

中谷祐介¹⁾，西田修三²⁾

1) 大阪大学大学院工学研究科 助教

2) 大阪大学大学院工学研究科 教授

1. はじめに

大阪湾奥部では、古くは江戸時代より干拓による埋め立てが行われていたが、戦後の高度経済成長期の港湾整備と沿岸開発により自然海浜はほぼ消失した。沿岸域には人工島を含む複雑な閉鎖性水域が出現し、現在、富栄養化や貧酸素化など水環境の劣化を引き起こしている。しかし、沿岸地形の変化と水環境劣化の関係は、未だ明らかになっていない。これまで研究代表者らは、大阪湾を対象に陸域から流入する汚濁負荷を量的・質的に明らかにするとともに、三次元流動水質モデルを用いて陸域、大気、底泥、外洋からの栄養塩負荷を考慮したリン、窒素の収支と循環の定量的把握について取り組んできた。しかしながら、地下水の海底湧出による栄養塩供給機構を考慮できていないことが課題として残されていた。

本研究では、大阪湾における栄養塩供給機構のうち未だ不明な点が多く残されている海底地下水湧出に着目し、その湧出域と湧出量の推定を行った。また、過去（1930年代）と現在における大阪湾の地形データを基に三次元流動シミュレーションを行い、湾奥部の地形改変が流動構造と物質輸送に及ぼす影響について解析を行った。

2. 方法

1. 大阪湾における海底湧出地下水の実態に関する調査解析

湧出地下水のトレーサーとして有用な ^{222}Rn を含めた水質データを得るために、大阪湾の港湾域および全域において現地調査を実施した。港湾域調査は2014年12月15日、全域調査は2014年12月23日に実施した。各地点では表層水と底層水を採取するとともに、多項目水質計（DataSonde5X, HYDROLAB 製）を用いて塩分、水温、DO、濁度、Chl. *-a* の鉛直プロファイルの計測を行った。また、一部の地点では5m間隔で中層水の採取も行った。さらに、2015年2月3日に、淀川（毛馬橋）において河川表層水を、岸和田沿岸の事業場で揚水されている地下水（揚水深度：33～40m）をそれぞれ採取した。採取した試料は冷暗条件下で実験室に持ち帰り、形態別の窒素、リン、ケイ素、炭素および ^{222}Rn の水質分析に供した。分析には、オートアナライザーAACS-V（BLTEC 製）、有機炭素計 TOC-V（島津製作所製）、静電捕集型ラドン測定器 RAD7・RADH20（Durrige 製）を使用した。

調査結果を基に、大阪湾底層水の塩分、水温、 ^{222}Rn 濃度、溶存無機態窒素・リン・ケイ素を入力変数として主成分分析を行った。また、鉛直一次元拡散モデルを用いて、現地調査で得られた ^{222}Rn 濃度の鉛直プロファイルを説明するような境界条件を逆推定することにより、海底からの地下水湧出フラックスの推定を試みた。

2. 地形改変が港域・湾灘スケールの流動構造と物質輸送に及ぼす影響解析

大阪湾沿岸域の地形改変が流動構造と物質輸送に及ぼす影響を明らかにするために、三次元流動シミュレーションによる解析を行った。2012年冬季を対象に、数値モ

デルの再現性の検証を行った後、現況地形における計算結果と、地形条件のみをまだ埋め立てがそれほど進行していない 1930 年代の条件に変更した場合の計算結果を比較することで、地形改変の影響を調べた。また、浮力を無視した中立粒子を湾奥部沿岸の最深層に配置し、その挙動をシミュレートすることで、地形改変が海域の物質輸送に及ぼす影響を調べた。

3. 結果と考察

1. 全試料水について塩分と ^{222}Rn 濃度の関係を図-1 に示す。低塩分域にいくつかプロットがみられるが、いずれも淀川河口域で採取された試料である。調査前の数日間は淀川大堰からの流出がほとんどなかったことを考えると、この低塩分水は神崎川に由来しているものと考えられる。図中には大阪湾の表層水と底層水について、最小二乗法により求めた相関曲線（破線）もあわせて示している。ただし、湾スケールの水質特性に着目するために、流入河川水の影響を強く受ける淀川河口域のデータは除いて相関式を構築した。決定係数は 0.26 と高くはないが、塩分と ^{222}Rn 濃度には弱い相関が認められた。今回の調査で得られた陸域地下水と淀川表流水の ^{222}Rn 濃度がそれぞれ $1,496\sim 6,736\text{Bq/m}^3$ と 185Bq/m^3 であったのに対し、相関式の切片は $5,370\text{Bq/m}^3$ を示し、陸域地下水の範囲にあった。このことは、外挿による粗い見積もりではあるものの、大阪湾水中の ^{222}Rn の主たる起源が淡水性地下水であることを示唆していると考えられた。

