

## 27. 大阪湾・播磨灘における気候変動緩和策の評価を目的とした新しい生態系モデル開発の試み

佐藤 達明<sup>1</sup>・森井 裕<sup>2</sup>・渋谷 尚<sup>3</sup>・相馬 明郎<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> (株) 建設技術研究所 北海道支社河川室 (〒060-0003北海道札幌市中央区北3条西3丁目1-6)

E-mail: ta-sato@ctie.co.jp

<sup>2</sup> (株) 建設技術研究所 大阪本社環境部 (〒541-0045大阪市中央区道修町 1-6-7)

<sup>3</sup> みずほリサーチ&テクノロジーズ (株) サイエンスソリューション部 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3)

<sup>4</sup> 大阪公立大学大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: [sohma@omu.ac.jp](mailto:sohma@omu.ac.jp) (Corresponding Author)

浅海域生態系は、大気CO<sub>2</sub>を吸収し、吸収した無機態炭素を生物過程によって固定し、固定された炭素を堆積物に貯留する一連の機能：気候変動緩和機能が、他の海洋生態系よりも高い可能性が指摘されている。本研究では、大阪湾並びに播磨灘という明石海峡を介して隣接するものの、その海域特性が大きく異なる2海域について、気候変動緩和機能の動態とそのメカニズムの解明を試みるため、底生系—浮遊系に渡る生物地球化学過程、炭酸化学平衡、生物生産、移流・拡散過程を包括的に取り扱った生態系モデル：EMAGIN-B.C. (Sohma et al., 2018)に、播磨灘の特徴である冬季大型珪藻の生活環を組み込んだ新しい生態系モデル開発を試みる。本稿では、開発するモデルの理念、数理構造、ならびに大阪湾並びに播磨灘への適用と検証の状況について報告する。

**Key Words :** *air-seaCO<sub>2</sub> flux, climate change, ecosystem modeling, blue carbon*

### 1. はじめに

我が国では、近年、地球温暖化による大気中の水蒸気量の増加等によって各地で線状降水帯による集中豪雨が増加しており<sup>1)</sup>、毎年のように大きな水災害が発生している。北海道においても、2016年8月に相次いで上陸・接近した4つの台風により河川氾濫等の甚大な被害が出たことは記憶に新しい。このように、地球温暖化による影響が各地で顕在化するなか、気候変動影響の緩和策の検討は喫緊の課題となっている。

海洋全体が、大気中CO<sub>2</sub>を吸収し、炭素を貯留・隔離する気候変動緩和機能を有することは、これまでも知られていた<sup>2) 3)</sup>。しかしながら、これら機能における沿岸域の重要性に焦点は当たっていなかった。こうした中、国連環境計画 (UNEP) は、気候変動緩和策の新しい選択肢として、海洋生物によって吸収・固定される炭素をブルーカーボン (Blue Carbon) と称し、海洋、特に高い生物生産性をもつ沿岸域が高い炭素貯留・隔離機能を有

する可能性を指摘した<sup>4)</sup>。

このブルーカーボンのメカニズムを整理するため、Sohma et al (2018)<sup>5)</sup> は、ブルーカーボン機能を、(1)大気CO<sub>2</sub>を”吸収”し、(2)吸収した無機態炭素を生物過程によって”固定”し、(3)固定された炭素を堆積物に”貯留”する3機能に区分した。また、これら3機能を合わせて“気候変動緩和機能”と定義した。この3機能のうち、近年、大気CO<sub>2</sub>吸収に着眼した研究は盛んに行われるようになり、”沿岸域の湿地植物生態系における大気中CO<sub>2</sub>の吸収量の評価<sup>6)</sup> や、沿岸生態系による気候変動緩和機能の主要なメカニズムである大気-海洋間でのCO<sub>2</sub>フラックスの大きさや向き (吸収/放出)、さらには、これらの支配要因の解明が観測<sup>7) 8)</sup> や数理モデル<sup>10) 11)</sup> によって試みられている。しかしながら、その実態は海域によって大きく異なる。それは、大気-海洋間でのCO<sub>2</sub>フラックスは、物理過程のみならず、炭酸化学平衡 (pCO<sub>2</sub>, DIC, 全アルカリ度, pH)、内部生産、有機物の無機化、還元物質の再酸化、炭酸カルシウム形成・溶解といった

