

312 連続的データ同化法を用いた屋外汚染物質の常時放出源の推定  
 Estimation of outdoor pollutant source by using variational continuous assimilation method

○松本 貴也 (大阪大学) 正 近藤 明 (大阪大学)  
 松尾 智仁 (大阪大学) 井上 義雄 (大阪大学)  
 嶋寺 光 (大阪大学)  
 Takaya MATSUMOTO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Akira KONDO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Tomohito MATSUO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Inoue Yoshio, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka  
 Hikai SHIMADERA, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

For the case where hazardous pollutants are emitted to the atmosphere, understanding the concentration field by pollutant source is important to protect not only our safety but also the surrounding environment from pollutant threat. In this study, based on Computational Fluid Dynamics (CFD), a data assimilation technique called the Variational Continuous Assimilation (VCA) method was utilized to estimate not only the concentration field but also the location and intensity of air pollutant source which continuously release to the atmosphere. The correction term added to the mass conservation equation by the VCA method is equivalent to the pollutant source. The VCA applications with different conditions in terms of sensor location, restriction of source location and observation conditions were compared. Restricting of source location, concentration field and source location was estimated more correctly.

*Key words:* Data assimilation, Variational Continuous Assimilation, Computational Fluid Dynamics, Concentration field

1. はじめに

化学薬品工場での薬品漏洩事故や生物・化学兵器による攻撃をはじめとして、危険な汚染物質が外部に放出されるような事例は数多く存在する。こうした汚染物質による脅威から、人々の安全や周辺環境を守るためにも、大気汚染物質の濃度分布を把握することが重要であり、そのために放出源に関する正確な情報が不可欠となる。大気汚染濃度については、これまで観測や数値計算により推定がなされてきた。

観測と数値計算にはそれぞれ長所と短所が存在する。観測では、用途に応じたセンシング技術の発達により、比較的高精度、かつリアルタイムでデータを得ることが可能である。しかし、対象全域からデータを得ることはできず、データに欠損が生じてしまう。一方、数値計算では、対象全域を推定することが可能であるが、適切な初期条件や境界条件を与えることが難しく、モデル化に際しての誤差や計算上の丸め誤差といった様々な要因から推定精度が下がりやすい。

こうした観測と数値計算の欠点を補い合う手法として、本研究では Derber<sup>1)</sup>が気象場の推定精度向上のために開発した連続的データ同化法(Variational Continuous Assimilation method: VCA 法)に着目した。VCA 法を大気汚染濃度推定ために修正することで、汚染濃度分布だけでなく、放出源の位置と放出強度の推定が可能となり、汚染物質の大気環境への放出事故の実態把握へのアプローチとして有効な手段となる。本研究では、数値実験によって得られた計算結果に VCA 法を適用し、推定結果を検証した。

2. VCA 法の概要

VCA 法は、数値計算と観測の誤差を最小化するように数

値計算に修正項を付与する手法である。修正項を加えた支配方程式を式(1)に示す。

$$\Psi^n = A^n(\Psi^{n-1}) + \lambda_n \phi \tag{1}$$

ここで、 $n$  は計算ステップ、 $A_n$  は  $\Psi_{n-1}$  から  $\Psi_n$  への変換行列、 $\lambda_n \phi$  は修正項である。

数値計算と観測の間の誤差を評価するため、(2)式で定義される評価関数を用いる。

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

ここで  $p$  は観測ステップ、 $P$  は観測回数、 $\Psi_p$ 、 $\tilde{\Psi}_p$  はそれぞれ時刻  $t_p$  における計算値ベクトル、観測値ベクトル( )<sup>T</sup> は転置行列を表す。

また、支配方程式に加えた修正項  $\lambda_n \phi$  は、物質輸送方程式のアナロジーから、放出源の発生項とみなすことができる。 $\lambda_n$  は時間的な分布を示す行列であり、放出があるときは単位行列、放出がないときには零行列とした。また、 $\phi$  は空間的な分布を示すベクトルである。VCA 法では、評価関数  $I$  を最小化するようなベクトル  $\phi$  を決定する。評価関数  $I$  の修正ベクトル  $\phi$  に対する導関数は式(3)で表される。

$$\frac{\partial I}{\partial \phi} = \sum_{p=1}^P \frac{\partial \Psi^p}{\partial \phi} (\Psi^p - \tilde{\Psi}^p) \tag{3}$$

