

# 水環境モデル・河川モデルにおけるデータ同化を用いた パラメタリゼーション技術



研究ノート

入江政安\*

Parameterization techniques in water quality and river runoff models  
using data assimilation

Key Words : Data assimilation, water environment, Osaka Bay, 4DVar, adjoint model

## はじめに

土木工学という分野は、理工学技術の下流にいて、多くの分野で先進的な取り組みや技術開発が行われた後、その技術を活用することに長けた分野であるとも言える。例えば、筆者が学生時代から使用してきた、水域の溶存酸素濃度を測定する現地用センサーは、2000年ごろからようやく購入可能な金額で販売されるようになった。それまではガラス瓶内に採水サンプル共々酸素を固定し、実験室に持ち帰って分析していた。また、その当時は隔膜式と呼ばれていたガルバニ電極センサー方式で、今は、反応の良い蛍光式センサーになり、より一層正確な測定ができるようになってきている。このような基礎的技術の進展に伴い、観測の機動性が著しく増し、情報量が増えることになることになるが、分からなかったものが分かるようになる一方で、分かっていたつもりのもので分からなくなることもある。土木行政が行う環境改善施策も、そのようなものに時として、影響を受け、大胆な政策転換を生じさせることもある。

## 土木工学分野に応用することの難しさ

筆者の研究は現地調査と数値シミュレーションを同時に実施するが、ここでの話題は数値シミュレーションである。土木工学分野には非常に多くの種類

の「シミュレーションモデル」があり、例えば、雨が降って、洪水や氾濫が発生するまでで言えば、大別して、降雨モデル、森林モデル、土壌浸透モデル、斜面流出モデル、河川流出モデル、氾濫モデルのように、種々のモデルが存在する。これらのモデル群には、ナビエ・ストークス方程式を解く力学を基礎とするモデルがある一方で、過程を概念的に解釈した「概念モデル」もある。加えて、観測によって得られるデータは離散的、つまり、広い空間に不等間隔にあり、決して扱いやすいデータではない。入力情報として与えられる降雨の情報も必ずしもその地域を代表しきれているわけでもない。

そこで、「データ同化」のような手法で、シミュレーション結果を改善することが求められる。データ同化は、計算の実施中に、ある時刻の観測値の一部を数値計算結果に織り込む（同化する）ことで、次の時刻の計算結果の再現性を向上させる技術である。データ同化は、気象学や海洋学の分野で先行して発展し、現在では、台風の進路予測など、リアルタイムの現況推定や短期間将来予測にも実運用されるようになってきている。海洋学におけるデータ同化は、初期には、衛星によるリモートセンシングで得られた海面高度や海表面水温の水平分布を用いて行われ、海洋環境科学分野では、海表面の植物プランクトンの量を表す、クロロフィル濃度の衛星観測データが良く用いられている。いずれのデータも筆者が普段取り扱うデータと比べれば密なデータである。

筆者が最初に取り組んだ貧酸素水塊（水域の富栄養化により結果として底層の酸素濃度が低下し、生物の生息に適さない水塊、近年では dead zone と呼ばれる）のシミュレーションにおいても、現地調査に加えて、数値モデルの最適化を可能な限り行った時点で、データ同化に着目し取り組み始めた。そこで苦しむのは、先に挙げた離散的なデータ、圧倒



\* Masayasu IRIE

1974年11月生まれ  
大阪大学大学院 工学研究科 土木工学  
専攻博士後期課程 (2004年)  
現在、大阪大学大学院 工学研究科 地球  
総合工学専攻 教授 博士 (工学)  
TEL : 06-6879-7605  
FAX : 06-6879-7607  
E-mail : irie@civil.eng.osaka-u.ac.jp

的に不足する情報量である。離散的なデータであっても、補間により間を埋め、密なデータとして整えれば良いように思われるかもしれないが、間を補間して描く空間分布が自然現象を上手く表せるのであれば、極端な話、シミュレーションは不要になる。観測値では分からない「間」を埋めるためにシミュレーションをやっているのであるから、空間補間したデータを使ってシミュレーションを向上させようというのはナンセンスである。そこで、土木工学では、海洋学では障壁とならなかった情報量の少ないデータの利用法で悩むことになる。やっていることは自然現象の解明であり、理学的であるが、必要なことは技術開発で、いかにも工学的な悩みである。簡単な解決法などなく、同化に用いる観測値が時空間的にどの程度範囲まで影響を及ぼすか、その強度はどれぐらいか、あるいは観測値と計算値があまりにも離れているときはどのように除外処理をするか、など細々とした検討を経て、初めて、貧酸素水塊分布のより良い再現につながる。