生物化学過程によって変動し、その過程の寄与は海域の生態系特性によって異なるからである。

大阪湾、播磨灘は、明石海峡を介して隣接・結合している海域であるが、その環境特性は大きく異なる。大阪湾北部沿岸域は依然として、富栄養化に伴う貧酸素化が発生している。しかし、播磨灘では、貧栄養化によるノリ色落ちやイカナゴ資源減少が問題となっている。このように特性の異なる2つの海域を同時に表現できる生態系モデルを構築し、大気-海洋間でのCO<sub>2</sub>フラックスの値とそのメカニズムの差異を解明することは、一般性ある気候変動緩和策の評価の検討にも資する。

こうした中、本研究では、その海域特性が大きく異なる大阪湾、播磨灘における気候変動緩和機能の動態とそのメカニズムを同時に表現できる新しい生態系モデルの開発を試みている。本稿では、開発するモデルの理念、数理構造、ならびに大阪湾及び播磨灘への適用と検証の状況について報告する。

## 2. 対象海域の環境

本研究では、環境特性の異なる大阪湾及び播磨灘を対象に、数理生態系モデルによる解析を実施した。

大阪湾は明石海峡と紀淡海峡の2つの狭い海峡により播磨灘および紀伊水道と接続している閉鎖性海域である。背後には流域人口約1600万人の日本有数の大都市を抱えており、東部湾奥に淀川等の主要河川が流入している。このため、湾奥部では陸域からの汚濁負荷による富栄養化や貧酸素水塊発生等の水質問題を有している。

一方、播磨灘は明石海峡を通じて大阪湾と接続する瀬戸内海の一部である。過去に赤潮発生等の水質問題が発生したため、陸域からの汚濁負荷削減に努めた結果、現在は栄養塩濃度は低下している。しかしながら、1990年代後半以降、栄養塩濃度の低下によると思われる養殖

ノリの色落ちが頻発している。また、冬季の珪藻赤潮の頻発やイカナゴ等の魚類の漁獲量も大幅に減少しており、海域の貧栄養化が懸念されている。

## 3. 研究方法

### (1) 生態系モデルの概要

本研究で開発する新生態系モデル(EMAGIN-B.C-L.P)は、浮遊系-底生系に渡る生物地球化学過程、食物網、内部生産、炭酸化学平衡、移流拡散によって駆動される酸素-窒素-リン-炭素の共役循環を表現したEMAGIN-B.C.(Sohma et al 2018)<sup>5)</sup>をベースとしている。EMAGIN-B.C.は、大気-海洋間CO<sub>2</sub>フラックスの駆動力となる大気と海面での二酸化炭素分圧(pCO<sub>2</sub>)の差を、pCO<sub>2</sub>の変化に直接的・間接的に寄与しうる“生態系メカニズムまでをも含めた大気-海洋間でのCO<sub>2</sub>吸収・放出機構”を、底生系-浮遊系の連鎖した包括的な炭素循環の観点から解析する構造をもつ。具体的には、(a)植物プランクトン、動物プランクトン、底生動物の生物生産や食物網に伴う炭素貯留と、(b)浮遊系から底生系への炭素の沈降・埋没過程に伴う炭素隔離を表現する内湾複合生態系モデルに、(c)大気-海洋間CO<sub>2</sub>フラックスを決める上で重要な、pCO<sub>2</sub>、溶存無機炭素(DIC)、pH、全アルカリ度(TALK)間の炭酸化学理論を組み込み、さらに、(d)生物・化学過程に伴うDIC、TALKの生成・消費を考慮している。

しかしながら、EMAGIN-B.C.は、植物プランクトンを1カテゴリーに集約して取り扱っている。したがって、播磨灘の特徴であり、加えて、気候変動緩和能にも影響を与えうる、冬季の大型珪藻赤潮について表現することは難しい。そこで、新モデル(EMAGIN-B.C-L.P)では、植物プランクトンを大型珪藻とその他プランクトンの2カテゴリーに区分し、各植物プランクトンの生活環を、

