

大阪湾における3段階ネスティングによる高解像度モデルを用いた 下水処理水分散シミュレーション

Urban Wastewater Dispersal in Osaka Bay Using a Triply-Nested High-Resolution Ocean Model

○神吉亮佑¹, 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: 130t113t@stu.kobe-u.ac.jp

内山雄介², 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

中山昭彦³, 建設工学研究所, 神戸市灘区深田町 4-1-1, E-mail: nakayama@kensetsuk.or.jp

Ryosuke KANKI¹, Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan

Yusuke UCHIYAMA², Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan

Akihiko NAKAYAMA³, Construction Engineering Research Institute, 4-1-1 Fukada-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan

Anthropogenic land-derived materials in wastewater and river water have been recognized to have a significant 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 during the summer and fall 2009. The dispersal in the northern Osaka Bay is two-layered and has a reversal pattern in the upper and lower layers due to stratification induced 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

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。中でも、下水処理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、本海域における沿岸海洋生態系に影響を及ぼすため、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）プル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 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⁽¹⁾ (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汐流などの影響を受けた複雑な流況が形成され、大阪湾・播磨灘両方向への広域的な分散が予想される。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り、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⁽²⁾, 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への鍵となる。そこで本研究では、大阪湾・播磨灘を対象として3段階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、密度プル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、日本沿岸海洋再解析データ JCOPE 2（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らによるモデル（内山ら⁽²⁾, 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（Fig. 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（最小水平解像度は 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プル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⁽³⁾ (2013) の初期分散モデルを用い、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。

3. 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（Fig. 2）。垂水からのトレーサーは最初、主に大阪湾側に侵入し、表層では南南東方向に、底層では主に東方向に輸送される。その後も同様の分散傾

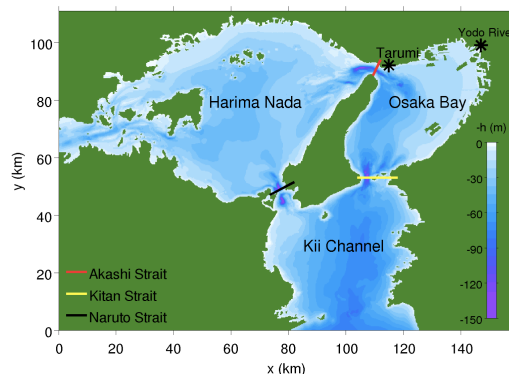


Fig.1 ROMS-L3 domain

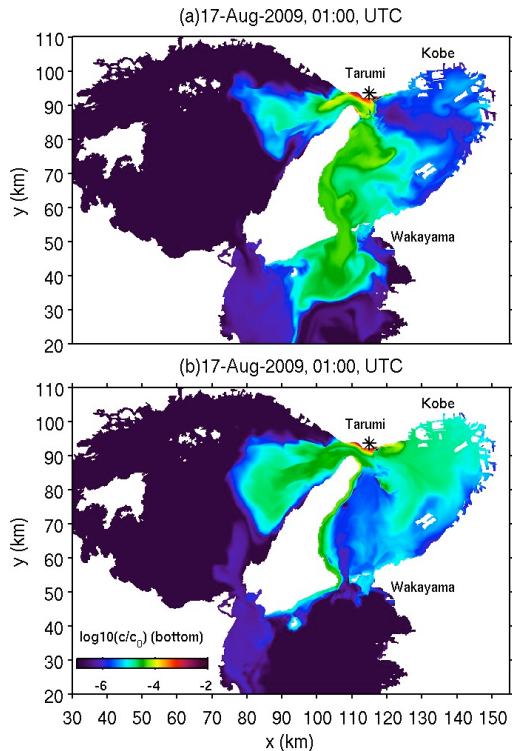


Fig. 2 Snapshots of the $\log_{10}$ -based normalized passive tracer concentration on Aug. 17, 2009, in (a) surface and (b) bottom layers.

