

# 海水混合運転による下水処理水放流が 沿岸海洋環境に及ぼす影響について

浅井 優多<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</sup>・升谷 瞭<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 東京科学大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup> 正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup> 大阪市高速電気軌道株式会社 (〒550-8552 大阪市西区九条南1-12-62)

大阪湾の湾口の1つである明石海峡北東岸に放流渠を有する垂水下水処理場では、隣接するノリ養殖場への影響緩和を目的として周囲の海水と処理水を混合希釈してから海洋放流する季節運転を行っている。本研究では、海水混合運転の海洋環境影響を定量的に評価するため、4段ネスト海洋モデルとトレーサー移流拡散モデルを連成させた処理水分散の高解像度比較数値実験を実施した。ノリ養殖場周辺では海水混合の有無によって海面水温・塩分場に有意な差は生じないものの、混合運転に伴い海面処理水濃度は大きく減少し、養殖場内での処理水蓄積量は約12.7%減少することが示された。これは、放流渠近傍で生じる鉛直循環流が強化されることで須磨沖反流を含む残差流系が変化し、処理場周辺での流速弱化等に伴う処理水分散とフラックス吸支の変化によるものと考察された。

**Key Words :** seawater mixing operation, ROMS, marine environment, residual current, tracer flux

## 1. はじめに

瀬戸内海は日本最大の閉鎖性海域であり、地形や潮流に恵まれたことで豊かな漁場が形成されている。淡路島を含む兵庫県沿岸域ではノリ養殖が盛んに営まれているが、ノリの生育には主に栄養塩、水温、塩分などが密接に関係している<sup>1)</sup>。沿岸に放流された下水処理水は、周辺海洋環境の変化をもたらすため<sup>2)</sup>、放流水の分散特性や養殖場への影響を評価することは工学的に重要である。

本研究で対象とする神戸市垂水処理場は、その周辺海域にノリ養殖場が位置していることから、放流された下水処理水の分散特性を評価することが課題であった。例えば中山・Bricker<sup>3)</sup>は、垂水処理場の処理水放流口近傍における初期混合過程を Large Eddy Simulation (LES) によって評価した。内山ら<sup>4)</sup>は、垂水処理場からの処理水に関する広域分散数値解析を行い、放流後4ヶ月間で約75%が大阪湾、約8%が播磨灘に滞留することを示した。また、Zhangら<sup>5)</sup>は、垂水処理場からの処理水放流量を16.7%減少させた場合、隣接するノリ養殖場へ蓄積する処理水が平均で25.4%減少することを示した。

垂水処理場では、ノリ養殖場への直接的な処理水影響をさらに低減させる試みとして、2021年10月より下水処理水に直近で取水した海水を流量比1:1で混合させて放

流する海水混合運転を開始した。しかしながら、垂水処理場における海水混合運転が周辺の海洋環境やノリ養殖場に及ぼす影響や、混合水による分散特性の変化などについては未だ十分な科学的知見が得られていない。

そこで本研究では、垂水処理場周辺に位置するノリ養殖場への処理水影響評価を念頭に、海水混合運転による放流水量と放流水密度の変化が周辺海洋環境に及ぼす影響、通常運転時からの変化、およびそれらのメカニズムを検討するべく、4段ネスト海洋モデルによる神戸沖海域の高解像度処理水分散シミュレーションを実施した。

## 2. 研究方法

### (1) 4段ネストROMSモデル

本研究で対象とする垂水処理場は、大阪湾と播磨灘を接続する明石海峡の北東海岸に位置し、複雑な地形条件に加えて埋立地・護岸等の影響を受けた潮流・潮汐残差流の支配下にある。このような条件下における流動場をより精緻に表現するため、JCOPE2海洋再解析データ<sup>6)</sup>を最外側方境界条件として与えた領域海洋循環モデルROMS<sup>7)</sup>による4段階ネストモデルを用いた高解像度3次元流動・分散数値実験を実施した(図-1、表-1)。

