

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3報) オープンソース CFD ライブラリ OpenFOAM への VCA 法の組み込み

Development of the Method to Estimate Indoor Environment using Variational Continuous Assimilation Method

(Part 3) Incorporation of VCA Method into an Open Source CFD Library OpenFOAM

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 this study, the Variational Continuous Assimilation (VCA) method was incorporated into OpenFOAM, an open source CFD library. In order to validate the method, a numerical experiment was performed. In the experiment, the location and the intensity of unknown contamination source in two-dimensional steady-state flow, and the concentration field were estimated by the VCA method. As a result, it was confirmed that the method can estimate the location and intensity of the contamination source, and the concentration field.

はじめに

室内環境を適切に管理するためには、室内環境を適切に把握し、室内環境を理想的な室内環境に近づけるために空調機器等の動作を制御する必要がある。本研究では、連続的データ同化法 (Variational Continuous Assimilation method: VCA 法) を用いて観測データを数値解析 (CFD) に同化することにより、より精度よく室内環境を把握することを目的としている。本研究で用いる VCA 法は Derber(1989)¹⁾ の VCA 法に修正を加えたものである。

前報では、VCA 法を用いて、2次元定常流れ中に発生した未知の放出源による汚染物質の放出について、汚染物質の濃度分布、および放出源の位置、放出強度の推定をおこなった。推定の結果、適切な位置で観測データを取得することで、汚染物質の濃度分布、および放出源の位置、強度が推定できることが示唆された^{2,3)}。

そこで本報では、VCA 法による室内環境の推定をより高度に、また多用途に行うため、VCA 法のアルゴリズムをオープンソース CFD ライブラリである OpenFOAM のモジュールとして作成し、OpenFOAM の既存のライブラリ、ソルバとの連携を可能にした。また、作成した VCA 法適用モジュールを用いて、実際に2次元定常流れにおける未知の放出源による汚染物質の放出について、その濃度分布、放出源位置、強度の推定をおこなった。

1. VCA 法の概要

1.1 基本式

VCA 法とは変分法の一つであり、汎関数を定義し、その汎関数の最小化を行うことで解を導く。VCA 法における汎関数は評価関数と呼ばれ、CFD 結果と観測データの

間の誤差により定義される。定義された評価関数を最小化するため、VCA 法では CFD モデルの支配方程式に修正項を付け加える。この修正項の値を調整することで CFD モデルを修正し、CFD 結果と観測データの間の誤差を最小化する。

CFD モデルの支配方程式は、時間的に離散化された形で、式(1)のようにあらわされる。

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

ここで、添字 n は第 n 番目の計算タイムステップであり、 Ψ は計算値ベクトルである。したがって、式(1)はある時刻 $(n-1)$ における計算値ベクトルに線形行列 A を与えることで、次の時刻の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)に修正項を付加した式(2)を用いる

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

ここで、 λ は修正の時間分布を意味する行列であり、 ϕ は修正の空間分布を意味するベクトルである。通常、 λ は既知であるとみなし、VCA 法では、評価関数を最小化する ϕ の値を探索する。

VCA 法の評価関数を、式(3)であらわす。

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

ここで、 p は第 p 回目の観測タイムステップであり、 $\tilde{\Psi}$ は観測値ベクトルである。なお、評価関数の算出には、観測データの存在する位置、時刻のみが用いられる。

VCA 法は、式(3)に式(2)を代入し、両辺を ϕ について微

分することで評価関数の勾配を求め、最急降下法を用いて評価関数を最小化するベクトル ϕ を導く。

1.2 放出源推定への応用

本研究では、VCA 法を放出源推定へと応用するため、以下の式(4)~式(7)に示す要領で修正項と物質の保存式における生成項を関連付けた。

物質の放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。

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

ここで、 Δt はタイムステップである。

式(5)に修正項を付加することにより、式(6)を得る。

$$C^n = A^n C^{n-1} + S \Delta t + \lambda^n \phi \quad \dots\dots(6)$$

以下、変換行列 A は正しいと仮定する。

ここで、実際の放出強度が S であるのに対し、誤った放出強度 S_{false} を用いて計算をおこなったとする。VCA 法の適用することで、放出強度の誤差が修正項の働きにより打ち消されたとすると、式(7)を得る。

$$C^n = A^n C^{n-1} + S_{false} \Delta t + \lambda^n \phi_{correct} \quad \dots\dots(7)$$

