

# 瀬戸内海における外洋起源有機物の動態解析

中谷 祐介

大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻

## 1. はじめに

瀬戸内海では、高度経済成長以降に過剰な汚濁負荷が流入した結果、富栄養化が進行し、赤潮や貧酸素水塊などの水質問題が深刻化した。これに対し、1979年度から水質総量削減が開始され、陸域から流入する化学的酸素要求量 COD（有機汚濁指標）、全窒素 TN・全リン TP（富栄養指標）の負荷量が削減された結果、TN と TP については瀬戸内海のほぼすべての湾灘で環境基準を達成した。しかしながら、近年、COD に関しては横ばい、あるいは一部海域では微増傾向にあり<sup>1)</sup>、環境基準の達成率は 70% 台にとどまっている。

陸域負荷の削減施策が進められてきたにも拘わらず、瀬戸内海の COD が当初の予想ほど低下しない原因は複数挙げられるが、その一つとして、太平洋から流入する外洋起源の有機物が影響している可能性がある。瀬戸内海の水質や密度構造は、太平洋を流れる黒潮の流路によって大きく変化することが報告されており<sup>2)</sup>、瀬戸内海内の水質を管理する上で外洋の影響を無視することはできない。外洋の中低層に存在する有機物は、一次生産による生成から数十年～数百年が経過し、易分解成分は既に微生物分解されているため、大半は難分解性の溶存有機物である<sup>3)</sup>。瀬戸内海に存在する有機物のうち、難分解性の外洋起源有機物が相当の量を占めているのであれば、環境基準値を下回ることは将来不可能である可能性が高い。その場合には、外洋起源有機物をバックグラウンド値として考慮し、現行の環境基準値の設定を見直す必要もあろう。

外洋起源の COD に関する既往研究は少なく、瀬戸内海と外洋域の COD の長期変動について統計的相関を調べた程度にとどまり<sup>4)</sup>、因果関係や機構は明らかにされていない。

本研究では、瀬戸内海 - 太平洋領域を対象に、三次元流動モデルを用いた流動シミュレーションを行い、瀬戸内海における外洋起源有機物の時空間分布を明らかにした。まず流動・密度構造についてモデルの再現性を検証した後に、外洋起源有機物に見立てた保存性トレーサーの移流拡散計算を行い、瀬戸内海における外洋起源有機物の存在量とその変動を解析した。

## 2. 方法

### 2.1 流動モデルと計算条件

三次元流動モデルには SCHISM (Semi-Implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model)<sup>5)</sup> を用いた。支配方程式は Reynolds 方程式、連続式、水温・塩分の輸送方程式、密度の状態方程式であり、静水圧近似と Boussinesq 近似を仮定している。水平粘性には Laplacian 型の Shapiro フィルター、乱流モデルには Mellor-Yamada 2.5 レベルを採用した。

計算領域は瀬戸内海から太平洋の黒潮流路を含む東西南北約 700 km の領域とした（図 1）。水平方向の格子サイズは瀬戸内海領域では 150 m ～ 1.5 km 程度とし、太平洋領域は約 5 km とした。

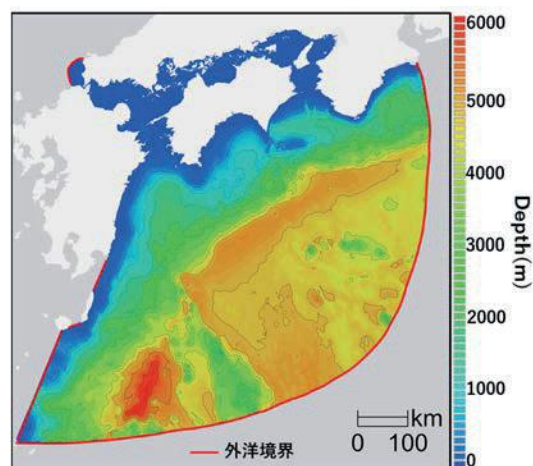


図1：対象領域

鉛直方向には多重 $\sigma$ 座標系 LSC<sup>2</sup> (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cell)を採用し、最大 84 層に分割した。計算期間は 2008 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日の 11 年間とし、差分時間間隔は 120 s とした。

初期条件および外洋境界条件には MOVE/MRI.COM-JPN<sup>6)</sup>による海面高度、水温、塩分、流速の出力値（時間解像度 1 d、空間解像度 2 km）を与えた。外洋境界にはグローバル潮汐モデル FES2014 による主要 28 分潮の潮位・潮流振動も加えた。太平洋領域においては、密度場の再現性を向上させるために、MOVE の三次元水温・塩分データを用いてナッジングした。

