

M2 データ同化法による室内速度・温度分布の推定に関する研究

Estimating distributions of indoor flow and temperature with data assimilation methods

指導教員 近藤明教授・共生環境評価領域
28H11023 久野貴大(Takahiro KYUNO)

Abstract: In fluid dynamics, Computational Fluid Dynamics (CFD) and measurements have been used for estimating flow fields. However, CFD has inevitably errors accompanied by boundary condition, discretization and numerical calculation, and measurements include missing data and some errors involving their methods. So, two data assimilation methods are adopted to understand both wind velocity and temperature distributions accurately. 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. Another is Variational Continuous Assimilation method (VCA) which introduces effect of measured data into CFD. As a result, it was confirmed that data assimilation method is effective to estimate velocity and temperature. Compared with Root Mean Square Error (RMSE), it was found that VCA could estimate closer distribution to measured data than CFM.

Keywords: Indoor flow, Computational fluid dynamics, Data assimilation, Air distribution

1.序論

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、測定値の持つ情報により計算における境界条件の誤差を改善し、より精度の高い場の推定が出来ると予想される。データ同化法として測定値と流れ場の支配方程式を用いて補完・修正する費用関数法の2種類(従来手法である個別型と発展的手法である統合型)と、数値解析に測定値による寄与の項を取り入れる Variational Continuous Assimilation Method(VCA 法)を提案する。室内熱環境の空気分布に関して、実測を行い、これらデータ同化法により速度場・温度場を推定することで、その有効性を比較評価することを目的とした。

2.データ同化法の概要

2-1.費用関数法

費用関数(Cost Function: CF)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して提案する。

費用関数法で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種類に分類する。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。

2-2.Variational Continuous Assimilation Method(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を A^n とする。 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。補正ベクトル 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 が最小化となるように $\partial I / \partial \phi$ 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。

3.実測概要

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するため、環境試験室において吹出し風速と温度を一定に保ち、図1のように室中央に熱源を置き、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。これをデータ同化法により再現可能か検討する。

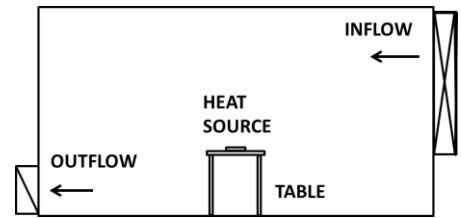


図1 実験空間概要図

4.結果

図2に温度分布の結果をまとめる。実測結果である図2.(a)と標準k-εモデルにより計算した図2.(b)を比べると、数値解析結果では上昇気流の傾きが緩やかである。しかしデータ同化による結果の図2.(c)~(e)を見ると、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高い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、実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。図3に速度分布の結果をまとめる。図3.(b)の数値解析結果では上昇気流の位置が図3.(a)の実測結果に比べ、吸入口側にズレているのが見て取れる。しかし図3.(c)~(e)のデータ同化法の結果でそれを改善することが出来ている。平方平均二乗誤差(Root Mean Square Error: RMSE)の値を求め、数値解析結果により基準化し、図4にまとめる。この結果からVCA法が最もよく実測分布を再現しているのが分かる。

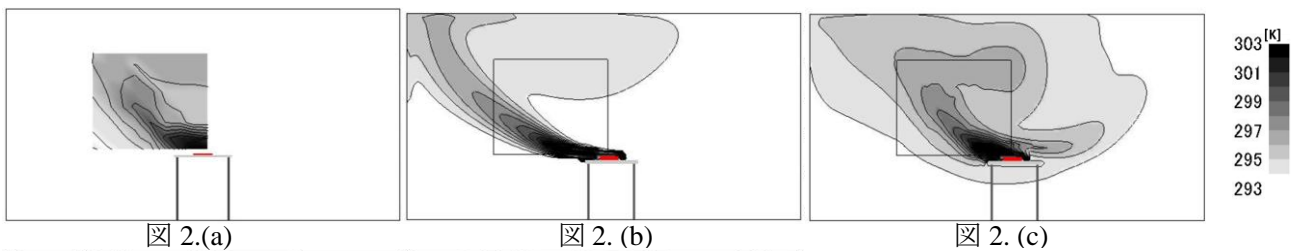


図2.(a)