向が見られ、表層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るが、大阪湾北東部にはほとんど分散しない。一方、底層では処理水の大部分は大阪湾奥部に広がっている。さらに17日目には、表層 (Fig. 2(a)) 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 (Fig. 2(b)) では湾奥部までトレーサーが到達しており、淀川からの淡水ブ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影響を与えている可能性が強く示唆される。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。

4. 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 (Fig. 3)、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流速の経時変化 (Fig. 4, top panels) から、淀川からの淡水ブリュームの影響を受けて、水深約4m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。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 (Fig. 4, bottom panels) 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表層での西側へのトレーサー濃度の拡大は、3章で述べた傾向と合致している。

大阪湾奥では、解析期間中を通じて水深4m程度の深さに明確

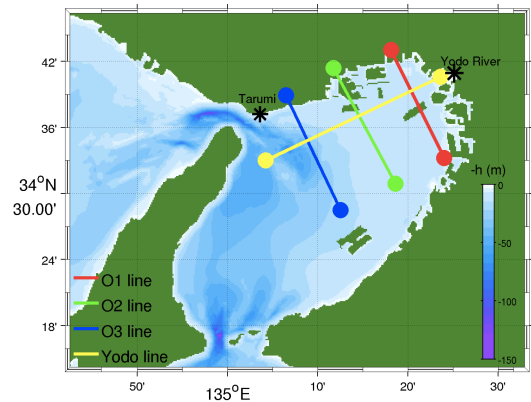


Fig. 3 Yodo line and O1, O2, O3 lines in Osaka Bay

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 (Fig. 3) における水深4m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求めたところ、累積輸送量は上下層で正負が逆であり、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確認された。この結果は、底層を東方向へ輸送されたトレ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解析期間全般を通じて維持されているものと理解される。したがって淀川は、大阪湾を分散する物質に対して下層ではシンク、表層ではソースの役割を果たしている。

5. 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た。各海峡における断面通過フラックスの時間積分値より、明石海峡で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った。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た。解析期間 (121日間) の処理水の総輸送量は、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。この結果を用いて大阪湾、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。その結果、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。

6. 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、そ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2つのパターンに大別された。大阪湾北東部では、淀川河川水の影響によって鉛直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。すなわち、垂水処理場から放出された処理水は、神戸沖で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

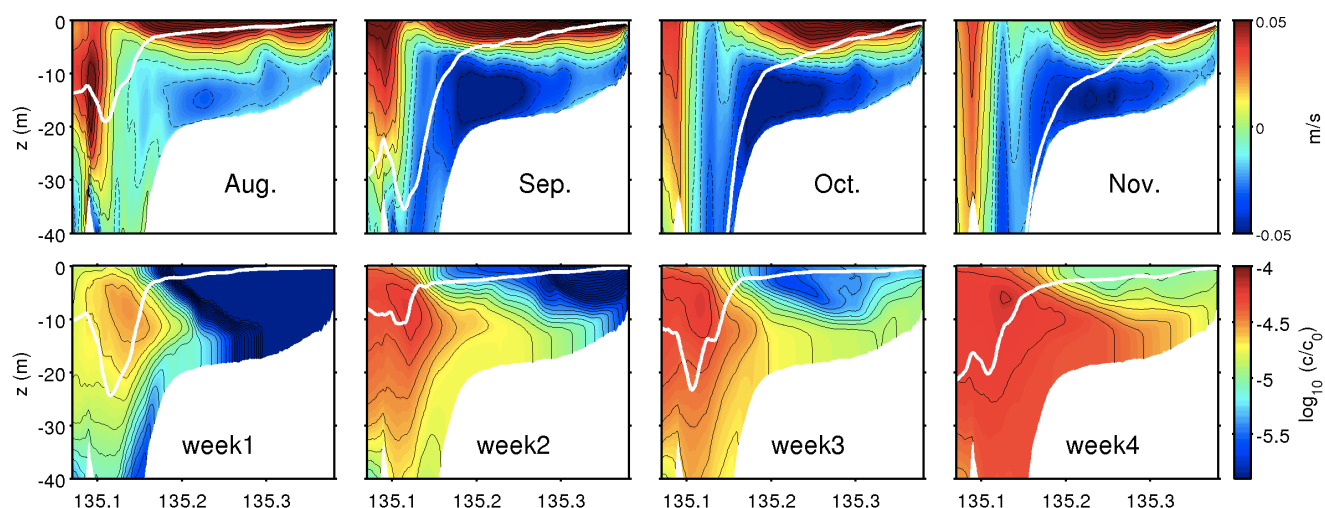


Fig. 4 Cross-sectional plots of the monthly-averaged offshore (to the SW) velocity (top panels) and of the weekly-averaged normalized tracer concentration in Aug., 2009 (bottom panels). The white curves indicate the corresponding mixed layer depths.

する。また、フラックス収支解析によると、解析期間内における全放流処理水の約 75% が大阪湾に滞留し、播磨灘への滞留は 8% 程度であった。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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)