

Source estimation of indoor contamination from instantaneous point source

with Variational Continuous Assimilation (VCA) method

○松尾 智仁 (大阪大学)

正 近藤 明 (大阪大学)

井上 義雄 (大阪大学)

Tomohito MATSUO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

Akira KONDO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

Yoshio INOUE, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

In order to manage and maintain a hygienic indoor environment, it is necessary to estimate concentrations of contaminants such as airborne particles and disease agents. For these estimations of the contamination, a data assimilation method was used with data previously measured. In this study, the Variational Continuous Assimilation method was applied to estimate indoor contamination sources. For an objective room which has neither circulation of flow nor temperature distribution, VCA method was validated. However, for an objective room has circulation and temperature distribution, the validity was seemed to be limited.

Key words: Data assimilation, Variational Continuous Assimilation, Computational Fluid Dynamics, Contamination

1. はじめに

室内の温熱環境や衛生環境を把握・改善するためには、室内の流れ場や、温度や物質濃度などのスカラー場を把握することが重要となる。従来、これらの場の把握手法としては、実測と数値解析 (CFD) が主に用いられている。しかし、これらの2つの方法にはそれぞれ長所と短所がある。実測は観測誤差を含むために得られたデータは必ずしも支配方程式を満たさず、また対象領域全体の分布を計測することは困難であるために観測値の存在しない欠測点を生じる。他方 CFD は数値モデル化に際して近似による誤差や離散化に伴う誤差を含む。そのため、これら実測と CFD を補うあうため、観測データを用いて数値計算を修正するデータ同化法が用いられる。

データ同化法には、ナッジング法⁽¹⁾や adjoint 法⁽²⁾、費用関数法⁽³⁾⁽⁴⁾、quasi-reversibility 法⁽⁵⁾や pseudo-reversibility 法⁽⁶⁾など多くの手法が存在するが、本研究では、観測データと数値計算結果の差分により定義される誤差情報を支配方程式によって時空間的に伝搬させることで、観測データ近傍以外にも比較的合理的な修正が得られる連続的データ同化法 (Variational Continuous Assimilation method: VCA 法)を採用した。VCA 法は LeDimet と Talagrand が導入し⁽²⁾、Derber が修正した⁽⁷⁾のものであり、数値解析結果と観測結果の差分から評価関数を定義し、評価関数を最小化するように数値解析を修正する手法である。

筆者らはすでに、2次元定常流れ場、濃度場を対象に VCA 法を適用した場合について、放出源位置・強度と濃度分布の推定が可能であることを確認している⁽⁸⁾。

本研究では、CFD によって作成した流れ場と濃度分布データを用いて、既知の2次元定常流れ場における汚染物質の瞬時排出点源の放出源位置と放出強度、汚染物質濃度の推定を行った。また、VCA 法により得られた推定結果と別手法による推定結果を比較により、VCA 法の特徴を分析した。

2. VCA 法の概要

2.1 VCA 法の基礎式

VCA 法は、数値解析のステップ計算に修正項を導入する

ことで数値解析を修正する。数値解析モデルを次式で表す。

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

ここで、 Ψ^n はタイムステップ t_n における計算値ベクトルであり、 A^n は Ψ^{n-1} から Ψ^n への変換を意味する行列式である。 λ^n は時刻 t_n によって決定される正方行列、 ϕ は空間によって決定する補正ベクトルである。 Ψ^n 、 ϕ は速度、温度、圧力など、タイムステップごとに変化するすべての変数を成分に持ちうるが、本研究では濃度のみを対象とするため、濃度以外の成分は定数であるとみなしている。

次に、数値解析結果と観測データの誤差の大きさを定義するため、評価関数を次式によって定める。

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

ここで、 Ψ^p 、 $\tilde{\Psi}^p$ はそれぞれタイムステップ t_p における計算値ベクトル、観測値ベクトルであり、 $()^T$ はベクトルまたは行列の転置を意味する。すなわち、評価関数は各時刻における計算値と観測値の差の二乗和によって定義される。