式(6)から式(7)を引くと式(8)を得る。

$$0 = (S - S_{false}) \Delta t + \lambda^n (\phi - \phi_{correct}) \quad \dots\dots(8)$$

式(8)において、放出強度 S が正しい値であるならば、修正を与える必要はないため、 $\phi=0$ である。したがって、 $S_{false}=0$ のとき、式(9)を得る。

$$0 = S \Delta t - \lambda^n \phi_{correct} \quad \dots\dots(9)$$

すなわち、

$$\lambda^n \phi_{correct} = S \Delta t \quad \dots\dots(10)$$

式(10)より、1 タイムステップあたりの修正量 $\lambda^n \phi$ は、1 タイムステップあたりの放出強度 S に等しい。

したがって、真の放出強度 S が未知である場合も、放出強度を 0 と仮定して VCA 法を適用することで、得られた修正ベクトル ϕ から放出強度を推定することが可能である。

2. OpenFOAM の概要

本報では、CFD モデルにオープンソース CFD ライブラリである OpenFOAM のバージョン 2.3.0 を用いた。

VCA 法の適用を行うため、OpenFOAM の既存ソルバをもとに、物質 (パッシブスカラ) の輸送を計算する機

能、観測データを読み込んで VCA 法を適用する機能などを追加したソルバを作成した。

3. 数値実験

3.1 数値実験の概要

作成した VCA 法適用ソルバの動作検証のため数値実験をおこなった。数値実験では、室内に未知の汚染物質放出源が発生した場合を想定し、観測点で観測されたデータから汚染物質放出源の位置、放出強度、および汚染物質の濃度分布を推定した。対象領域を図-1に示す。対象領域は室内空間を想定し、2次元に簡略化して用いた。

VCA 法では、計算値に観測データを同化することで推定値を求める。そのため数値実験では、実環境を模擬した CFD モデルを「基準モデル」とし、基準値からの誤差を与えた「計算モデル」に対して、「基準モデル」における濃度分布の一部データを抜き出すことで作成した「観測データ」を同化することで「推定値」を求めた。その後、「推定値」がどの程度「基準モデル」の濃度分布、放出源位置、強度を再現できたか評価することで、VCA 法の精度検証をおこなった。本報では、既知の流れ場に未知の汚染部室放出源が発生した場合を想定しているため、流れ場に関する境界条件は「基準モデル」、「計算モデル」で同じものを用い、濃度に関する境界条件を「基準モデル」と「計算モデル」で変更した。

「基準モデル」、「計算モデル」の境界条件を表-1に示す。

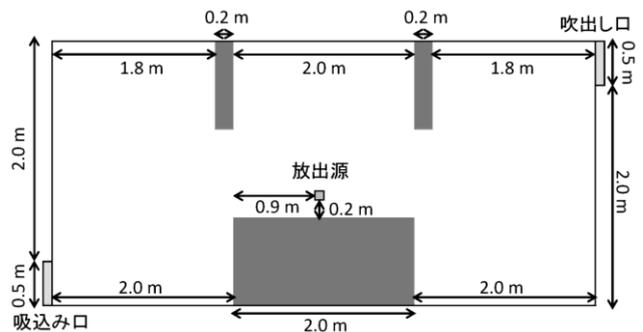


図-1 対象領域

表-1 数値実験の境界条件

	基準モデル	計算値
吹出し風速	0.5 m/s: 一定	0.5 m/s: 一定
吸込み口	自由境界	自由境界
放出源大きさ	0.1 m X 0.1 m	-
放出強度	10.0 g/m ³ /s	-
放出開始時刻	0 sec	-
放出終了時刻	1.0 sec	-