流入境界には一級水系 27 河川、中小河川 86 河川の計 113 河川を考慮した。淡水流入量には、分布型流出モデル（時間解像度 1 d、空間解像度 500 m）を瀬戸内海とその周辺海域の集水域に適用し、解析雨量を入力とした水文流出計算<sup>7)</sup>により得られた値を与えた。一級河川の計算値を観測値と比較し、Nash-Sutcliffe 係数の平均値は 0.7 以上を示すなど、モデルによる流量再現性は十分に高いことを確認した。

水面の熱収支には短波放射、長波放射、顕熱、潜熱を考慮した。降水量と短波放射には、AMeDAS の沿岸測候所の毎時観測値を補間して与えた。長波放射には米国環境予測センター NCEP が公開している全球モデル出力値を用い、2008 年 1 月～2011 年 3 月については NCEP-CFSR（時間解像度 1 h、空間解像度 0.3125°）、2011 年 4 月以降については NCEP-CFSv2（時間解像度 1 h、空間解像度 0.2°）を与えた。顕熱、潜熱はバルク式より求め、気温・気圧・比湿・風向・風速には気象庁メソ数値予報値 GPV-MSM（時間解像度 1 h、空間解像度 0.05°×0.0625°）を与えた。

## 2.2 外洋起源有機物の挙動解析

外洋水に含まれる有機物は、大部分が難分解性溶存有機物であるため、外洋性の溶存態有機炭素 DOC を保存性のパッシブトレーサーとして移流拡散計算を行い、瀬戸内海における外洋起源有機

物の挙動を解析した。

外洋境界条件の設定に際し、Global Ocean Data Analysis Project Version 2.2021 より収集した DOC の観測データの解析を行った。図 2 に外洋域における DOC 濃度の鉛直分布を示す。DOC 濃度 (mol/L)の鉛直分布には水深に依存する傾向が認められ、水深 Depth (m)の関数として近似可能であった。

$$DOC = 27.8 \times e^{-0.025 \times Depth} + 37.3 \quad (1)$$

外洋性の DOC は、分解速度に基づいて準易分解性溶存態有機物 SLDOC と難分解性溶存態有機物 RDOC の 2 種類に大きく分類される。このうち RDOC は数千年という非常に長い時間スケールで分解され、水深帯に依らず鉛直一様に存在することから、近似式(1)の切片である 37.3 mol/L を RDOC 濃度とし、鉛直一様に外洋境界に与えた。SLDOC 濃度については、近似式(1)より求めた DOC 濃度から RDOC 濃度 (=37.3 mol/L)を差し引くことで求め、鉛直方向に濃度分布を与えた (図 2)。

RDOC の分解速度は数千年という時間スケールで非常に小さく、今回の計算期間では分解過程は無視できるため、保存性物質として扱った。一方、SLDOC の分解速度は数日もしくは数週間から数年であり、分解にかかる日数に幅があるため、分解速度を一定値に設定することは難しい。そのため、SLDOC の分解速度が小さく全く分解されない場合と、分解速度が大きく瀬戸内海に進入す

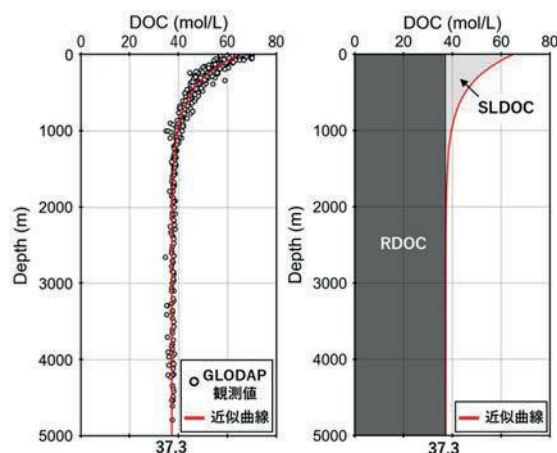


図2：外洋域におけるDOC濃度分布（左：観測値と近似曲線，右：RDOCとSLDOCの分類）

る前に完全に分解される場合を仮定することで、外洋起源有機物濃度の最大値と最小値を求めた。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 モデル再現性

潮汐の再現性を検証するために、19箇所の検潮所の潮位データについて調和解析を行い、主要8分潮の振幅と位相を求めた。観測値と計算値の比較を図3に示す。振幅、位相ともに相関係数Rが0.99を上回り、計算された潮汐場が高い精度を有していることが確認された。

