

費用関数を用いた室内環境推定手法の開発 (第2報) 費用関数法とVCA法の比較評価

Development of the method to estimate indoor environment using cost function (part2) Comparison of Cost Function method and VCA method

学生会員 ○松尾 智仁 (大阪大学) 正会員 近藤 明 (大阪大学)
正会員 小松 彰 (ダイキン工業) 正会員 塩地 純夫 (ダイキン工業)
正会員 井上 義雄 (大阪大学)

Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹ Akira KOMATSU*² Sumio SHIOCHI*² Yoshio INOUE*¹

*¹ Osaka University *² DAIKIN INDUSTRIES, LTD.

Two data assimilation methods are adopted to understand accurate distributions of wind velocity and temperature. One is Cost Function Method (CFM) which consists of errors of basic equations and of measured data errors. CFM is divided into individual and integrated type due to the combination between basic equation and estimated component. The other is Variational Continuous Assimilation method (VCA) which introduces effect of measured data into CFD. As a result, it was confirmed that both methods are effective to estimate velocity and temperature, and it was found that VCA could estimate closer distribution to measured data than CFM.

はじめに

流体工学における流れ場の速度分布や温度分布、濃度分布を把握するための手法として、数値解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD) によるものと実測によるものの2つの方法がある。しかし CFD には境界条件の簡略化や、数値解析の際のモデル近似や離散化による誤差が存在し、また実測にも測定誤差や欠測が存在する。このため、いずれの方法を用いる場合も、流れ場全体の正確な把握は困難であると考えられる。

本研究ではより正確に温・速度場を把握する手法として、データ同化法を提案する。これは測定値と数値解析を融合することによって、より精度の高い場の推定が行うものである。本研究では第一報に引き続き、測定値と流れ場の支配方程式を用いて数値計算を補完・修正する費用関数法¹⁾(従来手法である個別型と発展的手法である統合型)を用いた。また本報では費用関数法との比較のため、数値解析に測定値による寄与の項を取り入れる Variational Continuous Assimilation Method²⁾ (VCA 法)を用いた。VCA 法は支配方程式に修正項を導入するため、費用関数法同様、合理的な場を得やすい特徴を持つ。

本研究では室内熱環境の空気分布に関して行った観測を用いて速度場・温度場を推定することで、各データ同化法の有効性を比較評価することを目的とした。

1. データ同化法の概要

1.1 費用関数法 (Cost Function Method: CFM)

費用関数は最適化対象として考慮する従属変数に関連

したすべての支配方程式の残差の二乗及び測定値の修正量の二乗の和として式(1)で表される。

$$CF = \int \left\{ \sum_k \alpha_k \beta_k f_k^2(\xi_i, \eta_j) + \sum_j \alpha_j \beta_j (\eta_j - \eta_{j,obs})^2 \right\} d\xi \quad \dots(1)$$

ここで支配方程式 $f_k(\xi_i, \eta_j) = 0$ について、独立変数 ξ_i (空間座標、時間)、従属変数 η_j (速度成分、圧力、温度)、支配方程式 f_k (NS 方程式、連続の式、温度の保存式)を定義する。 $\int d\xi$ は対象領域全体にわたる全ての ξ に関する積分を、添え字 obs は測定値を表している。CF を最小化させることによって、より合理的な流れ場を得ようとする方法を費用関数法と呼ぶ。

費用関数法は、その扱う支配方程式及び最適化する従属変数の組み合わせにより2種類に分類される。個別型費用関数法において速度はNS式と連続式から、温度は温度の保存式から解を求める。統合型費用関数法では個別型で用いられた組み合わせに加えて温度の保存方程式から速度成分を推定する。

1.2 VCA 法

VCA 法は各計算ステップでモデル自体に補正項を付け加え、式(2)のようにしてモデルを補正する。

$$\Psi^n = A^n \Psi^{n-1} + \lambda^n \phi \quad \dots(2)$$

ここで A^n は変数ベクトル Ψ^{n-1} を次のステップの値 Ψ^n へ変換するための行列式である。 λ^n は時刻によって決定する正方行列(本研究では定常計算であるため単位

行列)、 ϕ は空間によって決定する補正ベクトルである。
 ϕ を決定するための評価関数 I を式(3)で定義する。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (\Psi^n - \tilde{\Psi}^n)^T (\Psi^n - \tilde{\Psi}^n) \quad \dots(3)$$

