

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709042

研究課題名(和文) データ同化技術を用いた流動水質予測計算の精度向上と新たなパラメータ最適化法の開発

研究課題名(英文) Improvement of flow and water quality simulation using data assimilation and development of parameter optimization method in water quality model

研究代表者

入江 政安 (Irie, Masayasu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00379116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、4次元変分法およびアンサンブルカルマンフィルタ法(EnKF)を用いて、沿岸域における流動水質シミュレーションの再現性向上を図り、水質モデルに用いられる各種パラメータ、計算条件の最適化手法の開発を行った。計算対象は大阪湾の夏季の水質とし、同化するデータとして、HFレーダによる水表面流速分布、定点自動観測システムによる水温・塩分・クロロフィル・溶存酸素(DO)の鉛直分布を取り上げた。4次元変分法およびEnKFのいずれも、密度や水質項目の水平・鉛直分布の再現性を大きく向上させた。また、両データ同化手法それぞれを用いた水質モデルパラメータの修正手法の構築を行い、パラメータの推定を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we performed data assimilation using the four-dimensional variational method and the Ensemble Kalman Filter method (EnKF) to obtain the better representation of flow and water quality distributions in coastal areas and to develop the estimation method of various model parameters and conditions used in the water quality model. We assimilated data of surface current velocity collected by HF radar and temperature, salinity, chlorophyll, and dissolved oxygen (DO) collected by Osaka Bay Water Quality Automatic Observation System. Both the four-dimensional variational method and the ENKF significantly improved the distributions of water quality horizontally and vertically. In addition, methods for estimating model parameters in the water quality model using both data assimilation methods was developed and evaluated.

研究分野：環境水理学，沿岸域の水理・環境

キーワード：4次元変分法 アンサンブルカルマンフィルタ データ同化 大阪湾 多項式カオス展開 4D-Var 水質シミュレーション ROMS

1. 研究開始当初の背景

近年、沿岸域における流動水質モデルは細緻化されて、多くの水質項目を有し、それに伴いモデルパラメータも多くなっている。流動モデルに十二分の精度が確保されている場合でも、水質モデルのキャリブレーションには相応の時間を必要とする。一方で、流動モデルがある程度しか精度が確保されていない場合、再現性の低下の要因となる問題が切り分けられず、容易には原因が究明されないことも多くなる。例えば、有機物の水中での分解量において再現性を得ない場合、原因は無機化速度か、有機物の沈降速度か、はたまた、密度成層の再現性低下に伴う鉛直方向拡散係数かという多岐の可能性が生まれるのが良い例である。このように、再現性の向上を図るときに、多岐にわたる検討が必要で、かつ、容易に解が見つからないのは、流動水質モデルの「現代病」と言え、流動および水質の予測を容易あるいは高速に行える技術、再現性低下要因の解明を容易にする技術が求められている。

一方で、ここ数年で国内における沿岸域の観測体制が充実し、流況や水質の常時定点モニタリングが行われ、また、以前より海洋レーダによる水表面流速観測も実施されている。これらにより、流況、水温、塩分、水質などの4次元データの蓄積が行われつつありある。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、これらの観測データおよびデータ同化手法を利用し、モデルの精度向上を図るとともに、新たなパラメータ最適化法の開発によるパラメータ推定の適正化・高速化を図ることを目的とした。

本研究は、4次元変分法およびアンサンブルカルマンフィルタ法(EnKF)による高度なデータ同化を用いて、沿岸域における流動水質シミュレーションのさらなる高精度化を目指すことを目的とした。また、近年、多項目化されている流動水質モデルは、結果として、数値実験上の課題の所在が不明瞭となり、その解決に向けて新たなアプローチが必要である。本研究は、観測データを用いたパラメータ最適化技術を新たに開発し、再現性を向上することを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 流動水質モデルの概要

流動モデルには Regional Ocean Modeling System (ROMS) を用いる。本研究では基本的に研究対象として大阪湾を選択し、研究の進展により最終的に、計算格子は水平方向に解像度約 500 m の直交曲線座標、鉛直方向に 20 層の s 座標系とし、表層をより細かく分割している。水質モデルの変数は無機溶存態栄養塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$), 植物プランクトン, クロロフィル, 動物プランクトン, 浮遊性の懸濁態有機物 (Small detritus-N, P),