また、広域総合水質調査の全測定地点のデータを用いて、水温・塩分の再現性の検証を行った結果を図4に示す。出水時における河川水の拡がりをやや弱く表現する傾向があるものの、観測値と計算値のRMSEを求めると、表層と底層の水温ではそれぞれ1.14℃、1.19℃、塩分では0.65、

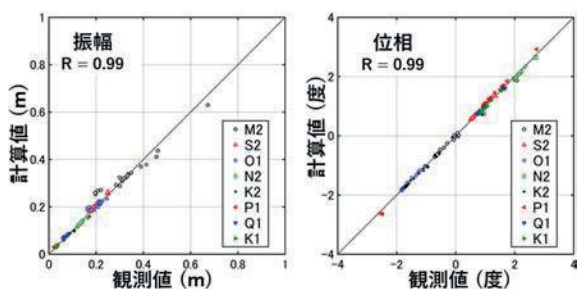
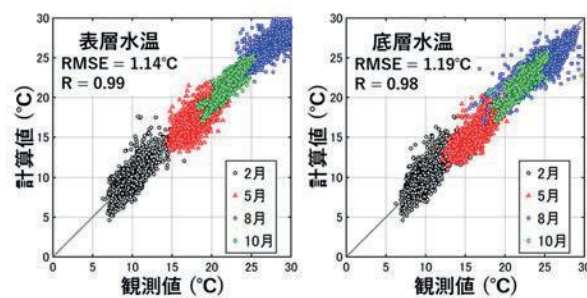
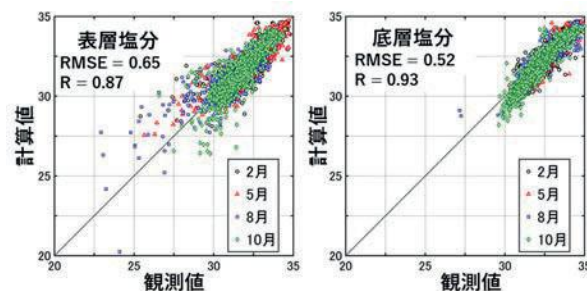


図3：主要8分潮の再現性



(a) 水温



(b) 塩分

図4：水温・塩分の再現性

0.52と良好であった。紙面の都合上図示はしないが、太平洋領域の水温・塩分についても鉛直分布を比較し、良好に再現していることを確認した。

#### 3.2 外洋起源有機物の挙動

一例として、2018年7月における外洋起源DOCの空間分布を図5に示す。河口付近では河川水による希釈が生じているが、外洋起源DOCは瀬戸内海全域でほぼ一様に分布しており、最大(SLDOC+RDOC)の場合で約55 mol/L (=0.66 mg/L)、最小(RDOC)の場合で約35 mol/L (=0.42 mg/L)の濃度範囲にあった。

図6に紀伊水道の外洋起源DOC濃度の全水深平均値の年変動を示す。計算開始から約3年間は初期条件の影響で濃度上昇がみられるが、それ以降は変動が小さくほぼ一定値を推移した。その他の湾灘でも同様の結果となり、外洋起源有機物は瀬戸内海全域において時空間的にほぼ均一に存在する結果が得られた。