ここで $\tilde{\Psi}$ は測定値ベクトルを表す。計算値と測定値の二乗和を意味する評価関数 I を最小化するため、 I の勾配 $\partial I / \partial \phi$ を計算し、最急降下法により最適な ϕ を求める。これにより、最適な場の推定が可能となる。

2.実測と数値解析の概要

2.1 実測の概要

本研究では定常非等温流れ場における温度分布と速度分布を対象とし、実測は環境試験室を用いて行った。図1に示したように、試験室には吹き出し口と吸い込み口、熱源を配置した。吹き出し風速と温度は一定であり、吸い込み口は自由解放とした。室中央には熱源を置き、吹き出し風速と熱源による浮力による上昇気流の様子を実測した。実測時の境界条件を表1に示した。

また、温度の観測には熱電対を、速度の観測には超音波風速計を用いた。実測は、熱源付近を密に測定する場合、室全体を疎に測定する場合の二種類を行った。2種の観測結果を図2に示した。

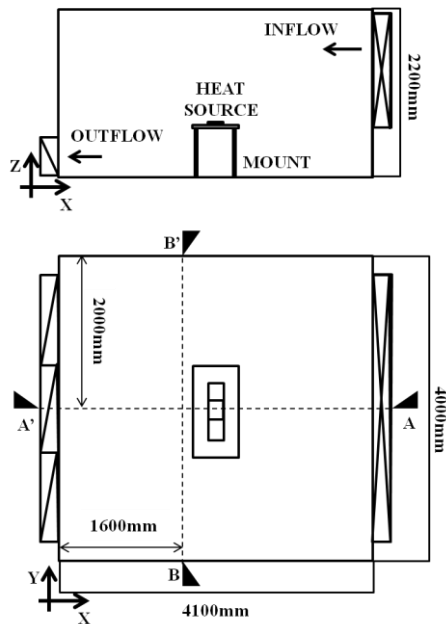


図1 実験空間概要図 (上：立面図 下：平面図)

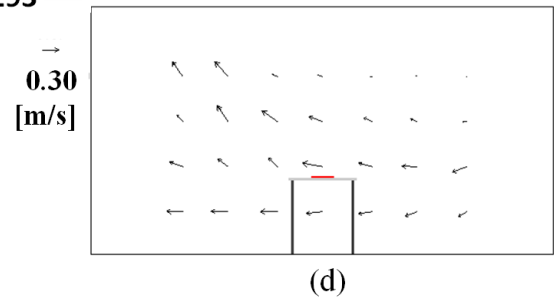
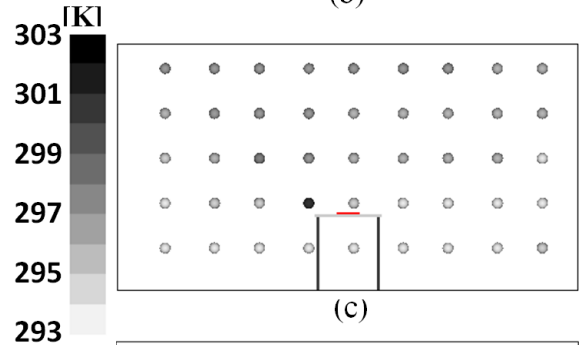
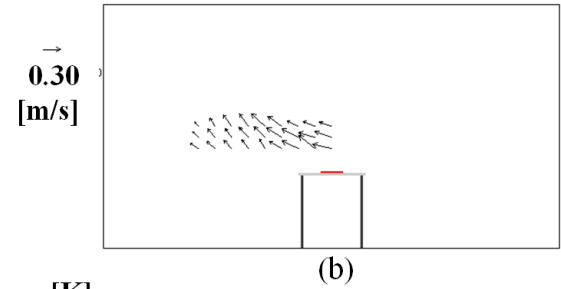
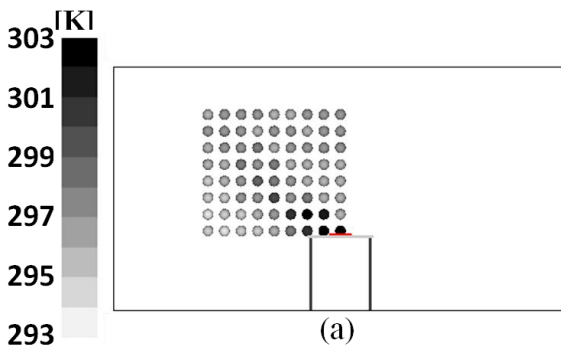