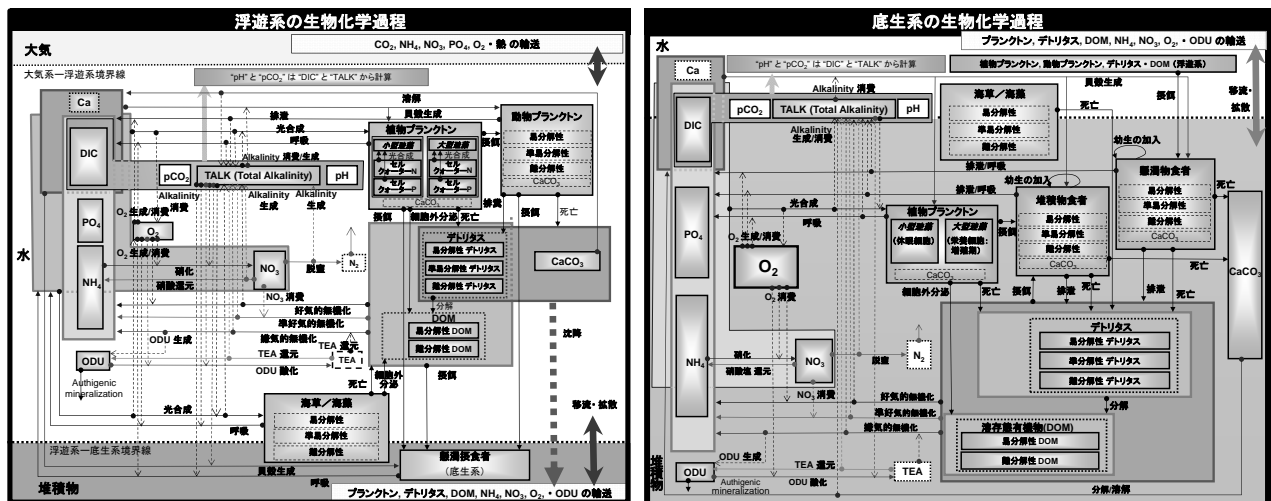


図-1 生態系モデルの概念図 (左図：浮遊生態系、右図：底生生態系) (Sohma et al (2018)<sup>5)</sup>を改変)

EMAGIN-L.P (Sohma et al. 2022)<sup>12)</sup>を参考にモデル化し組込んだ。(図-1)

## (2) モデルの適用

生態系モデルを用いて、現状の大阪湾及び播磨灘における平年的な季節変動(1年周期の変動)を計算した。なお、計算外力に対して応答の遅い底生系の初期値影響を排除し、外力に適応した底生系モデル変数(コンパートメント)の鉛直プロファイルを得るため、この計算に先立ち500年間の先行計算を実施した。先行計算においては陸域負荷のみを変化させており、最後の80年間の負荷量として既往知見<sup>13) 14)</sup>から1920年以降の負荷量変動を設定した。それ以前の420年間は、1920年の負荷量を一定として設定した。

空間分解能は流動モデルでは500m~1kmグリッドとし、大阪湾・播磨灘を含む範囲をモデル化した。生態系モデルでは、78ボックスで大阪湾と播磨灘をモデル化した。

また、底生生態系の鉛直分解能は、底泥表層付近は $\mu$ ミリメートルスケールとし、深層にかけてセンチメートルスケールまで次第に厚くなるような52層を設定し、堆積厚1mの範囲をモデル化した。

## 4. 結果

モデルの検証は①浮遊生態系、②底生生態系、それぞれにおけるモデル変数の時間変化及び空間変化について、観測値と計算値を比較することで行った。モデルは、すべてのモデル変数に対して、概ね良好な再現性を示した。従来モデルからの改良点である複数種(小型珪藻、大型珪藻)のプランクトンによる季節変動も、観測値の特徴を概ねとらえることができた。図-2に植物プランクトン及び底層DOの季節変動の再現例を示す。