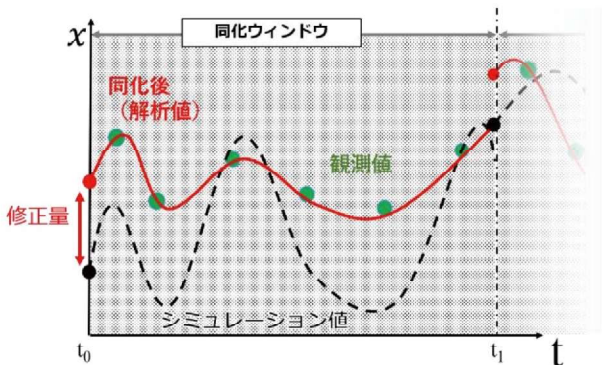


図-1 4次元変分法によるデータ同化 (例えば淡路ら<sup>1)</sup>)

データ同化を行うことにより、貧酸素水塊分布の再現性が良くなっただけでは、学問的な面白みは少ない。このような新たな分布を得ることを、この分野では状態推定と呼ぶ。状態推定により台風の進路の短期先予測の精度が増すように、状態推定には、将来予測の精度が増すことに価値がある。しかし、水環境分野では、短期先予測の需要は大きくない。データ同化をこの分野で用いることの意味は、先にも述べた、計算条件やモデルの最適な条件を探索する手作業による作業を効率化、あるいは自動化することにある。数値モデルにおけるパラメータをデータ同化により推定することをパラメータ推定と呼び、

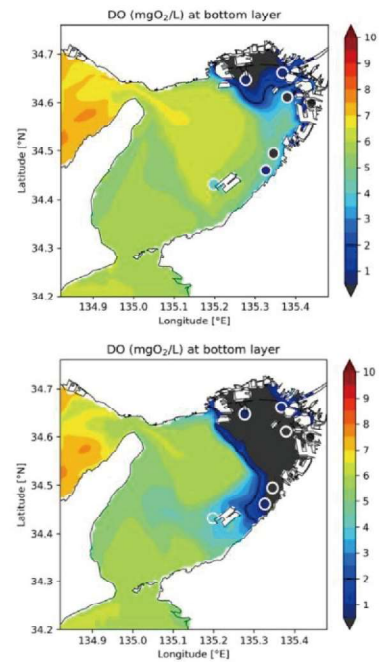


図-2 大阪湾における貧酸素水塊の「状態推定」<sup>2)</sup>  
(上：同化前 下：同化後)

状態推定よりさらに高難度な技術となる。

## パラメータ推定技術 2例

ここでは2つの例をお示ししたい。1つは植物プランクトンの増殖速度の推定である。水域の植物プランクトンは生態系ピラミッドの最下層を形成しており、この増殖と死滅、被捕食を尤もに表現できていることが重要である。例えば、1口の光合成による増加が元のプランクトンの量の1.8倍で、死滅・被捕食による減少量が0.3倍でも差し引き1.5倍で、これが、増加量が2.0倍、減少量が0.5倍でもやはり、差し引き1.5倍である。水域で測定されるクロロフィル濃度の変化は、敢えて言うなら、この1.5という数字としてしか現れないため、その他のパラメータの推定が必要となる。そしてその値は、水温や日射の条件によって大きく変化する。これを植物プランクトンだけでなく、水中の窒素(プランクトン態窒素、その他の有機態窒素、アンモニア、硝酸など、にさらに細分化される)やリン、酸素濃度それぞれの増減にいちいち含まれるパラメータを対象とすると、その調整作業が膨大で、どれほど経験が重要であることが想像していただけるだろうか。

筆者らのグループで実施しているデータ同化は4次元変分法という手法で、ある期間(同化ウィンド

ウと呼ぶ) に含まれる観測値全てを使って、その再現にふさわしいパラメータを探索しながら、観測値と差を減らしていく。図-3に示すように、植物プランクトン周りのパラメータはその日の植物プランクトン中のクロロフィル濃度に合わせるべく、日々変化すると推定できることが分かる。このように、毎日、値を変化させることは、手作業では実現不可能であり、データ同化によるパラメータ推定技術によって初めてなし得るものである。

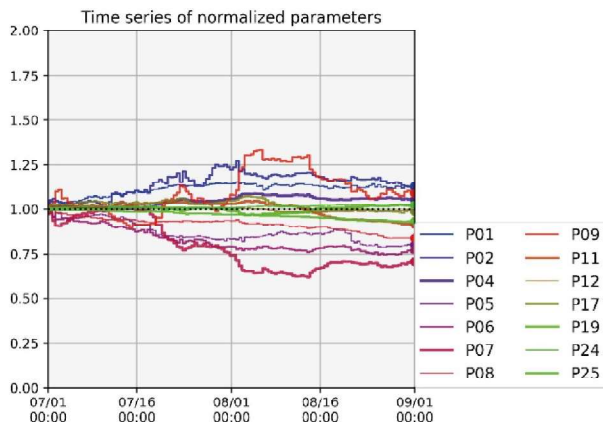


図-3 推定されたパラメータ値の変化 (初期値を1とした)

