

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2報) 汚染物質の瞬時放出源を持つ2次元オフィス空間

Development of the method to estimate indoor environment using Variational Continuous Assimilation method
(part2) Case study of two-dimensional office space with instantaneous contamination sources.

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 嶋寺 光 (大阪大学) 正会員 塩地 純夫 (ダイキン工業)
正会員 小松 彰 (ダイキン工業)

Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Sumio SHIOCHI*² Akira KOMATSU*²
*¹ Osaka University *² DAIKIN INDUSTRIES, LTD.

In order to determine the contamination sources whose location and intensity are unknown, the variational continuous assimilation (VCA) method was used. The governing equation of the VCA method is defined by adding the correction term to linearized governing equation of the Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The correction term is determined by minimalizing the errors between CFD calculations and observed data. This term is considered as source term from the analogy of the form of mass conservation equation. Numerical experiments were conducted to validate the VCA method. In the experiments, the method was applied to two-dimensional steady flow, and the unsteady-state calculation was performed with instantaneous contamination sources, and it was confirmed that the VCA method can determine the location and the intensity of the unknown source.

はじめに

本報では第1報に引き続き、連続的データ同化法(VCA法)を用いて、未知の境界条件を含む室内環境の推定手法の開発を検討する。VCA法とはDerber(1989)が開発した手法であり、時空間的に分布する観測データを用いて数値解析の支配方程式を修正する手法である。

本報では、VCA法による数値解析の修正を放出源の位置・強度の推定へと応用する。そのため、質量保存式とのアナロジーから修正項を汚染物質の生成項とみなした。

VCA法を用いた未知の室内汚染源の推定の妥当性を評価するため、数値シミュレーションを行った。シミュレーションは簡単のために2次元定常流れ場を対象とし、汚染物質が瞬間的に放出される場合について、汚染源の位置、強度、放出された汚染物質濃度分布の時間変化を推定した。

1. 連続的データ同化法(VCA法)の概要

1.1 基本式

VCA法は数値解析の支配方程式に修正項を付け加えることで、数値解析の支配方程式を修正する。離散化された数値解析の支配方程式は、計算値ベクトル Ψ と変換行列 A^n を用いて式(1)のであらわすことができる。

$$\Psi^n = A^n \Psi^{n-1} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 n は第 n 番目の計算タイムステップを意味する。

VCA法では、式(1)の各計算ステップについて、支配

方程式に修正項 $\lambda^n \phi$ を付け加え、式(2)に示すように数値解析を補正する。

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

ここで λ^n は時刻によって決定する正方行列である。 ϕ は空間によって決定する修正ベクトルである。通常、 λ^n は計算条件に応じて適当に定めるため、VCA法では観測値と計算値の間の誤差を最小化するような ϕ を繰り返し計算によって求める。

観測値と計算値の間の誤差は、評価関数 I を用いて式(3)で定義される。

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

ここで $\tilde{\Psi}$ は観測値ベクトルであり、 T は行列の転置を意味する。評価関数 I を最小化するような ϕ を導出するため、 I の勾配 $\partial I / \partial \phi$ を計算し、最急降下法を用いた繰り返し計算をおこなう。これにより、観測値との誤差が最も小さくなるように数値解析を修正するための修正ベクトル ϕ が求められる。なお、修正行列 λ^n の決定については、2.1節で詳述する。

1.2 放出源推定への応用

VCA法による数値解析の修正を放出源推定に応用するため、本研究ではVCA法の基本方程式と物質の保存

則の間のアナロジーから、修正項の分布と強度を放出源の分布と強度に読み換えた。

なお、操作の内容については第1報に詳述している。

2. 数値シミュレーションによる検証

2.1 対象領域

VCA 法による放出源推定の妥当性を確認するため、2次元オフィスモデルを対象に VCA 法を適用した。対象としたのは図1に示す2次元オフィスモデルである。モデルは吹出口と吸込口を1つずつ持つ。図の中央には障害物としてテーブルがあり、テーブルの上には5つのパソコン熱源および汚染放出源がある。また、天井には4つの証明熱源がある。また、室内の流れ場、温度場、濃度場には定常条件を仮定した。吹出口、吸込口、熱源、汚染放出源の詳細は表1に記した。

本報では、修正項 ϕ を生成項に読み替えている。そのため、修正の時間分布を意味する n は生成項が存在する時刻 n において単位行列に、それ以外の時刻においては零行列であるとする。



図1. 対象領域

2.2 シミュレーション条件

シミュレーションでは、境界条件のうち放出源をなしと仮定しておこなった数値解析結果に対し VCA 法を適用し、どの程度の放出源の位置・強度を再現できるかを検証した。

また、VCA 法による修正の精度には同化に用いる観測データの位置が大きな影響を持つため、複数の観測データセットを用いて VCA 法の適用を行い、その結果を比較することで観測データの位置と修正結果の関係を考察する。観測データの作成方法については2.4節で詳述する。