図2.(b)

図2.(c)

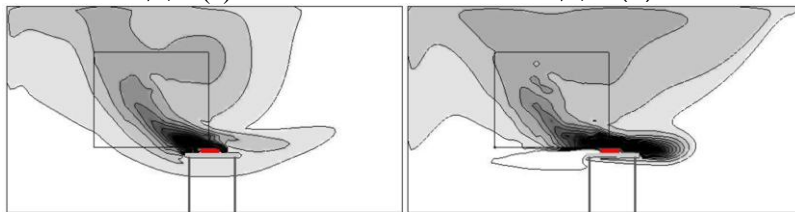


図2.(d)

図2.(e)

図2 温度分布

(a)実測結果

(b)数値解析結果

(c)個別型費用関数法による結果

(d)統合型費用関数法による結果

(e)VCA法による結果

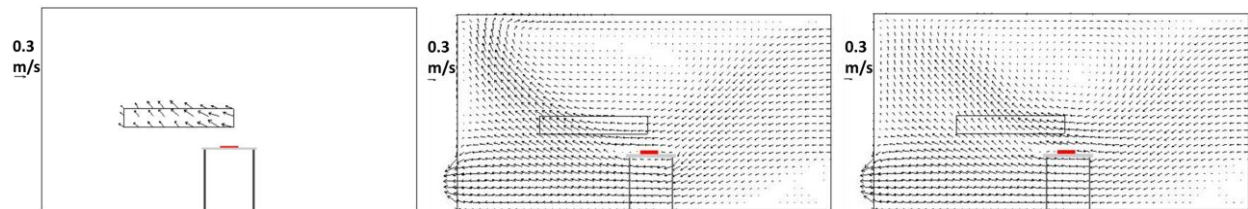


図3.(a)

図3.(b)

図3.(c)

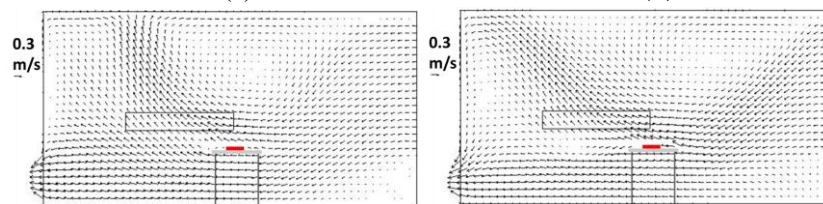


図3.(d)

図3.(e)

図3 速度分布

(a)実測結果

(b)数値解析結果

(c)個別型費用関数法による結果

(d)統合型費用関数法による結果

(e)VCA法による結果

5.結論

データ同化法を提案しこれに必要な実測を行い、実験空間の空気分布の推定に適用した。数値解析では再現しきれなかった、実測値の分布を推定することが出来、その有効性が確認できた。また手法としては費用関数法よりVCA法の優位性があることが分かった。

参考文献

1)Kondo A, Nakagawa H, Kaga A and Inoue Y "Understanding of flow and scalar fields combing Measured Data and CFD", ASHRAE Trans. Vol.116 Issue2 318-328

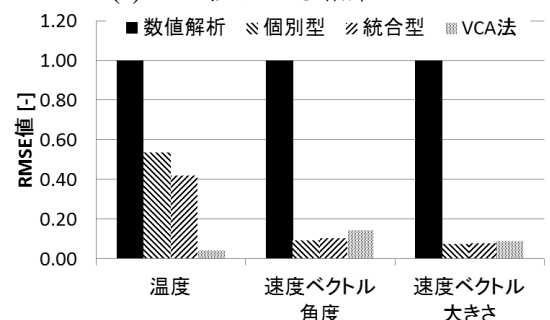


図4 RMSEによる評価
(数値解析結果で基準化)