3.2 CFD モデルの概要

数値実験の CFD モデルには、2.で説明したように OpenFOAM を用いた。対象流体は等温非圧縮性定常流れ

を仮定した。計算格子は0.1 m×0.1 mの直交格子とし、計算格子数は約1600である。OpenFOAMでは、対象領域の離散化には有限体積法が用いられる。

本報では、流れ及び濃度分布の計算を行うため、使用する支配方程式は運動方程式、連続の式、物質の保存式である。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ 法を用いた。速度-圧力の解法には、定常計算にはSIMPLE法を、非定常計算にはPISO法をそれぞれ用いた。

数値実験では定常流れを仮定しているため、まずSIMPLE法を用いた定常計算により、定常状態となる速度場、圧力場を求めた。次に、定常となった流れ場、圧力場を初期条件とし、「基準モデル」では汚染物質放出源を与えて濃度分布の計算を行った。以下では、汚染物質の放出が開始された時刻を $t=0$ としている。

3.3 「基準モデル」の計算結果

「基準モデル」の速度分布を図-2に示す。吹出し口から吸込み口へと向かう主流のほか、いくつかの渦が生成している。また、「基準モデル」の濃度分布を図-3に示す。放出された汚染物質は、拡散により急速に濃度のピークを減衰させながら主流に沿って吸込み口に向かって輸送されている。

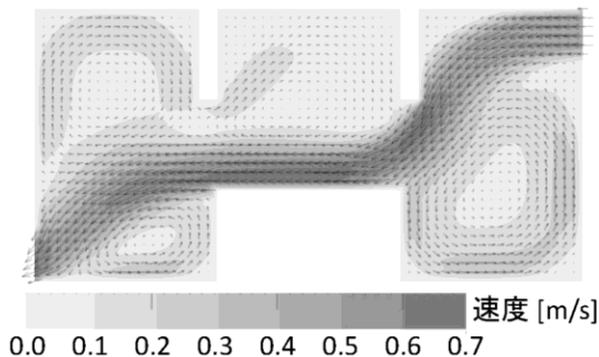


図-2 速度場

3.4 観測データの位置

VCA法に用いる観測データは、「基準モデル」の濃度

分布から観測点における濃度データを抜き出すことで作成した。

「計算モデル」の修正に寄与する観測データを取得するためには、「計算モデル」と「基準モデル」で濃度が異なる地点の濃度を観測する必要がある。本報では汚染放出源位置が未知であると仮定しているため、放出源がどこに発生してもその濃度分布が観測できるよう、吸込み口に観測点を配置した。

また、観測は0.1秒間隔で行われると仮定し、放出開始から放出開始の10秒後までの吸い込み口における濃度分布を、0.1秒刻みで取得した。

3.5 VCA法の適用結果

VCA法の適用により推定された濃度分布を図-4に示す。基準モデルの濃度分布(図-3)と比較すると、放出開始直後の濃度分布が再現できていないが、その後の拡散が進んだ状態における濃度はよく再現できている。

基準モデルにおける濃度分布は、放出直後は拡散による輸送が支配的であるが、拡散により濃度の空間的な勾配が小さくなると、対流による輸送が支配的になる。推定値でよく再現できているのは、対流輸送が支配的となったあとの濃度分布であると考えられる。すなわち、VCA法は対流輸送が支配的な場に対して特に有効であることが示唆される。

また、VCA法により得られた修正項の分布を図-5に示す。式(10)に示したように、修正項の分布は放出源の分布と等価であるとみなせる。したがって図-5はVCA法による放出源分布の推定結果であるとみなせる。図-5を見ると、放出源の強度のピークは机上にあり、おおむね「基準モデル」の放出源位置と一致しているが、「基準モデル」の放出源よりも広い範囲に分布していることがわかる。これは、観測された濃度分布がすでに拡散したものであったため、拡散前的高密度な放出強度が再現できなかったのだと考えられる。また、推定された放出強度はとところどころ負になっているが、これは「基準モデ

