

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：14401
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2017～2019
課題番号：16KK0128
研究課題名（和文）最新データ同化技術の水環境シミュレーションにおける活用の体系化（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）Systematization of the use of latest data assimilation technology in water environment simulation(Fostering Joint International Research)
研究代表者
入江 政安（Irie, Masayasu）
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00379116
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、渡航先の海外研究機関と共同で、4次元変分法およびアンサンブルカルマンフィルタ法の2種類のデータ同化手法を用いて、大阪湾のクロロフィル分布および溶存酸素濃度分布の、3次元海洋モデルによる再現精度を向上させた（状態推定）。通常、データ同化を用いた研究ではこのような状態推定に留まるものが多いが、本研究では、データ同化中に水質モデル内のパラメータの値を推定するパラメータ推定も同時に実施し、水質モデル自体の精度向上も同時行える手法を構築した。さらに、ケーススタディを通じて、推定すべきパラメータ抽出法についても検討し、手法の体系化を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水環境シミュレーションに用いる水質モデルは年々、複雑なモデルに発展する一方で、現地観測データや室内実験からだけでは、そのモデルに必要な情報を得られない状況が続いている。本研究は海洋学や気象学で先行するデータ同化技術を沿岸の水環境解析に活用する方法について体系化を図った。特に、2種類の同化法を用いて、それぞれの個性を見極めながら、活用法を検討した点が新しい。また、本研究で用いた現地観測データは比較的維持管理費が低廉なセンサーで観測できる項目であり、開発した技術は、現地データとシミュレーションにより、沿岸域の環境モニタリングを効率的に実施することを可能にする技術であると言える。

研究成果の概要（英文）：This study adopted two different data assimilation methods: the four-dimensional variational method and the ensemble Kalman filter method, and assimilated vertical profiles of chlorophyll and dissolved oxygen in Osaka Bay. We developed the techniques that can simulate the state variables better and estimate model parameters in a biogeochemical model connected to a three-dimensional ocean model simultaneously. In addition, case studies were conducted to devise how to select parameters to be estimated.

研究分野：環境水理学

キーワード：データ同化 ランクトン 4次元変分法 アンサンブルカルマンフィルタ 大阪湾 水質モデル 貧酸素水塊 植物プランクトン 沿岸域

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

世界各国の経済発展に伴う水質汚濁域の拡大に伴い、流動水質モデルはますます広範に水環境解析で利用されている。近年の流動水質モデルは、水質項目（状態変数）を増やした細緻化が行われ、解析に当たってあらかじめ設定しなければならない各種の係数（モデルパラメータ）も増大している。このようなパラメータは、他の水域で得られた文献値に頼って設定されることが多く、モデルによる再現精度が良くない場合は、さらに原因究明を難しくするという問題がある。

2. 研究の目的

基課題（国際共同研究加速基金申請時に基課題として設定した科研費前課題）では、データ同化手法のなかから4次元変分法を選択し、研究を進めてきた。データ同化は計算中に観測値を用いて（同化して）より良い計算結果（解析値）を得る手法であり、高度なデータ同化手法としては4次元変分法（4DVar）とアンサンブルカルマンフィルタ法（EnKF法）がある。データ同化は手法を工夫すれば、状態推定（計算で得られる水温や水質項目の分布を修正する）と同時に、モデルパラメータの修正を行うことができる。基課題ではこれらの手法について一定の知見を得たが、特に沿岸域の水質の再現予測に適したデータ同化のあり方について提言できるほどの十分なケーススタディや計算条件の検証は行えていなかった。

一方で、海外連携機関であるカナダ・ダルハウジー大学の研究グループが開発しているEnKF法によるデータ同化モジュールの提供を受け、こちらでモジュールの改良を進める共同研究を始めた結果、4DVarとEnKF法の両手法による再現精度の向上と同化による効果の把握ができるようになった。このような「流派」の異なる2種類の高度な同化手法を用いて、それぞれの長所・短所を明らかにし、同じ同化対象を用いてその有効性を把握すること自体、ほとんど研究がないことから、本研究では、海外機関と共同で研究を実施し、4次元変分法とEnKF法を両方用いてデータ同化を実施し、沿岸域における水質シミュレーションでの活用法の体系化を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で同化対象とした、水底面上に形成される貧酸素水塊は溶存酸素濃度（DO）が3 mg/l以下となる現象であるが、特に大阪湾の夏季の底面上のDOはゼロに近い値になり、長期間にわたり継続する。つまり頻度分布を描けば、ゼロ付近の正の値の頻度が多くなる一方で、負の値は発生しない分布となり、誤差分布に正規分布を仮定しているデータ同化法では不具合が大きい。そこで誤差分布が対数正規分布であると仮定する対数正規4次元変分法を適用し、クロロフィルおよびDOの再現精度が向上するかについて検討した。合わせて、貧酸素化と水域内の内部生産に影響を及ぼす底質と海水-底泥間の物質交換を再現する底質モデル（早期続成作用モデル）の高精度化のために、既存データを活用できるパラメータ最適化法を検討した。さらに、瀬戸内海では水質改善に伴う底質の改善が進んでおり、底質による溶存酸素消費を正確に把握する必要性が生じたことから、酸素消費速度調査も実施した。