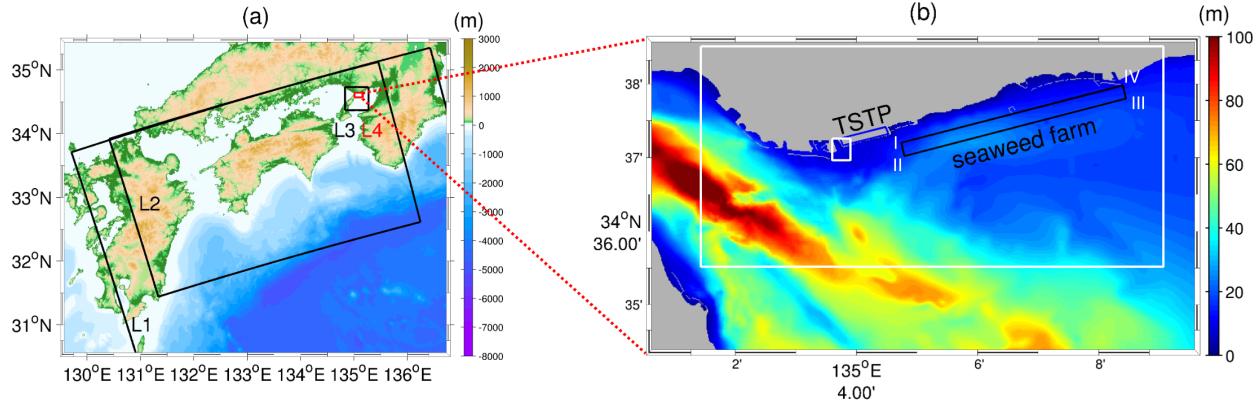


図-1 (a) 4段ネストモデル計算領域（黒枠・赤枠）. 黒枠は外側から ROMS-L1～ROMS-L3 モデル領域, 赤枠は本研究で用いる ROMS-L4 モデル領域に対応. (b) ROMS-L4 領域 ((a)赤枠) 全域の拡大図. 白枠は外側から 3章, 4章で用いる解析領域, 青枠は垂水処理場 (Tarumi Sewage Treatment Plant; TSTP) の概形, 黒枠はノリ養殖場 (seaweed farm) の概形・検査領域, I～IV はノリ養殖場領域を表す黒枠の各頂点 (5章参照). 背景カラーはいずれも水深分布を表している.

表-1 4段ネスト ROMS モデルの計算条件

| モデル     | ROMS-L1  | ROMS-L2              | ROMS-L3                          | ROMS-L4              |
|---------|--|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| 計算期間    | 3/1/2006–11/30/2015                              | 9/1/2006–11/9/2015   | 9/1/2015–11/9/2015               | 9/21/2015–10/16/2015 |
| 計算格子数   | 320×320×32層                                      | 800×480×32層          | 400×400×32層                      | 696×400×32層          |
| 水平解像度   | 2 km   | 600m                 | 100m                             | 20 m                 |
| 初期条件    | JCOPE2   | ROMS-L1 (日平均値)       | ROMS-L2                          | ROMS-L3              |
| 境界条件    | (日平均値)   | +TPXO7.0による潮汐        | (2時間平均値)                         | (2時間平均値)             |
| 地形      | J-EGG 500 (水平解像度500m)<br>+SRTM30 PLUS (水平解像度30秒) |                      | 内閣府中央防災会議 地形・堤防データ<br>(水平解像度50m) |                      |
| 海面フラックス | COAMPS バルク法                                      |                      | NOAA COADS (月平均気候値)              |                      |
| 海上風     |  | 気象庁 GPV-MSM (1時間値)   |                                  |                      |
| 一級河川流量  | 日本河川協会   | 雨量・流量データベース (月平均気候値) |                                  |                      |

表-2 放流シナリオ

| ケース<br>Case | 処理水量<br>(m <sup>3</sup> /day) | 海水流量<br>(m <sup>3</sup> /day) | 放流水量Q<br>(m <sup>3</sup> /day) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1           | 157,900                       | 0                             | 157,900                        |
| 2           | 157,900                       | 157,900                       | 315,800                        |

1-way offlineネスティングによるダウンスケーリングを行い, モデルの水平解像度をJCOPE2: 10 km → ROMS-L1: 2 km → L2: 600 m → L3: 100 m → L4: 20 mへと順次細密化することで高解像度化した. 解析期間はノリ養殖の採苗開始時期に対応させ, かつ季節変動の影響を排除しながら一朔望周期を含むよう考慮し, 2015年10月1日0時から10月15日0時までの2週間 (14日間) とした. 本モデルの再現性担保に関してはUchiyamaら<sup>8)</sup>を参照されたい.

## (2) 放流シナリオ

本研究では, 2022年度における実際の垂水処理場放流水量と, 海水混合設備の設計値を参考にして, 2通りの放流シナリオを設定した (表-2) . Case 1は海水混合なしの場合, Case 2は下水処理水との流量比1:1で海水混合した場合である. 海水混合は垂水処理場中央放流渠 (吐口は護岸から約130 m の海底に敷設) から取水した海水を処理場内で処理水と混合することによって行う. した

がって, 混合された放流水の水温・塩分・処理水濃度は処理水と海水の中間値となる. また, 処理水の放流は両ケースとも垂水処理場西側放流渠 (吐口は護岸から約40 m の海底に敷設) の海底付近から鉛直上向きに行われる. ただし, 現況の放流口は管径50 cm の吐口12本で構成されているが, ROMS-L4 モデルの解像度 (水平20 m) では吐口管の形状を直接表現できないため, 吐口管の水平分布を考慮して, 放流口面積を ROMS-L4 モデル2グリッド分の 20 m × 40 m で設定し, 表-2 の放流水量  $Q$  がこの2グリッドから放流されると仮定した.

## (3) 処理水放流・追跡モデル

本研究では, 放流水の移流分散を追跡するために, Uchiyamaら<sup>9)</sup>による放流処理水追跡モデルを利用し, 濃度  $C_p$  (kg/m<sup>3</sup>) の仮想トレーサー (passive tracer) を放流させる. 仮想トレーサーの無次元濃度  $c$  (実際の濃度を  $C_p$  で除した濃度) の保存式は式(1)のよう表される.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot c = P \quad (1)$$

