

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 6 報）複数の熱源がある場合の熱源分布の推定  
Development of the Method to Estimate Indoor Environment using Variational Continuous  
Assimilation Method  
(Part 6) Estimation of distribution of heat sources

正会員 ○近藤 明（大阪大学） 正会員 松尾 智仁（大阪大学） 正会員 嶋寺 光（大阪大学）

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

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

Because of the nature of inverse problem, some of data assimilation methods, including the variational continuous assimilation (VCA) method, has limitations; for example, the uniqueness of solution is not always ensured. One of the reason is that the degree of freedom of the solution of inverse problem is too large. Thus, in this study, the constraint condition was employed in order to estimate the distribution of indoor unknown heat source. The method was validated by the numerical experiments.

## はじめに

熱源推定手法の多くは、観測されたデータを用いてその原因である熱源を推定する、いわゆる逆問題の形式を取る。一般に、逆問題は不良設定問題 (ill-posed problem) と呼ばれ、解の存在、解の唯一性、解の安定性が保証されない。熱源推定に関しては、観測データが存在する以上、解の存在は保証されているが、解の唯一性と安定性は一般には保証されない。実際に、前報<sup>1)</sup>において筆者らが放出源推定を行った際には、推定された放出源分布は実際の放出源分布よりも薄く広がった分布を取っていた。これは、解の唯一性が保証されないため、無数にある局所解の 1 つに落ち込んだものと思われる。

不良設定問題を根本的に解決することは難しいが、工学的には、様々な工夫により解の自由度を小さくすることで、その影響を回避ないし緩和することができる。例えば、観測データの取得個所を十分に多数確保することで、観測データと同程度の解像度の推定値は容易に得ることができる。しかし、このような観測コストが高い手法が採用できる場合、そもそもデータ同化法を使う必然性があまりない。実用上は、観測コストの増加を招かない方法が望ましい。

一例として、筆者らは、汚染物質の放出源分布の推定に関して、汚染物質濃度が負の値を取らないという物理的に自然な条件を制約条件に追加することで、より真の解に近い解を得られることを確認した<sup>2)</sup>。データ同化法の適用に際してこのような制約条件を与えることで、解の自由度を減らし、推定精度を高められると考えられる。

本研究では、熱源が複数あり、またそれらの熱源の発

熱量が異なる場合に、その熱源分布を連続的データ同化法 (VCA 法) により推定することを目的とし、そのような推定における適切な制約条件を、数値実験を用いて検討する。

## 1. VCA 法

### 1.1 VCA 法の基礎式

VCA 法の基礎式については、前報<sup>1)</sup>に記したためここでは繰り返さない。

### 1.2 VCA 法の修正項のふるまい

VCA 法の適用において、CFD の支配方程式は離散化され、VCA 法による修正項の負荷された形で式 (1) のように記述される。

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

ここで、 $\Psi$  は温度などの変数ベクトルである。 $\lambda\phi$  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。

式 (1) に示されるように、VCA 法の修正項は生成・消滅項として振る舞う。修正の空間分布は修正ベクトル  $\phi$  により定義されるため、修正ベクトル  $\phi$  が熱源の分布に対応していると考えられる。

### 1.3 制約条件の追加による推定精度の向上

熱源推定の特徴である解の唯一性、解の安定性の欠如は、解の自由度を低下させることで向上させることができることはすでに述べた。その方法として本研究では、

式 (2) に示すように修正項の空間的分布を制限する.

$$\phi_{ncell} = \begin{cases} \phi_{ncell} & \text{if } ncell \subset N_{region} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで,  $\phi_{ncell}$  は修正ベクトル $\phi$ の第  $ncell$  成分を,  $N_{region}$  は計算領域のうち修正項の分布範囲に含まれる計算格子の集合をそれぞれ表す.

この制約条件は, 例えば未知の熱源が壁面貫流熱のみであるときに, 壁面表面のみを対象として VCA 法を適用するような場合に用いる.

また, 熱源が複数あり, かつ, 各熱源表面においてはその発熱量が一定であると仮定できる場合, 式 (3) に示すように, 各領域内で発熱量を体積平均化する制約条件を付加できる.

$$\phi_{ncell} = \begin{cases} \frac{V_{ncell}\phi_{ncell}}{\sum_{ncell}^{N_{region}}(V_{ncell}\phi_{ncell})} & \text{if } ncell \subset N_{region} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで,  $V_{ncell}$  は第  $ncell$  番目の計算格子の体積である.