また、EnKF法を用いた解析では、はじめに、水温・塩分の鉛直分布のデータ同化が水質項目の再現精度に及ぼす影響について評価した。これは、水質分布の再現性が悪い場合、原因は水温・塩分の計算も含む流動モデルにあるのか、あるいは水質モデルそのものにあるのか。明確に分からない場合が多いため、原因の切り分けが可能であるかを実証するためである。また、大阪湾のような河口域では、塩分濃度差による強固な密度成層があり、数値モデルはこのような強い密度成層の再現に弱いことから、その再現性能の低下が水質の再現・予測に及ぼす影響を評価した。次に、DOデータで同化した場合、観測値変動が大きく、また夏季の底層ではDOが0 mg/lになったまま継続することがアンサンブルの広がりにも影響を与えることから、同化における計算条件およびパラメータ設定について検討した。

以上の得られた知見から、2012年8月の大阪湾における水質データを用いて、データ同化を実施し、状態推定およびパラメータ最適化を同時に実施した。

さらに、4次元変分法を用いたデータ同化では、再現性能が低い水質モデルが同化の効果に及ぼす影響を評価した。具体的には、植物プランクトンの増殖において、水温依存関数が異なり、また、考慮する植物プランクトンの種類数を1種と3種にした2つの水質モデルを用いて、植物プランクトンが3種のモデルについては新たに接線形モデルとアジョイントモデルを構築し直し、データ同化を実施した。

最後に、前述のようなモデルの修正のたびに接線形モデルとアジョイントモデルを構築する膨大な作業を回避するための、新たな同化スキームである二重数を用いたデータ同化の導入を行った。

4. 研究成果

対数正規4次元変分法（L4DVar）を用いて双子実験を実施し、通常の4次元変分法（4DVar）との同化効果の比較検証を行った結果、L4DVarを用いることで、負の値をとることなく4DVarと同程度の精度で、大阪湾の貧酸素水塊を再現することができた。また、L4DVarによる表層クロロフィル同化結果では、中程度の濃度の水域では再現性が確保されたものの、低濃度の湾西部、高濃度の湾奥部で再現性が低下した。

底質モデル（早期続成作用モデル）におけるパラメータ最適化においては、多項式カオス展開を用いることによりその実現が可能になった（表-1）。底質モデルは多くの物質を取り扱うため、パラメータも非常に多い。一方、再現対象となる栄養塩の水中回帰速度は地点ごとのばらつきが多い。多項式カオス展開で一度に推定できるパラメータは2種類であるが、パラメータ値の推定順を検討することにより、少ない推定回数で、底質内の窒素、リン分布と水中への回帰速度を同時に再現する手法を構築した。

底泥による酸素消費速度を、不攪乱柱状採泥と室内コア実験により実施した。ダイバー採泥によるコアの2019年10月5日の平均SODは湾西部（水深33m）で0.40 g/m²/day、湾東部の有機物堆積が多い地点（水深19m）で1.38 g/m²/dayであった。これらの値は10月であることを考慮しても従来値より低く、瀬戸内海全域で進む水質と底質の改善の影響も示唆された。

EnKF法によるデータ同化では、まず、クロロフィル、DOの鉛直分布データを同化することに当たって、特に夏季の底層DOがほぼゼロになる観測データを同化することによる弊害を回避すべく、同化パラメータの最適値を探索した。アンサンブルのシュリンクを避けるためのインフレーションの調整を行って適切な値を見いだすことによって、解析値がゼロの値に引っ張られて解析値が徐々に下がる現象を回避することができた。そこで、別検討で、双子実験を用いて、より再現性の高い解析値を得つつ、パラメータも、戻るべき元の“真値”に近づくパラメータの組み合わせを検討した結果から、適切な修正すべきパラメータのセットを選択し、パラメータ推定を行った。大阪湾水質定点自動観測システムで得られたクロロフィルおよびDOの鉛直データを用いデータ同化を実施したところ、DOの再現性については十分に改善されなかったものの、クロロフィル分布については再現性が改善し、また、パラメータも修正されることが示された。（表-2）修正前と修正後のパラメータを用いて、モデル計算における窒素とDOの動態を明らかにし、パラメータの最適化が物質循環解析にどのような影響を与えたかを評価した。窒素循環については、植物プランクトンの枯死速度が大きくなったことで、クロロフィル濃度が下がり、植物プランクトンによる消費が少なくなり。また、有機物の分解速度が大きくなったことで、有機物が堆積する前に有機態窒素が分解されやすくなるという結果を示した。DOの収支については、光合成量低下によるDO生成量の低下と、有機物分解量の増加によるDO消費量の増加によって、特に表層におけるDO収支がマイナスに近づくという結果になった。

