として、一部壁面からの貫流熱の推定を行う。

なお、前報までに筆者らは、VCA法を用いて、汚染物質の放出源推定を行っていたり、それらと比較した、本報の主たる成果として、温度の誤差を修正することにより、浮力を介した流れ場の誤差も同時に修正することに成功した点を挙げられる。また、本報では、流れ場に加え温度場にも定常場を仮定している点で、前報までとは異なる。

## 1. VCA法

### 1.1 VCA法の基礎式

VCA法とは、気象場の予測を目的としてDerber<sup>2)</sup>により開発された手法である。数値シミュレーションによる推定値と観測値の残差を評価関数として定義し、反復計算によりこれを最小化するような推定値を探索する。

VCA法の評価関数を式(1)に示す。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \left\{ (\Psi^p - \tilde{\Psi}^p)^T (\Psi^p - \tilde{\Psi}^p) \right\} \quad (1)$$

ここで $P$ は観測回数、 $\Psi$ 、 $\tilde{\Psi}$ はそれぞれ計算値、観測値ベクトルである。 $()^T$ は行列、ベクトルの転置を意味する。

一方、数値シミュレーションの支配方程式は、ナビエ・ストークス方程式、連続の式、熱の保存式などを離散化することにより、式(2)の形で表現できる。

$$\Psi^{n+1} = A^{n+1} \Psi^n \quad (2)$$

ここで、 $A$ は時刻 $n$ における計算値ベクトルから時刻 $n+1$ における計算値ベクトルを求める変換行列である。

式 (2) に修正項を付け加えることで、式 (3) を得る。

$$\Psi^{n+1} = A^{n+1}\Psi^n + \lambda^{n+1}\phi \quad (3)$$

ここで、 $\lambda\phi$  は VCA 法が付加する修正項であり、 $\lambda$  が修正の時間分布を、 $\phi$  が修正の空間分布を表す。修正の時間分布  $\lambda$  は既知であるものとし、定常状態を仮定する場合、 $\lambda$  は常に単位行列である。

VCA 法は、式 (1) を最小化する修正ベクトル  $\phi$  を探索する。探索には、式 (4) に示す最急降下法を用いた。

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \alpha \frac{\partial I}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi_k} \quad (4)$$

ここで、 $\phi_k$  は  $k$  回目の繰り返し計算で得られた修正ベクトルであり、 $\alpha$  は勾配を定めるパラメータである。

式 (4) より得られた修正ベクトルを用いて、VCA 法は式 (3) により数値シミュレーションを修正する。式 (3) において修正項は支配方程式の生成項と同様に振る舞うため、修正項の分布は生成項の分布と等価であるとみなすことができる。

VCA 法の導出は、Derber<sup>2)</sup>および松尾ら<sup>34)</sup>に詳しい。

## 1.2 制約条件の追加による、推定精度の向上

数値シミュレーションの修正に用いる修正項の探索は、1.1 節で述べた方法によって行われる。このとき、観測データに加えてさらなる情報が利用できる時、それらの情報を制約条件として追加し、計算精度を高めることができる<sup>4)</sup>。

## 2. 数値実験の方法

### 2.1 対象領域

本研究では、VCA 法を用いて壁面貫流熱の推定を行う。ここでは、VCA 法それ自体の精度を評価するため、フィールド実験ではなく数値実験を用いた。

数値実験では、Fig.1 に示す 3 次元室内モデルを対象とした。3 次元室内モデルは、7.5 m 四方の床面を持つ天井高さ 2.6 m の空間であり、向かい合う壁面に 1 対の窓面を持ち、天井中央に空調機の室内機を 1 機持つ。室内機の寸法を Fig.2 に示す。また、空調機の吸込み口には複数の温度センサーが取り付けられており、吸込み口における温度分布が計測されているものとした。

数値シミュレーションは夏季日中の冷房運転時を想定した。また、数値シミュレーションにおいては、モデルの対称性を利用し、鏡面境界を用いてモデルの手前半分 ( $Y : 0 \sim 3.75$  m) のみを計算した。