ここで、式(3)の導関数が 0 になるような  $\phi$  はを式(4)に示す最急降下法による繰り返し計算により模索する。

$$\phi^{k+1} = \phi^k + \alpha \frac{\partial I}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi^k} \tag{4}$$

ここで、 $k$  は繰り返し回数であり、 $\alpha$  は修正ベクトルの変化幅を定める学習係数である。

### 3. 数値実験方法

#### 3.1 VCA 法による放出源と数値計算

VCA 法の妥当性の検証には、数値計算を用いた。正しい放出源情報を用いた数値計算結果を正解値とし、正解値のうち観測点の存在する地点の濃度を観測誤差のない観測値として利用した。放出源に関する情報を与えず計算を行った数値計算結果に対して、観測値を同化させ、数値計算を修正した。

#### 3.2 計算条件

数値計算には、有限体積法により離散化を行い、圧力解法には、SIMPLE 法<sup>2)</sup>を用いた。移流・拡散項の差分法にはべき乗則を用い、乱流モデルには、標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた。

計算対象領域は、3次元屋外での汚染物質の貯蔵区画を想定した。その平面図と立面図を Fig.1 に示す。9 m×5.25 m×4 m の区画を 0.25 m 均一のメッシュで分割し、x 方向に 1.0 m/s の一様な風を与えた。貯蔵所として直方体の建物を配置した。汚染物質の放出源位置は、貯蔵所の上部の 1 メッシュに、放出強度は 1 g/m<sup>3</sup>/s の連続放出がなされている仮定した。計算および観測対象時間は放出開始から 90 秒間 (case 1) と対象領域が定常状態になってから 30 秒間 (case 2) の 2 種類を設定した。また、case 1 と case 2 のそれぞれに対し、放出源の場所を制限せずに推定を行った場合 (a) と放出源の場所が貯蔵所周辺 1 m の空間にのみ存在するとして推定を行った場合 (b) の VCA 計算を行った。

放出源の存在する  $z = 1.625$  m の xy 面、および  $x = 3.375$  m の yz 面の流れ場を Fig.2 に示す。

汚染物質の放出開始時刻を 0 s とした正解値の計算結果濃度場分布の時間変化を Fig.3 に、定常状態の濃度分布を Fig.4 に示す。

観測は各 xz 平面の最高濃度を含むように Fig.5 に示す 4 つの平面で実施され、放出源から x 方向に 1 m, 2 m, 3 m, 4 m 離れた xz 面の濃度が最も高い地点を中心に、それぞれ y 方向と z 方向については 0.5 m 間隔に 3×3 の 9 か所に観測点を流線の法線となるようにそれぞれ設置し、1 秒間隔で観測が実施されるとした。正解値の計算結果から、これらの観測点のあるメッシュの観測値を作成した。

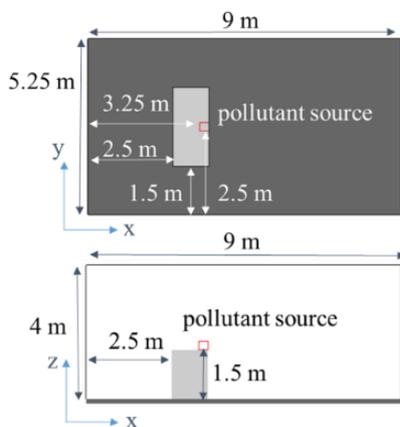


Fig.1 Objective domain

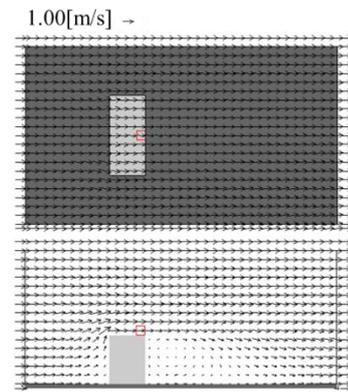


Fig.2 Flow field

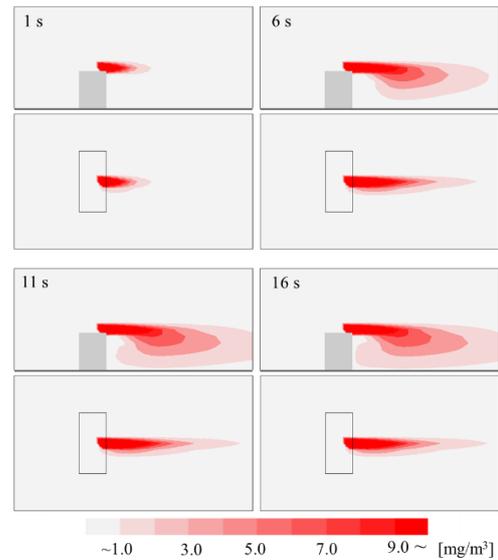


Fig.3 Concentration field (case 1)

