



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

内山, 雄介
神吉, 亮佑
中山, 昭彦

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 69(2):I_1056-I_1060

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002938>



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

A triply-nested high-resolution ocean modeling of wastewater dispersal in Osaka Bay and Harima Nada

内山雄介¹・神吉亮佑²・中山昭彦³

Yusuke UCHIYAMA, Ryosuke KANKI and Akihiko NAKAYAMA

Anthropogenic land-derived materials in wastewater have been recognized to influence on the water quality and the marine ecosystem in Osaka Bay and Harima Nada. Towards a rigorous environmental assessment of these two semi-enclosed estuaries, a triple-nested high-resolution oceanic modeling framework based on ROMS is developed to investigate the dispersal and dilution of urban wastewater effluent released from the subsurface nearshore outfall of Tarumi Sewage Treatment Plant near Akashi Strait. The effluent dispersal in the northern Osaka Bay is two-layered and highly reversal in the upper and lower layers due to stratification influenced by freshwater input mainly from Yodo River. The estimated cumulative tracer flux for the four-month period is found to accumulate by about 75% in Osaka Bay.

1. はじめに

瀬戸内海では、高度経済成長期以降、工場排水などによる水質汚染が問題視されていた。その後、窒素・リン等の総量規制などの環境保全施策が行われ、水質は以前より改善されつつある。しかし、瀬戸内海東部に位置する大阪湾・播磨灘海域の水質は、その巨大な後背地人口ゆえに河川水や下水処理水等を通じた陸水の影響を強く受けるため、十分な改善効果が得られているとは言い難い。海域に流入する陸起源負荷の中でも、下水処理水や小河川出水の海域環境への寄与については未解明な部分が多く残されている。これらの陸起源水は、本海域における養殖海苔などの水産資源や、沿岸海洋生態系に影響を及ぼすため（阿保ら、2012）、綿密なアセスメントが求められている。

本研究では、大阪湾最西端に位置する神戸市垂水下水処理場を例に、処理水（淡水）プリュームの内湾での広域分散過程を検討する。垂水処理場近傍場2 km四方での初期分散については、LESモデルを用いた中山ら（2010）の検討事例がある。しかしながら、同処理場は明石海峡のやや東に位置するため、独特な海底地形や強い潮流などの影響を受けた複雑な流況が形成され、大阪湾・播磨灘両方向への分散が予想される。大阪湾・播磨灘は狭隘な海峡に囲まれた閉鎖性の強い海域であることに加え、埋め立て地などによる複雑な海岸線を有している。また、淀川などの河川からの浮力流入により、特徴的なエスチュアリ循環が形成されることが知られている。一方、瀬

戸内海全域の水収支は、四国沖を東進する黒潮流路の季節変動の影響を強く受けつつも、年間を通じて豊後水道から紀伊水道方向への時計回りの流れが卓越する（内山ら、2012）。したがって、潮汐、海上風や河川流入などに代表される局所的な外力条件を正確に考慮することに加え、大スケールモデルからのダウンスケーリングによって瀬戸内海全体の流れと、複雑な海岸線と外力を同時に表現することが本海域の流動・物質分散モデリングの成功の鍵となる。そこで本研究では、大阪湾・播磨灘を対象として多段ネスティングによるダウンスケーリング海洋モデルを開発し、外洋影響を考慮した瀬戸内海全体の流れと、複雑で詳細な地形情報を取り入れた高解像度モデリングを実施して流動構造を再現することを試みる。さらに、密度プリュームとして移流分散される垂水処理場からの処理水の広域分散過程をシミュレートし、大阪湾・播磨灘における処理水の挙動や湾内への滞留プロセスおよびそのメカニズムについて解析し、内湾における処理水のinventoryを明らかにすることを目的とする。

2. モデルの概要

外洋影響を受けた瀬戸内全体の流動影響を考慮しつつ、大阪湾・播磨灘海域を高解像度で表現するため、日本沿岸海洋データセットJCOPE2（水平解像度1/12°, 格子数866×620, 鉛直46層）を最外側境界条件とし、領域海洋循環モデルROMSをベースにした3段階ネスティングにより、ROMS-L1（同2 km, 格子数320×320, 鉛直32層）→L2（瀬戸内海全域モデル, 同600 m, 格子数800×480, 鉛直32層）→L3（同200 m, 800×560, 鉛直32層）へと順次ダウンスケーリングを行った。中間グリッドであるROMS-L1, L2モデルについては、外洋影響を考慮しながら瀬戸内海全体の流れ場を再現した著者