沈降性の懸濁態有機物 (Large detritus-N, P) および溶存酸素 (DO) の 11 項目で、ROMS に付属のモデルに、各反応速度の水温依存性や、栄養塩溶出速度の DO 依存性の追加等の変更を施している。

(2) 4次元変分法およびアンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同化の適用のための手法構築

データ同化法(図-1)にはナッジング法のような基本的な手法の他、高度な手法として、4次元変分法と EnKF がある。本研究の成果のうち、リアルタイム予測システムにおいてはナッジング法を用いた。一方で、モデルの再現性向上、モデルパラメータの最適化には4次元変分法および EnKF の両方を利用した。

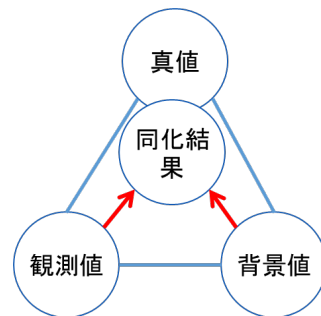


図-1 データ同化のイメージ データ同化は観測値と計算結果(背景値)から、知りようがない真値(観測値にも誤差が含まれており、観測値は空間的・時間的に「点」のデータのため、ある時ある場所の真の値は知りようがない)に近い値を導出する手法である。

4次元変分法は、時間進行に合わせて状態変化を予測する通常モデルに加えて、時間を逆行するための随伴モデルが必要となる。ROMSには流動モデルおよび比較的単純な水質モデル(NPZDモデル)の初期値、境界値に対する4次元変分法のアルゴリズム(ROMS 4D-Var)が実装されている。本研究の最終的成果においては、このROMS 4D-Varをベースに、上で示した水質モデルの各方程式を線形近似し、時間を後方に積分する随伴方程式(アジョイントモデル)を構築し、コード化した。さらに評価関数は、状態変数の初期値とモデルパラメータを制御変数に含むよう実装し、制御変数の修正量、および修正後の計算値と観測値との差を評価できるよう定めた。

EnKFはEvensenにより提案された、アンサンブル近似を利用して統計誤差の推定を行い、モデル変数を逐次的に更新する手法である。EnKFの利点として、アンサンブル近似を用いることにより、非線形モデルをそのまま使用できるため、4次元変分法に比べて、手法の導入が容易という点がある。具体的にはパラメータや状態変数を摂動させ、初期アンサンブルを作成し、非線形計算を行う。予測アンサンブルを作成し、状態誤差共分散行

列を作成することにより、カルマンゲインと呼ぶ補正のための係数を得る。新たに得た観測値に近づいた分析アンサンブルを用いて次の時間の計算を行う。(図-2)このように逐次時間進行するだけである点が、時間を逆行する4次元変分法と異なる点である。

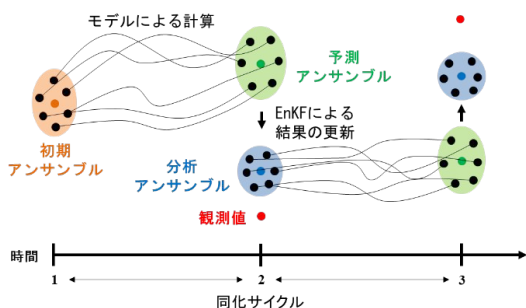


図-2 EnKFによるデータ同化のイメージ

本研究では、この2つの同化手法を用いて、大阪湾で海洋レーダにより観測している表面流速分布、定点自動観測されている流速と水質(水温、塩分、クロロフィル、濁度、溶存酸素濃度(DO))の鉛直分布データを同化した。いずれも観測は国土交通省近畿地方整備局により実施、維持管理されている。