VCA 法は、評価関数 I を最小化する修正ベクトル ϕ を求めることで数値解析を修正する。そのため、 I の ϕ に対する勾配を求め、最急降下法などを用いて最適な ϕ を探索する。

2.2 VCA 法を用いた放出源推定

VCA 法は計算値ベクトルを修正する最適な修正ベクトル ϕ を求める。本研究では VCA 法で修正する変数は濃度のみであり、流れ場、温度場は既知であるとみなしている。

濃度の移流拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}C) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla C) + S \quad (3)$$

ここで C は汚染物質濃度であり、 \mathbf{v} 、 Γ はそれぞれ速度と拡散係数である。 $\nabla \cdot$ は発散、 ∇ は勾配をそれぞれ意味する。 S は放出源強度であり、定数であるとみなしている。

汚染源が未知であるとき、もし数値解析が正しい流れ場を用いているならば、数値解析と観測値の間に生じた誤差は汚染源の影響であると考えられる。それゆえ、VCA 法の修正項を汚染源の影響であるとみなすこと以下の式を得る。

式(1)の変換行列を用いると、式(3)は式(4)のように表せる。

$$C^{n+1} = A^{n+1}(C^n + S^*) \quad (4)$$

すなわち、

$$C^{n+1} = A^{n+1}C^n + A^{n+1}S^* \quad (5)$$

ここで S^* は $S^* = S \cdot \Delta t$ で定義され、 Δt は n 番目と $(n+1)$ 番目の計算ステップ間のタイムステップである。

一方、式(1)より式(6)が得られる。

$$C^{n+1} = A^{n+1}C^n + \lambda^n \phi \quad (6)$$

式(5)、式(6)より、

$$\lambda^n \phi = A^{n+1}S^* \quad (7)$$

以上より、 $\lambda^n \phi$ は第 n ステップの汚染放出源の影響に等しいとみなすことができる。ここで、汚染源は瞬時放出点源であるから、汚染が放出される時刻を $n=1$ とすると、汚染放出源が濃度分布に影響をあたえるのは時刻 $n=1$ のみである。したがって式(8)が得られる。

$$\lambda^n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

以上より、修正ベクトル ϕ の分布は、汚染放出源の影響、すなわち汚染放出源の位置・強度を示していると考えられる。

3. 計算条件

3.1 計算条件

数値解析について、計算手法には標準 $k-\epsilon$ モデルを、解法には SIMPLE 法を、移流項の差分法にはべき乗法を用いた。

また、対象空間は 2 次元定常流れ場を仮定し、流れの循環・温度分布がない場合と、流れの循環・温度分布のある場合の 2 種類の流れ場を設定した。いずれの場合も、数値計算では汚染放出源位置、汚染放出強度、濃度分布は未知であると仮定した。

3.2 観測データ

本研究では、データ同化に用いる観測データ（正解値データ）も数値解析により作成した。正解データは、正しい境界条件と汚染放出源データを用いて行われた数値解析結果のうち、後述する観測点の存在する座標の濃度を観測データとしてデータ同化に用いた。

3.3 流れの循環・温度分布のない流れ場（対象空間 1）

比較的単純な流れ場の例として、流れに循環がなく、また室内に温度分布のない対象空間を対象空間 1(Objective room 1)とし、Fig.1 に示した。また、対象空間 1 の境界条件を Table 1 に示した。

また、対象空間 1 の数値解析結果を Fig.2(a)-(e)に示した。

Table.1 Boundary condition for flow field without circulation and temperature distribution

| | |
|----------------------|--|
| Inflow | 0.16 m s ⁻¹ , constant 293 K, constant |
| Outflow | Open boundary |
| Temperature | 293K, constant |
| Contamination Source | 5.6×10 ⁻⁵ g m ⁻² s ⁻¹ |