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科 市民工学専攻
2 学正会員 学(工) 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻
3 正会員 Ph.D. 神戸大学名誉教授、(一財)建設工学研究所

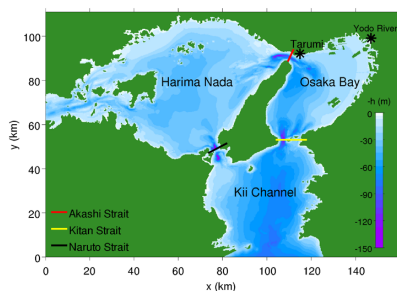
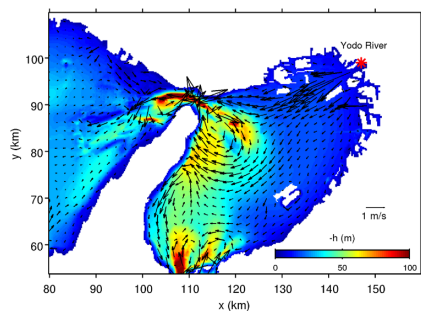
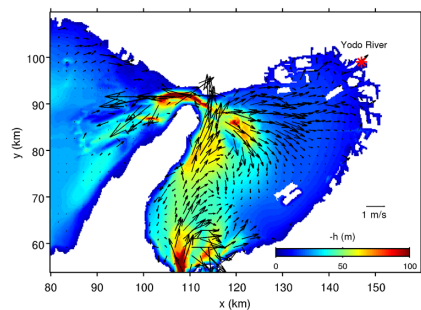


図-1 大阪湾・播磨灘モデル (ROMS-L3) の計算領域および水深分布。



(a) 混合層 (表層) における鉛直平均値



(b) 混合層より下層に対する鉛直平均値

図-2 L3モデルによる2009年9月の月平均流速分布 (ベクトル) と水深分布 (カラー)。

らによるモデル (内山ら, 2012) を用いた。本研究では、備讃瀬戸から紀伊水道へ至る大阪湾・播磨灘を対象としたL3モデルの結果について報告する (図-1)。地形データ及び堤防データには内閣府中央防災会議によるデータを用いた (水平解像度は最大 50 m)。L2境界においてTPOX7による主要10分潮を与え、L2解の2時間平均値をL3境界上に時空間的に内挿することにより、内部潮汐を含む3次元流動を考慮した。海上風には気象庁GPV-MSMデータの1時間値を、河川流入には日本河川協会DBによる領域内の10本の一級河川の月平均流量を淡水フラックスとして与えた。ROMSは静水圧モデルであるため、海底から噴出される垂水処理場からの浮力ブリームの初期分散を厳密に再現することはできない。そこで本研究では、Uchiyamaら (2013) の初期分散モデルを

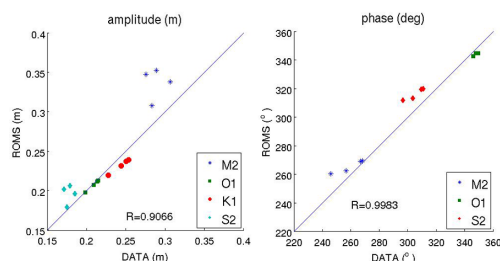


図-3 観測およびL3モデルによる湾内4箇所における潮位に対する調和解析結果。主要4分潮の(左)振幅、(右)遅角の比較。

用い、現地での放流状況を参考に処理場を点源として海底から淡水を放出することとし、海表面に流量ピークを持つガウス分布で与えた。処理場からの淡水流量 ($Q = 1.018 \pm 0.0364 \text{ m}^3/\text{s}$) は垂水処理場処理日報データ (神戸市) による一時間値を時間内挿して与えた。処理水の追跡のため、別途保存的なパッシブトレーサーを連続放出し、放流点での濃度との相対無次元濃度を解析する。本研究の計算期間は2009年8月1日から11月29日までの約4ヶ月間である。

