

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1報) 汚染物質の連続排出源を持つ2次元オフィス空間

Development of the method to estimate indoor environment using Variational Continuous Assimilation method

(part1) Case study of two-dimensional office space with continuous contamination sources.

正会員 ○小松 彰 (ダイキン工業) 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)

Akira KOMATSU*² Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Sumio SHIOCHI*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 steady-state calculation was performed with continuous contamination sources, and it was found that the intensity of the unknown source was determined successfully by the VCA method with adequate observed data, but the location was difficult to evaluate because it was indetermination where the observed contamination was released..

はじめに

室内環境を適切に管理するためには、室内流れ場や温度場、濃度場を正確に把握する必要がある。室内環境を推定する手法には、数値解析(Continuous Fluid Dynamics: CFD)と実測の2つがある。しかし、CFDには境界条件の簡略化やモデル化にともなう近似、離散化による誤差が存在し、また境界条件が未知である場合にその影響を正確に推定することができない。他方、実測には測定誤差や欠測が存在し、また室内全域を測定することは観測コストの点から現実的ではない。そのため、いずれの方法を用いる場合も、未知の境界条件を含む室内環境を正確に推定することは困難であると考えられる。

本研究では、未知の境界条件を含む室内環境を正確に推定するための手法として、データ同化法を提案する。これは、観測データを数値解析に融合することにより、より精度の高い数値解析を行うものである。

第1報では、室内環境のうち、流れ場や温度場への影響がないために推定が容易な濃度場を対象とし、未知の汚染物質放出源を含む室内濃度場、放出源の位置、強度を推定した。

本研究では、Derber(1989)が開発した連続的データ同化法 (Variational Continuous Assimilation method :VCA 法)を用いる¹⁾。VCA法は離散化された数値解析の支配方程式に修正項を導入することで数値解析を修正する手法で、

修正項は数値解析と観測値の誤差を最小化するように決定される。VCA法は支配方程式を修正するため、他のデータ同化法に比べて、合理的な場が得られやすいという特徴を持つ。

また、本研究ではVCA法を放出源の位置・強度の推定へと応用するため、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2次元定常流れ場を対象とし、汚染物質が定常的に放出される場合について、複数の観測データを用いて汚染源の位置、強度、放出された汚染物質濃度分布を推定し、その結果を比較した。

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 を用いて式(1)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、添え字 n は第 n 番目の計算タイムステップを意味する。すなわち、式(1)はある時刻 $n-1$ における計算値

ベクトルを用いて、次の時刻 n における計算値ベクトルを求める計算を意味している。

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)により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を用いて、修正項を以下のように読み替える操作を行った。

物質の排出強度が定数で与えられるとき、物質の保存則は式(4)で表現される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla C) + S \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 C は濃度、 v は速度ベクトル、 Γ は拡散係数、 S は生成項である。

式(3)を線形化することで、式(5)を得る。

$$C^n = A^n C^{n-1} + S \Delta t \quad \dots\dots(5)$$

式(5)と式(2)を比較すると、修正項 $\lambda^n \phi$ は生成項 $S \Delta t$ と同型であることがわかる。そのため、本研究では修正項を生成項とみなし、修正項の位置・強度を放出源の位置・強度と読み換えることで放出源推定を行う。

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、図1に示す2次元オフィスモデルを対象にVCA法を適

用した。対象領域には吹出口と吸込口のほか、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。

定常場においてはVCA法による修正にも時間変化が存在しないため、修正項 $\lambda^n \phi$ のうち、修正の時間分布を意味する λ^n はすべての時刻 n において単位行列になる。



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、境界条件から放出源をなしとしておこなった数値解析結果に対してVCA法を適用し、放出源の位置・強度をどの程度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。

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 40W 天井熱源:各 40 W
汚染放出源	机上放出源:各 48 g/s

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。

一方、VCA 法による修正対象として、表 1 に示した境界条件から、放出源をなしとしたものを用いておこなった数値解析の結果を計算値とした。観測点位置 A は各放出源の中央下に、位置 B は各放出源を挟む位置に、位置 C は吸込口に観測点を配置している。