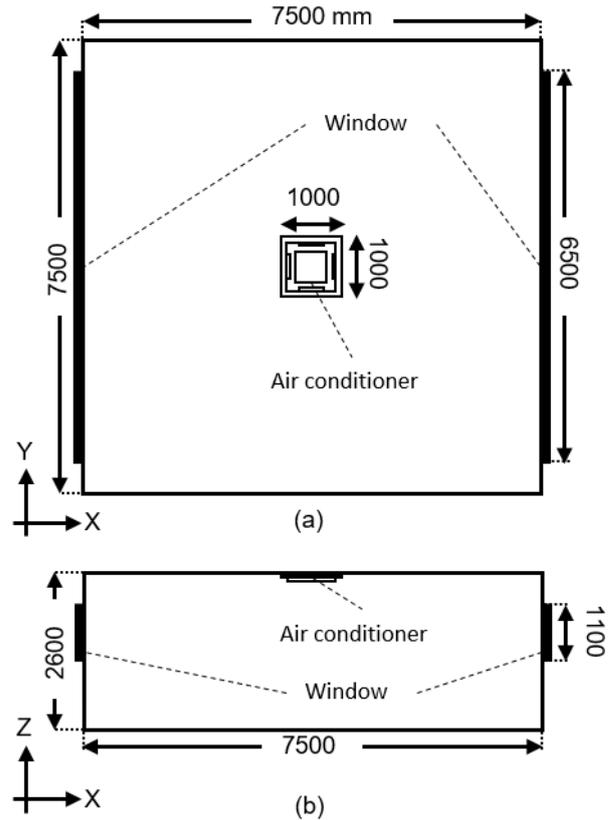


Fig.1 Objective room (a) plan view, (b) elevation view

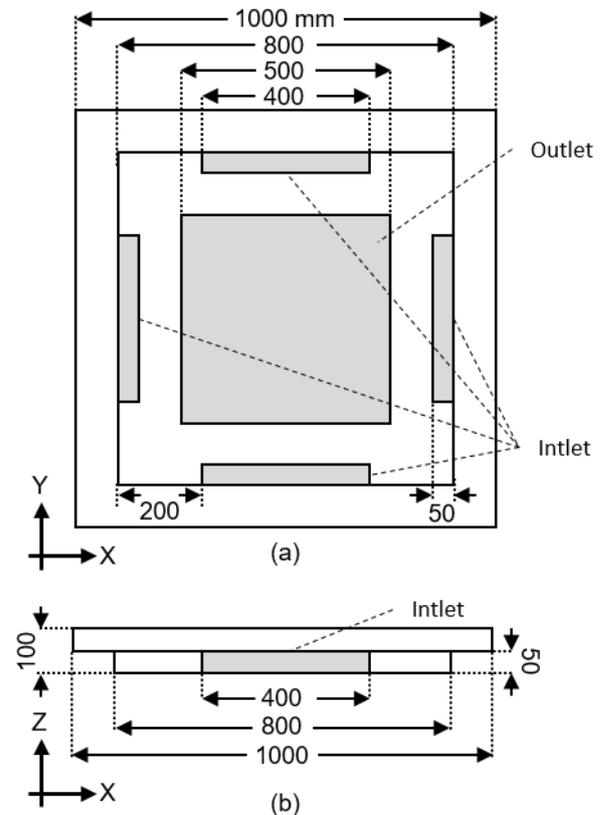


Fig.2 Air conditioner (a) plan view, (b) elevation view

## 2.2 数値実験の手順

数値実験は、以下の手順で行った。

- 1) まず、窓面貫流熱を含め全ての境界条件を入力した数値シミュレーションを行った。この結果は、数値実験において「正解値」と見なされた。
- 2) 次に、「正解値」温度分布のうち、空調機吸込み口における温度を抜き出し、これを「観測データ」とみなした。
- 3) 一方、VCA 法による推定に用いるため、窓面貫流熱を0として再度シミュレーションを行った。この結果を推定の初期値とした。
- 4) 窓面貫流熱0の結果を推定の初期値とし、これに作成した「観測データ」をVCA法によりデータ同化することで、「観測データ」によく一致する推定値を探索した。
- 5) 得られた推定値を「正解値」と比較することで、VCA法による推定の精度を評価した。

## 2.3 計算条件

数値計算ツールとして、オープンソース CFD ライブラリである OpenFOAM version 2.3.0 に、VCA 法の適用及び「観測データ」作成のためのソルバ、ライブラリを追加して用いた。

計算は非圧縮性定常流れを仮定し、ブシネスク近似を用いて浮力の影響を考慮した。離散スキームとして、対流項には2次精度風上差分法を、拡散項には2次精度中心差分法を用いた。乱流モデルには標準  $k-\epsilon$  モデルを用い、速度と圧力のカップリングには SIMPLE 法を用いた。