3. モデルの再現性

L3モデルによる流動場の再現性を確認するために、計算結果と現地観測データを比較する。図-2は2009年9月の月平均流速分布を混合層内 (表層) および混合層下 (下層) の層平均値として求めた残差流ベクトルを示している。淡路島東岸沖に形成される時計回りの沖の瀬還流、泉南沖の東岸恒流帯、紀淡海峡北部の友ヶ島反流などが再現されており、現地観測に基づく中辻・藤原 (1995) による大阪湾の残差流系と概ね一致している。湾北部では芦屋・西宮沖に形成される西宮沖還流は見られず、西向き的一様流が卓越しているが、これは出水期である9月における淀川・猪名川等の影響を受けたためと考えられる。下層では神戸須磨沖から湾奥・淀川河口方向の流れが見られ、エスチュアリ循環に関しても良好に再現されている。

次に、湾内4点 (大阪・神戸・洲本・淡輪) における水位に対して調和解析を実施し、気象庁による観測値とL3計算結果による主要4分潮の振幅および遅角 (位相) を比較する (図-3)。調和定数の相関係数は振幅、遅角ともに0.9以上となり、潮汐周期の変動に対する良好な再現性が確認できる。なお、M2分潮については他の成分と比較してやや再現性が悪い。この原因については引き続き調査を行う予定である。

4. 処理水分散

垂水処理場から放出されたトレーサー分布の分散状況を調べたところ、表層と底層で大きな違いが見られた

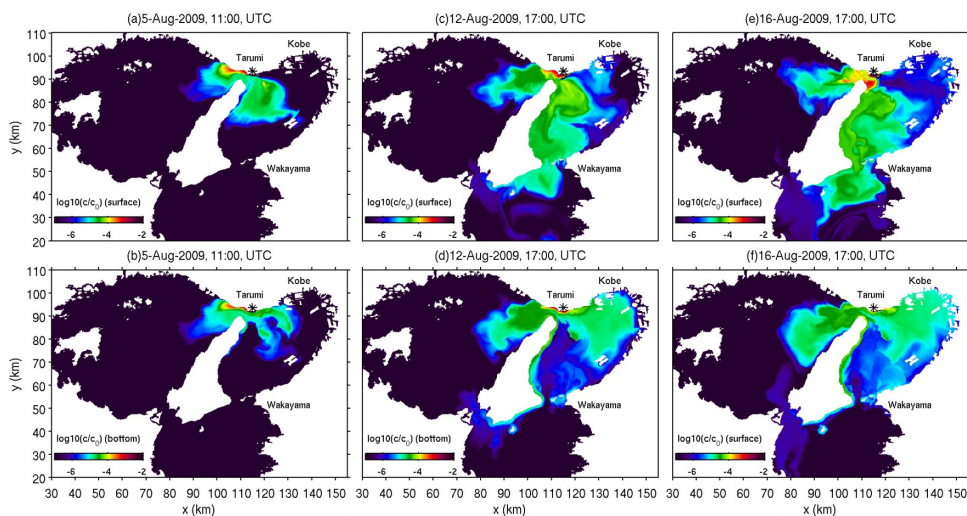


図-4 計算開始後の無次元トレーサー濃度分布。(上)表層,(下)底層であり、左から計算開始後5日,12日,16日目。

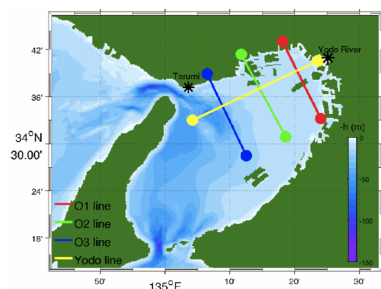


図-5 大阪湾内における鉛直断面を与える4つのライン。

(図-4)．ここでは表層相対濃度として32の σ -層のうち最も表層の第1層内の層平均濃度を用い、底層相対濃度としては海底面直上の第32層内(最下層)の層平均濃度を用いて表示している。まず、計算開始5日目では垂水からのトレーサーは主に大阪湾側に侵入し、表層(図-4(a))では南東方向に、底層(図-4(b))では主に東方向に輸送されている。この傾向は12日目も同様であり、表層(図-4(c))ではさらに南方向へ広範囲に輸送され、その一部は紀淡海峡を超えているが、大阪湾北東部にはほとんど分散していない。一方、底層(図-4(d))での南下傾向は淡路島東岸でわずかに見られるが、大部分は大阪湾奥部に広がっている。さらに16日目には、表層(図-4(e))では大阪湾奥部淀川河口域においてトレーサーが湧き出し、西に向かって流れ始める。このとき、底層(図-4(f))では湾奥部までトレーサーが到達しており、淀川からの淡水プリュームによって底層水が連行され、湧昇が生じていることがうかがえる。湾奥部で湧昇したトレーサーは淀川の影響を受けた表層流にトラップされて大阪湾全体に輸送されている。したがって、大阪湾では鉛直2層流的な状況が形成され、それがトレーサーの3