つまり, この仮想トレーサーは, 放流後は保存物質として物理的な移流分散作用のみを受ける. これは, 輸送中

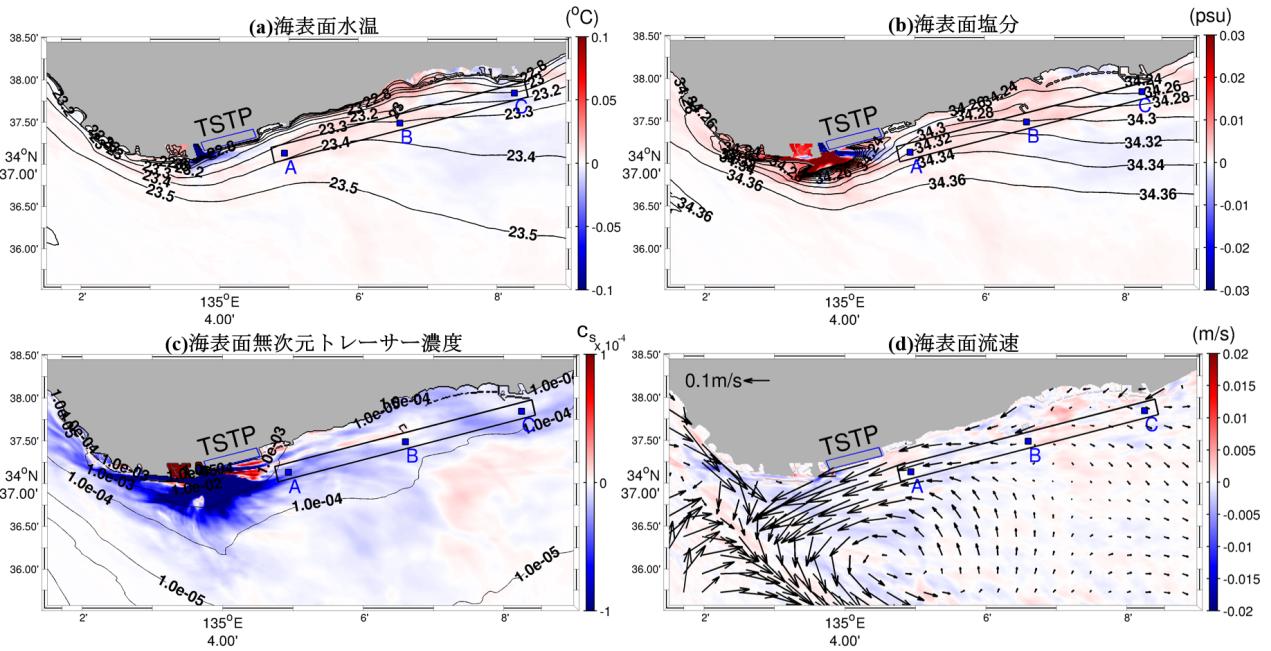


図-2 (a)海表面水温  $T_s$  (°C) , (b)海表面塩分  $S_s$  (psu) , (c)海表面無次元トレーサー濃度  $c_s$  (no unit) , (d)海表面水平流速絶対値  $|u_s|$  (m/s) の変化量 (Case 2–Case 1) . カラーは海水混合による各変数の変化を表し, 赤(青)は海水混合によって増加(減少)することを意味する. (a)~(c)中の黒コンター線は, Case 1の値, (d)のベクトルはCase 1における海表面水平流速  $u_s$  を表している. いずれも解析期間平均値である. 各図の範囲は図-1(b)の白枠(外側)の領域であり, 青枠は垂水処理場(TSTP)位置, 黒枠はノリ養殖場位置, A,B,Cはノリ養殖場内の西部, 中央部, 東部の代表検査地点である.

表3 養殖場内検査点A,B,Cにおける海表面水温・塩分・無次元トレーサー濃度の解析期間平均値変化量 (Case 2–Case 1) .

|                            | 点A (西部)                | 点B (中央部)               | 点C (東部)                |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 海表面水温 $T_s$ (°C)           | $+7.21 \times 10^{-3}$ | $+5.67 \times 10^{-3}$ | $-4.06 \times 10^{-3}$ |
| 海表面塩分 $S_s$ (psu)          | $+1.66 \times 10^{-3}$ | $+2.29 \times 10^{-3}$ | $-0.24 \times 10^{-3}$ |
| 海表面トレーサー濃度 $c_s$ (no unit) | $-2.58 \times 10^{-5}$ | $-0.39 \times 10^{-5}$ | $-0.61 \times 10^{-5}$ |

の生化学過程などによる濃度変化をあえて排除することで、処理水の影響を直接的に評価することを企図したものである。また、正の浮力が卓越する処理水の密度プリュームを静水圧モデルであるROMSにおいて安定に与えるため近傍場点源放流モデルは式(2)のように表される。

$$P(x, y, z, t) = P_s(t)A(x, y)H(z) \quad (2)$$

放流渠における濃度フラックス  $P$  は表-2の流量条件に  $C_p$  を考慮して与えた。海水混合時は通常運転時と比べて  $C_p$  は1/2倍、流量は2倍となるため、放流するトレーサー濃度フラックスは両ケースで同じになる。 $P_s$  は放流処理水中のトレーサー濃度の時間変化を表すが、本研究では一定と仮定した(定常放流)。 $A, H$  は放流水とトレーサー濃度の水平分布形( $x, y$ 方向)および鉛直分布形( $z$ 方向)を表す無次元関数である。放流口を水平2グリッドで表現しているため、 $A$ の分布型は放流口上で1、それ以外では0とシンプルに与え、 $H$ はUchiyamaら<sup>8</sup>、Robertsら<sup>10</sup>を参考に海表面でピーク値を取るガウス型分布を仮定した。処理水放流近傍場モデルのさらなる詳細やその妥当性についてはUchiyamaら<sup>8,9</sup>、Zhang<sup>5</sup>らを参照されたい。