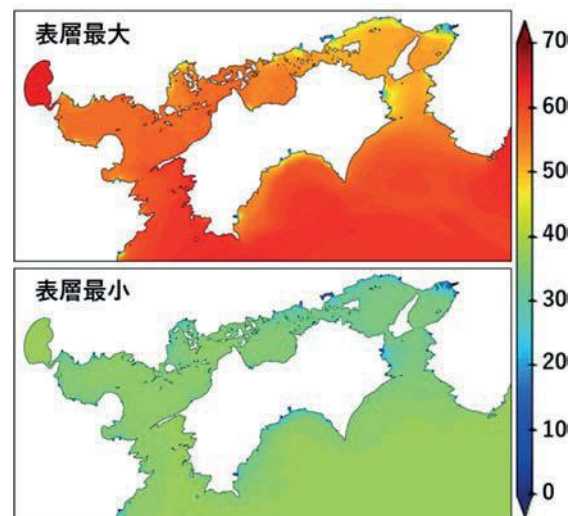


図5：外洋起源DOC (mol/L)の表層分布

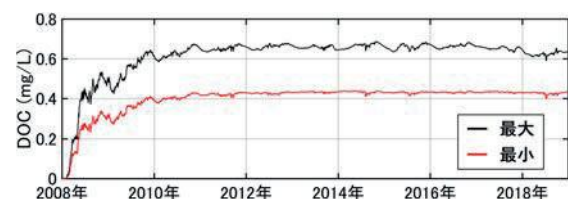


図6：紀伊水道の外洋起源DOC濃度の変動

### 3.3 海域 COD に占める外洋起源有機物の割合

各湾灘における外洋起源 COD の濃度(計算値)と、海域の COD 濃度(観測値)に占める外洋起源割合を図 7、表 1 に示す。観測値には、広域総合水質調査により 2011 年～2018 年に年 4 回測定された COD 濃度を平均し、さらに各湾灘における全測定地点間で空間平均した値を示している。図-11 に示すように、外洋起源 COD 濃度は全湾灘でほぼ同程度であり、0.42～0.67 mg/L の範囲を示した。流入負荷量や内部生産量が多い大阪湾などでは、相対的に外洋起源の占める割合が 18.7～28.5%と低い一方で、豊後水道や紀伊水道では割合が高く、最大(SLDOC+RDOC)で 60.8%にも及んでいる。また、最小(RDOC)の場合でも、外洋起源が 18.7～39.9%を占める結果が得られた。

### 4. おわりに

本研究では瀬戸内海 - 太平洋領域を対象に大規模な三次元流動シミュレーションを行い、外洋起源有機物の挙動解析を行った。その結果、瀬戸内海では人為的に制御不可能な外洋起源 COD が最大で 6 割、少なくとも 2 割程度存在していることが明らかになった。瀬戸内海の水質管理において決して無視できない量であり、環境基準の検討においては、外洋起源有機物量をバックグラウンド値として考慮することが重要であると考えられる。

### 謝辞

本研究は「2022 年度公募型利用制度(若手・女性研究者支援萌芽枠)」を受けて実施したもので

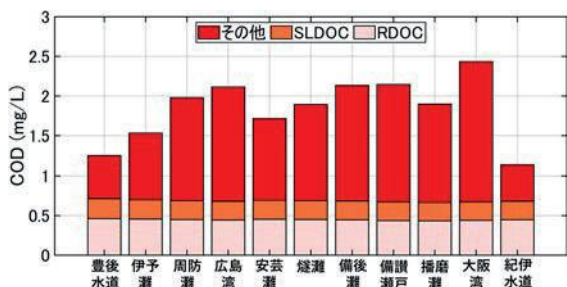


図 7: 各湾灘の COD の内訳

表 1: 各湾灘の COD に占める外洋起源割合 (%) (2011 年から 2018 年の平均)

	豊後水道	伊予灘	周防灘	広島湾	安芸灘	燧灘	備後灘	備讃瀬戸	播磨灘	大阪湾	紀伊水道
最大	60.3	47.6	35.9	32.6	40.7	34.6	31.9	31.3	35.4	28.5	60.8
最小	39.1	31.0	23.3	21.3	26.5	22.6	20.7	20.4	23.1	18.7	39.9

あり、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援(課題番号: EX22707)を受け、大阪大学サイバーメディアセンターの大規模計算機システム SQUID を利用した。GPV-MSM データは京大大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースより、また気象研究所が提供する MOVE/MRI.COM-JPN Dataset はデータ統合解析システム DIAS より収集した。本研究の一部は JSPS 科研費(21K04273)を受けて実施した。あわせてここに記し、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 藤原建紀ら: 窒素・リン削減が海域の有機物量(COD および TOC)に及ぼす影響, 水環境学会誌, **41(5)**, 135-148, (2021).
- (2) 駒井克昭ら: 黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海の流れに及ぼす影響, 土木学会論文集 B, **64(3)**, 165-179, (2008).
- (3) 濱健夫, 和田茂樹: 海洋溶存態有機物の生産と難分解化過程, 水環境学会誌, **34(5)**, 134-138, (2011).
- (4) 矢吹芳教ら: 日本近海の太平洋側外洋水の COD の長期変動と瀬戸内海の COD の変動に及ぼす影響, 水環境学会誌, **40(5)**, 189-197, (2017).
- (5) Zhang, Y., et al.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM, Ocean Modelling, **102**, 64-81, (2016).
- (6) 広瀬成章ら: 日本沿岸海況監視予測システム 10 年再解析値(JPN Atlas 2020), 気象研究所技術報告, **83**, (2020).
- (7) 山根成陽ら: 過去 30 年の降雨パターンと土地利用の変化が瀬戸内海への淡水流入量に及ぼす影響, 土木学会論文集 G, **78(6)**, II\_89-II\_97, (2022).