次元的な分散過程に多大な影響を与えている可能性が示唆される。なお、播磨灘方向への分散パターンには表層・底層の差はほとんど見られないが、底層濃度が表層よりも若干広範囲に分散している。

5. 鉛直構造

大阪湾におけるトレーサー分散の3次元構造をみるため、4本の検査線を設け(図-5)、各ラインでの鉛直断面内の分布について調べた。淀川流軸方向に定義されたYodo line内の鉛直断面における月平均された沖方向(軸に沿って西南西方向を正とする)流速の経時変化(図-6上)から、淀川からの淡水プリュームの影響を受けて、水深約4 mを境に上層では沖方向へ、下層では淀川方向(湾奥方向)への流れが形成されている。密度分布(図-6中)は流速分布に概ね対応しており、表層に低密度水塊が形成され、明確な成層構造が形成されている。水深が20 m以上となるYodo lineとO3線の交点(135.1°E)周辺にフロントが形成され、この海域以西では混合層が急に深くなって成層構造が弱くなるため、流れは一層流的になる。淀川河川水と海面加熱の影響を受けた8, 9月では強い成層が発達するのに対し、10, 11月には徐々に縮退するものの、淀川河口域には成層構造が残っている。2009年8月における無次元トレーサー濃度7日平均値の経時変化(図-6下)から、1週目, 2週目にかけてフロント西側の垂水沖海域で全層的に分布していたトレーサーは、フロント東側へ輸送され、神戸沖海域で下層に侵入して淀川方向へ輸送され、3週目には淀川河口域に到達し湧昇が始まり、4週目には上層に到達して沖方向へ拡大している様子が分かる。淀川河口域における湧昇とそれに伴う西側へのトレーサー濃度の拡大は、図-4の傾向

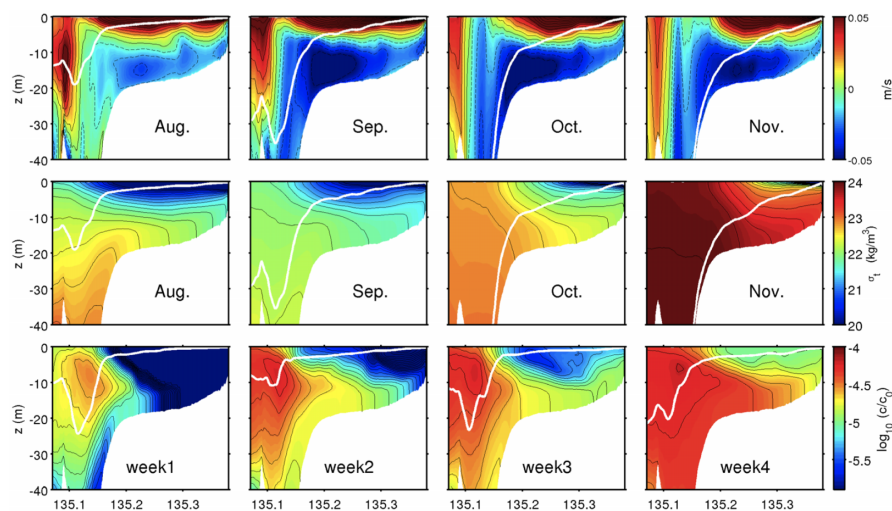


図-6 Yodo line断面における (上) 沖向き (西向き正) 方向流速の月平均値, (中) 密度 σ_t の月平均値, (下) 無次元トレーサー濃度の7日平均値 (2009年8月). 白線は混合層深さ. コンター間隔は上から, 0.01 m/s, 0.2 kg/m³, 0.1 (対数スケール).

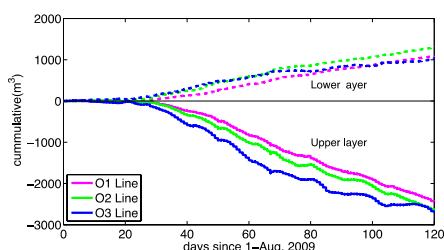


図-7 O1, O2, O3 lineでの断面通過フラックス時間積分値.