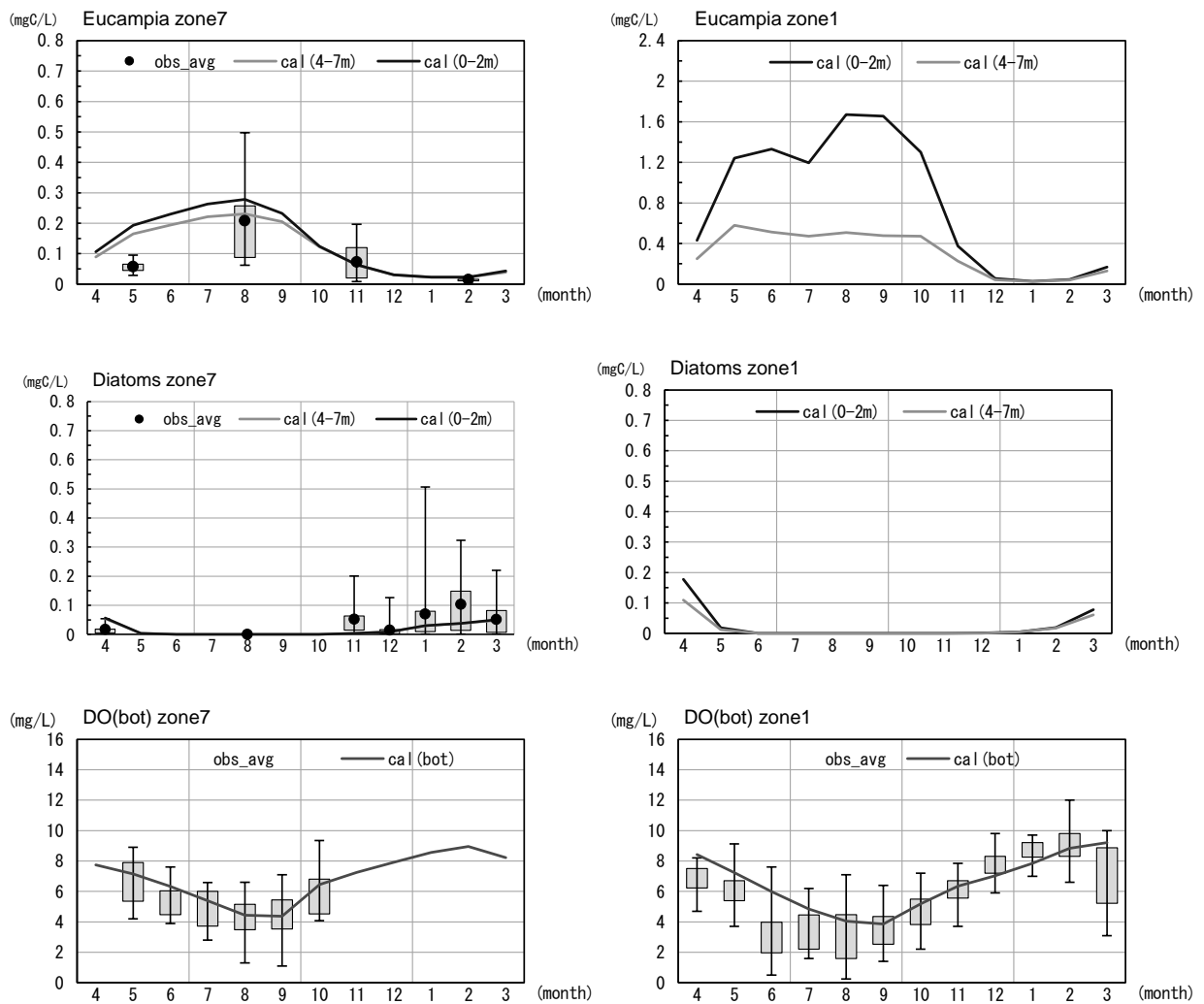


図-2 播磨灘(左側)と大阪湾奥(右側)の植物プランクトンとDOの計算結果  
(上図:大型珪藻、中図:その他プランクトン、下図:底層DO)

