

第II部門

アンサンブルカルマンフィルタを用いた水質モデルパラメータの最適化と大阪湾のDO収支への影響評価

大阪大学工学部 学生員 ○吉野 泰司 大阪大学大学院工学研究科 学生員 高橋 祐馬  
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 入江 政安

1. はじめに

大阪湾では、水質改善に向けた取り組みが数多く行われており、一定の成果を挙げているものの、未だに赤潮や貧酸素水塊の発生が報告されている。そのため、さらなる環境施策が必要であり、その前提として湾内の物質循環解析に基づいた水質の把握が必要である。物質循環解析には水質モデルを用いたシミュレーションが有効であるが、モデルパラメータを決定するにあたって、文献値を用いることも多く、不確実性が高い。そこで、本研究ではデータ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタを用いてパラメータの最適化を行い、モデルの再現性向上を図った。そして、パラメータの更新が夏季における大阪湾のDOの物質循環解析に与える影響を評価した。

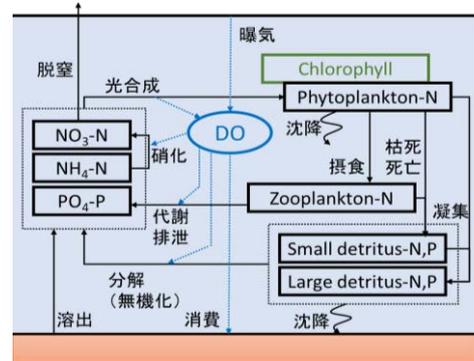


図-1 水質モデルの概念図

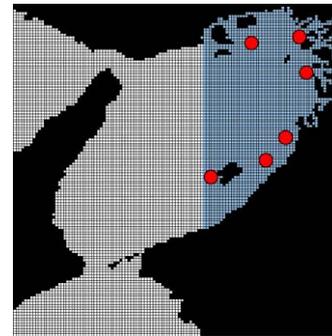


図-2 計算領域図

2. 本研究の手法について

(a) 数値モデル

本研究では、流動モデルとして ROMS (Regional Ocean Modeling System) を用い、水質モデルとして Fennel ら<sup>1)</sup>による水質モデルに改良を加えたものを用いた。本研究における水質モデルの概念図を図-1に示す。また、図-2に示すように、計算領域として大阪湾の東西 58.5 km×南北 62 km の範囲を設定し、水平方向に 500 m 間隔で区切った格子を用いた。また、鉛直方向については 20 層に設定し、表層が薄くなるように分割した。図-2における赤い点はデータ同化に用いた大阪湾定点自動観測の観測地点を示し、青い領域は物質循環解析の対象領域を示している。

(b) 同化手法

本研究では、データ同化およびパラメータ推定にアンサンブルカルマンフィルタ(以下、EnKF)を用いた。以下に、EnKFによるパラメータ推定の更新式<sup>2)</sup>を示す。

$$\theta^{a,i} = \theta^{f,i} + K_{\theta}(y - Hx^{f,i}) \quad \dots(1)$$

ここで、 $x^f$ は解析前の状態変数、 $H$ は観測演算子、 $y$ は観測値、 $\theta^f$ は同化前のパラメータ値(予報値)、 $\theta^a$ は同

化後のパラメータ値(解析値)であり、上付き文字の*i*は、*i*番目のアンサンブルであることを示している。また、 $K_{\theta}$ はカルマンゲインと呼ばれる重み行列で、以下の式から求められる。

$$K_{\theta} = P_{\theta x}^f H^T (H P_{xx}^f H^T + R)^{-1} \quad \dots(2)$$

ここで、 $P_{xx}^f$ は状態変数の誤差共分散行列、 $P_{\theta x}^f$ はパラメータと状態変数の相互相関行列、 $R$ は観測誤差の共分散行列である。式(1),(2)は、状態変数とパラメータの分散の相関関係から求めたカルマンゲインに基づいて、パラメータの修正量を決定していることを示している。

3. パラメータの最適化と考察

パラメータ推定における計算期間は2012年8月の1ヵ月間に設定し、1日毎に図-2で示した観測地点におけるDOとクロロフィルの鉛直分布を同化してパラメータ推定を行った。表-1に、推定したパラメータの一覧と、推定前後のパラメータ値を示す。同化計算終了

表-1 最適化前後のパラメータ値

パラメータ	同化前	同化終了時
植物プランクトンの最大増殖速度	1.3	1.381
植物プランクトンの枯死速度	0.1	0.143
動物プランクトンの増殖速度	0.27	0.309
浮遊性有機態窒素の分解速度	0.05	0.250
沈降性有機態窒素の分解速度	0.05	0.135