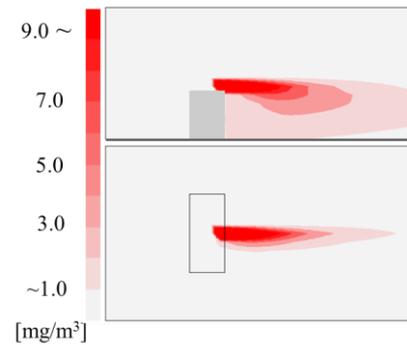


Fig.4 Concentration field (case 2)

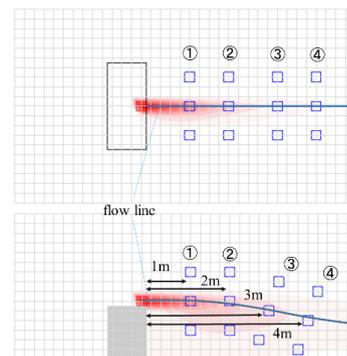


Fig.5 Observation points

## 4. 結果と考察

### 4.1 汚染物質濃度分布

平面②と平面③のそれぞれ9点の観測値を用いて VCA 法を適用した濃度分布の結果を記す。

放出開始時から 90 秒間を対象として、放出源の場所を制限せずに推定を行った場合(case 1a)と放出源の場所を貯蔵所から 1m 以内の範囲に制限した場合(case 1b)の VCA 計算結果を Fig.6 および Fig.7 に示す。

次に、定常になってから 30 秒間を対象として、放出源の場所を制限せずに推定を行った場合(case 2a)と放出源の場所を貯蔵所から 1m 以内の範囲に制限した場合(case 2b)の VCA 計算結果を Fig.8 および Fig.9 に示す。

case 1 については両者で濃度分布に大きな違いは見られず、正解値に近い濃度分布が再現されている。case 2 では、正解値に比べて濃度値は小さく広がりが大きい。特に放出源の場所を制限せずに推定を行った場合に顕著である。

濃度場の推定結果は、式(6)に示す計算対象領域全体における濃度の平均二乗誤差(Root Mean Square Error: RMSE)で評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M_{all}} \sum_{i=1}^{M_{all}} (\Psi_{i,true} - \Psi_{i,calc})^2} \quad (6)$$

ここで、 $M_{all}$  は計算対象メッシュの総数、 $\Psi_{i,true}$ 、 $\Psi_{i,calc}$  はそれぞれ  $i$  番目のメッシュにおける濃度の正解値と、計算値を示す。また、修正前の計算値の誤差に対する VCA 法を適用した場合の誤差の大きさは、推定結果の RMSE を VCA 法の適用による修正を行う前の計算値の RMSE で除すことで、正規化して用いた。正規化を施した RMSE を正規化 RMSE と呼ぶことにする。Fig.10 に時間ごとの正規化 RMSE の時間変化を示す。Fig.11 に定常濃度場の再現結果について正規化 RMSE を示す。

どちらの case でも修正項分布範囲に制限をかけたほうがより濃度分布が再現できていた。

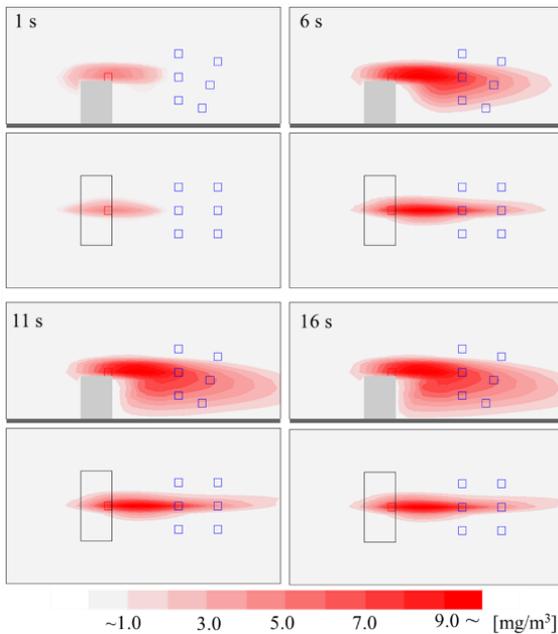


Fig.6 Concentration field (case 1a)