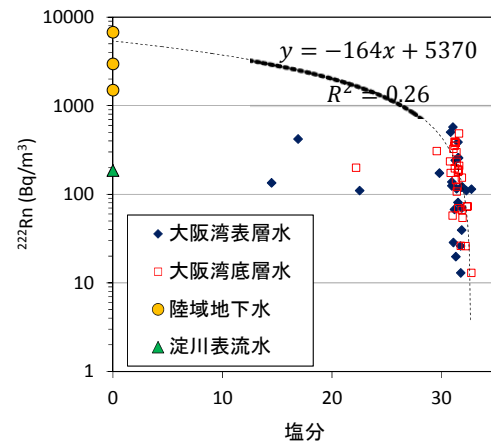


図-1 塩分と ^{222}Rn 濃度の関係

主成分分析の結果、第一主成分では栄養塩濃度と ^{222}Rn 濃度が大きな正の負荷量を、塩分が負の負荷量を示した。一般に、淡水性地下水は沿岸海水に比べて栄養塩濃度や ^{222}Rn 濃度が高いことから、主成分 1 は淡水性地下水の影響度を表す指標であると解釈可能であった。主成分得点の空間分布を図-2 に示す。陸域に近い地点の底層水ほど淡水性地下水湧出の影響が強く現れており、大阪湾北部港湾域の底層水の水質は、湧出地下水の影響を受けている可能性が示唆された。

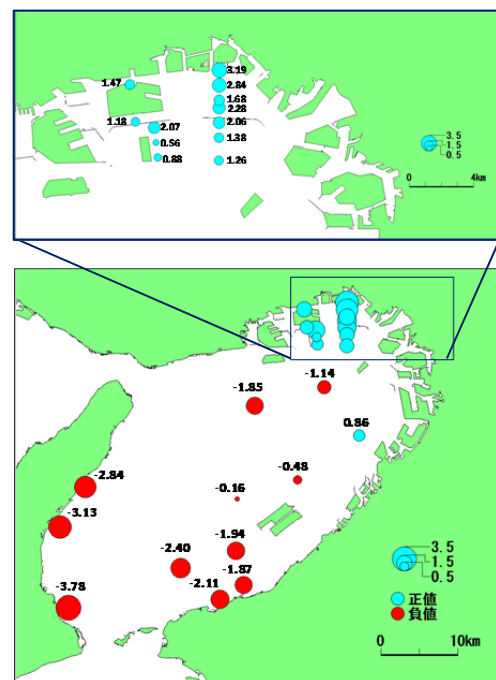


図-2 主成分得点の空間分布

^{222}Rn 濃度の鉛直分布について、観測結果とモデルによる再現結果の比較を図-3 に示す。 ^{222}Rn 濃度の鉛直分布は、水 - 大気間の拡散、地下水湧出に伴う供給、親核種である ^{226}Ra の崩壊による生成、河川水の影響を考慮した横流入および鉛直拡散といった素過程の組み合わせによ

って概ね説明可能であった。逆推定の結果、海底からの地下水湧出量は0~2.2cm/dayと見積もられ、湾口部に比して湾奥部で高い値を示した。

2. 大阪湾奥部における残差流系と期間平均密度 σ_t (2月13日~28日の15日間平均)の分布について、地形条件の違いによる比較を図-4に示す。陸域から流入する低密度水の挙動や、エスチュアリー循環に起因する高気圧性循環流や潮汐フロントの規模・位置について差異がみられた。これより、大阪湾では地形改変によって湾奥部の流動構造が大きく歪められたと考えられた。