と合致している.

大阪湾奥では, 解析期間中を通じて水深4 m程度の深さに明確な躍層が形成され, それに伴って2層流的な状況が生じていた. そこで, Yodo lineに垂直な検査線O1, O2, O3 (図-5) における, 水深4 mよりも上層と下層に対するトレーサーの断面通過フラックスを次式により求める.

$$F_{upper} = \int_L \int_{z_{int}}^{\eta} u_n c dz dL; \quad F_{lower} = \int_L \int_{-h}^{z_{int}} u_n c dz dL \quad (1)$$

ここに, u_n : 断面に対する流速の法線成分, c : 無次元トレーサー濃度, h : 水深, η : 水位, z_{int} : 躍層水深 (= -4 m), L : 断面の水平距離, であり, F_{upper} , F_{lower} : z_{int} より上層および下層の無次元トレーサー濃度フラックスである.

O1, O2, O3での上下層での断面通過フラックス時間積分値 (図-7) から, 累積輸送量は上下層で正負が逆であり, 輸送方向に関しても若干の時間変動に伴う符号の反転はあるものの, 約4ヶ月間の解析期間全体を通じてほぼ2層流的な状況が維持されていることが分かる. これは成層強度にあまり依存しないロバストな構造であり, 図-7で見たように, 底層を東方向へ輸送されたトレ

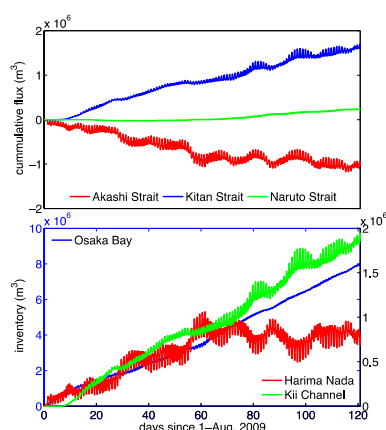


図-8 (上) 海峡別無次元トレーサーフラックス累積値, (下) 海域別無次元トレーサー蓄積量inventory.

ーサーが淀川に到達したあとも, 下層には継続的に淀川方向へ向かうフラックスが存在することを意味する. そしてこの底層フラックスは, 河口部での湧昇を通じて表層へ供給され, それが大阪湾全域に広く分散するという構造が維持されていることが理解される. したがって, 大阪湾を分散する物質に対して, 淀川は下層ではシンク, 表層ではソースの役割を果たしていることが分かる.

6. フラックス収支

L3領域内に存在する主な海峡部である明石海峡, 紀淡海峡, 鳴門海峡の3断面を検査断面とし, 断面を通過する無次元トレーサー濃度フラックス収支を求める. 各海峡での u_n の方向 (輸送方向) は, 明石海峡では東向き, 紀淡海峡と鳴門海峡では南向きを正と定義する. なお, L3西側境界付近に位置する備讃瀬戸方向へのフラックス