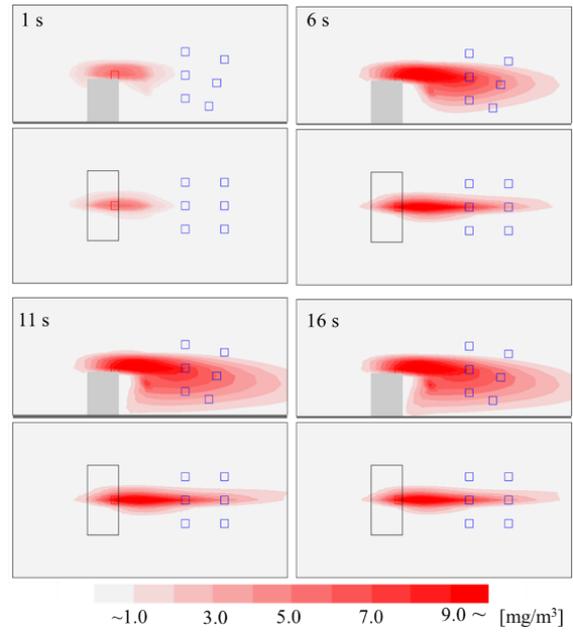


Fig.7 Concentration field (case 1b)

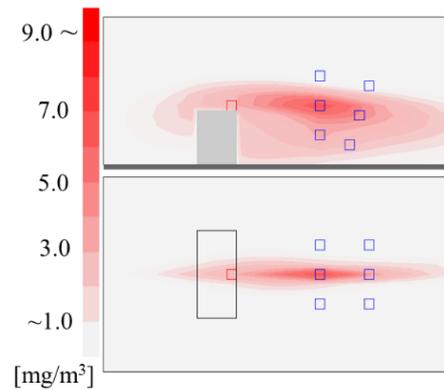


Fig.8 Concentration field (case 2a)

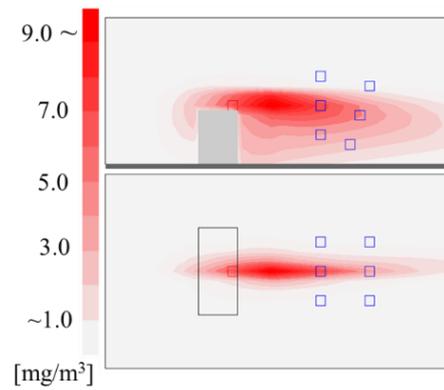


Fig.9 Concentration field (case 2b)

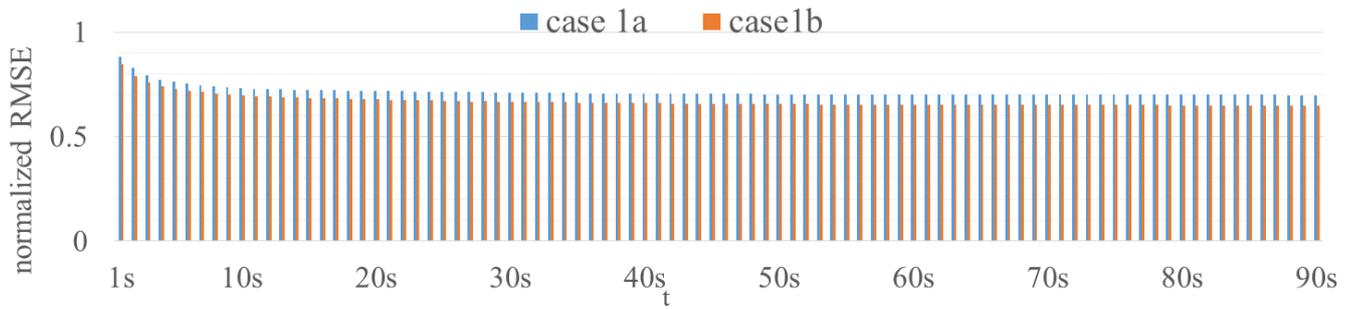


Fig.10 Normalized RMSE (case 1)