### 3. 混合運転に伴う海表面環境変化

まず、海面付近に繁茂するノリへの影響が大きい海表面に注目して、垂水処理場周辺の各変量の空間分布(解析期間平均値)を解析した(図-2)。ノリ養殖場内の西部・中央部・東部に設定した検査点A~Cにおける海水混合運転による海表面水温  $T_s$ 、海表面塩分  $S_s$ 、海表面無次元トレーサー濃度  $c_s$  の変化量(いずれも期間平均値)を表-3に示す。

図-2から、 $T_s$  および  $S_s$  は放流源のごく近傍を中心とした岸に近い浅海域での変化が大きく、海水混合に伴う放流水の水温低下と塩分増加に対応して全体的に  $T_s$  低下と  $S_s$  上昇が生じている。しかしながら、放流源から1.5km以上離れたノリ養殖場内における変化量はそれぞれ  $\pm 10^{-3}$  程度であり、 $T_s \sim 23.3^{\circ}\text{C}$ 、 $S_s \sim 34.3 \text{ psu}$  と比べると有意な変化は生じていない。海水混合運転によるトレーサー濃度  $c_s$  の変化を見ると(図-2(c))、放流源の北東・北西の岸近傍海域を除けば全体的に低減傾向を示しており、混合運転が海域への処理水負荷を減少させうることが明示されている。 $c_s$  の低減範囲は  $T_s$ 、 $S_s$  の影響範囲よりも広く、特に処理場近傍において減少量が大きい。一方で、ノリ養殖場内の変化