(3) データ同化による再現性向上とモデル最適化

これらのデータを使用するにあたっては、各同化対象となるデータによって、同化パラメータの調整が必要である。そのため、感度解析を実施するなどして、再現性向上のための同化手法の検討を行ったうえで、大阪湾における水質の数値予測の再現性向上を図った。

また、データ同化中に修正する項目として、水質モデル内に含まれるモデルパラメータ(例えば、植物プランクトンの増殖速度)を加えることにより、データ同化によりパラメータの修正が可能かについても検討した。

(4) 多項式カオス展開を用いたパラメータ最適化

データ同化によるパラメータ最適化が適切に実現しない場合に備えて、データ同化を利用しないパラメータ最適化法として、多項式カオス展開を用いた最適化を実施した。

4. 研究成果

(1) 4次元変分法によるデータ同化とモデルパラメータの最適化

まず、最初に表面流速のデータ同化の効果を把握し、流況の再現性に及ぼす効果を明らかにした。同化なしの計算に比べて、4次元変分法を用いた場合、推定値と観測値の誤差(二乗平均平方根誤差、RMSE)は大きく減少した。また、観測範囲だけを同化するナッジング法と比べても、自然な分布形状を再現できることを示した。(5. 主な発表論文等の雑誌論文8), 以下同様)

さらに、流速の鉛直分布の修正効果は各観測地点によってばらつきがあったが、シミュレーション結果が観測データに漸近している様子が見てとれた。流速のRMSEにおいては平均で0.04 m/s程度減少させることに成功した。また、密度の鉛直分布の再現性について、同化による改善効果を検証した。(雑誌論文7))

また、定点自動観測で得られたクロロフィルの鉛直分布データを流動水質モデルに直接同化し、その影響について検討した。全地点全水深の値を用いた推定値と観測値のRMSEおよびその時間変化、およびクロロフィルの表層平面分布について、再現性が大きく向上した。(図-3)感度解析の結果、評価関数の繰り返し計算回数は5回でも十分であった。さらに、背景誤差の水平および鉛直方向相関スケールは、それぞれ、5.0 kmおよび1.0 mが適切であり、これらは同じ流動モデルに水温塩分データを同化した時とは異なる結果であった。(雑誌論文4))

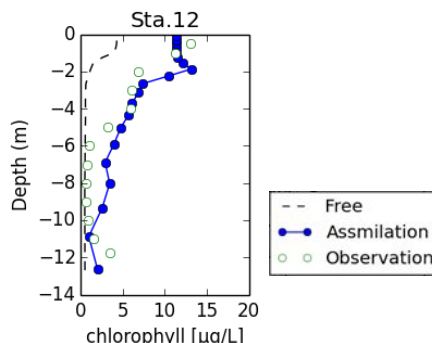


図-3 クロロフィル鉛直分布のデータ同化による再現性向上の例(雑誌論文4))

上記までの研究から、水質データを直接同化することにより再現性の向上が図れることが確認できたことから、データ同化を行う際の水質モデルをより高度なモデルに変更し、そのためのアジョイントコードを作成した。この場合も、クロロフィル、DOとも再現精度が著しく向上した。同化に用いる観測値を取捨選択する条件を課したことで、沿岸域を対象に12時間の同化ウィンドウでも安定して同化計算を行うことが可能となった。(図-4)

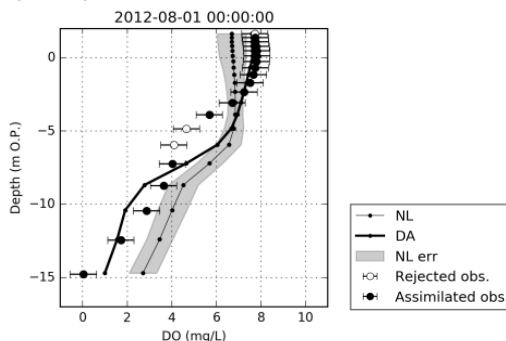


図-4 DO鉛直分布のデータ同化における再現性向上と観測データ取捨選択の例(雑誌論文1), 学会発表2))

パラメータも合わせて修正を行う双子実験の結果、状態変数の初期値に加え、パラメータを推定することで、水質モデルの 11 変数すべての再現性を向上できることが示された。(雑誌論文 1))