4DVarによるデータ同化において、水質モデルの低再現性がデータ同化に及ぼす影響を評価した。状態推定の際には同化ウィンドウの初期値を修正しているため、同化地点における修正量へのモデルの低再現性の影響は1-1.5日程度であったが、12時間の同化ウィンドウ内でさえ

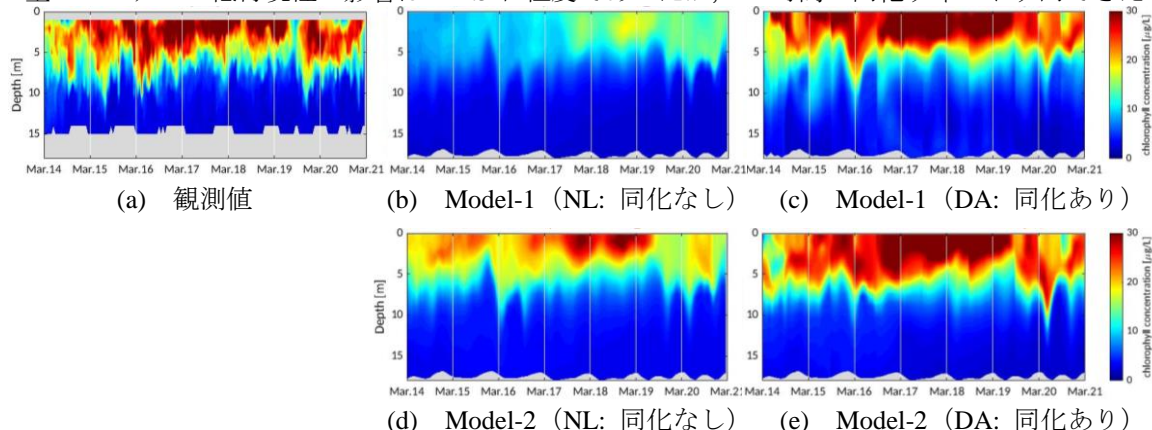


図-1 春季の神戸港波浪観測塔におけるクロロフィル濃度のイソプレット (Model-1が低再現性能な水質モデル、Model-2が高再現性能な水質モデル)

表-1 底質モデルのパラメータ推定結果（Case1から順に徐々に推定し、値を固定するパラメータが増える）

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
KDOM _f	1.2×10 ⁻¹	1.2×10 ⁻¹	9.4×10 ⁻²	9.4×10 ⁻²
non/t	0.19	0.19	0.16	0.16
KPOM _s		2.5×10 ⁻⁹	1.9×10 ⁻⁹	1.9×10 ⁻⁹
fast/t		0.46	0.54	0.54
C/N ratio				9.2
C/P ratio				90.9

表-2 現地観測データのEnKFによる同化により推定されたモデルパラメータ値

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

水質モデルの悪影響が現れやすい。(図-1) モデルの精度が悪い場合には、単に状態推定のためだけのデータ同化であっても同化ウィンドウを小さくした逐次的な手法が推奨される。さらに、同化地点以外へはモデルの低再現性の影響が現れやすい点に留意すべきであることが示された。高性能なモデルは表層プランクトンの増加に追従できるモデルであることから春季の阪南沖での濃度の増加が見られる。モデルの精度はデータ同化後の空間分布に影響を及ぼし、その違いは無視できないと言える。また、このデータ同化時においては状態推定とパラメータ推定を同時に実施している。修正されるパラメータの中では、植物プランクトンの増殖速度は最も感度の高い、同化システムによる修正が加えられやすいパラメータグループの1つである。プランクトン種ごとに見ると、春季には *Skeletonema* 属の増殖速度の変動が大きく、ほかの2種は殆ど変化しないのに対し、夏季には、*Chaetoceros* 属、*Thalassiosira* 属、*Skeletonema* 属の順に大きな修正が加えられていることが分かった。これは、栄養塩は豊富にあるが水温は 10 °C 程度の春季には、専ら *Skeletonema* 属の増殖に頼り、水温 30 °C 程度の夏季には *Chaetoceros* 属に比較的依存するシステム上の応答によるものであり、データ同化に対し、システムが正常に機能していることを示すものである。

