

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4報) 制約条件の追加による放出源推定の精度向上

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

(Part 4) Improvement of Source Estimation Accuracy by Applying Constraint Condition

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 this study, the Variational Continuous Assimilation (VCA) method was applied for source estimation of unknown contamination source in two-dimensional steady-state flow field. In order to improve the accuracy of the source estimation, some constraint conditions were determined: (1) The intensity of the contamination source is always positive; (2) The region in which the contamination source located is limited; (3) The contamination source is a point source. The effect of these constraint conditions were assessed by the numerical experiment, and it was found that appropriate constraint condition can improve the accuracy of the source estimation.

はじめに

本研究では、室内環境を適切に管理するため、室内環境を高精度に推定する手法の開発を目的としている。そのための手段として、本研究はこれまで、Derber(1989)の開発したデータ同化法の一つである連続的データ同化法(VCA法)⁽¹⁾を部分的に修正した。^(2,3)また、第3報ではVCA法をオープンソースCFDツールであるOpenFOAMに組み込み、2次元定常流れ中に発生した未知の汚染物質放出源について、VCA法を適用することでその放出源位置、強度と汚染物質濃度分布が推定できることを確認した。

つづく本報では、前報と同様に2次元定常流れ中に発生した未知の汚染物質放出源を対象とし、より精度の良い放出源推定、濃度分布推定のための制約条件について検討を行う。

制約条件には様々な条件を想定することができるが、本報では「汚染物質放出源の放出強度は常に正である」、「汚染物質の発生源が存在する範囲は限定されている」、「汚染物質放出源は点源である」といった条件を検討した。いずれも、一定の物理的合理性や実環境における条件を反映したものである。

本報では、以上の制約条件を付加した場合に、VCA法を適用した放出源推定、濃度分布推定にどのような影響があらわれるか、数値実験により検討した。

1. VCA法の概要

1.1 基本式

VCA法は、CFDモデルの支配方程式に修正項を付け加えることによりCFDモデルを修正する。観測データによく一致するようにCFDモデルを修正するため、VCA法は、観測データとCFDモデルによる計算結果の間の誤差を評価する関数を定義し、その関数を最小化するような修正項を探索する。

CFDモデルの支配方程式、誤差を評価する関数、修正項の定義式を式(1)~(3)に示す。

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

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

$$\phi^{k+1} = \phi^k - \alpha \left. \frac{\partial I}{\partial \phi} \right|_{\phi=\phi^k} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、式(1)の Ψ^n は時刻 n における計算値ベクトルであり、 A は線形な変換行列である。 λ^n は修正の時間分布を表す行列であり、既知とする。 ϕ は修正の空間分布をあらわすベクトルである。式(2)の I は誤差を評価する関数であり、 P は観測回数である。 $()^T$ はベクトルの転置を意味し、チルダ付きの Ψ は観測値ベクトルである。式(3)の k はVCA法の適用ステップであり、 α は最急降下法の勾配を意味する定数である。

式(3)で最急降下法を用いることから明らかであるように、VCA法は繰り返し計算によって徐々に修正項を

最適化していく手法である。

1.2 放出源推定への応用

前報で示したように、既知の流れ場、初期条件を用いて汚染物質の濃度推定を行う場合、修正項の時空間分布は放出源の時空間分布に一致する。そのため、VCA法の適用により得られた修正項の分布を、VCA法により推定された放出源強度の分布であるとみなすことができる。

1.3 制約条件の表現

本報では、「汚染物質の放出強度は常に正である」、「汚染物質の発生源が存在する範囲は限定されている」、「汚染物質放出源は点源である」という3つの制約条件を与える。それぞれの条件の物理的な意味と基本式上の表現を以下に示す。

(1) 汚染物質の放出強度は常に正である

汚染物質の放出強度は、通常正の値を取る。ある地点において放出強度が負であるということは、その地点で汚染物質が消滅することを意味する。例えば、汚染物質を吸着、あるいは分解するような装置が配置されている場合、その装置は負の放出強度を持つとみなすことができる。また、汚染物質が空气中で容易に分解される場合なども、計算上、空間中に負の汚染物質放出源があるとみなすことができる。

そのような汚染物質の分解、除去を想定しない限り、室内の汚染物質の放出量はどの地点においても必ず正またはゼロになる。すなわち、「汚染物質の放出強度は常に正である」という制約条件は、物理的には、室内で汚染物質が吸着されたり分解されたりすることがない、という仮定を意味する。この制約条件を式(4)で表すことができる。

$$\phi_{ncell}^k = \begin{cases} 0 & \text{if } \phi_{ncell}^k < 0 \\ \phi_{ncell}^k & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、添字 $ncell$ は計算格子の番号を意味する。すなわち式(2)は、各計算格子について、その格子に対する修正項の大きさが負であるときその値を0にすることを意味する。