図2 観測結果

(a)密な温度分布の実測 (b)密な速度分布の実測
(c)疎な温度分布の実測 (d)疎な速度分布の実測

表1 境界条件

吹き出し口	速度: 0.16m/s 一定 温度: 293K 一定
吸い込み口	自由開放
熱源	1200W (400W 熱源×3)
壁条件	熱伝達率 10W/m ² /K

2.2 数値解析の概要

計算条件として 105×100×55 の均一メッシュを用い、境界条件については実測と同様、表1に示した条件を用いた。計算手法としては標準 k-ε モデルを、解法には SIMPLE 法を、移流項の差分法としてはべき乗法を用いた。

数値解析の結果を図3に示す。なお、図中の枠は観測点の存在範囲を示している。

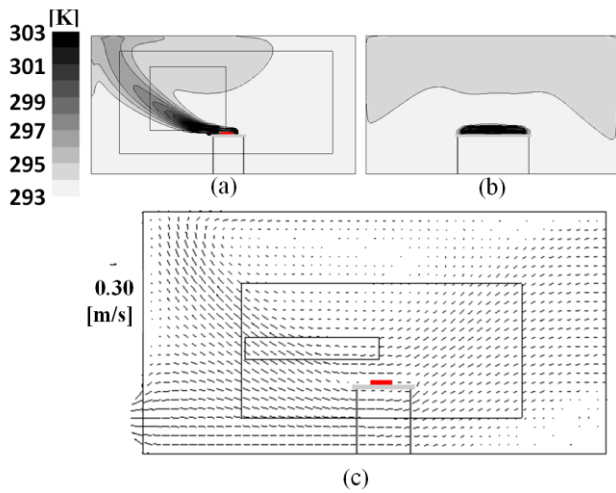


図3 数値解析結果

(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

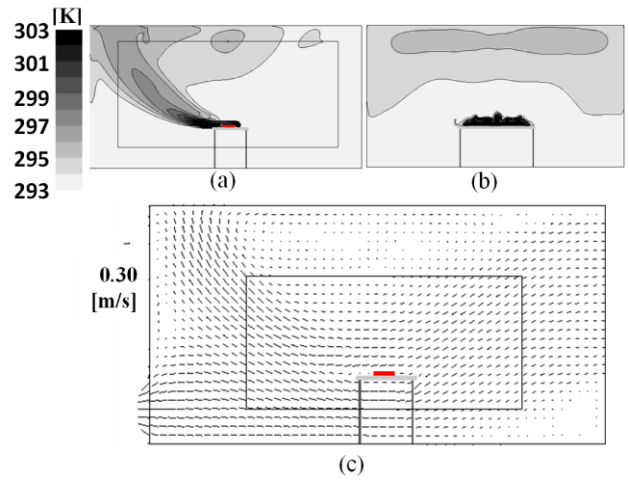


図5 個別型費用関数法による修正結果 (疎な観測)

(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

3.結果

3.1 データ同化法の適用結果

図4～図9に温度分布の結果をまとめる。実測結果である図2と数値解析結果図3を比較すると、数値解析結果では上昇気流の傾きが緩やかであることが見て取れる。しかし、データ同化による結果の図4～図9を見ると、統合型CFM、VCA法では実測結果と同様の傾きを持つ分布を再現出来た。また統合型では、個別型で見られる熱源より風上側の不自然な温度分布が改善されている。VCA法では室上部に温度溜まりが出来ており、観測領域外に対しても修正を伝播させることが可能であると言える。速度分布についてみると、数値解析結果では実測結果に比べ、上昇気流の影響がより吸い込み口側に強く現れているのが見て取れる。しかし図4～図9より、データ同化法の結果でそれを改善することが出来たことが確認できる。