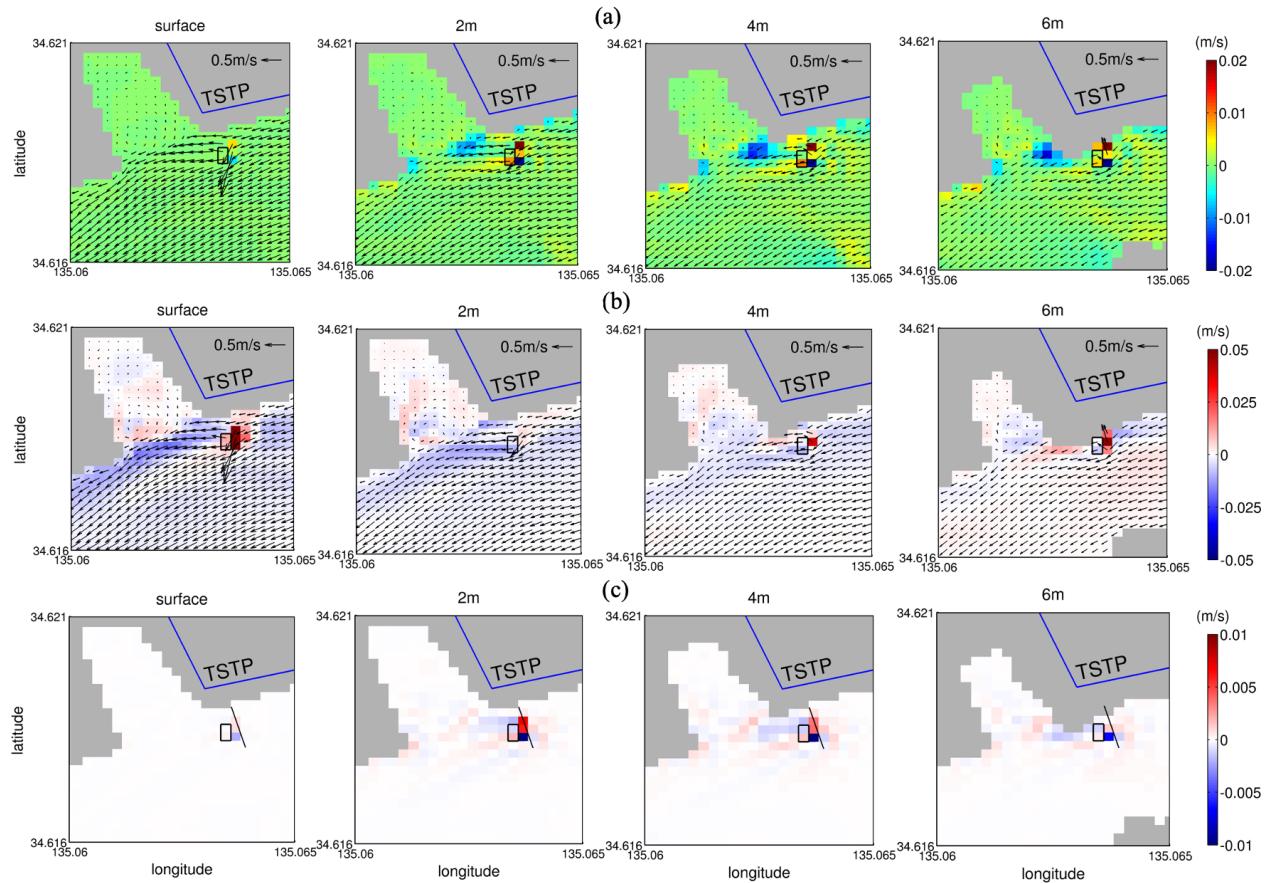


図-3 垂水処理場西側放流渠近傍の解析領域（図-1(b) 内側の白枠）における4通りの水深（左から海表面、水深2m, 4m, 6m）での各変量の期間平均値の水平空間分布。（a）Case 1の水平流速ベクトル $\mathbf{u}$ と鉛直流速 $w$ （カラー、正=赤：湧昇流、負=青：下降流）、（b）Case 1の水平流速 $\mathbf{u}$ （ベクトル、（a）と同じ）と $|\mathbf{u}|$ の変化量（Case 2–Case 1、カラー）、（c）鉛直流速 $w$ の変化量（Case 2–Case 1、カラー）と、図-4で用いる検査線（黒線）。各図の青枠は垂水処理場（TSTP）、黒枠は西側放流渠に相当する放流グリッドの位置を示す。

量は $\pm 10^{-5}$ 程度であるが、 $c_s$ が $\pm 10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度（例えば図-4(a)）なので、これは有意な差であると考えられる。

Case 1（混合運転なし）の海表面流速 $\mathbf{u}_s$ の分布を見ると（図-2(d)），処理場近傍では明石海峡から大阪湾方向へ東進する強い潮汐残差流と、垂水沿岸を西進する残差流とが合流することによって双対型の循環流が形成されており、このうち東側の反時計回り循環流は須磨沖反流<sup>10)</sup>に対応している。海水混合運転によって $|\mathbf{u}_s|$ は全体的に低下しており、特に反流の東側海域において減少が顕著である。

#### 4. 西側放流渠近傍の3次元流動構造

須磨沖反流周辺の $\mathbf{u}_s$ 変化が海水混合運転による海洋環境変化の一因になっていると考え、海水混合運転時の放流渠である西側放流渠近傍海域に着目し、水深別の時間平均流を3次元的に解析した（図-3）。図-3(a)から、残差流の上流側に相当する放流渠東側において北側で湧昇流、南側で下降流が生じており、放流水プリュームと同程度の空間スケールで強い鉛直循環流が生じているこ

とが分かる。これに伴い、須磨沖反流による西向き残差流は放流渠を避けるように流れを変化させており、その傾向は表層でより顕著である。海水混合運転による流れの変化を見ると（図-3(b), (c)），領域全体で西向き残差流が弱化する傾向が再確認される。特に放流渠西側の岸寄り表層での弱化傾向は明瞭であり、逆に放流渠の直上および東側では流向変化に伴う残差流の強化が見られ、同時に鉛直循環流も強化されている。

放流渠東側における鉛直循環流および海水混合運転に伴う循環流変化をより詳細に評価するため、図-3(c)の黒線のように検査線を設定し、検査線断面内の流れを解析した（図-4）。ここでは処理水中の物質濃度との関連性も併せて調べるため、無次元トレーサー濃度 $c$ を背景カラーで示している。図-4(a)から、検査断面中央部において時計まわりに渦を巻くような流れが形成されており、図-3(a)に見られた上昇流と下降流が確認される。また、水平流速の断面平行成分 $u^{\parallel}$ と併せて見ると、下層で岸向き、上層で沖向きとなる沿岸湧昇モードになっていることが分かる。一方、海底から供給される $c$ は上向きの密度プリュームにより上方輸送されるため、海表