最後に、より高度な水質モデルによる現地観測のデータ同化とそれによる水質モデル内のパラメータ最適化を試みた。パラメータの修正量は、同時に修正を行う他の条件(例えば、初期条件、境界条件)によって変化し、必ずしも適切な値が得られるとは限らなかった。現地データとデータ同化を用いたパラメータの最適化についてはより一層の検討が必要である。

(2) EnKFによるデータ同化とモデルパラメータの最適化

大阪湾において、水質データを用いた EnKF によるデータ同化手法を構築し、再現性の向上を実現した。本研究のような、沿岸域における 1m ピッチの水質鉛直分布データを用いたデータ同化は世界的に見てもほとんど例がなく、新しい知見と言える。

鉛直分布の擬似観測値を用いた双子実験により EnKF によるデータ同化の同化効果の評価を行った。その結果、計算値は擬似観測値に漸近し、データ同化の有効性が見受けられただけでなく、平面的にも同化計算による再現性向上効果が現れることを示した。また、それぞれの水質項目には、局所化手法や影響半径など同化パラメータの設定次第で、同化計算の結果に大きな影響を与えることが確認できた。

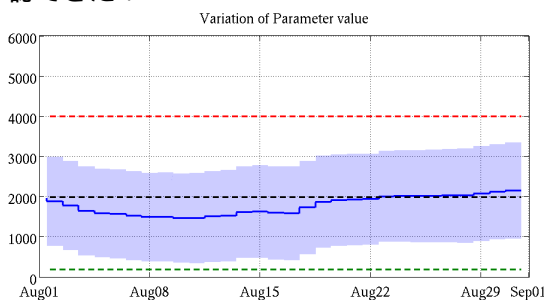


図-5 双子実験における、20 °C における底泥による酸素消費フラックスの計算期間中の変動(推定結果)

EnKF による水質モデルのパラメータ最適化を行った。まずは擬似観測値をデータ同化に用いたパラメータ推定を行い、パラメータ推定の実効性を検証した。その結果、パラメータの最適化によりクロロフィル、DO とともに鉛直プロファイルの再現性が向上し、パラメータ推定の実効性が確認できた。(図-5)一方で、修正が十分でないパラメータも多くあった。次に、大阪湾水質定点自動観測システムにより収録された実データをデータ同化に用いてパラメータ推定を行ったが、水質モデルのパラメータについては、全てのパラメータ値に修正が見られ、パラメータによって、

値の変動の大きさにばらつきが見られた。推定されたパラメータの中には既往研究で確認されている最小値あるいは最大値を超えるものも存在したことから、パラメータ最適化の手法についてはより一層の検討が必要である。(学会発表 3))

(3) 多項式カオス展開によるモデルパラメータの最適化

多項式カオス展開はパラメータ推定の際に、モンテカルロ法や変分法のような労力および計算コストを必要としない推定技術のひとつである。本研究ではその導入にあたって、一回あたりの計算時間が短い一方で、多くのモデルパラメータを持つ底質モデル(早期続成作用モデル)内のモデル最適化を行い、これまで困難であった栄養塩溶出量と栄養塩の土壌間隙水内鉛直分布を同時に精度良く再現できるパラメータを推定することができた。(学会発表 8))

この手法を用いて、大阪湾における流動水質モデルにおける、植物プランクトンの増殖速度および沈降速度についてパラメータ最適化を行い、これらのパラメータの季節変化を推定した。また推定された値から、パラメータを定義する新たな式を提案した。(学会発表 1))

5. 主な発表論文等 (雑誌論文)(計 8 件)

1) 岡田輝久, 入江政安, 西田修三, 4次元変分法による水質データ同化システムの構築と双子実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_1057-I_1062, 2017年02月

2) 岡田輝久, 入江政安, 桑田岳治, 西田修三, 海洋レーダおよび定点自動観測によって得られる異種データの4次元変分データ同化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, p. I_505-I_510, 2016年11月,
https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_505