(単位: 1/day)

時点の推定値に注目すると、植物プランクトンの増殖速度はクロロフィル濃度をやや増加させる方向に最適化された一方で、枯死速度はクロロフィル濃度を減少させる方向に変化した。これは、同化期間の前半と後半でクロロフィル濃度の修正された方向が異なっており、枯死速度は期間前半におけるクロロフィルの下方修正の影響、増殖速度は期間後半におけるクロロフィルの上方修正の影響がそれぞれより強く表れた結果であると考えられる。また、底層 DO を減少させる同化の影響を受け、分解速度が大きくなるよう変化した。

#### 4. 物質循環の解析と考察

パラメータ修正が大阪湾における DO 動態解析に及ぼす影響を明らかにするために、同化前と同化計算終了時点のパラメータ値をそれぞれ用いて、2012年8月1日から2012年8月15日の15日間を計算期間とする通常の再現計算を行った。図-3にDOの湾奥部における収支を示す。

パラメータの最適化によって植物プランクトンの増殖速度が増加したにも関わらず、光合成による酸素生産量が減少した。これは、植物プランクトンの枯死速度も高くなったために表層の植物プランクトン濃度が減少し、光合成総量が減少したためである。加えて、有機物の分解速度が高くなったことでDOの消費量が増え、全体としてDOが減少した。湾奥部全体でDOが低下したことで、表層では、曝気による大気からの酸素供給量が大幅に増加し、底層では、無酸素の領域が広がったために、底泥が物理的に消費できる酸素量が減少した。また、湾中央部におけるDOも低下したことで、移流によるDOの流入量が減少するなど、湾中央部との交換も変化していることがわかった。

同化終了時のパラメータを用いた再現計算では、DOの減少が湾奥部全体に及んだために、DOの再現性が同化前のパラメータを用いた場合に比べて悪くなる観

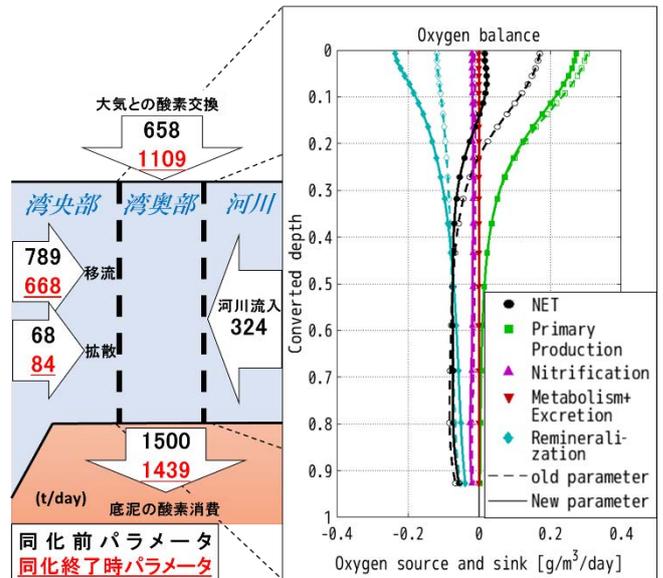


図-3 大阪湾湾奥部における DO の収支

測地点がいくつか見られた。これは、水質パラメータを計算領域に対して一様に与えている他、同化時点終了時の8月末におけるパラメータ推定値を用いたために、計算期間を通したパラメータ最適値とは言えないことも理由として挙げられる。

#### 5. まとめ

本研究では、EnKFを用いてデータ同化を実施することによりパラメータを最適化し、パラメータの更新が大阪湾のDO動態に与える影響を評価した。パラメータ推定においては、クロロフィルとDOの状態推定に基づいてパラメータが変化していることが確認できた。しかし、推定されたパラメータを用いて通常の再現計算を実施すると、かえってDOの再現性が悪くなる地点もあり、推定値の活用方法などについてさらなる検討が必要であることが示された。

**謝辞** 本研究はJSPS科研費16KK0128, 17K06576の助成を受け実施した。記して深甚の謝意を表す。

**【参考文献】** 1) Fennel, K., et al. : Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.20, GB3007, 2006.  
2) Gharamti, M. E., et al. : Online tuning of ocean biogeochemical model parameters using ensemble estimation techniques: Application to a one-dimensional model in the North Atlantic, *Journal of Marine Systems*, 168, pp.1~16, 2017.