2.3 数値解析に用いたモデル

数値解析に用いる支配方程式の離散化には SIMPLE 法を、乱流モデルには標準 k-εモデルをそれぞれ用いた。

また、CFD 計算の境界条件を表1に示した。

2.4 観測データの作成

本研究では観測誤差やモデル誤差の影響を排除するため、データ同化に用いる観測データにも数値解析の結果を用いた。

表1に示したすべての境界条件を用いておこなった数値解析の結果を『正解値』とし、『正解値』のうち一部のデータを抜き出したものを観測値としてデータ同化に用

いた。観測値の存在する位置を『観測点位置』と呼ぶとし、図2(a)~図2(c)に観測点位置の例を示す。観測は、放出開始から60秒間、1.0秒間隔でおこなわれる。

一方、VCA 法による修正対象として、表1に示した境界条件のうち、放出源をなしと仮定した場合の数値解析の結果を計算値とした。

以降、観測点位置 A,B,C を用いて VCA 法を適用した結果を、それぞれ VCA 結果 A,B,C と呼ぶ。

表1. 境界条件

吹出し口条件	吹出し風速:0.50 m/s 吹出し温度 288 K(15°C)
吸込口	自由境界
熱源	机上熱源:各 40 W 天井熱源:各 40 W
汚染放出源	机上放出源:各 48 g/s 放出時間:1.0 s

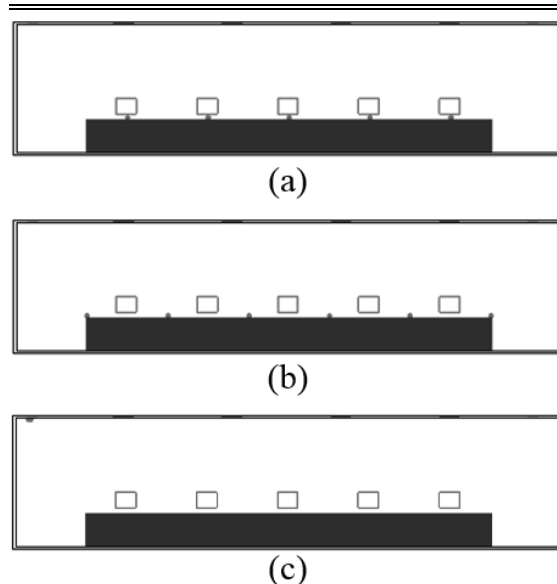


図2 (a)観測点位置 A (b)観測点位置 B (c)観測点位置 C

3. 結果・考察

3.1 流れ場、温度場

数値解析によって得られた流れ場、温度場をそれぞれ図3(a)、図3(b)に示す。図3(a)より、室内を大きく循環するような流れが構成されていることがわかる。テーブルの右側では、テーブルを回り込むように強い上向きの流れができており、右端の熱源/放出源を回り込むような流れとなっている。また、テーブルの左側には流れの停滞した領域がある。図3(b)をみると、室内はおおむね 291~294K の温度分布となっている。テーブルの周辺では、机上熱源により発生した熱が左に流されるため、左に行くほど温度が高くなる分布となっている。天井熱源のた

め、天井付近は極めて温度が高くなっている。

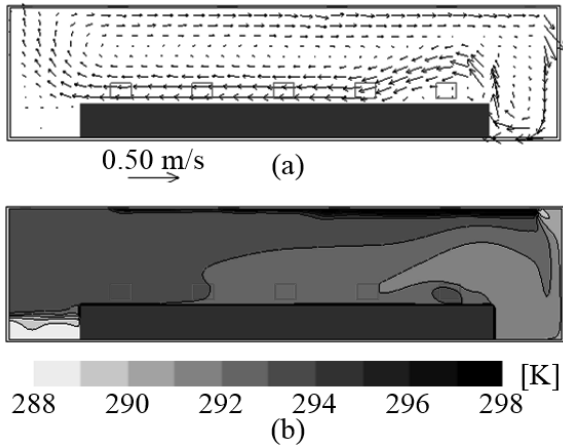


図3 数値解析結果 (a)流れ場 (b)温度場

3.2 正解値濃度場

『正解値』の濃度場を図4に示す。図4を見ると、図に四角で示された汚染物質放出源から発生した汚染物質は、拡散しつつ流れに沿って吸い込み口へと輸送されることがわかる。左側の4つの放出源から放出された汚染と異なり、右端の放出源から発生した汚染はその場に滞留する傾向がある。これは、右端の放出源が比較的流れの弱い位置に位置しているためだと考えられる。