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。

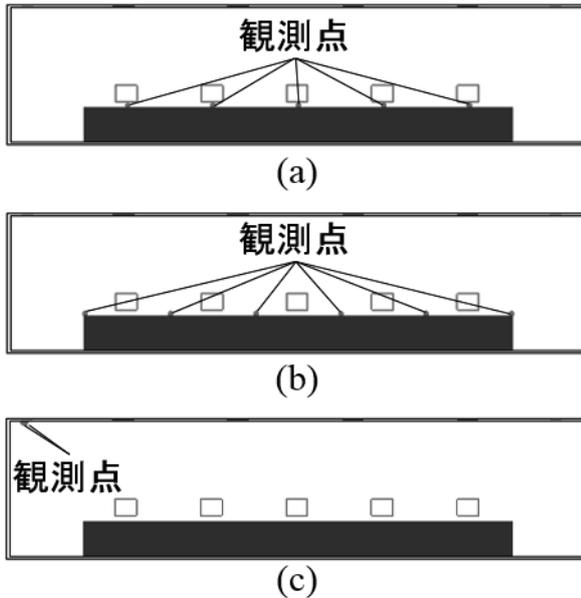


図 2 (a)観測点位置 A (b)観測点位置 B (c)観測点位置 C

3. 結果・考察

3.1 流れ場、温度場

流れ場、温度場については、計算値、『正解値』ともに同様であり、それぞれ図 3(a),(b)に示した。

図 3(a)より、吹き出し口から時計回りに室内全体を大きく循環するような流れが形作られている。机上ではほぼ右から左への流れとなっているが、机の右端では、机にぶつかった流れが上に大きく向きを変えられているため、右端の熱源/放出源を迂回する流れができています。

温度場は、流れ場に沿って右から左に向かって温度が高くなる勾配を持っている。室内のほとんどの領域は 291～294K の範囲に収まっている。

3.2 正解値濃度場

『正解値』の濃度場を図 4 に示す。温度同様、おおむね右から左に向かって高くなる分布であるが、放出源位置から風下に向かって濃度のピークがみられる。特に、流れの弱い右端放出源近傍では濃度のピークが大きい。

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(a)～(c)に示す。

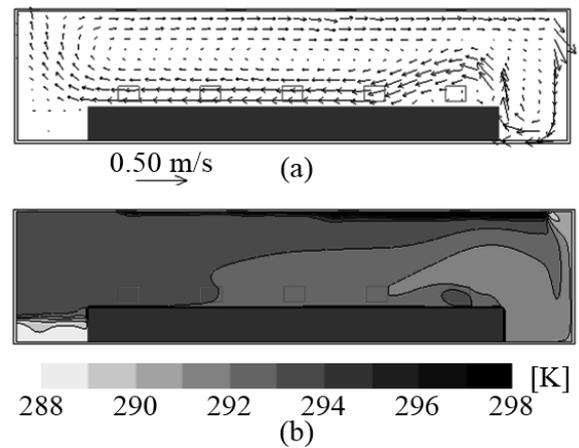


図 3 数値解析結果 (a)流れ場 (b)温度場

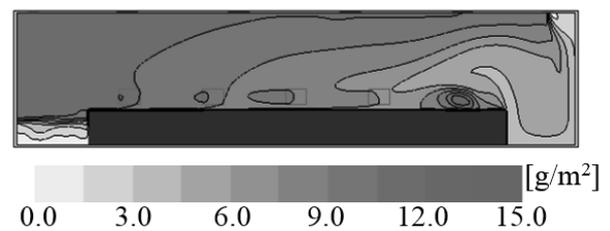


図 4 『正解値』濃度場

いずれの結果も、特に部屋の左側で濃度を過大評価する結果となった。また、VCA 結果 A を除いて放出源位置近傍での濃度のピークをうまく再現できなかった。

VCA 結果 A では、右端放出源のピークがやや小さいながら再現できており、また室内全体の濃度分布も、他の 2 つの結果に比べてよく再現できている。

VCA 結果 B では、右端放出源のピークは小さいながら確認できる。また、机の左端にもピークがみられるが、これは観測点が机上左端にあるため、左端放出源の濃度ピークを実際よりも左側に再現してしまったものだと考えられる。

VCA 結果 C では、濃度のピークは見られない。その一方で、室内の濃度自体は他の結果よりも過大評価となっている。これは、濃度のピークが捉えられなかったため、観測された濃度に対して室内全体の濃度を上げるような修正を行ったためだと考えられる。

3.3.2 放出源位置

VCA 法により推定された放出源の位置を図 6(a)～(c)に示す。

いずれの結果でも、観測点近傍とその風上側で強く修正がかかっている。また、結果 A、結果 B では、観測点より風下には修正項はほとんど分布していない。これは、観測点で観測される濃度は通常観測点より風上側で発生

したものだと考えられるからであろう。

VCA 結果 A,B について、結果 A で左端放出源が再現できていないのは、前述のように放出源より風下に観測点が存在しないためだと考えられる。また、放出源の間でも大きな修正項が分布しているのは、定常条件では観測された濃度が発生した位置と時間の両方が未知であるため、放出源の位置が特定できないためだと考えられる。