計算の境界条件を Table 1 に示す。

Table 1 Boundary conditions

Inlet	Temperature: 273 [K] Flow rate: $0.125 \times 4$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] Pressure: Zero gradient condition
Outlet	Temperature: Zero gradient condition Velocity: Zero gradient condition Gauge pressure: 0 [Pa]
Window	Temperature: 303 [K] Heat transmission: 100 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
Wall	Temperature: 303 [K]

## 3. 数値実験の結果

### 3.1 「正解値」

「正解値」温度・速度分布を Fig.3 に示す。窓面貫流熱と空調吹き出し口からの低温空気の流入により、室内には温度分布が形成されている。また、窓表面の速度分布を見ると、空調吹き出しによる強制対流に加え、窓面での温度上昇による自然対流の影響が見られる。

### 3.2 「観測データ」

「正解値」温度分布のうち、空調機吸込み口における温度分布を、「観測データ」として用いる。空調機吸込み

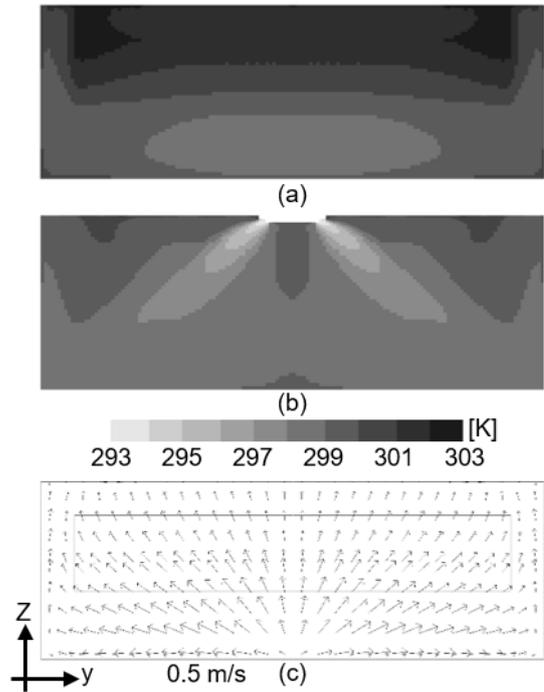


Fig.3 “Correct” temperature field in (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=3.75$  m, and (c) velocity field in  $x=0.025$  m

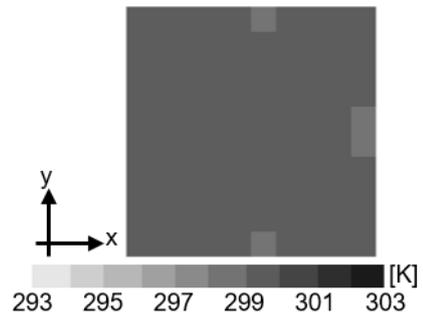


Fig.4 “Observed” temperature at the outlet of Air Conditioner

口における温度分布を Fig.4 に示す。吸込み口においてはわずかな温度分布が見られる。なお、観測誤差は無いものとした。

### 3.3 推定の初期値

次に、推定の初期値における温度・速度分布を Fig.5 に示す。推定の初期値においては、窓面貫流熱が0であるとしているため、窓面近傍での温度上昇が見られない。また、速度場に「正解値」と大きな違いは見られないが、窓面近傍での自然対流が弱くなっていることがわかる。

### 3.4 VCA 法による推定値

推定の初期値を初期条件として、「観測データ」をVCA法によりデータ同化することで得た推定値の温度・速度分布を Fig.6 に示す。データ同化の適用により、推定の初期値では再現できていなかった窓面近傍の温度分布や、上昇気流が再現されていることがわかる。

窓面貫流熱の推定では、正解値  $100 \text{ W}/\text{m}^2$  に対し、推定

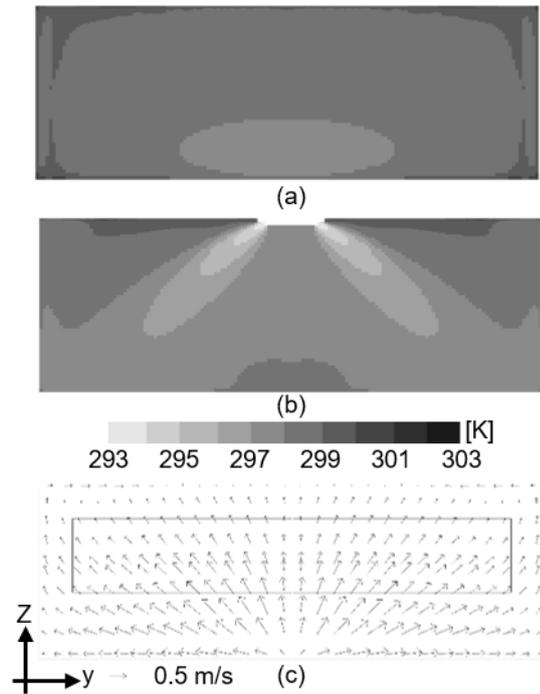


Fig.5 Initial temperature field in (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=3.75$  m, and (c) velocity field in  $x=0.025$  m