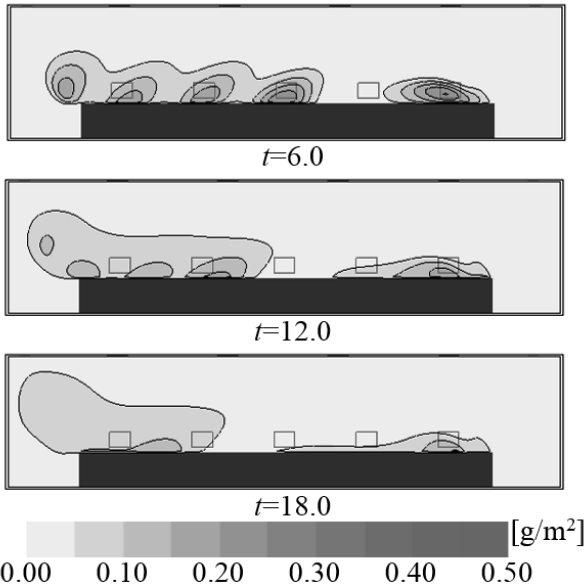


図4 『正解値』濃度場 (放出開始から t 秒後)

3.3 VCA 法による推定結果

3.3.1 濃度場

VCA 法により推定された濃度場を図5～図7に示す。図5と図4を比較すると、VCA 結果 A では、左端の放出源から放出される汚染が再現できていないが、その他の汚染源から放出される濃度分布についてはよく再現

できている。これは、左端の放出源より風下に観測点が存在せず、放出された汚染物質が検知できないためだと考えられる。左端の放出源より風下にも観測点が存在する VCA 結果 B においては、左端の放出源からの濃度分布も再現できている。VCA 結果 C では、汚染が実際よりもかなり広く薄く広がっている。これは、観測点が吸い込み口近傍にしか存在しないため、検出される濃度がすでに拡散に時間的、空間的になだらかに分布していることを反映していると考えられる。

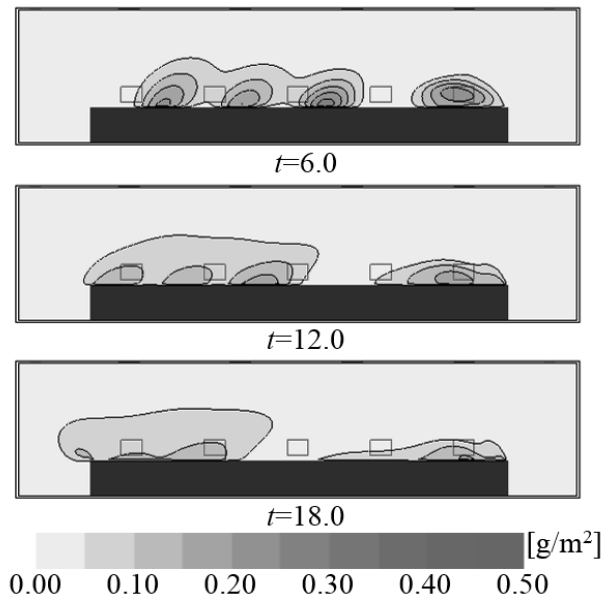


図5 VCA 結果 A の濃度場 (放出開始から t 秒後)

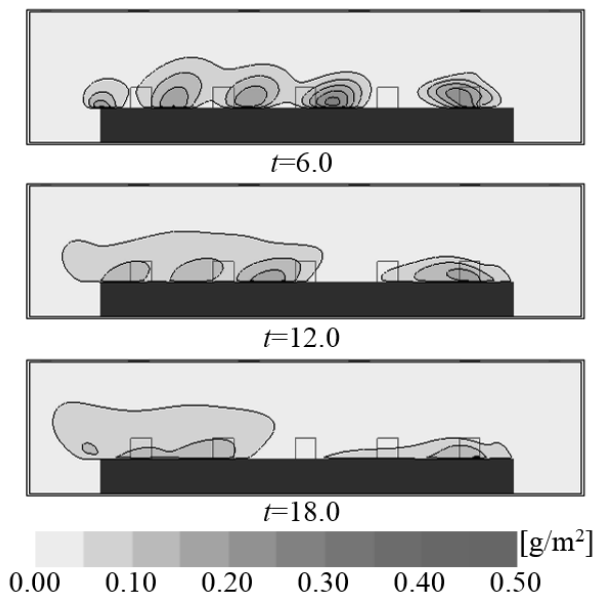


図6 VCA 結果 B の濃度場 (放出開始から t 秒後)