(2) 汚染物質の発生源が存在する範囲は限定されている

室内に未知の汚染物質が発生する場合、その発生源になりうる箇所があらかじめある程度限定されている場合がある。例えば、建材由来の汚染であれば壁面や床面、天井面から生じ、室内に配置された機器から生じる汚染であれば、機器の周辺から生じる。あるいは、室の出入口や空調機器や換気装置の吹出し口などから汚染物質が流入する場合も考えられる。いずれにしても、室内の汚染は室内の物体表面もしくは吸排気口で生じると考えられる。

このように、汚染物質の発生箇所が限定される場合、

式(5)を用いて、修正項の分布も同様に限定することができる。

$$\phi_{ncell}^k = \begin{cases} \phi_{ncell}^k & \text{if } ncell \in N_{region} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 N_{region} は汚染物質の発生箇所となりうる計算格子番号の集合である。

(3) 汚染物質放出源は点源である

汚染放出源が狭い空間に高濃度で発生する場合、汚染放出源は点源であるとみなすことができる。これは、なんらかの配管、装置などの小さな亀裂から汚染物質が漏出する場合などが当てはまる。

VCA法は逆解析的な手法であるため、制約条件を与えない場合、不可逆的な現象である拡散を高精度に再現することが困難であり、推定される放出源分布は広がりを持って表現される。

しかし、汚染放出源が点源であると仮定した場合、推定された放出源分布のうちもっとも放出強度が大きい1点を放出源であるとみなすことで、点源の位置の推定ができる。この制約条件を式(6)で表すことができる。

$$\phi_{ncell}^k = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \phi_n^k & \text{if } \phi_{ncell}^k = \phi_{MAX}^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 N は計算格子数であり、 ϕ_{MAX}^k は修正項分布の最大値である。

(1)~(3)の制約条件は互いに独立であり、併用して用いることもできる。

2. 数値実験

2.1 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。

2.2 CFDモデルの概要

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。対象領域の離散化には有限体積法を用いた。

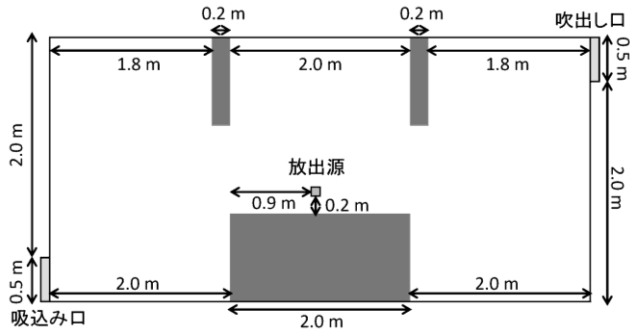


図-1 対象領域

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	-

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。

2.3 「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。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る。

2.4 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。

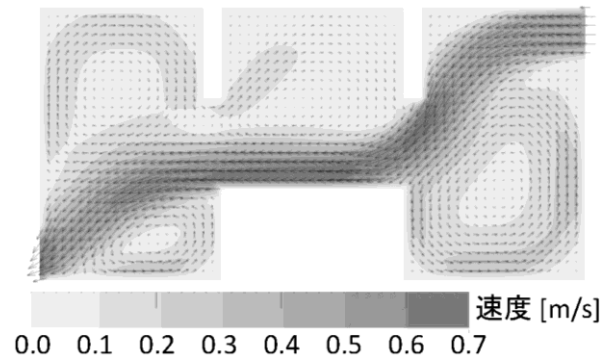


図-2 速度場

2.5 VCA法の適用結果

「基準モデル」から作成した濃度データをVCA法を用いて同化することで、汚染物質放出源の分布を推定した。推定は、制約条件を与えない場合と、1.3節で示した(1)~(3)の制約条件のうち1つを与えた場合の4つの場合を検討した。また、条件(2)については、放出源は室内中央の机上面の直上50 cm以内であると仮定した。

推定された放出源分布を図-3に示す。

制約条件を与えない場合、推定された放出強度分布は「基準モデル」の放出源位置をピークに含み、おおむね「基準モデル」の濃度分布を再現できるような分布となっている。しかし、推定された放出源分布は、「基準モデル」の放出位置にピークを持つものの、その近傍にもなだらかに広がっており、放出強度のピーク高さは再現できていない。また、推定された放出源分布のピークから吸込み口の向きに、推定放出強度が正の部分と負の部分交互に現れており、振動のような分布が現れている。

これは、逆解析的に修正項の分布を探索するVCA法は、不可逆的な現象である拡散現象をうまく再現できないためであると考えられる。また、VCA法は繰り返し計算により徐々に最適解へと漸近する手法であるため、繰り返し計算の中で生じた誤差を打ち消すため、別の誤差が生じるといった事態も発生しうる。

図-3(b)は「汚染物質放出源の放出強度は正である」という制約条件を与えた場合の推定結果である。推定放出強度の分布の傾向は制約条件を与えなかった場合と類似しているが、負の放出強度が生じていない他、制約条件