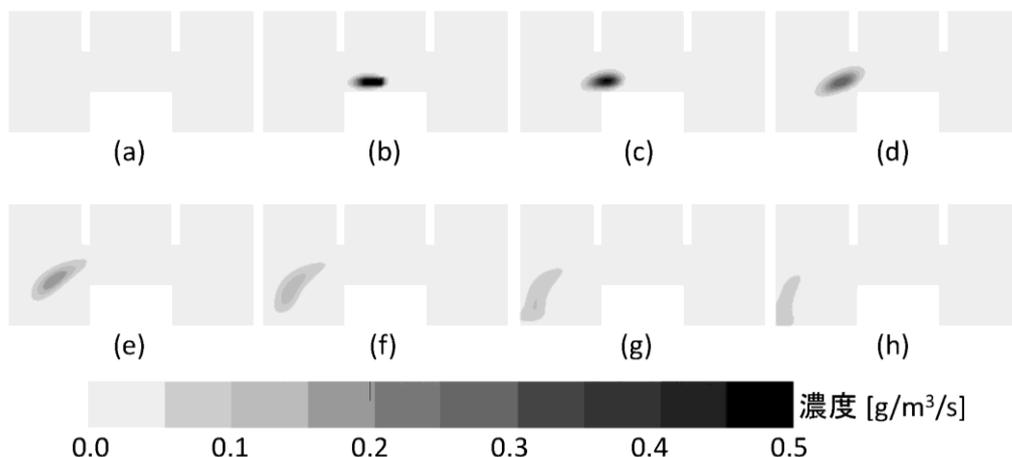


図-3 「正解値」濃度分布

(a) $t=0$ s, (b) $t=1$ s, (c) $t=2$ s, (d) $t=3$ s, (e) $t=4$ s, (f) $t=5$ s, (g) $t=6$ s, (h) $t=7$ s

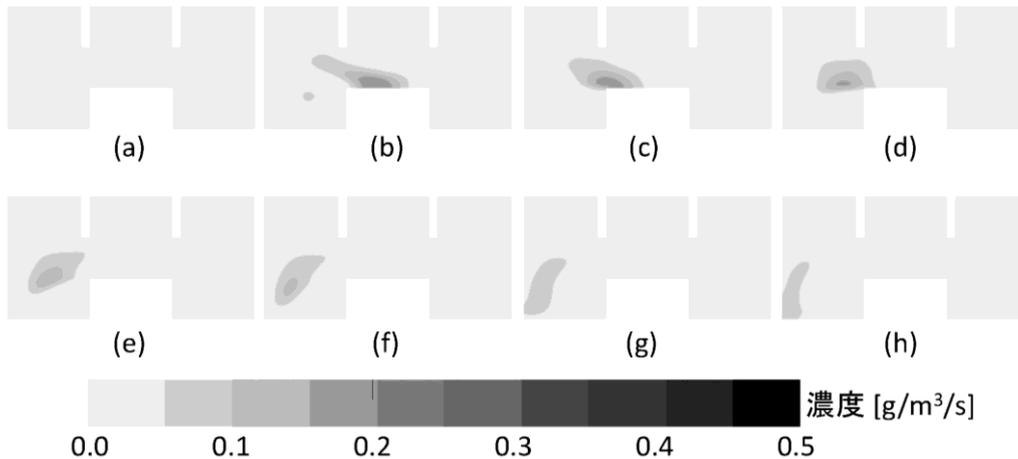


図-4 VCA法による「推定値」濃度分布
(a) $t=0$ s, (b) $t=1$ s, (c) $t=2$ s, (d) $t=3$ s, (e) $t=4$ s, (f) $t=5$ s, (g) $t=6$ s, (h) $t=7$ s