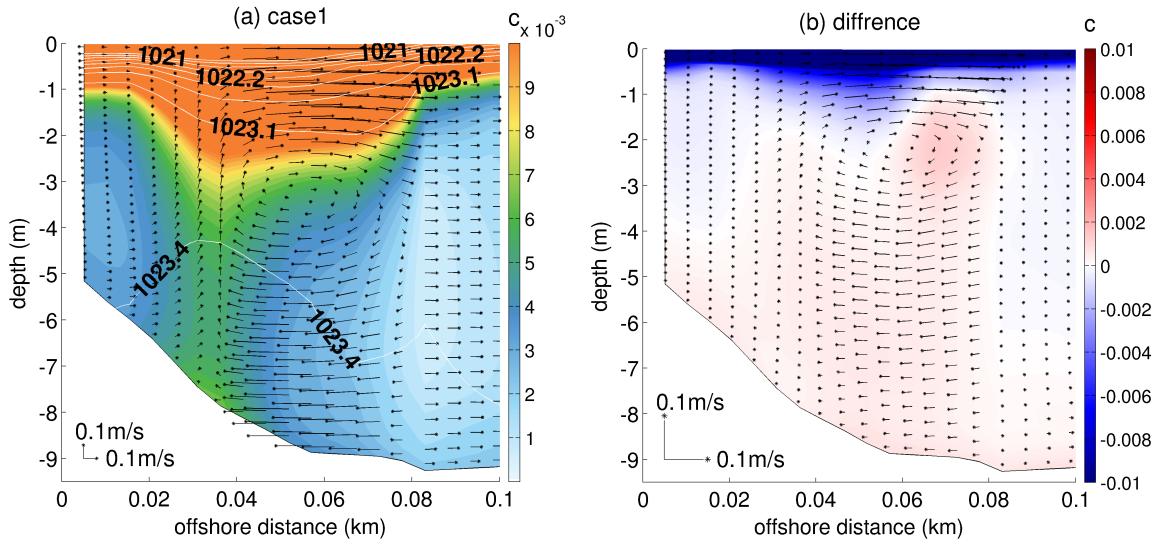


図4 放流渠近傍検査線断面 (図3 (c) 参照) における各変量の解析期間平均値の断面内分布. (a) Case 1 の流速ベクトル( $u^l, w$ ) および無次元トレーサー濃度 $c$  (カラー) , 白コンター線は海水密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) を示す.  $u^l$  は水平流速の断面平行成分 (沖向き: 正) . (b)  $c$  の変化量 (Case2-Case1, カラー) および( $u^l, w$ ) の変化量 (Case2-Case1, ベクトル) .

面付近で大きく、反対に海水密度は $c$ が大きい場所で小さくなっている。すなわち、処理水中は海底から放流されると岸向き底層流によって岸方向へ輸送されつつも速やかに海表面へ湧昇し、表層の沖向き水平残差流によって上層で水平輸送されていることが示唆される。

図4 (b) より、海水混合運動によって表層付近で鉛直循環流と沿岸湧昇モードが強化されるように変化していることが分かる。混合運動によるトレーサー濃度 $c$ 変化量は、図2 (c) と整合して海表面での減少が特に大きく、水深2 m以深ではむしろ増加している。つまり、鉛直循環強化によって単純に表層で増加するのではなく、高密度の混合水の影響により $c$ の表出が抑制され、同時に湧昇モードの強化に伴い $c$ は表層では岸方向へ、表層では沖方向へより強く輸送され、さらには水平残差流によって移流分散する効果が重畠している。

以上のことから、処理水放流に伴い放流渠東側で渦を巻くような鉛直循環流が形成され、沿岸湧昇モードのトレーサー輸送を生じ、海水混合運動はその構造を強化することが分かった。このとき、西向き水平残差流は放流渠西側を中心に低減傾向を示し、かつ放流渠を迂回するような残差流が形成され、しかも海水混合運動によって強化されていた (図3)。したがって、処理水放流による密度プリュームと、それに伴う東側での鉛直循環流は水平流動に対して擬似的な「水柱」のように作用し、西向き残差流を阻害しているものと解釈される。海水混合運動はこのような放流渠近傍場の流れを変化させ、トレーサー輸送にも影響し、しかもその影響範囲は放流渠近傍に留まらず、少なくとも須磨沖反流を含む数km~10数kmの範囲にわたる点は特筆すべきである。

## 5. ノリ養殖場におけるトレーサー収支解析

### (1) トレーサー収支解析手法

ノリ養殖場への処理水影響を定量的に評価するために、ノリ養殖場におけるトレーサー収支解析を実施する。ここでは、ノリ養殖場を取り囲む4断面 (図1(b) 参照、北断面: I-HV, 南断面: II-III, 西断面: II, 東断面: III-IV と定義) からの流入・流出トレーサーフラックスの収支を考える。各断面は海表面から海底面までを高さに持つ鉛直2次元の平面である。各断面を通過する無次元トレーサー濃度フラックス $F$  およびその (時間) 積分値 $Q$  は下式で定義される。

$$F_i^j(t) = \int_{A_i} c_i^j u_i^{\perp j} dA_i \quad (3); \quad Q_i^j(t) = \int_0^t F_i^j(\tau) d\tau \quad (4)$$

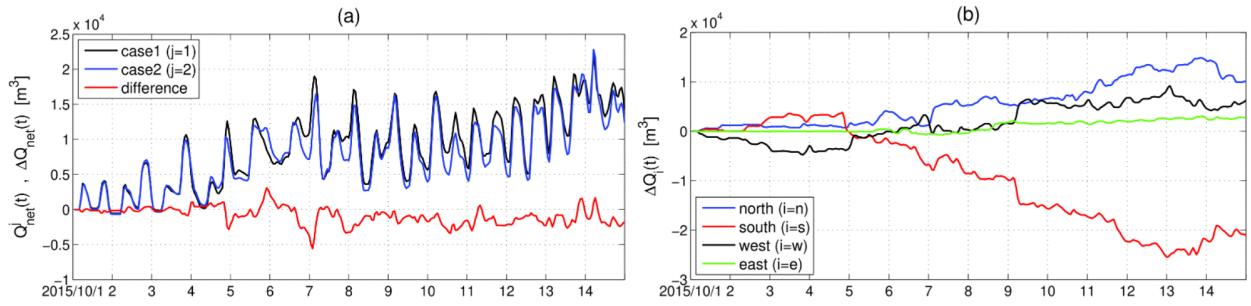
下付き添字 $i (= n, s, w, e, net)$  は、ノリ養殖場を囲む各断面に対応しており、それぞれ北・南・西・東、4断面の総和 (すなわち正味の流入フラックス) を表し、上付き添字 $j (= 1, 2)$  はケース番号 (表2) を表す。 $A_i$  は各断面の断面積、 $u^{\perp}$  は断面直交流速成分であり、養殖場内への流入を正、流出を負と定義する。 $\tau$  は積分のためのダミー変数である。さらに、海水混合運動による $Q$  の変化量  $\Delta Q$ 、およびその変化率  $\gamma(\%)$  を次式で定義する。