M2 潮流振幅の分布について、地形条件の違いにより生じた計算結果の差を図-5に示す。赤い部分が地形改変により潮流振幅が大きくなった部分、青い部分

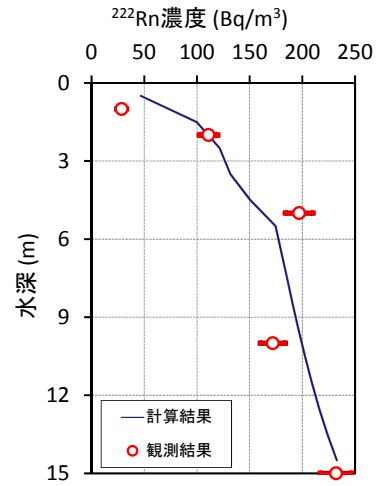


図-3 ^{222}Rn 鉛直濃度分布の観測・モデル再現結果

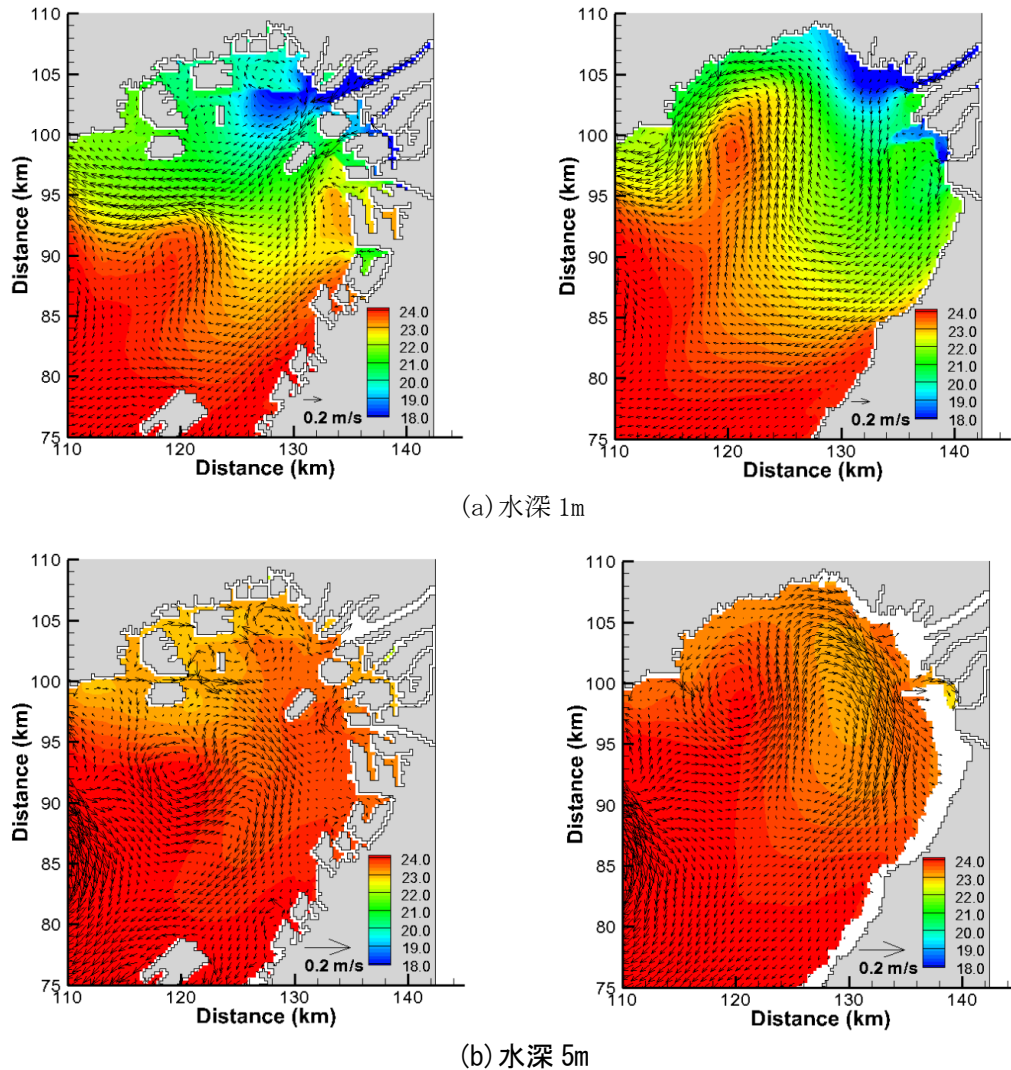


図-4 地形改変による残差流系と期間平均密度の分布の変化
(左：現況地形，右：1930年代地形)