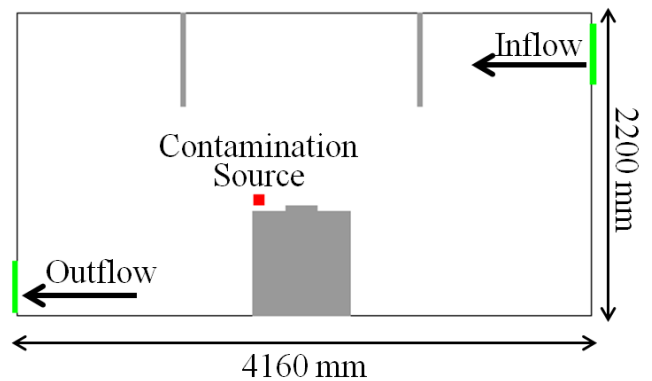


Fig.1 Objective room 1.

Flow field without circulation and temperature distribution

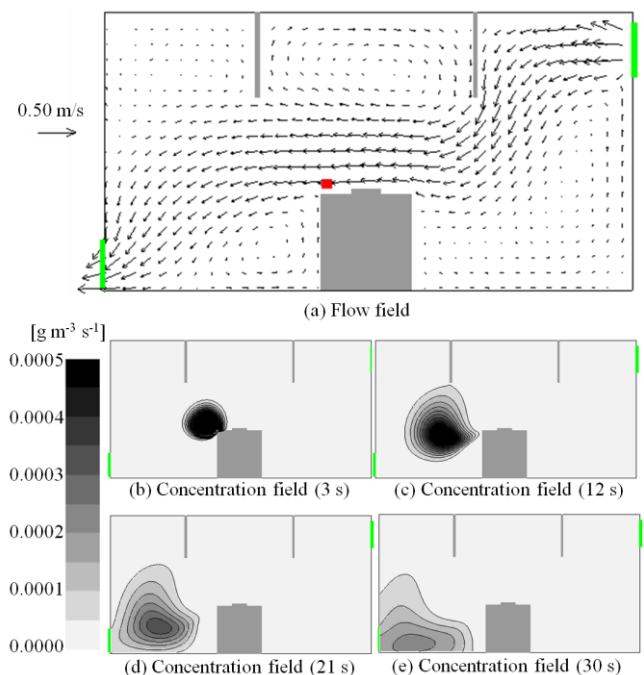


Fig.2 Calculation result (flow and concentration fields)

3.4 流れの循環・温度分布のある流れ場（対象空間 2）

また、本研究では、VCA 法の放出源推定への適用の有効性を検討するため、Zhang らの研究⁽⁴⁾と同様の場を想定し、VCA 法の適用を行った。

Zhang らは、流れの循環と温度分布のある 2 次元室内空間を対象に、支配方程式の時間方向を逆転する quasi-reversibility(QR) モデルと、流れ場を逆転する Lagrangian-reversibility(LR)モデルを用いて放出源推定を行っている。

Zhang らと同様の対象空間を対象空間 2 として Fig.3 に示し、また対象空間 2 の境界条件を Table 2 に示した。また、対象空間 2 の数値解析結果を Fig.4(a)-(e)に示した。

Table.2 Boundary condition for flow field with circulation and temperature distribution

| | |
|----------------------|--|
| Inflow | 0.57 m s ⁻¹ , constant 288 K, constant |
| Outflow | Open boundary |
| Temperature | bottom surface:308.5 K, other:293K, constant |
| Contamination Source | 5.6×10 ⁻⁵ g m ⁻² s ⁻¹ |