$$\Delta Q_i(t) = Q_i^2(t) - Q_i^1(t) \quad (5)$$

$$\gamma_i(t) = \frac{\Delta Q_i(t)}{|Q_i^1(t)|} \times 100 \quad (6)$$

### (2) 無次元トレーサー濃度フラックス累積値

図5(a)にCase 1 (混合運動なし)、Case 2 (あり) にお

図-5 (a)  $Q_{net}^1(t)$ ,  $Q_{net}^2(t)$  と, その変化量  $\Delta Q_{net}(t)$  の時系列. (b) ノリ養殖場4断面における  $\Delta Q_i(t)$  の時系列.表4 解析期間終了時  $t_{end}$  (=2015年10月15日0時) における  $Q_i^1(t_{end})$ ,  $Q_i^2(t_{end})$ ,  $\Delta Q_i(t_{end})$ ,  $\gamma_i(t_{end})$ . 赤字は負値.

| 検査域                   | $Q_i^1(t_{end}) [\times 10^5 \text{m}^3]$ | $Q_i^2(t_{end}) [\times 10^5 \text{m}^3]$ | $\Delta Q_i(t_{end}) [\times 10^5 \text{m}^3]$ | $\gamma_i(t_{end}) [\%]$ |
|-----------------------|---|---|--|--------------------------|
| 北断面 ( $i = n$ )       | -2.92                                     | -2.83                                     | +0.10  | +3.48                    |
| 南断面 ( $i = s$ )       | +5.09                                     | +4.88                                     | -0.21  | -4.14                    |
| 西断面 ( $i = w$ )       | -1.62                                     | -1.56                                     | +0.06  | +3.89                    |
| 東断面 ( $i = e$ )       | -0.40                                     | -0.37                                     | +0.03  | +7.06                    |
| ノリ養殖場全体 ( $i = net$ ) | +0.14                                     | +0.12                                     | -0.02  | -12.7                    |

けるノリ養殖場に流入する正味のトレーサーフラックス累積値 ( $Q_{net}^1$ ,  $Q_{net}^2$ ) と, 両者の差  $\Delta Q_{net}$  を時系列で示す.  $Q_{net}^1$  と  $Q_{net}^2$  は, ともに潮汐に伴う半日周期変動による流入入が繰り返され, 長期的には増加していることから, 潮汐残差流の影響によって処理水が養殖場内に徐々に残留していくことが分かる. また, 時系列の大部分で  $Q_{net}^2(t)$  は  $Q_{net}^1(t)$  より小さい値を取り続けており, その結果,  $\Delta Q_{net}$  も特に後半ではほぼ一貫して負値を取ることから, 海水混合運転によってノリ養殖場への処理水影響が軽減されていることが明示されている.

$\Delta Q_{net}$  を構成する各4断面における  $\Delta Q_i$  の分配状況を見ると (図-5 (b)), 放流開始から5日後までは放流渠に最も近い西側断面で  $\Delta Q_w < 0$ , 他の断面では  $\Delta Q_{n,s,e} > 0$  となるが, その後の期間では北・東・西断面からは海水混合運転に伴って  $\Delta Q_{n,e,w} > 0$  (処理水の流入増) となり, 時間とともに増加する一方で, 南断面では  $\Delta Q_s < 0$  (流出増) が顕在化する. つまり, 混合運転による南断面での流出増加が北・東・西断面からの流入増加を凌駕することで, 全体として  $\Delta Q_{net} < 0$ , すなわち養殖場での処理水残留が低減したものと理解される.

表4は解析期間終了時  $t_{end}$  (=2015年10月15日0時), すなわち図-5の右端の時刻における各累積フラックスの値と, 混合運転による変化率  $\gamma_i$  を示している. 各断面における  $\gamma_i$  は高々  $\pm 3\sim 7\%$  程度であるが, ノリ養殖場への累積フラックスの大半は南断面での流入によって規定されており, その影響を受けて正味の変化率  $\gamma_{net}$  は-12.7%に達する. したがって, 海水混合運転による放流渠近傍での僅かな摂動の差がバタフライ効果のように広域の海洋環境に変化を与え, ノリ養殖場へ処理水の滞留を有意に低減させていることが分かる.

## 6. 結論

本研究では, 神戸市垂水処理場の海水混合運転による海域への放流水量および放流水密度の変化が, 周辺海域, 特に近接するノリ養殖場に与える影響, およびそのメカニズムについて検討するために, 4段ネスト3次元海洋流動モデルと, 処理水の挙動を追跡するために放流した保存物質を模した仮想トレーサー移流分散モデルを用いた数値実験を行った. その結果, 海水混合運転を実施した場合, これを行わなかった場合と比較して養殖場での海表面水温・海表面塩分には有意な変化が生じないものの, 海表面トレーサー濃度は処理場近傍および養殖場内で大きく減少することが示された.

