

第 II 部門

対数正規 4 次元変分法を用いた大阪湾水質鉛直分布のデータ同化に関する基礎的検討

大阪大学工学部 学生会員 ○野田晃平
大阪大学大学院工学研究科 正会員 入江政安

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 岡田輝久

1. はじめに

日本の沿岸域では赤潮や貧酸素水塊の発生などの水環境問題があり、これらの問題を解決することを目的に水環境解析がなされてきた。その 1 つに、観測データと数値モデルを組み合わせることで数値モデルによる解析精度を向上させるデータ同化がある。データ同化手法の 1 つである 4 次元変分法を適用した過去の研究では、水質項目等がガウス分布に従うと仮定して計算を行っている例がほとんどである。しかし、この仮定のもとデータ同化を行うと、非負の変数である溶存酸素量 (DO) などで負の値をとる可能性がある。そこで本研究では、DO などの非負の水質項目が対数正規分布に従うと仮定する対数正規 4 次元変分法 (L4DVar: Lognormal 4-dimensional variational data assimilation) ¹⁾を用いてデータ同化を行い、その結果と非負の水質項目がガウス分布に従うと仮定した場合の同化結果の比較検証を行った。

2. 対数正規 4 次元変分法の概要

本研究で用いる流動モデル (ROMS: Regional Ocean Modeling System) には、Moore ら ²⁾により 4 次元変分法を用いたデータ同化を行うアルゴリズム (ROMS 4D-Var) が実装されている。ROMS 4D-Var では、非線形モデルを線形化したモデル $\mathbf{M}$ (タンジェントリニアモデル) と $\mathbf{M}$ の随伴モデル $\mathbf{M}^T$ (アジョイントモデル) を用いて評価関数を求め、これを最小化する制御変数を求める。本研究では、既存のモデルを修正することで L4DVar を用いたデータ同化を可能にした。制御変数を初期条件 $\mathbf{x}_0$ とした場合、L4DVar における評価関数 J_L は以下の式で表される。

$$J_L = \frac{1}{2} \delta \mathbf{g}_0^T \mathbf{B}_L^{-1} \delta \mathbf{g}_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_o} (\mathbf{L}_i \mathbf{H}_i \mathbf{M}_{i,0} \mathbf{x}_{b,0} \delta \mathbf{g}_0 - \mathbf{p}_i)^T \mathbf{R}_{L,i}^{-1} (\mathbf{L}_i \mathbf{H}_i \mathbf{M}_{i,0} \mathbf{x}_{b,0} \delta \mathbf{g}_0 - \mathbf{p}_i)$$

ここで、 $\delta \mathbf{g}_0$: 初期値の修正量 ($= \ln \mathbf{x}_0^{new} - \ln \mathbf{x}_0$)、 $\mathbf{B}_L, \mathbf{R}_{L,i}$: 対数変換後の空間における背景誤差共分散行列および観測誤差共分散行列、 $\mathbf{p}$: 観測地点における第一推定値 (同化前の値) $\mathbf{x}_b$ と観測値 $\mathbf{y}$ との差 ($= \ln \mathbf{y} - \ln \mathbf{x}_b$)、 $\mathbf{L}_i, \mathbf{x}_{b,0}$: 観測地点における第一推定値および初期値の第一推定値を成分とする対角行列、 $\mathbf{M}_{i,0}$: 非線形モデル $\mathbf{M}_{i,0}$ を線形化した接線形モデル、 $\mathbf{H}_i$: 観測演算子、 N_o : 観測値の総数である。

3. 対数正規 4 次元変分法を用いたデータ同化

(1) 双子実験の概要および計算条件

本研究では、水質モデルに DO, クロロフィル, 栄養塩など 11 の水質項目を再現するモデルを使用する。初期値を修正する変数は水温, 塩分, 11 の水質項目の全 13 変数とし、12 時間毎に修正を行う。13 変数がガウス分布に従うと仮定する 4 次元変分法 (G4DVar: Gaussian 4D-Var) と、水温, 塩分はガウス分布、水質項目の 11 変数は対数正規分布に従うと仮定する L4DVar について、それぞれの同化効果を比較するため双子実験を実施した。

双子実験とはデータ同化の有効性を確かめる試行実験である。まず、「真値」と仮定する計算と「シミュレーション値 (同化なし計算)」を用意する。次に、真値から抜き出した値 (擬似観測値) をシミュレーション値に同化することで「解析値」を求め、解析値が真値へ近づくことを確認する実験である。

計算領域は図-1 に示す大阪湾を含む領域とした。水平方向の格子間隔は 500 m, 格子数は東西方向 117, 南北方向 124 とし、鉛直方向の格子は 20 層に分割した。擬似観測値は水温, 塩分, クロロフィル, DO とし、図中の赤点で示す 6 地点から 1 時間毎, 各 20 層の真値の値を抜き出したものを用いた。7 ヶ月の助走計算のち、貧酸素化が生じる夏季の 2012 年 8 月 1 日 0 時から 8 月 8 日 0 時の 1 週間を対象に双子実験を行った。