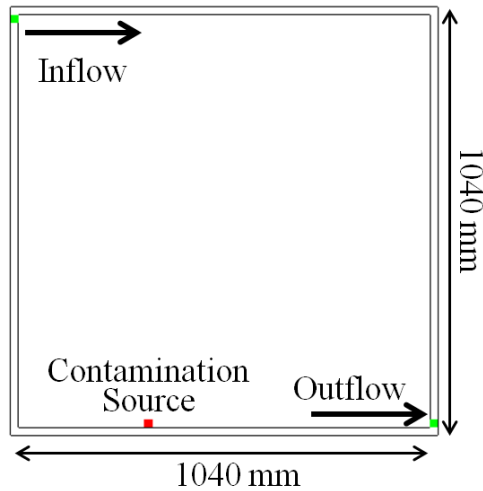


Fig.3 Objective room 2.

Flow field with circulation and temperature distribution

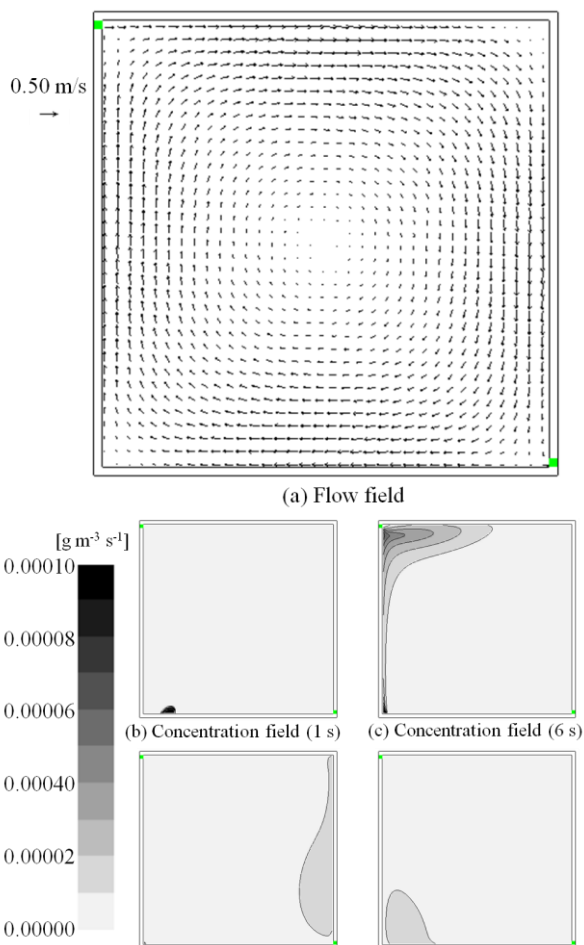


Fig.4 Calculation result (flow and concentration fields)

4.VCA 法の適用結果

4.1 流れの循環・温度分布のない流れ場 (対象空間 1)

対象空間 1 について、観測点の配置を Fig.5 に示した。観測点は、対象空間に均等に配置した。また、VCA 法の適用結果を Fig.6 に示した。

Fig.6(b)より、修正ベクトル ϕ は汚染放出源の近辺で大きな値を取ることが確認できる。また、Fig.2(b)-(e)と Fig.6(c)-(f)を比較すると、VCA 法による修正結果では実際よりも汚染物質が広範囲に広がっているものの、高濃度部分の分布はおおむね正解値と同傾向の分布となっている。

VCA 法による修正結果がこのような歪な濃度分布になるのは、修正が観測点近傍で強くかかるためであると考えられる。すなわち、観測点近傍では大きな正または負の修正がかかり、観測点の間の領域では小さな修正しかかからないため、観測点近傍で勾配の大きな分布が生じてしまうのだと考えられる。

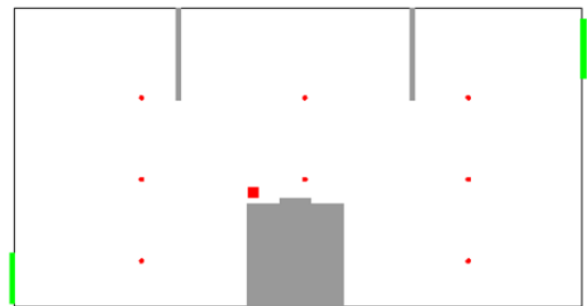


Fig. 5 Observation points.(Objective room 1)