最後に、二重数を用いた自動微分を導入した 4DVar を用いて双子実験を実施し、実用性の評価および、従来型の 4DVar との同化性能の比較検証を行った。二重数を用いることで、非線形モデルの評価のみで接線形モデルおよびアジョイントモデルの計算を代用でき、これらのコーディングを行うことなく、水質モデルの再現性を向上させる手法が確立できた。また、二重数を用いた 4DVar は、従来型と比較して計算時間は増加したが、同化性能はほとんど変わらず、実用性を有していた。さらに、大阪湾で観測されたクロロフィルおよび DO データを用いたデータ同化を実施したところ、それら状態量の再現性が向上したことが確認された。

以上のように、アンサンブルカルマンフィルタ法および 4次元変分法の 2 種類の高度なデータ同化を大阪湾における水環境解析に適用し、水質項目の再現性向上を図り、合わせて水質モデル自体の改善につながるパラメータ値の修正にデータ同化が活用できることを示した。十分なケーススタディを実施することで、データ同化の適用限界や修正すべきパラメータなどの抽出を行う手法も開発でき、水環境シミュレーションにおけるデータ同化の活用法の体系化が行えた。

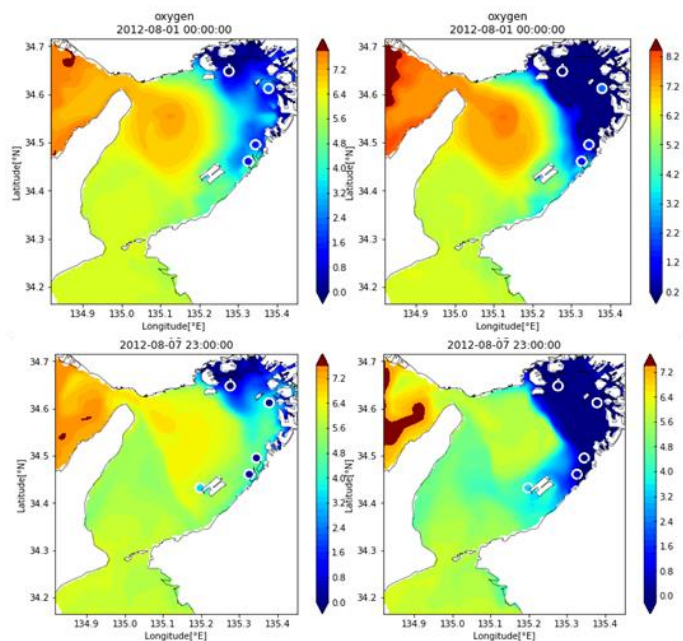


図-2 計算開始時（上）および終了時（下）における DO の底面分布（コンターは計算値、丸は観測値）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Irie Masayasu, Hirose Fumiaki, Okada Teruhisa, Mattern Jann Paul, Fennel Katja	4. 巻 60
2. 論文標題 Modeling of nitrogen and phosphorus profiles in sediment of Osaka Bay, Japan with parameter optimization using the polynomial chaos expansion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 499 ~ 515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2018.1531814	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 入江 政安、野田 晃平、岡田 輝久	4. 巻 73
2. 論文標題 対数正規4次元変分法を用いた水質鉛直分布のデータ同化：双子実験による評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B 2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1243 ~ I_1248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_1243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高橋祐馬, 林政宏, 入江政安
2. 発表標題 アンサンブルカルマンフィルタによる大阪湾における水温・塩分鉛直分布の同化と水質再現に及ぼす影響
3. 学会等名 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田晃平, 岡田輝久, 入江政安
2. 発表標題 対数正規4次元変分法による水質実観測データの同化に関する基礎的検討
3. 学会等名 2018年度日本流体力学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Irie, Yuma Takahashi, Masahiro Hayashi, Liuqian Yu and Katja Fennel
2. 発表標題 Impacts of temperature and salinity assimilation with the Ensemble Kalman Filter on simulated chlorophyll and hypoxia in Osaka Bay, Japan
3. 学会等名 15th Estuarine and Coastal Modeling Conference (ECM15) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Irie, Kohei Noda and Teruhisa Okada
2. 発表標題 Assimilation of vertical chlorophyll and oxygen profiles using the lognormal four dimensional variational method: A case study in Osaka Bay, Japan
3. 学会等名 Ocean Predict '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永野隆紀, 井上凌, 岡田輝久, 入江政安
2. 発表標題 二重数を用いた4次元変分データ同化の大阪湾低次生態系モデルへの適用
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野泰司, 高橋祐馬, 入江政安
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

上記以外に、現在3本の論文を投稿中である。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	フェネル カーチャ (Fennel Katja)	ダルハウジー大学・理学部海洋学科・教授	