## 2. 数値実験の方法

### 2.1 数値実験の目的

数値実験の目的は, 対象領域内に複数の熱源が存在し, それぞれの熱源が異なる発熱量を持つ場合に, VCA 法を用いてその熱源分布を正確に推定するために必要な制約条件について検討することである.

### 2.2 対象領域

数値実験の対象領域を Fig.1 に示す. 対象領域は 1 対の窓と空調機の室内機を持ち, 後述するように 3 種類の観測点群を持つとした. 空調機の寸法を Fig.2 に示す. なお, 数値実験においては, 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.

### 2.3 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.

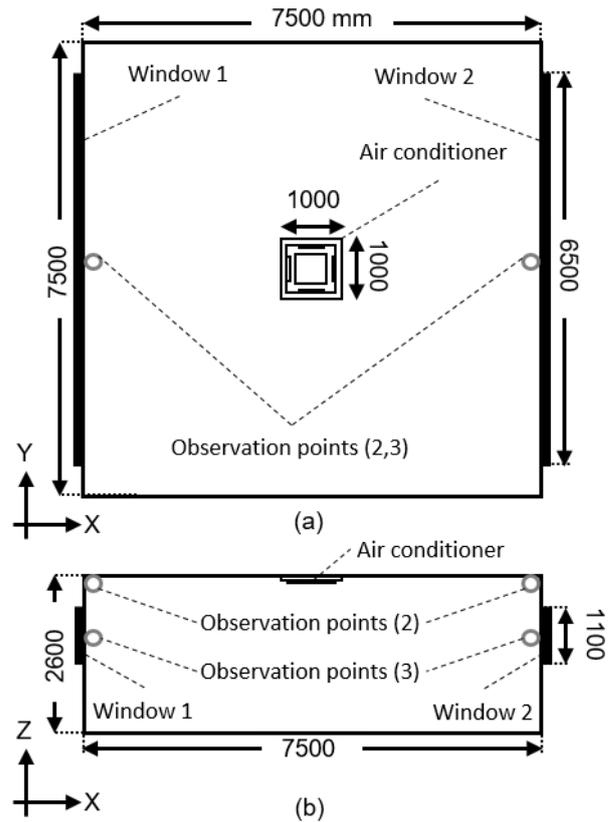


Fig.1 Objective room (a) plan view, (b) elevation view

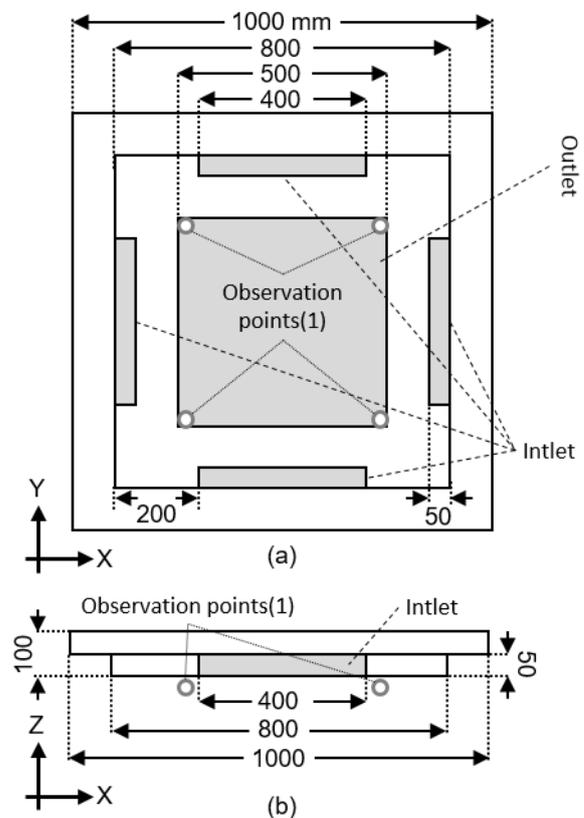


Fig.2 Air conditioner (a) plan view, (b) elevation view

- 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。

#### 2.4 計算条件

数値シミュレーションのツールには、OpenFOAM-2.3.0 を修正して用いた。数値実験で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。対流項、拡散項の離散スキームには 2 次精度風上差分法、2 次精度中心差分法をそれぞれ用いた。乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  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。

数値実験の境界条件を Table 1 に示す。また、VCA 法の制約条件として、修正対象は各窓面のみであるとし、また式 (3) の制約条件を課す場合には、それぞれの窓面で発熱量が一樣であるとした。