が小さくなった部分を示している。湾西部では広範囲で潮流振幅が小さくなっており、埋め立て等により海域面積が減少した結果、湾全体で潮流が弱化したものと考えられた。一方、湾東部では埋め立て地や人工島の付近で複雑に変化しており、局所的にみると狭窄部では±10cm/sec以上の大きな差異が生じる結果となった。また、湾灘スケールで見ると、播磨灘と紀伊水道ではともに潮流振幅が小さくなっており、大阪湾奥部の地形改変の影響は海峡部を通じて隣接海域にも及ぶことがわかった。特に、小豆島東部や沼島付近といった海峡部から離れた地点で比較的大きな変化が生じる結果となった。

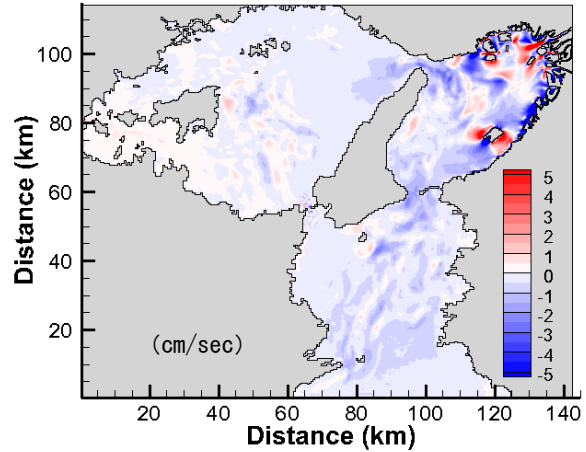


図-5 地形改変によるM2潮流振幅の変化

粒子追跡シミュレーションの結果の一例として、粒子放出後72時間経過後の分布を図-6に示す。図-4に示した西宮沖環流や潮汐フロントの規模や位置にみられる流動構造の変化に伴い、湾内の物質輸送場が大きく変化することがわかった。

4. 結論

本研究で得られた主たる結論は以下の通りである。

1. 主成分分析の結果より、大阪湾北部港湾域の底層水は海底湧出地下水の影響を受けていることが示唆された。また、鉛直次元拡散モデルを用いて境界条件を逆推定した結果、海底地下水の湧出量は0~2.2cm/dayと見積られ、湾口から湾奥部にかけて増大する傾向にあった。
2. 数値シミュレーションの結果、大阪湾の地形改変は、湾奥部における低密度水の挙動や西宮沖環流および潮汐フロントの規模や位置を大きく歪め、湾内の物質輸送を変化させることがわかった。また、地形改変は湾奥部の潮流場を局所的に大きく変化させ、その影響は隣接海域である播磨灘や紀伊水道にまで及ぶことがわかった。

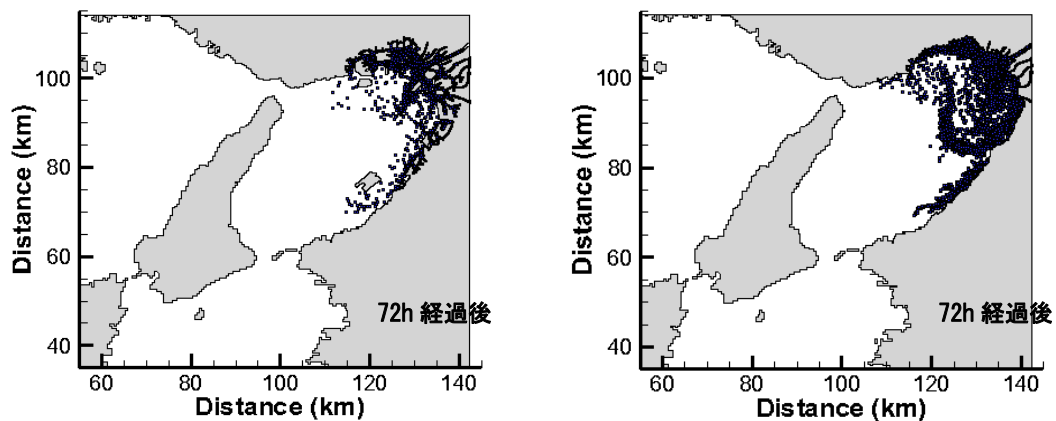


図-6 地形改変による粒子挙動の変化 (左：現況地形, 右：1930年代地形)