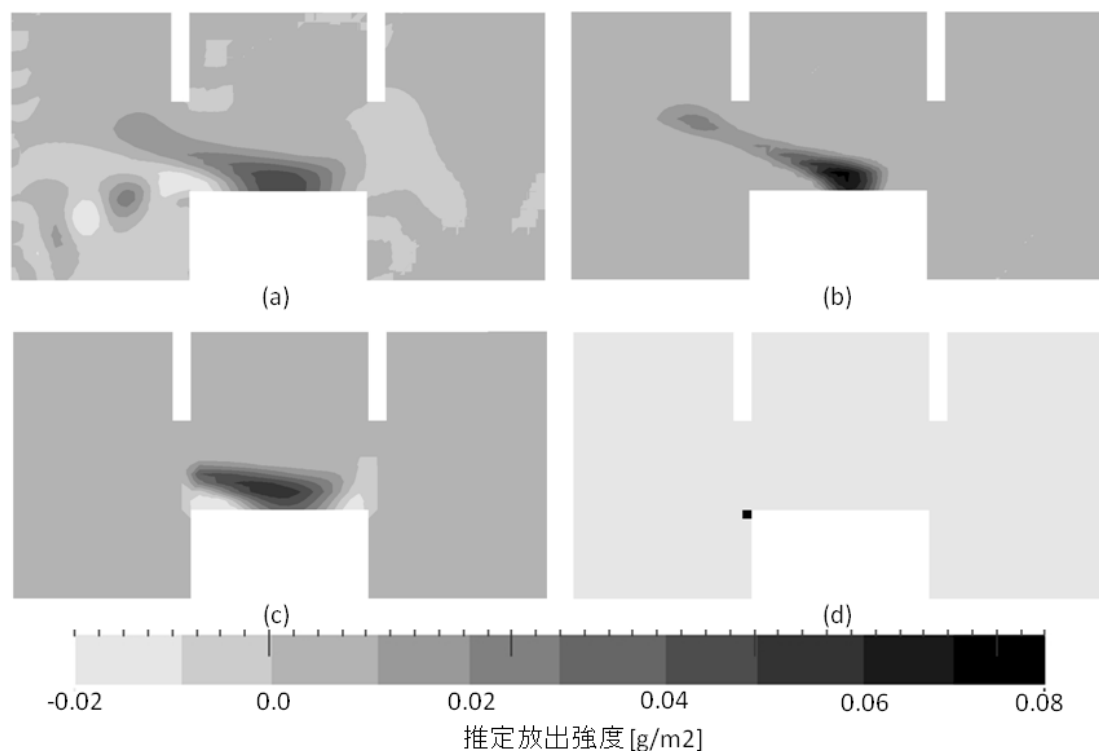


図-3 VCA法の適用による推定放出強度

- (a) 制約条件なし (b) 汚染物質放出源の放出強度は常に正である
 (c) 汚染物質の発生源が存在する範囲は限定されている (d) 汚染物質放出源は点源である

無しでみられた振動のような分布も生じていない。また、放出源近傍における放出強度のピークがより高くなっている。これは、負の修正を禁止することにより、負の修正項が生じることによる副次的な誤差の発生が抑制されたこと、「基準モデル」よりも推定放出源分布が広がっていることに起因する誤差を抑制するため、修正項の分布の広がりが抑制されたためだと考えられる。

図-3(c)は「汚染物質の放出源が、室内中央の机の上から上方 50 cm 以内に存在する」という制約条件を与えた場合の放出源分布の推定結果である。制約条件を与えない場合と比較して、放出源分布のピークが高くなり、また振動もみられない。一方、負の値は生じている。これは、放出源の分布範囲が限定されたことで範囲外まで修正項が分布することがなくなったために放出源強度のピークが高くなったことが原因だと考えられる。しかし、制約条件を与えない場合でも放出源の位置の推定は比較的良く推定されているため、本制約条件の負荷による結果の変化はわずかであった。

図-3(d)は「汚染物質放出源は単一の点源である」という制約条件を与えた場合の推定結果である。点源が仮定されているため、放出源分布の推定結果は、単一の計算格子にのみ値が生じている。しかし、その位置は「基準モデル」の放出源位置からは大きく外れている。これは、VCA法は繰り返し計算により漸近的に最適解を求めるものであるが、制約条件により比較的誤差の大きい計算

初期に放出源位置が誤った位置に強く拘束されてしまい、その後修正を漸近的に修正することができなくなっているのだと考えられる。

以上の結果は、制約条件を単独で与えた場合の結果であり、複数の条件を組み合わせた場合、あるいは条件の数値等を変更した場合には異なる結果が生じる。したがって、さらなる検討が必要とされる。

まとめ

本研究では、VCA法を用いて、2次元定常流れ中の未知の放出源の位置・強度推定、濃度分布推定を行い、VCA法適用時の推定精度を向上させる制約条件について数値実験を用いて検討した。数値実験の結果、VCA法の適用時に適切な制約条件を与えることで、推定精度の向上をはかること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
- 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