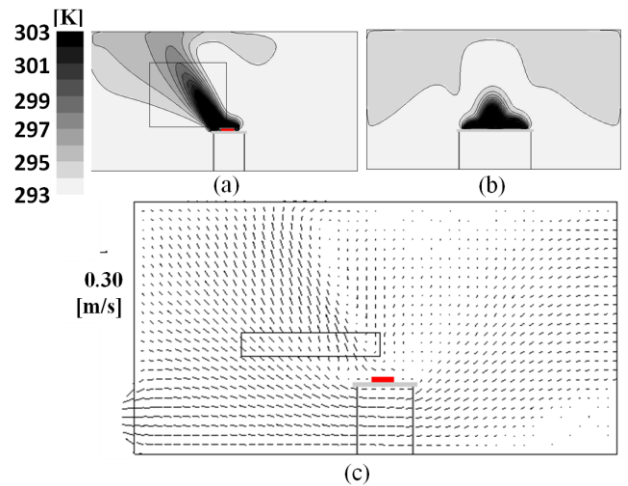


図6 統合型費用関数法による修正結果 (密な観測)

(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

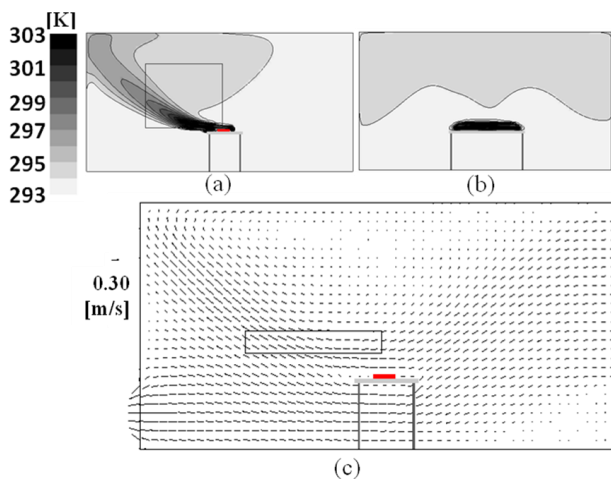


図4 個別型費用関数法による修正結果 (密な観測)

(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

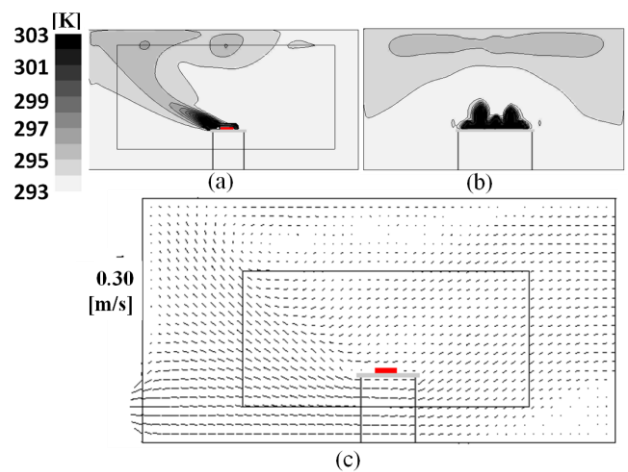


図7 統合型費用関数法による修正結果 (疎な観測)