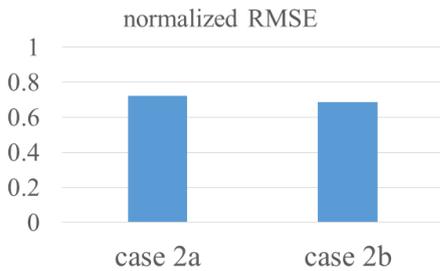


Fig.11 Normalized RMSE (case 2)

#### 4.2 放出源強度及び位置推定

放出強度は、修正ベクトルの総計として表した。各平面の観測点で推定された放出強度を Fig.12 に示す。ここで、①&②などの表記は両面の観測点を使用したことを示す。排出源の近い観測点を用いるほど、放出強度は大きくなる。放出源の場所に制限を加えた場合には、精度が改善されている。

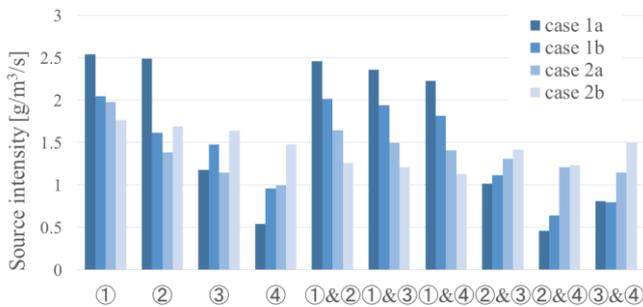


Fig.12 Estimated source intensity

放出位置の推定は、修正項の全修正項に占める割合が 50%と 90%を閾値として、コンター図で表示した。Fig.13 に平面②と③の観測値を用いて VCA 法を適用した計算結果の放出源位置を示す。

case1 は、放出位置推定に広がりはあるが放出位置を特定することができる。しかし、case 2 は、放出源位置推定が大きく広がる。特に case2a では、その傾向が顕著である。case2 の場合、観測点での観測値は濃度が定常なため、時間的に変化がなく、VCA に利用できる情報が少ない。そのため推定位置の推定に大きな誤謬が現れたと推定される。一方、case1 の場合、観測点での観測値は濃度が時間的に変化するため利用できる情報が多いので、case2 に比べると放出位置推定に成功したと考えられる。

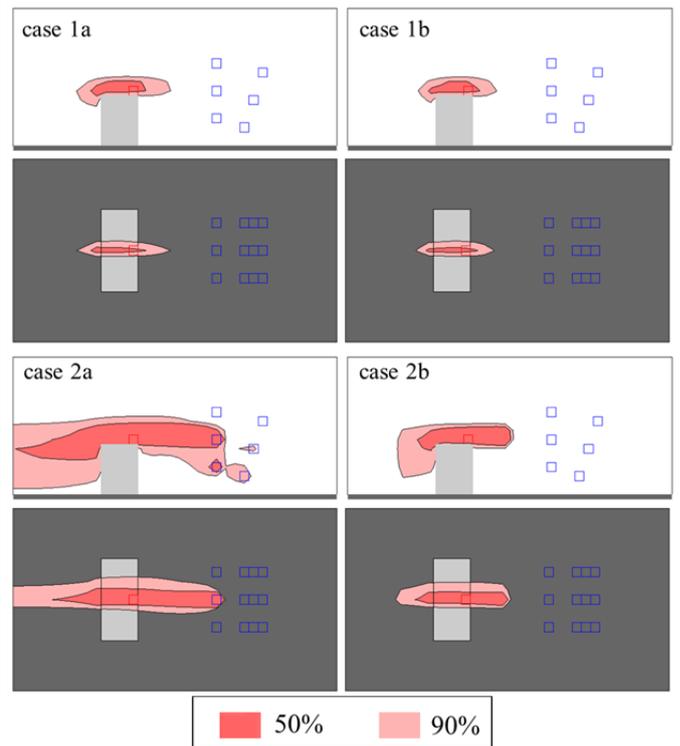


Fig.13 Estimated source location

#### 5.結論

本研究では、3次元の定常流れ場の屋外空間を対象に、汚染物質の連続放出源推定を行うため、データ同化法の一種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。

連続放出のなされる放出源に対して、濃度分布と放出源位置推定に関しては修正項の分布範囲に制限を加えることでより正確な予想を可能とした。

#### 参考文献

- 1) Derber, J.C.: A Variational Continuous Assimilation Technique, Mon. Weather Rev., 1989, 117, 2437-2446.
- 2) スハス V. パタンカー (著)、水谷幸夫 (訳)、香月正司 (訳) : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 130-136, 1985