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 1	Temperature: 303 [K]
	Heat transmission: 0 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
Window 2	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」

正しい窓面貫流熱を与えて行った計算結果の温度分布を「正解値」とみなし、Fig.3 に示す。貫流熱の差に対応して、2 つの窓面で異なる温度分布となっていることが確認できる。

#### 3.2 「観測データ」

「正解値」のうち、観測位置における温度データを「観測データ」とみなす。「観測データ」として、(1) 空調機吸込み口全点、(2) 窓面中央各 1 点、(3) 窓面上方の天井角各 1 点、をそれぞれ用意し、組み合わせて用いた。

Fig.4 に示すように、空調機吸込み口では顕著な温度分布は見られず、窓面貫流熱の影響は小さい。

#### 3.3 推定の初期値

窓面からの貫流熱がない条件で行った数値シミュレーションの結果を推定の初期値として用いた。初期値の温度場を Fig.5 に示す。いずれの窓面からも貫流熱が 0 であるため、「正解値」に比べて室内の温度が低い。

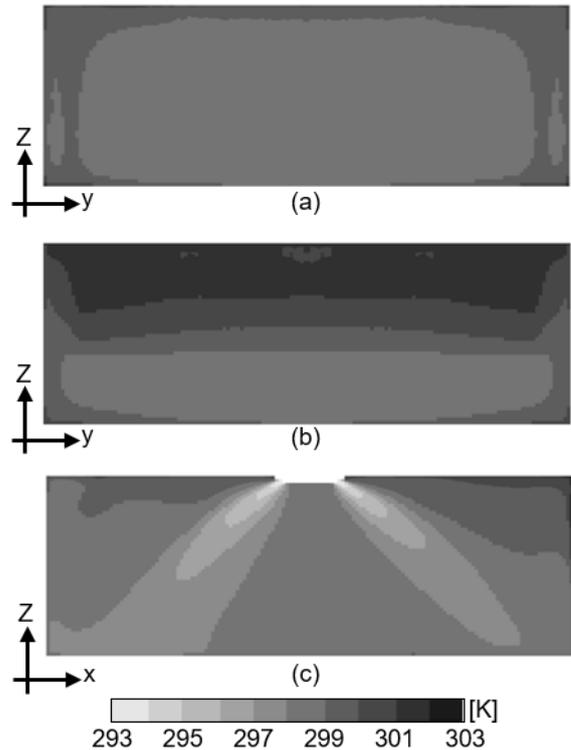


Fig.3 “Correct” temperature field at (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=7.475$  m, and (c)  $y=3.75$  m

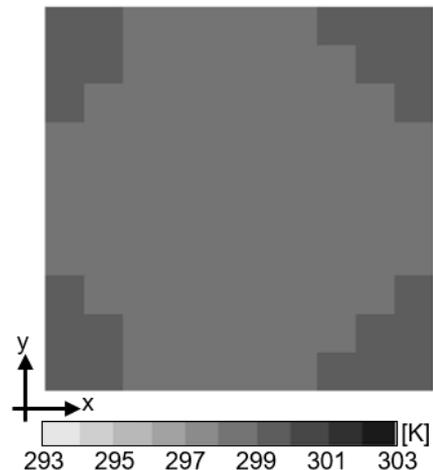


Fig.4 “Observed” temperature field at outlet

また両窓面での温度場の差はほぼ見られない。

#### 3.4 VCA 法による推定値

観測データ (1), (2) を用い、かつ式 (2), (3) に示した制約条件を課した場合の VCA 法による推定結果を Fig.6 に示す。Fig.4-6 を比較すると、観測データの同化により、窓面貫流熱の影響をよく推定できている。

ただし、VCA 法による推定値では、「正解値」には貫流熱のない側の窓面に対してはわずかに温度を下げる修正が与えられている。発熱量は、真の発熱量が Window 1 で  $0 \text{ W}/\text{m}^2$ 、Window 2 で  $100 \text{ W}/\text{m}^2$  であるのに対し、推定