3) 入江政安, 日下部包, 太田智也, 岡田輝久, 西田修三, 大阪湾リアルタイム水質再現予測システムの開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, p. I_1261-I_1266, 2016年11月,
https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1261

4) 岡田輝久, 入江政安, 藤井裕司, 西田修三, 4次元変分法による内湾のクロロフィル鉛直分布のデータ同化に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1297-I_1302, 2015年10月
https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_1297

5) 岡田輝久, 入江政安, ROMS 4D-Var の海峡部不安定性を回避するアジョイントモデルの最適化と検証, 土木学会論文集 B1(水工学),

Vol. 71, No. 4, pp. I_685-I_690, 2015年2月
https://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_685

6) 入江政安, 岡田輝久, 4次元変分データ同化を用いた沿岸域モデルの高度化, 沿岸海洋研究, Vol. 52, No.2 pp.159-168, 2015年2月,

7) 入江政安, 岡田輝久, 西田修三, 4次元変分法による流速鉛直分布のデータ同化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_506-I_510, 2013年10月,
https://doi.org/10.2208/kaigan.69.I_501

8) 入江政安, 藤井裕司, 岡田輝久, 西田修三, 海洋レーダーによって観測される表面流速の4次元変分法を用いたデータ同化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_501-I_505, 2013年10月
https://doi.org/10.2208/kaigan.69.I_506

〔学会発表〕(計15件)

1) Irie, M., Oda, K., Okada, T., Mattern, J.P., Fennel, K., Optimization of time-dependent model parameters by polynomial chaos expansion for a better model representation of chlorophyll in Osaka Bay, Japan, ASLO2017 Aquatic Sciences Meeting, ハワイ, アメリカ, 2017年02月

2) Okada, T., Irie, M., Nishida, S., Twin experiments of biogeochemical parameter estimation by 4DVar data assimilation in an estuary, ASLO2017 Aquatic Sciences Meeting, 2017年02月

3) Ito, Y., Irie, M., Okada, T., Yu, L., Fennel, K., Data assimilation of chlorophyll and dissolved oxygen profiles using the EnKF: a numerical experiment for Osaka Bay, Japan, ASLO2017 Aquatic Sciences Meeting, 2017年02月

4) 伊藤由比己, 岡田輝久, 入江政安, 西田修三, アンサンブルカルマンフィルタを用いた水質鉛直分布データ同化の試み, 日本流体力学会年会 2016 講演要旨集(USB), 2016年09月

5) 入江政安, 廣瀬文明, 岡田輝久, 底質モデルによる窒素・リンの間隙水中濃度および溶出量推定における多項式カオス展開を用いた高度化, 日本沿岸域学会研究討論会 2016, 講演概要集, No.29, 10-2, 2016年07月

6) Masayasu Irie, Tomoya Ota, Teruhisa Okada, Shuzo Nishida, Effects of data assimilation on real-time simulation of hypoxia in Tokyo Bay, Japan, Estuarine and Coastal Modeling Conference (ECM14), 2016年06月

7) 林政宏, 入江政安, 岡田輝久, 伊藤由比己,

山野貴司, 水中設置型分光光度計を用いた栄養塩連続観測法の検討と現地観測, 平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, II-25, 2016年05月

8) 廣瀬文明, 岡田輝久, Jann Paul Mattern, 入江政安, 多項式カオス展開を用いた底泥中のアンモニア態窒素再現に関するパラメータ推定, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, II-26, 2015年05月

9) Teruhisa Okada, Masayasu Irie and Shuzo Nishida, Data Assimilation of Hourly Vertical Current Profiles Using 4D-Var in Stratified Coastal Area, The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2014), 2014年06月

10) 入江政安, データ同化を用いた沿岸域モデルの高度化, 海洋学会シンポジウム, 東京海洋大学, 2014年03月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕なし

〔国際共同研究集会〕(計1件)

International Research Collaboration Workshop on Water Quality Modeling, 2016/11/28 - 2016/12/2, 大阪大学

〔その他〕

ホームページでの研究成果公開
Estuary+Python <http://estuary.link/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 政安 (IRIE, Masayasu)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00379116