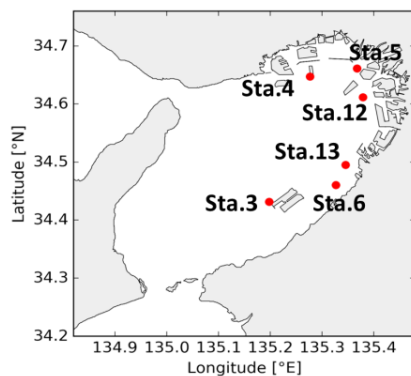


図-1 計算領域および疑似観測値抽出地点

(2) 双子実験結果

図-2に2012年8月8日0時における底層DOの真値、同化なし計算値、G4DVarによる解析値、L4DVarによる解析値の平面分布を示す。湾奥部において、同化なし計算値では十分に再現できていない真値の貧酸素水塊を同化によって再現することができている。また、0未満の値の領域を灰色で表しており、G4DVarによる同化では、湾奥部において負の値が発生していることが分かる。一方、L4DVarによる同化では、湾奥部の無酸素の領域の再現性が向上するとともに、負の値が発生していないことが分かる。図-3に2012年8月8日0時のSta.4（神戸港波浪観測塔）、Sta.6（阪南沖窪地）におけるDOの鉛直分布を示す。底層においては、G4DVarおよびL4DVarによる解析値が同化なし計算値より真値に近づき再現性が向上している。しかし表層においては、L4DVarによる解析値が真値を再現できていない。図-4に6地点におけるクロロフィルの真値と、G4DVarおよびL4DVarによる解析値とのRMSE（二乗平均平方根誤差）の時系列を示す。G4DVarとL4DVarとも同化によってRMSEが減少しているが、L4DVarの方がRMSEが大きく、十分に改善されていないことが分かる。

4. まとめ

本研究では、ROMS内のモデルに改良を加え、L4DVarを用いた同化計算を行い、L4DVarおよびG4DVarによるデータ同化結果の比較検証を行った。その結果、L4DVarを用いることで負の値を発生させることなく、大阪湾の貧酸素水塊を再現することができた。しかし、一部ではG4DVarよりL4DVarの再現性が低下していることから、今後の背景誤差標準偏差および観測誤差標準偏差の最適化等により、L4DVarのより一層の精度向上が図れるか検討する必要がある。

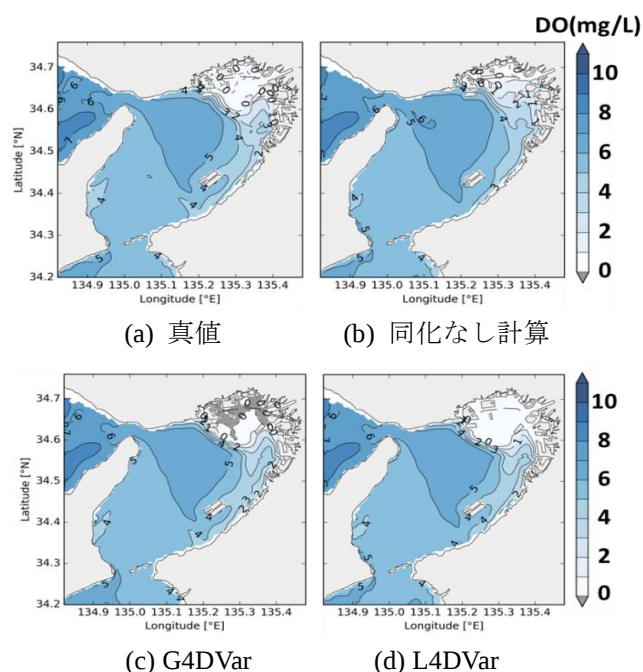


図-2 2012年8月8日0時の底層DOの平面分布

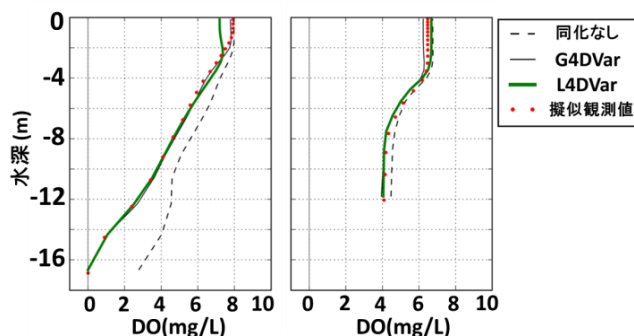


図-3 Sta.4（左）、Sta.6（右）におけるDO鉛直分布

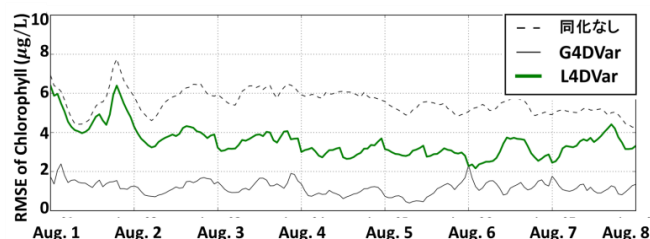


図-4 6地点におけるクロロフィルの真値と解析値とのRMSEの時系列

謝辞

本研究はJSPS科研費JP25709042の助成を受けて実施したものです。

参考文献

- 1) Song et al., Data assimilation in a coupled physical-biogeochemical model of the California Current System using an incremental lognormal 4-dimensional variational Part 1, *Ocean Modelling*, Vol.106, pp.131-145, 2016.
- 2) Moore et al., The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems Part 1, *Progress in Oceanography*, Vol.91, pp.34-49, 2011.