ル」よりも広い範囲に分布した放出源を打ち消すために生じたのだと考えられる。

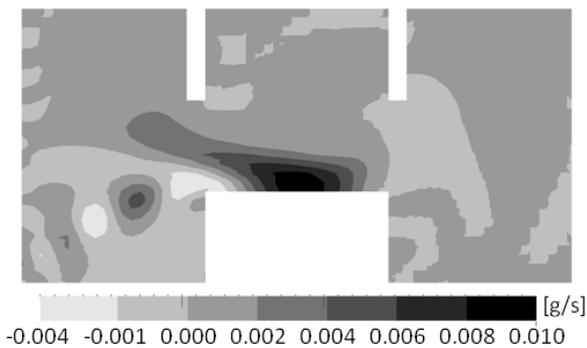


図-5 修正項分布

3.6 濃度分布の誤差

推定された濃度分布の誤差の大きさを評価するため、式(11)により二乗誤差を求めた。

$$E_{est.} = \frac{1}{N} \sum_1^N (\Psi_{cor.}^n - \Psi_{est.}^n)^T (\Psi_{cor.}^n - \Psi_{est.}^n) \quad \dots\dots(11)$$

ここで、 $E_{est.}$ は誤差の大きさをあらわす。 $\Psi_{cor.}^n$ は時刻 n における「基準モデル」の濃度分布を、 $\Psi_{est.}^n$ は「推定値」をあらわす。 N は計算格子数をあらわす。

各時刻における誤差を図-6に示した。比較のため、図にはVCA法を適用しない場合の誤差の時間分布も同時に示した。

VCA法を適用した場合と適用しない場合を比較すると、濃度のピークがあらわれる放出開始の1秒後には2割程度の誤差の減少が見られる。その後、時間の経過とともに誤差の減少は顕著になり、放出の5秒後には誤差はほぼ0になる。計算時刻全体では、VCA法を適用しない場合に比較して、VCA法の適用により約40%の誤差の減少が見られた。

以上より、VCA法の適用により誤差の減少が期待できることが示唆された。

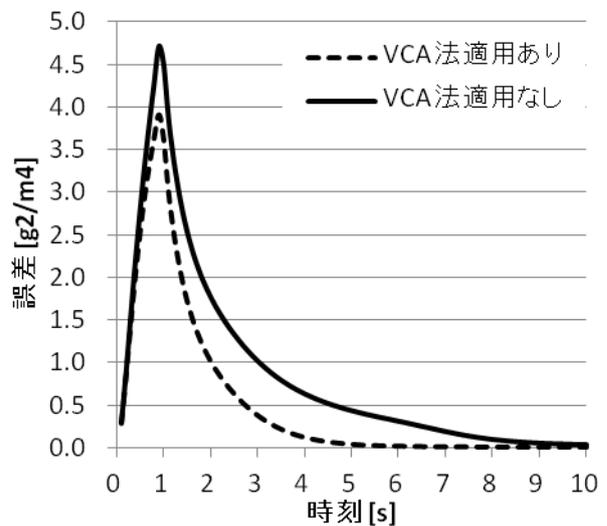


図-6 誤差の推移

まとめ

本研究では、オープンソース CFD ライブラリである OpenFOAM に VCA 法を組み込み、2次元定常流れ中の未知の放出源の位置・強度推定、濃度分布推定を行った

その結果、VCA法の適用により放出源位置がある程度推定可能であることが確認された。また、濃度分布について、とくに拡散が進んだのちの濃度分布は精度よく推定することが可能であることが確認された。

参考文献

- 1) Derber, J. C., 1989 "A Variational Continuous Assimilation Technique", Monthly Weather Review, 116, 977-1000
- 2) 小松彰、松尾智仁、近藤明、嶋寺光、塩地純夫：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、平成 26 年度空気調和衛生工学会大会、秋田、2014
- 3) 松尾智仁、近藤明、嶋寺光、塩地純夫、小松彰：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) 汚染物質の瞬時排出源を持つ 2 次元オフィス空間、平成 26 年度空気調和衛生工学会大会、秋田、2014