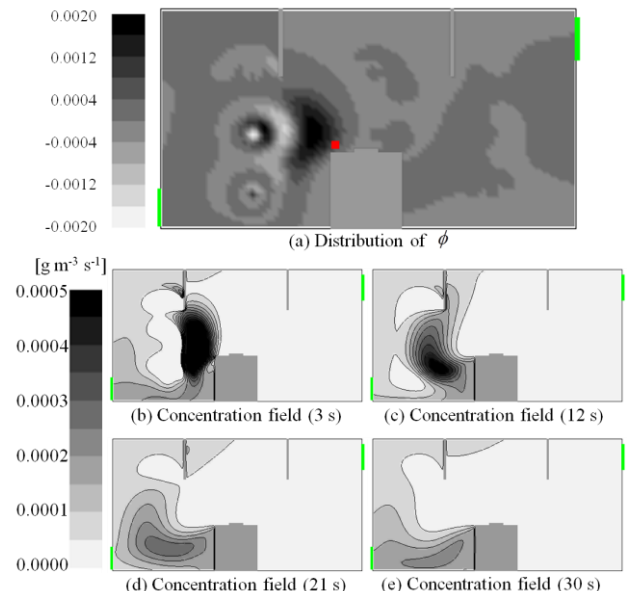


Fig. 6 VCA results (Objective room 1)

4.2 流れの循環・温度分布のある流れ場 (対象空間 2)

対象空間 1 について、観測点の配置を Fig.7 に示した。Zhang らは、汚染物質放出後のある時刻の濃度分布が完全に既知であるとし、その時刻の濃度分布から汚染放出源の位置

を推定しているが、本研究では、対象空間の四隅にある観測点位置の濃度が複数の時刻で既知であるとみなしている。また、VCA法の適用結果を Fig.8 に示した。

Fig.8(b)をみると、修正ベクトル ϕ は汚染放出源の近辺に小さなピークが見られるが、対象空間右側でさらに大きなピークが生じている。それらの ϕ の影響により、濃度分布は実際の濃度分布から大きく離れた値を取っている。また、濃度分布は室内全体で実際の濃度分布よりもかなり高い値を取っている。

このような修正ベクトル ϕ の分布を取った原因として、観測点が比較的流れの弱い点に配置されていたため、数値計算結果と観測データの誤差情報の伝搬がうまく行われていないことが考えられる。

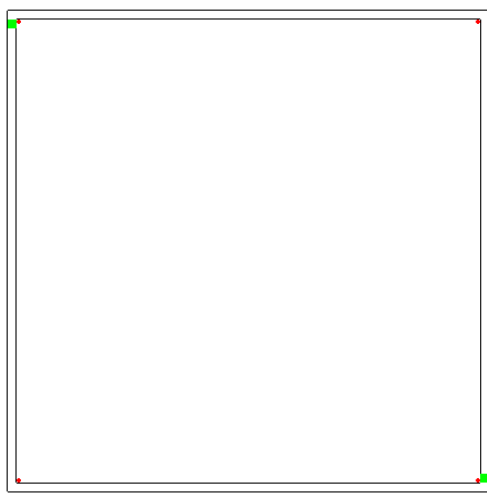


Fig.7 Observation points.(Objective room 2)