このようにして得た、尤もなパラメータ値を用いることで、将来予測にも精度が増す。気候変動に伴って水温上昇する将来において、大阪湾における貧酸素水塊がどのように変化するかを示したのが図-4である。年間で見た場合、将来は、貧酸素水塊の発達時期が早くなることを示している。パラメータ値を十分に検証しないまま、将来予測することの危険性は多く指摘されており<sup>3)</sup>、将来予測を行うに当たっては、このような丁寧な対応が必要である。

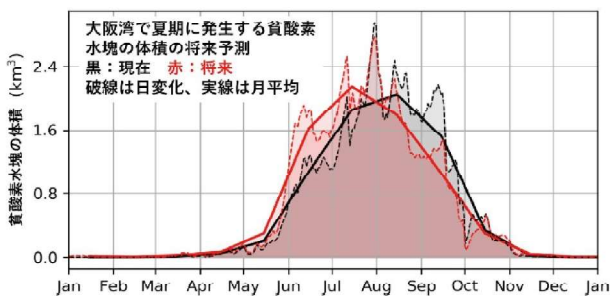


図-4 貧酸素水塊の季節変化 (現況と将来)<sup>2)</sup>

今ひとつは、冒頭で述べた河川流出モデルにおけるパラメータ推定である。筆者が用いたモデルでは

降水の土壌浸透過程と流出過程を同時に解くモデルであり、浸透モデルは概念モデル、流出過程は運動方程式を簡単にした力学モデルである。図-5は、河川の水量の再現に大きな影響を及ぼす河床の粗度係数(河床の粗さを表す)を、観測値を用いて自動推定した結果<sup>4)</sup>であり、このように、粗度係数の空間分布を細かく推定することは、データ同化によるパラメータ逆推定によってようやくなし得る技術である。

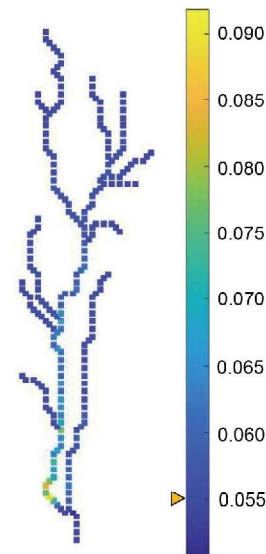


図-5 データ同化により推定されて河床の粗度係数分布<sup>4)</sup> (凡例の矢印が初期値で、観測水位をより良く再現するために下流部で粗度が高くなるよう推定されている。)

### まとめにかえて

近年、深層学習が頻繁に使用されるようになって、不明なプロセスを一足飛びに飛び越し、結果だけを推定するような使用のされ方も増えている。しかし、あらゆる新技术はこれまでも「巨人の肩に乗って」いままで見えていない遠方まで見えるようになるためのツールとして昇華されてきたように、深層学習も既存の公式や法則の代替手段ではなく、より現象を深く理解するために使用されていくのではないかと思われる。また、そのときには、先行する分野で上手くいった事例を土木工学分野に適用、応用することに非常に苦勞をするだろう、と容易に推察できる。しかし、それこそが土木分野の学術面での真の面白さの1つと言える。本稿で述べたデータ同化もその面白さと難しさがある。

また、上で示したパラメータの推定技術はそれな

りに高度な技術であるものの、本来、では、なぜそのようなに変化したのか、既存のパラメータ設定では、あるいは、既存のモデル式では表現できていないものは何か？を追跡することが必要である。筆者らもまだ十分な答えを得ておらず、これからの課題である。

### 謝辞

本稿作成にあたり、大阪大学博士後期課程学生永野隆紀君の協力を得た。また、本稿で示した成果の一部はJSPS 科研費 17K06576, 21H01435 によるものである。また数値計算に当たっては、統計数理研究所のスーパーコンピュータを使用した。記して深甚の謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 淡路敏之, 池田元美, 石川 洋一, 蒲地 政文 : データ同化—観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, 284p (2009)
- 2) 永野隆紀, 入江政安, 東博紀 : 気候変動に伴う水温上昇が大阪湾の貧酸素水塊と酸素循環におよぼす影響評価, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 印刷中 (2022)
- 3) Ulrike Löptien and Heiner Dietze: Reciprocal bias compensation and ensuing uncertainties in model-based climate projections: pelagic biogeochemistry versus ocean mixing, *Biogeosciences*, 16, 1865–1881, <https://doi.org/10.5194/bg-16-1865-2019> (2019)
- 4) Masayasu Irie, Hiroaki Toi, Masahide Ishizuka, Kohji Tanaka and Shuzo Nishida: Parameter estimation of a distributed hydrological model using the adjoint method: A case study in the Ibo river watershed, Japan, *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*, 4692-4701 (2019)



K. Iwa