処理水の放流による密度プリュームに伴い, 放流渠近傍の東側では局所的な鉛直循環流が形成されていた. 海水混合運転に伴う流量増加によって鉛直循環流が強化され, 須磨沖反流の一部である処理場近傍の西向き水平残差流を強く阻害することで, 広域的な残差流場にも影響を与えていた. この流動構造変化に加え, 海水混合による放流水密度の増加に伴う処理場近傍での海表面トレーサー濃度の減少などが重畠することで, 養殖場南断面からのトレーサーフラックスの流入が大きく減少し, 養殖場内への処理水の滞留が低減していた. その結果, 放流開始から2週間後におけるノリ養殖場全体の処理水の累積値は約12.7%減少したと見積もられ, 海水混合運転による養殖場への負荷低減効果が定量的に示された.

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究A (24H00337) の助成および神戸市建設局下水道部のご協力を得て実施された. ここに記して深甚なる謝意を申し上げます.

## REFERENCES

- 1) 前田竜孝 : 兵庫県瀬戸内海側の海域における環境変化とノリ養殖, 地理科学, Vol. 78, No. 4, pp. 173-187, 2023. [Maeda, R.: Environmental Changes and Nori Cultivation in the Seto Inland Sea Area, Hyogo Prefecture, *Geographical Sciences (Chiri-Kagaku)*, Vol. 78, Issue 4, pp. 173-187, 2023.]
- 2) 原田和弘, 阿保勝之, 川崎周作, 竹迫史裕, 宮原一隆 : 港湾水および下水処理放流水に含まれる溶存態無機窒素が播磨灘北東部沿岸のノリ漁場に与える影響, 水産海洋研究, Vol. 82 (1), pp. 26-35, 2018. [Harada, K., Abo, K., Kawasaki, S., Takesako, F. and Miyahara, K.: Influence of DIN derived from ports and treated sewage effluent on nori (*Pyropia*) farms of the northeastern part of Harima Nada, *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, Vol. 82 (1), pp. 26-35, 2018.]
- 3) 中山昭彦, Bricker, J.D. : 処理水放流口近傍初期混合過程のLESシミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I\_936-I\_940, 2012. [Nakayama, A. and Bricker, J.D.: LES simulation of initial mixing process of treated wastewater near a coastal outfall, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 68, Issue 2, pp. I\_936-I\_940, 2012.]
- 4) 内山雄介, 神吉亮佑, 中山昭彦 : 高解像度海洋モデルによる大阪湾・播磨灘における処理水分散シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_1056-I\_1060, 2013. [Uchiyama, Y., Kanki R., and Nakayama, A.: A triply-nested high-resolution ocean modeling of wastewater dispersal in Osaka Bay and Harima Nada, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 69, Issue 2, pp. I\_1056-I\_1060, 2013.]
- 5) Zhang, X., Uchiyama, Y. and Nakayama, A.: On relaxation of the influences of treated sewage effluent on an adjacent seaweed farm in a tidal strait, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 144, pp. 265-274, 2019.
- 6) Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J.S., Okuno, A., Yoshinari, H., and Komatsu, K.: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756, 2009.
- 7) Schepetkin, A.F. and McWilliams, J.C.: The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model., *Ocean Modelling*, Vol. 9, pp. 347-404, 2005.
- 8) Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y., and Nakayama, A.: Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulation-dispersal model, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 130, pp. 40-54, 2018.
- 9) Uchiyama, Y., Idica, E.Y., McWilliams, J.C. and Stolzenbach, K.D.: Wastewater effluent dispersal in Southern California Bays, *Continental Shelf Research*, Vol. 76, pp. 36-52, 2014.
- 10) Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J.: Ocean outfalls. I: Submerged wastefield formation and II. Spatial evolution of submerged wastefield and III. Effect of diffuser design on submerged wastefield, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, pp. 1-25, 26-48 and 49-70, 1989.
- 11) 中辻啓二 : 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A9.1-28, 1994. [Nakatsuji, K.: Estuarine circulation and mass transport in Osaka Bay, Japan, *Hydraulic Engineering Series*, Vol. 94-A-9, JSCE Committee on Hydroscience and Hydraulic Engineering, pp. A9.1-28, 1994.]

(Received March 17, 2025)

(Accepted July 22, 2025)

## EFFECTS OF TREATED WASTEWATER EFFLUENT DUE TO SEAWATER MIXING OPERATION ON COASTAL MARINE ENVIRONMENT

Yuta ASAI, Yusuke UCHIYAMA and Ryo MASUTANI

The Tarumi Sewage Treatment Plant, which has an outfall at the seafloor near the northeastern shore of the Akashi Strait, one of the two openings of Osaka Bay, operates seasonally by mixing and diluting treated sewage water with surrounding seawater before discharging it into the ocean in order to mitigate the impact on the adjacent seaweed farm. In this study, a high-resolution comparative numerical experiment of effluent dispersal was conducted using a quadruple nested three-dimensional ocean circulation model coupled with a conservative Eulerian tracer advection-diffusion model to quantitatively evaluate the impact of the effluent with the seawater mixing operation on the surrounding marine environment. Although no significant difference was observed in sea surface temperature and salinity around the seaweed farm, the effluent concentration at the sea surface decreased significantly with mixing operation, indicating that the amount of effluent accumulated in the farm decreased by approximately 12.7%. This is considered to be due to changes in the residual current system, including the Suma Offshore Countercurrent, caused by the strengthening of the localized vertical circulation formed near the outfall, and changes in subsequent effluent dispersal and flux budget associated with the weakened currents around the treatment plant.