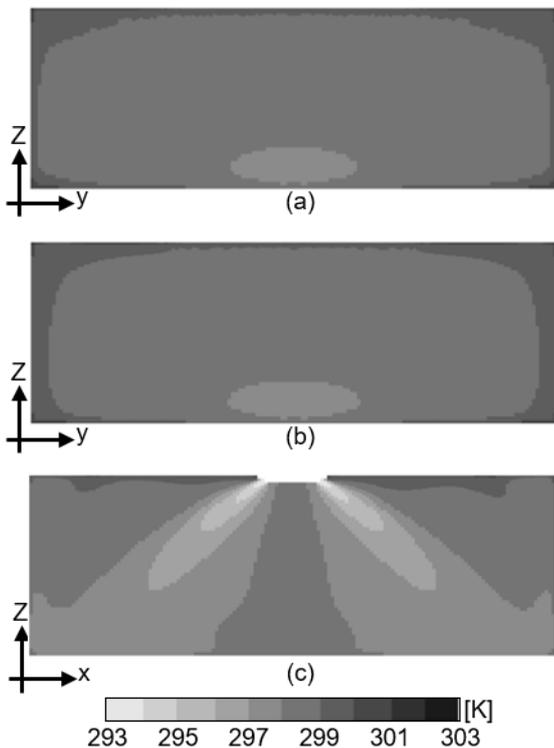


Fig.5 Initial temperature field at (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=7.475$  m, and (c)  $y=3.75$  m

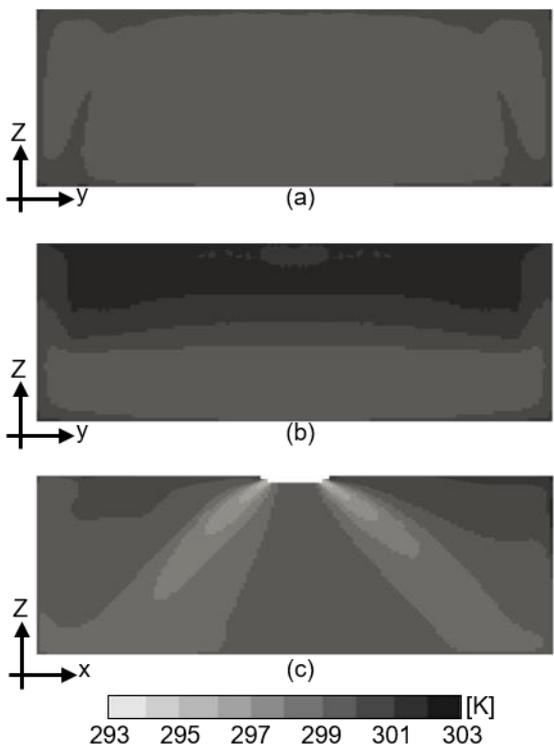


Fig.6 Estimated temperature field at (a)  $x=0.025$  m, (b)  $x=7.475$  m, and (c)  $y=3.75$  m

値は Window 1 が  $-7.9 \text{ W/m}^2$ , Window 2 が  $106.3 \text{ W/m}^2$  であった。

### 3.5 推定結果の評価

推定の初期値と推定値について、温度と速度ベクトルの二乗平均平方根誤差 (RMSE) を求めた。室内全体および窓面表面、空調機吸込み口における RMSE を Table 2 に示す。推定時に貫流熱を過小評価した窓 1 の表面で誤差が拡大しているが、窓 2、空調機吸込み口では温度、速度の誤差が減少しており、また室内全体で見ても温度、速度ともに誤差が減少していることが確認できた。

これより、適切な観測データと制約条件を与えた VCA 法の適用が、室内熱源分布の推定に有効であることが確認された。

Table 2 RMSEs of temperature and velocity in each regions

	Temperature [K]		Velocity [m/s]	
	Initial	Estimated	Initial	Estimated
Whole region	0.62	0.16	0.13	0.09
Window 1	0.17	0.11	0.06	0.10
Window 2	2.09	0.15	0.06	0.03
AC outlet	0.64	0.07	0.17	0.08

### 4. 結論

本研究では、VCA 法を用いて室内熱源分布を推定する数値実験を通して、逆問題の特徴である解の唯一性と解の安定性の問題を緩和するための制約条件について検討し、その有効性を確認した。

数値実験では、2 面の窓面の一方からのみ貫流熱が存在する場合を「正解値」とし、「正解値」の空調機吸込み口、および窓面中央各 2 点の温度を「観測データ」とした。これに対して貫流熱がない条件を初期条件として、「観測データ」を VCA 法により同化することで窓面貫流熱分布及び室内温度分布、速度分布を推定した。

数値実験の結果、各窓面の貫流熱一定などの適切な制約条件を付加することにより、熱源分布、温度・速度分布を精度よく推定できることが確認された。

### 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) 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・衛生工学会論文誌, Vol.223, pp.11-18, 2015