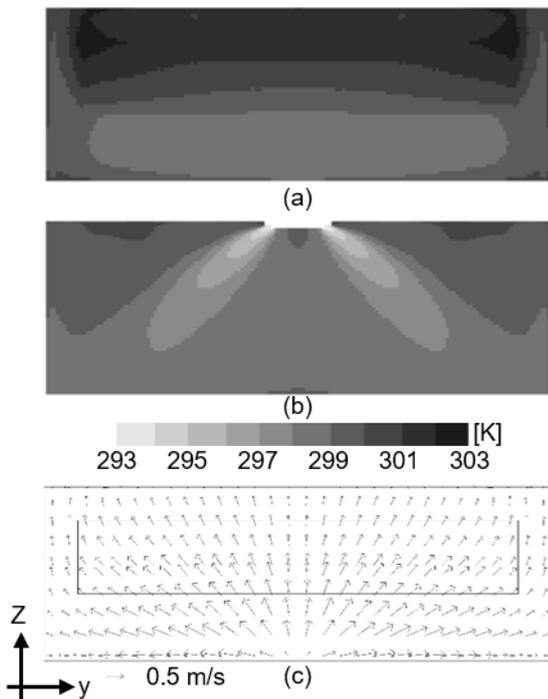


Fig.6 Estimated temperature field in (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=3.75$  m, and (c) velocity field in  $x=0.025$  m

値は平均  $98 \text{ W/m}^2$  であり、ほぼ正解値と一致した。

### 3.5 推定精度の評価

推定の初期値と推定値について、室内全体、窓面（2面の双方）、空調機吸込み口のそれぞれで求めた、温度と速度ベクトルの二乗平均平方根誤差（RMSE）を Table 2 に示す。Table 2 より、空調機吸込み口における速度ベク

トルの誤差が僅かに増加したことを除き、すべての箇所、温度、速度ベクトルの誤差が減少した。これにより、VCA 法により室内温熱環境の推定精度が向上できることが示唆された。

Table 2 RMSEs of temperature and velocity in each regions

	Temperature [K]		Velocity [m/s]	
	Initial	Estimated	Initial	Estimated
Whole region	0.08	0.01	0.01	0.00
Window surface	2.44	0.14	0.05	0.02
AC outlet	1.21	0.06	0.05	0.06

## 4. 結論

本研究では、CFD を用いた室内温熱環境推定の精度向上を目的として、少数の観測データを CFD に同化することで CFD の解析精度を向上させる VCA 法を適用する数値実験を行った。

数値実験では 4 方向吹き空調機と 1 対の窓を持つ 3 次元室内空間を対象とし、以下の手順で行われた。

- 1) 窓面からの貫流熱がある場合を「正解値」とし、「正解値」における空調機吸込み口温度分布を「観測データ」と見なした。
- 2) 窓面貫流熱を 0 とした場合を初期条件とし、VCA 法を用いて「観測データ」を同化すること「正解値」の窓面貫流熱、室内温度場・速度場を推定した。
- 3) 推定された窓面貫流熱と温度場・速度場を「正解値」と比較した。

数値実験の結果、VCA 法を用いることで、窓面貫流熱を精度良く推定できることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 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 4 報) 制約条件の追加による放出源推定の精度向上. 平成 27 年度空気調和衛生工学会大会, D-19, 大阪, 2015
- 2) J. C. Derber. A Variational Continuous Assimilation Technique. *Monthly Weather Review*, Vol.117, pp.2437-2446, 1989
- 3) 松尾智仁, 近藤明, 嶋寺光, 塩地純夫, 小松彰. 連続的データ同化法を用いた室内環境推定に関する研究 (第 2 報) 3 次元定常流れにおける濃度場推定への適用. *空気調和・衛生工学会論文集*, Vol.232, pp.23-30, 2016
- 4) 松尾智仁, 近藤明, 嶋寺光, 塩地純夫, 小松彰. 連続的データ同化法を用いた室内環境推定に関する研究 (第 1 報) 2 次元定常流れにおける濃度場推定への適用. *空気調和・衛生工学会論文集*, Vol.223, pp.11-18, 2015