

大阪大学工学部 学生会員 ○廣瀬文明
カリフォルニア大学 非会員 Jann Paul Mattern

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 岡田輝久
大阪大学大学院工学研究科 正会員 入江政安

1. はじめに

海底には、河川あるいは内部生産由来の有機物が堆積し、微生物によって無機態の窒素やリンに分解され海水中に溶出する。西本ら¹⁾は大阪湾で底質の現地調査を実施し、得られた結果をもとに数値モデルによる底質のシミュレーションを実施しているが、再現性に改善の余地が残されている。底質モデルには不確定性を持つパラメータが多く存在する。それらの多くは過去の文献や室内実験の値を参考に決定しており、パラメータの調整には非常に多くの作業を要する。そこで、本研究では、2つのパラメータを同時に最適化する多項式カオス展開を用いて、パラメータの最適化を行い、底質間隙水中のアンモニア態窒素の鉛直分布の再現を試みた。

2. パラメータの感度分析

(1) 計算条件

本研究で用いた底質モデルは Anggara ら²⁾の研究をもとに構築された、底泥中の土粒子及び間隙水中における各物質間の生物化学的反応を考慮した鉛直1次元早期続成作用モデルである。鉛直方向の構造を全40層・泥深16cmまでとし、底泥内において反応が活発である表層部で起こる現象をより明確にとらえるため、表層ほど層厚が小さくなるようにした。タイムステップは20分、1年を360日とし、計算を行った。季節変化を再現するため、直上水の水温および溶存酸素濃度、POM（懸濁態有機物）フラックスは1年間を1周期とするsin関数と仮定した。

(2) 感度分析

推定で用いるパラメータを抽出するため感度分析を行った。底質モデルの計算結果のうち、7月の間隙水中のNH₄-N濃度を用いてパラメータに対する感度を調べた。パラメータ値は既往研究で用いられた値を参考に決定した。その結果、間隙水質に与える影響が小さいパラメータも存在した一方で、図-1に示す易分解性有機物比 (R_{fast}) のように間隙水質に大きな影響を与えるパラメータが存在した。同様に、非分解性

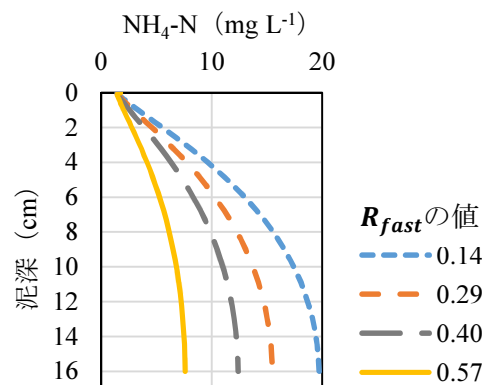


図-1 R_{fast} の値を変化させたときのNH₄-N濃度の変化

有機物比 (R_{non})、有機物中のC/N比 (R_{CN})、難分解性懸濁態有機物の分解速度定数 (KP_{slow})、易分解性溶解態有機物の分解速度定数 (KD_{fast})、硝化反応速度定数 (K_6) が間隙水中のNH₄-N分布の再現に大きな影響を与えることが分かった。よってこれら6つのパラメータの最適値を多項式カオス展開を用いて推定する。

3. パラメータ推定

(1) 多項式カオス展開

多項式カオス展開は不確定性を定量的に評価する数値解析法であり、補間を行うため、モンテカルロ法と比べて少ない計算回数で高い精度を得られる特徴がある。以下に多項式カオス展開の基礎式を示す。

$$f(\theta) = \sum_{k=0}^{k_{max}} a_k \varphi_k(\theta) + \epsilon_{trunc}(\theta)$$

ここで θ は不確定性を持つパラメータ、 $f(\theta)$ はモデルから出力された結果、 $\varphi_k(\theta)$ は k 次の直交多項式、 a_k は展開係数、 k_{max} は最大次数、 $\epsilon_{trunc}(\theta)$ は打ち切り誤差である。 $f(\theta)$ を求めるためには展開係数 a_k を計算する必要がある、その式を以下に示す。

$$a_k \approx \frac{1}{N_k} \sum_{i=0}^{k_{max}} f(\theta^{(i)}) \varphi_k(\theta^{(i)}) \omega_i$$

ここで $\theta^{(i)}$ は $(k_{max}+1)$ 次の直交多項式の i 番目の根、 ω_i はガウス求積の重み、 N_k は正規化因子である。この展開係数を用いることにより、モデルの出力結果である

$f(\theta)$ を求めることができる。海洋水質モデルへの、このパラメータの推定法の適用は Mattern ら³⁾により行われている。再現結果と観測データとの差を最小にするパラメータ値が、観測データを再現するのに最適なパラメータ値である。本研究では、観測データのうち、夏季の湾奥部での間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を用いる。再現結果と観測データとの差は以下の式で評価し、それを多項式カオス展開の $f(\theta)$ として扱う。その式を以下に示す。

$$f(\theta)=\sqrt{\frac{\sum_1^n\{(obs-cal)w\}^2}{n}}$$

ここで obs は観測データ、 cal は計算結果、 n は層数、 w は重みである。栄養塩の溶出には表層の影響が大きいと考えられ、本研究では再現性を高めるため、表層ほど大きい重みをつけた。