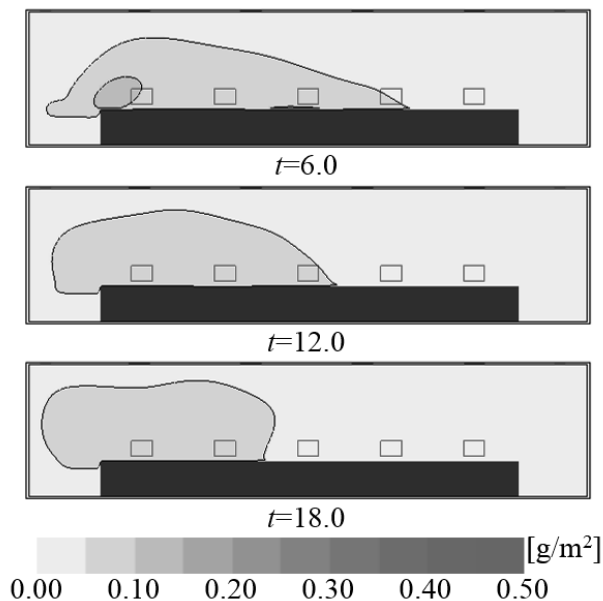


図7 VCA 結果Cの濃度場 (放出開始から t 秒後)

3.3.2 放出源位置

VCA 法により推定された放出源位置を図 8(a)~(c) に示す。3.3.1 で述べたように、VCA 結果 A では観測点の風下にある左端の放出源を除いて、おおむねよく再現できている。VCA 結果 B では、すべての放出源を再現できている。VCA 結果 C では、流れに沿って放出源が広く分布しており、放出源分布が再現できていない。また、右端の放出源が再現できていない。これらは、放出源から観測点までの距離が遠いため、拡散により観測される濃度のピークがつぶれてしまうためだと考えられる。

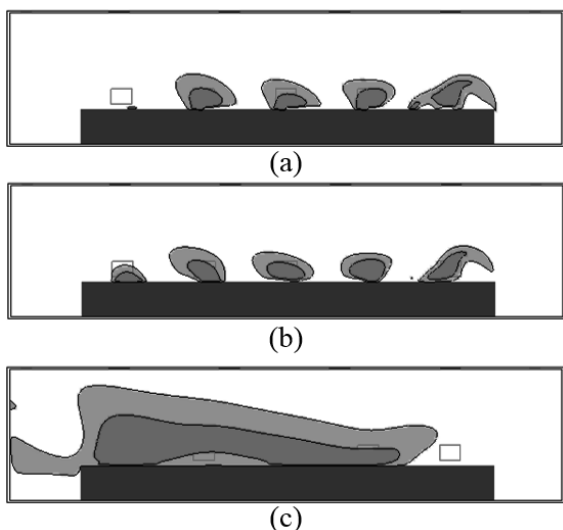


図8 VCA 法により推定された放出源位置
(a)VCA 結果 A (b)VCA 結果 B (c)VCA 結果 C

3.3.3 放出源強度

VCA 法により推定された放出源強度を図9に示す。

図9より、いずれの結果でも、放出強度はほぼ再現できている。VCA 結果 A,B でやや過小評価となっているのは、観測点が放出源より低い位置にあるため放出源から放出された汚染物質の一部が検出できていないためだと考えられる。VCA 結果 C でやや過大評価となっているのは、正解値よりも放出源が広がっているため、濃度のピークを再現する際に、ピークの周囲が正解値よりも高くなってしまったためだと考えられる。

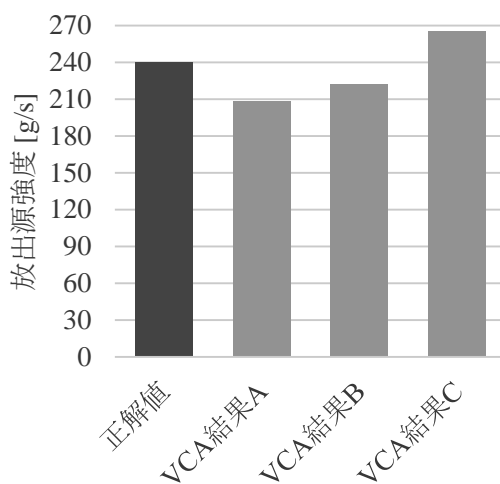


図9 放出源強度の推定結果

4. 結論

本報では、連続的データ同化法(VCA 法)を用いて未知の汚染放出源の位置、強度、濃度分布の推定を行った。推定は複数の観測データを用いて行い、それぞれの結果を比較した。

推定の結果、放出源強度については、観測点が放出源の風下にある場合には高い精度で推定ができた。

放出源位置については、放出源の風下に観測データがあり、また放出された濃度のピークが観測できた場合に、高い推定精度を得ることができた。

濃度分布については、放出源位置と同様、放出源の風上に観測点があり、またピークが観測できた場合に比較的精度良く推定ができた。

以上の結果より、観測点が適当な場所に配置されていれば、未知の放出源について妥当な精度で推定ができることが示唆された。

参考文献

- 1) Derber, J. C., 1989 "A Variational Continuous Assimilation Technique", *Monthly Weather Review*, 116, 977-1000