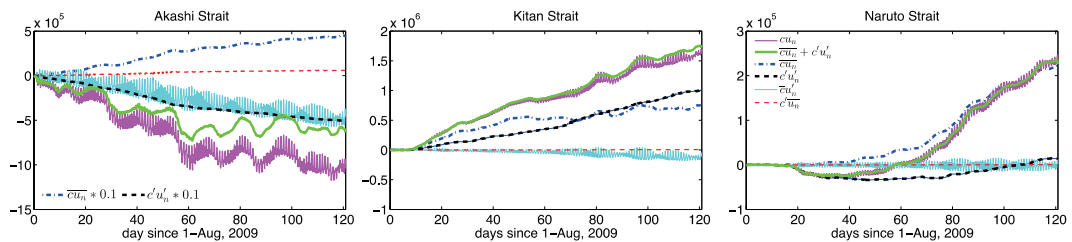


図-9 (左) 明石海峡, (中) 紀淡海峡, (右) 鳴門海峡における成分分離された断面通過トレーサーフラックスの累積値。

はほぼゼロであることを確認しており、解析からは除外する。ここでは、式(1)における鉛直積分の範囲は海底面から海表面までとする。各海峡における断面通過フラックスの時間積分値(図-8上)を見ると、明石海峡では負値、すなわち処理水は垂水処理場のある大阪湾側から播磨灘方向へ輸送される成分が卓越していることが分かる。一方、紀淡海峡では大阪湾から紀伊水道へ、鳴門海峡では播磨灘から紀伊水道へと処理水が輸送されている。121日間の総輸送量は、明石海峡では $-1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、紀淡海峡で最大値を取り $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、鳴門海峡では1桁小さく、 $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ である。次に、大阪湾、播磨灘、紀伊水道の3つの海域に対する垂水起源の処理水分散の寄与と蓄積量inventoryとして評価するため、各海峡通過フラックスの収支を求めた(図-8下)。121日間に放流されたトレーサー総量約 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ のうち、その約75%近くが大阪湾に蓄積され、播磨灘には約8%しか蓄積せず、残りは紀伊水道・太平洋方向へ輸送されることが明らかとなった。

最後に、各海峡における通過フラックス(図-8上)の内訳について検討する。ここではカットオフ周期を40時間とした周波数Butterworthフィルタにより、40時間以下の短周期成分(潮汐、日周・半日周、乱流等)と、40時間以上の長周期成分(恒流、季節変動、残差流等)にReynolds分解して相関を求めることにより、無次元トレーサー濃度フラックス f を以下のように表現する。

$$f = c u_n = \bar{c} u_n + c' u_n' + \bar{c} u_n' + c' u_n' \dots \dots \dots (2)$$

ただし、上付きバーは長周期成分、プライムは短周期成分を表す。右辺第3, 4項は長周期-短周期相関成分であり、長周期成分も時間変動するために相関がゼロにならない。各海峡における成分ごとの断面積分されたフラックスの累積値を見ると、内訳の差は歴然としている(図-9)。鳴門海峡では長周期成分が卓越して短周期成分はほぼゼロであるのに対し、紀淡海峡では両者は拮抗しており、しかも、ともに紀伊水道への流出に寄与している。ところが、明石海峡では長周期成分は大阪湾への流入を、短周期成分は逆に流出に寄与しており、その収支は播磨灘への流出となっている。さらに、 $\bar{c} u_n'$ が有意な負の値(播

磨灘への流出)を持ち、121日後の累積値では全通過量の半分程度の寄与がある。これは、明石海峡と処理場が近く $|\bar{c}| > |c'|$ であること、狭窄部の影響で強い潮流が生じて $|\bar{u}_n| < |u_n'|$ となるためである。

7. おわりに

本研究では外洋および瀬戸内海全域の影響を考慮した高解像度大阪湾・播磨灘モデルを開発した。モデルの再現性を確認したのち、神戸市垂水処理場からの下水処理水の分散実験を行なった。処理水分散には、明石海峡から播磨灘へと流入し、鳴門海峡から紀伊水道へ至るパターンと、大阪湾に滞留(または通過)し、紀淡海峡から紀伊水道へ流出するパターンが見られた。大阪湾北東部では、淀川河川水の影響による2層構造が形成され、それに伴う特徴的な分散過程が見られた。垂水処理場から放出された処理水は、神戸沖のフロントを通過後、下層へ侵入して東向きに輸送され、大阪湾奥部に到達する。そこで湧昇し、表層での淀川河川水による沖向き(西向き)流にトラップされて大阪湾全体に拡大する。解析期間内では、全放流処理水の約75%が大阪湾に滞留し、播磨灘への滞留は8%程度であった。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、神戸市建設局下水道河川部のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 阿保勝之・樽谷賢治・原田和弘・宮原一隆・中山哲蔵・八木宏(2012): 加古川河口域ノリ養殖場に及ぼす陸域からの栄養塩供給の影響, 土木学会論文集B2, Vol. 68, No.2, pp. I_1116 - I_1120.
- 内山雄介・栗山貴生・宮澤泰正(2012): 外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について, 土木学会論文集B2, Vol. 68, No. 1, pp. I_441 - I_445.
- 中辻啓二・藤原建紀(1995): 大阪湾におけるエスチュアリ循環機構, 海岸工学論文集, Vol. 42, pp. 396 - 400.
- 中山昭彦・J.D. Bricker・本田翔平(2010): 沿岸域に放流される処理水拡散の観測とLESシミュレーション, 土木学会論文集B2, Vol. 66, No.1, pp. 351 - 355.
- Uchiyama, Y., E. Idica, J.C. McWilliams, and K.D. Stolzenbach, (2013): Wastewater Effluent Dispersal in Southern California Bays, Cont. Shelf Res. (投稿中)