(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

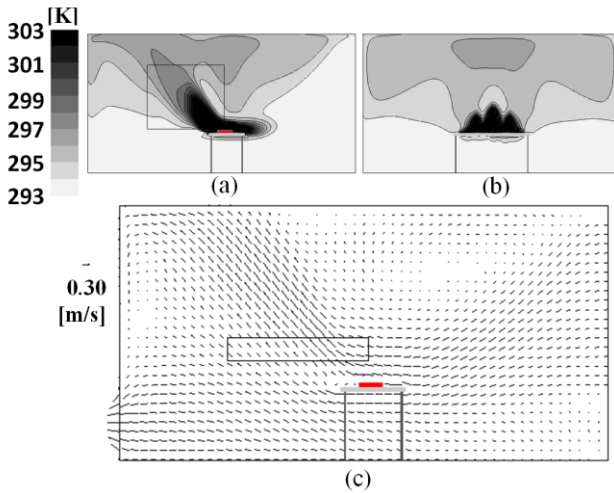


図8 VCA法による修正結果(密な観測)
(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

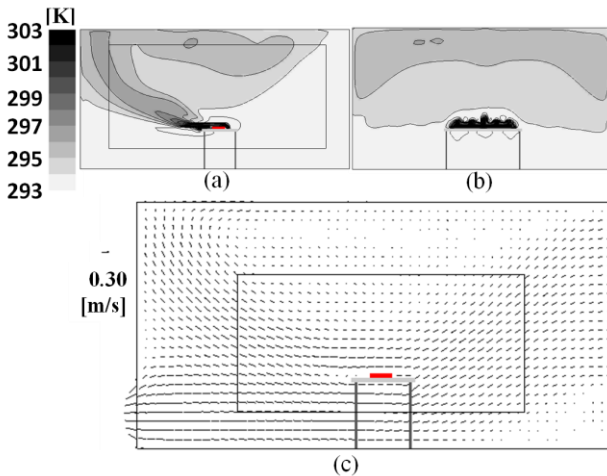


図9 VCA法による修正結果(疎な観測)
(a)温度 A-A'断面 (b)温度 B-B'断面 (c)速度 A-A'断面

3.2 データ同化の適用による誤差の減少量の評価

データ同化の適用に減少した誤差の程度を評価するため、データ同化適用後の計算値と観測値の平方平均二乗誤差(Root Mean Square Error: RMSE)の値を求めた。RMSEの算出の際には、データ同化に用いられなかった観測データを用いている。

図10には密な観測データをデータ同化に用いた場合の、疎な観測データとのRMSEを、図11には疎な観測データを用いた場合の、密な観測データとのRMSEを、それぞれ示した。図中の数字は、数値解析と観測データのRMSEで除することで規格化してある。

費用関数法とVCA法を比較すると、費用関数法は支配方程式の残差を用いて修正を行うため、観測点近傍でも不連続な流れ場は生じにくいという特長がある。他方、VCA法は計算値と観測値の誤差が支配方程式により伝搬されるため、観測点の周辺も修正されやすいという特

長がある。そうした特長のため、密な観測データを用いた場合、費用関数は観測データのない部分も比較的合理的な推定結果が得られているが、VCA法は観測データに合わせるために周辺を過剰に修正していることが図10より示唆される。

他方、疎な観測データを用いると、観測点の間の領域まで修正が伝搬されるVCA法の方がより合理的な流れ場を得ることができていることが図11から示唆される。また、個別型CFMと統合型CFMの比較では、流れ場の修正が温度場との整合性の影響も受けるため、上述の費用関数の特長がより強く出ていると考えられる。

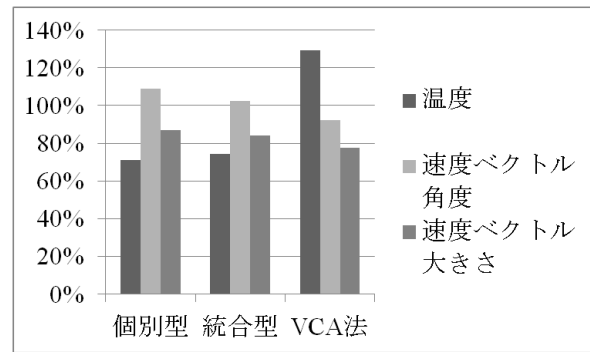


図10 密な観測データを用いてデータ同化を適用した場合の、疎な観測データとのRMSE値

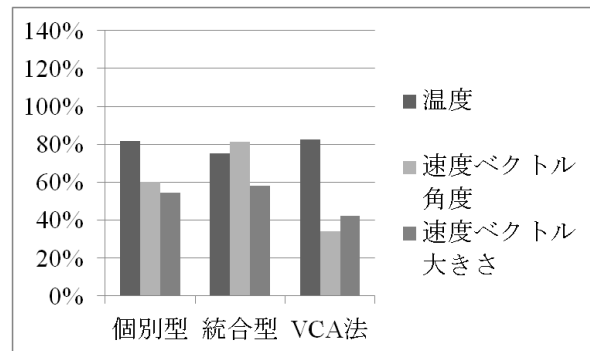


図11 疎な観測データを用いてデータ同化を適用した場合の、密な観測データとのRMSE値

4. 結論

データ同化法を提案し、実測データを用いた実験空間の速度・温度分布の推定に適用した。その結果、より実測値の分布に近い形に数値解析結果を修正することができた。また、観測点は広範囲に疎に取った場合の結果が良好であり、その場合費用関数法よりもVCA法の結果が良好であった。

参考文献

- 1) Kondo A, Nakagawa H, Kaga A and Inoue Y "Understanding of flow and scalar fields combining Measured Data and CFD", *ASHRAE Trans.* Vol.116 Issue2 318-328
- 2) Derber, J. C., 1989 "A Variational Continuous Assimilation Technique", *Monthly Weather Review*, 116, 977-1000