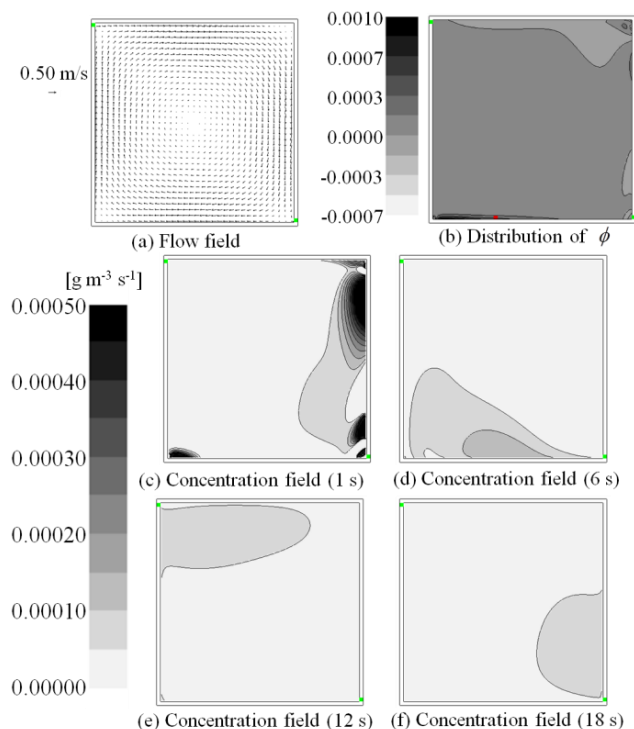


Fig. 8 VCA results (Objective room 2)

5. 結論

本研究では、2次元の定常流れ場を対象に、瞬時汚染放出源の放出源推定を行うため、データ同化法の一つである連続的データ同化法(Variational Continuous Assimilation method: VCA法)の適用を行った。

VCA法の適用のために用いる観測データは数値解析を用いて作成し、観測誤差はないものと仮定した。

対象空間として、比較的単純な流れ場・一様な温度場を持つ場合(対象空間1)と、流れの循環と温度分布をもつ場合(対象空間2)の2つの場合を設定し、それぞれに対してVCA法の適用を行った。

対象空間1については、VCA法の適用により放出源位置、濃度分布について推定ができることが確認された。他方、対象空間2については、放出源位置、濃度分布を精度よく推定することはできなかった。その原因として、観測点位置の設定が不適切であるそのため、VCA法の有効性は対象空間の流れ場や観測データの用い方に依存する可能性が示唆された。しかし、VCA法の有効性がどのような条件に依存するのかを知るためには、更なる検討を要する。

参考文献

- (1) X. ZOU, I. M. NAVON, F. X. LEDIMET "An optimal nudging data assimilation scheme using parameter estimation" Q. J. R. Meteorol. Soc (1992), 118, 1163-1186
- (2) FRANÇOIS-XAVIER LE DIMET, OLIVIER TALAGRAND, "Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects" Tellus 38A(1986), pp.97-110.
- (3) Akira Kondo, Hiroshi Nakagawa, Akikazu Kaga, Yoshio Inoue, "Understanding of flow and scalar fields by combining Measured Data and CFD," ASHRAE Transaction 116(2010), issue 2, pp. 318-328
- (4) Tengfei (Tim) Zhang, Hongzhu Li, Shugang Wang, "Inversely tracking indoor airborne particles to locate their release sources" Atmospheric Environment 55 (2012) 328-338
- (5) 加賀昭和, 塩田卓, 近藤明, 井上義雄, 山口克人, "測定値とCFDの融合のための費用関数法の非定常流れ場への適用," 日本機械学会論文集(B編) 682 (2003), pp. 1307-1312.
- (6) Tengfei Zhang, Qingyan (Yan) Chen, "Identification of Contaminant Sources in Enclosed Spaces by a Single Sensor," Indoor Air 17(2007), pp. 439-449.
- (7) John C. Derber, "A Variational Continuous Assimilation Technique" Monthly Weather Review 117(1989), pp. 2437-2446.
- (8) 松尾智仁, 近藤明, 久野貴大, 井上義雄, "VCA法による室内汚染物質の放出源推定" 第26回数値流体力学シンポジウム