## 5. おわりに

本稿では、現在進めている大阪湾・播磨灘における“生態系メカニズムまでも含めた大気-海洋間でのCO<sub>2</sub>吸収・放出機構”を評価する試みの概要とその検証結果の一部を報告した。今後は、海洋のもつ気候変動緩和機能である、①海洋が大気CO<sub>2</sub>を吸収する炭素吸収機能、②生物体が炭素を固定する炭素固定機能、③土壌深部へ炭素を埋没する炭素貯留機能<sup>5)</sup>、についても水域毎にその特徴を評価していく予定である。

また、本モデルは、ブルーカーボンの評価に際して生態系メカニズムを考慮可能であるので、気候変動緩和策の効果のみならず、当該施策の海域生態系への影響も同時に評価できるのが特徴である。海域生態系には二枚貝に代表される懸濁物食者がモデル変数として含まれているため、水産資源保護の視点からも緩和策を評価することができる。今後当該モデルを使用し、異なる環境特性をもつ湾内の小さい時空間スケールにおけるブルーカーボンメカニズムのみならず、地域の水産業の発展と気候変動緩和の両立を可能とする施策を評価していく予定である。

## 参考文献

- 1) 気象庁気象研究所：集中豪雨の発生頻度がこの45年間で増加している～特に梅雨期で増加傾向が顕著～，報道発表（令和4年5月20日），2022.
- 2) Archer, D. and Brovkin, V.: The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Climatic Change*, Vol. 90, pp.283-297, 2008.
- 3) IPCC, 2001: Climate change 2001: The scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of IPCC. Cambridge University Press, 881p, 2001.
- 4) Nellemann, C., E, Corcoran, E, Duarte, C. M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G., Blue carbon. A rapid response assessment.

Birkeland: UNEP, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri A.S, 78p, 2009.

- 5) Sohma, A., Shibuki, H., Nakajima, F., Kubo, A., Kuwae, Tomohiro. : Modeling a coastal ecosystem to estimate climate change mitigation and a model demonstration in Tokyo Bay. *Ecological Modelling*, 384, pp.261-289, 2018.
- 6) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅沢有, 佐々木淳: 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, No.1, pp.10-20, 2019.
- 7) Kubo, A., Maeda, Y., Kanda, J.: A significant net sink for CO<sub>2</sub> in Tokyo Bay, *Scientific Reports* 7, 44355, 2017.
- 8) 遠藤徹, 嶋野純平, 酒井大樹, 藤原隆一: 大阪湾奥部における pCO<sub>2</sub> の鉛直分布と大気海水間の CO<sub>2</sub> 交換の関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.L\_1231-L\_1236, 2017.
- 9) 遠藤徹, 嶋野純平, 池永健二, 国分秀樹: DIC の空間分布調査による大阪湾, 播磨灘および英虞湾の CO<sub>2</sub> フラックスの評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.L\_1315-L\_1320, 2018.
- 10) 佐藤文也, 佐々木淳, A.A.W.R.R.M.K.AMUNUGAWA: 水底質統合モデルを用いた東京湾における炭素収支の推算と気候変動に伴う将来予測, 土木学会論文集, B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.L\_1441-L\_1446, 2017.
- 11) 相馬明郎, 中居瑞貴, 久保篤史, 桑江朝比呂: 東京湾河口域における大気-海洋間 CO<sub>2</sub> フラックスの通年変化とその要因～炭酸化学理論を組込んだ生態系モデルによる解析～, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.L\_1267-L\_1272, 2018..
- 12) Sohma, A., Imada, R., Nishikawa, T., Shibuki, H. : Modeling the life cycle of four types of phytoplankton and their bloom mechanisms in a benthic-pelagic coupled ecosystem. *Ecological Modelling*, 467, 109882, 2022.
- 13) 中辻啓二, 寺口貴康, 山根伸之: 近年70年の大阪湾水質の時間変化と環境事後評価の試み, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.1011-1015, 1998.
- 14) 中辻啓二, 韓銅珍, 山根伸之: 大阪湾における汚濁負荷量の総量規制施策が水質保全に与えた効果の科学的評価, 土木学会論文集, Vol.741/VII-28, pp.69-87, 2003.