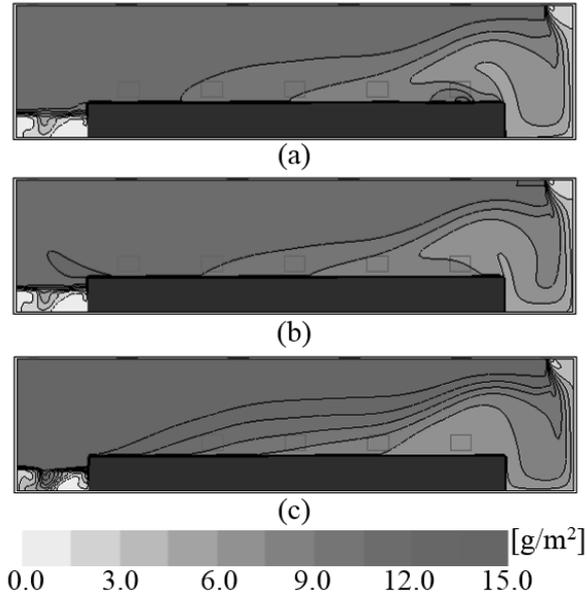


図5 推定濃度場

(a)VCA 結果 A (b)VCA 結果 B (c)VCA 結果 C

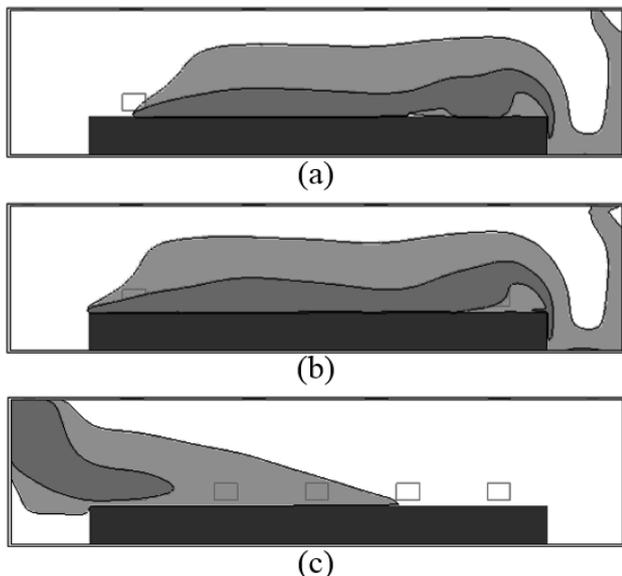


図6 VCA 法により推定された放出源位置

(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の強度を図7に示す。

VCA 結果 A,B では、放出源強度がよく推定できている。結果 A でやや過小評価となっているのは、左端放出源の風下側に観測点が存在しないため、放出された濃度の一部が検出されていないためだと考えられる。結果 B ではやや過大評価となっているが、これは実際の放出源より広い範囲に観測点が分布しており、観測点における濃度に寄与しない位置に過剰な修正が及んでいるためだと考えられる。結果 C では、放出源強度が著しく過大評価されているが、これも結果 B と同様、観測点の濃度に寄与しない位置で過剰な修正がはたらいたためだと考えられる。結果 C において観測点は流れの合流点に置かれており、観測された濃度がどこから来たものか推定が難しいため、観測点位置の推定ができず、それによっても強度の推定精度も低下したのだと考えられる。

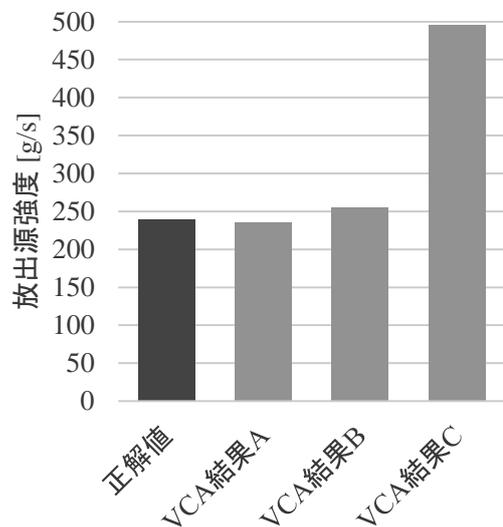


図7 放出源強度の推定結果

4. 結論

本報では、連続的データ同化法(VCA 法)を用いた未知の汚染放出源の位置、強度、濃度分布の推定のシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果、観測点が放出源の風下近傍にある場合には、放出強度は比較的精度よく推定できることが分かった。また、観測点が放出源近傍にある場合は濃度分布も比較的精度良く推定できた。しかし、どのような観測点配置であっても、放出源位置を推定することはできなかった。これは、定常条件では観測された汚染物質の放出時刻と放出位置がともに未知であるためだと考えられる。

参考文献

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