(2) 推定結果と考察

KD_{fast} と R_{non} の推定を Step 1 とし、その結果を図-2 に示す。また Step 2 として、Step 1 で推定された値を用いて KP_{slow} と R_{fast} の推定を行った。さらに Step 3 として Step 1, 2 で推定された値を用いて R_{CN} と K_6 の推定を行った。その結果を表-1 にまとめ、それらの値を用いた間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の再現結果を図-3 に示す。文献値は主に Anggara ら²⁾が用いた値であり、観

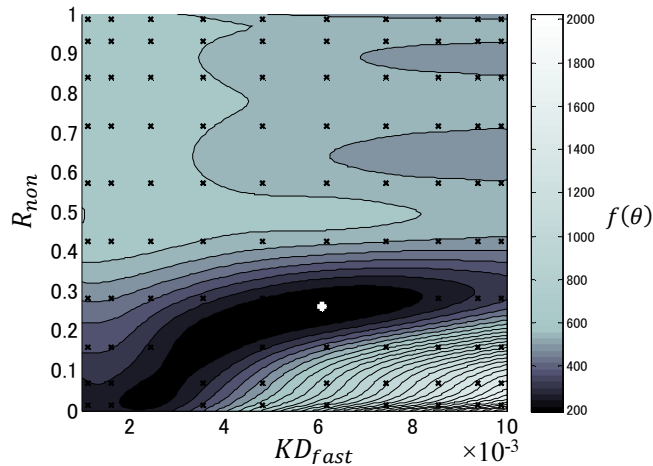


図-2 KD_{fast} と R_{non} の推定結果

表-1 パラメータ推定の結果

パラメータ (単位)	推定された値	文献値
KD_{fast} (s^{-1})	6.1×10^{-3}	1.0×10^{-3}
KP_{slow} (s^{-1})	6.0×10^{-9}	6.0×10^{-10}
R_{fast} (—)	0.45	0.57
R_{non} (—)	0.26	0.20
R_{CN} (—)	5.3	8.0
K_6 ($\mu\text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$)	5.4×10^{-5}	2.5×10^{-7}

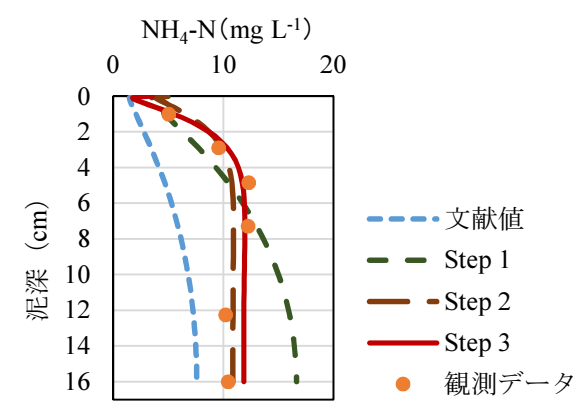


図-3 間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の再現結果

測データは西本ら¹⁾が 2012 年 7 月 10 日に行った調査の値である。Step 1 で推定された値を用いた再現結果では、観測値と違い、泥深 8 cm より下層でも間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなり続けている。モデル内では実際の底質と同様に、常に堆積が進むため、表層にある物質は時間の経過とともに下層に移動していく。従って、下層で有機物が分解されるのは分解速度が遅いためであると類推し、Step 2 として KP_{slow} と難分解性有機物の量に関係がある R_{fast} の推定を行った。さらに Step 3 として別の 2 つのパラメータ推定を行うことで良好な再現性が得られた。

最後に 6 つの最適化されたパラメータ値を用いて冬季の間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を計算した。その結果、冬季の $\text{NH}_4\text{-N}$ 鉛直分布についてもおおむね再現できた。

4. まとめ

多項式カオス展開を用いることで、底質間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を良好に再現することができた。今後底質モデル全体の再現性を高めるには、他の物質に関するパラメータや境界条件についても検討する必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25630208 の助成を受けたものであり、記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 西本佳名子, 岡田輝久, 入江政安, 中谷祐介, 西田修三: 大阪湾における窒素・リン溶出量に関する底質調査及び数値モデルによる推定, 平成 25 年土木学会関西支部学術講演会, 大阪, 2014 年 6 月。
- 2) G.A. Anggara Kasih, S. Chiba, Y. Yamagata, Y. Shimizu and K. Haraguchi: Numerical model on the material circulation for coastal sediment in Ago Bay, Japan, Journal of Marine Systems, 77, pp.45-60, 2009.
- 3) J.P. Mattern, K. Fennel and M. Dowd: Estimating time-dependent parameters for a biological ocean model using an emulator approach, Journal of Marine Systems, 96-97, pp32-47, 2012.