

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03312

研究課題名（和文）都市沿岸域における新たな流動・水質制御方策の提案と効果検証

研究課題名（英文）Proposal of new measures for flow and water quality control in urban coastal seas and verification of their effects

研究代表者

西田 修三（Nishida, Shuzo）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40172663

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,400,000円

研究成果の概要（和文）：沿岸域に立地する事業所の取放水や排水を積極的に利用した、閉鎖性海域における水環境改善の可能性を検討した。

事業所データの解析から、大阪湾奥部の沿岸域に位置する事業場から排水される流量は、大阪湾に流入する河川流量に匹敵し、そのうち発電所排水量の割合は約80%と極めて大きく、沿岸域の流況改善に利用できる可能性が示唆された。発電所周辺海域において現地調査と数値シミュレーションを実施し、発電所の取放水方法や流量の変化が港域の水交換と水質に及ぼす影響を予測した。その結果、流動構造（残差流系）の変化や水交換の促進が認められたが、その効果は港域スケールに大きく依存することなどが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海域の負荷削減施策による海域の環境偏差の問題や生物生産性の低下など、いま日本の都市沿岸域が抱える新たな課題に対して、従来の水質の規制・管理ではなく、都市沿岸域に特化した新たな環境改善策となることが期待できる。また、環境の「保全」を目的とした事業アセスメントの課題を抽出し、これまで積極的な利用ができなかった事業所からの取放水を利用した停滞水域の流動・水質の制御による水環境の「再生」と「創造」と一体化した、アセスメントの必要性と重要性を提示した。

研究成果の概要（英文）：The possibility of improving the water environment in highly enclosed coastal sea by actively using the water discharge of factories and plants was examined.

From the analysis of the factories and plants data, it was found that the flow rate discharged from them located in the coastal area in the head of Osaka Bay is comparable to the river discharge into the bay, and the thermal discharge of the power plant is about 80% of the total discharge. It was suggested that it could be used to improve the flow structure in the coastal area. Field surveys and numerical simulations were carried out in the sea area around the power plants to predict the effects of changes in the water intake and discharge method and flow rate on the water exchange and water quality in the port area. The results showed that changes in the flow structure (residual flow system) and promotion of water exchange were observed, but it was clarified that the effect depends greatly on the scale of the port area.

研究分野：環境水理学

キーワード：閉鎖性海域 港湾 水交換 栄養塩循環 流況制御 発電所取放水 環境影響評価

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に劣化した水環境の再生に向けて、これまで種々の環境施策が講じられ、良好な水環境を取り戻しつつある。しかし、東京湾や大阪湾など、大都市を背後に抱える閉鎖性内湾の沿岸域では未だに赤潮や青潮が発生し、期待されたほどには水質改善は進んでいない。さらに、沿岸域を除いた沖域では、長年にわたる負荷削減施策の効果により富栄養化が解消されつつあるものの、一部海域では行きすぎた陸域負荷の削減により、栄養分が不足する貧栄養化が生じ、生物生産性の低下を招くという新たな問題も指摘されている。

このような現況に鑑み、長年にわたり瀬戸内海の環境保全の役割を担ってきた瀬戸内海環境保全特別措置法が2015年に改訂され、これまでの水質規制を中心とした環境施策が見直され、水域特性に応じた水質管理と生物多様性・生物生産性の確保に向けた施策へと方針を大きく転換した。各自治体ではその方針を受け、具体的な施策の検討が行われ、実施に移されている。

埋立等により複雑な地形を有する都市沿岸域は、高い閉鎖性のために流動が弱く、栄養塩をはじめ多くの物質が滞留・堆積し、陸域負荷削減による環境改善効果は現れにくい。その結果、沿岸域では富栄養、沖合では貧栄養を示す大きな環境偏差が生じ、これが大都市を抱える内湾の環境改善を進める上での大きな問題となっている。また、沿岸域の水環境の改善策として、生態系を考慮した、藻場・干潟の造成や生物共生護岸の設置等も一部水域で行われてきたが、適用可能な水域が限られ、また改善効果も限定的である。いま、都市沿岸域を対象とした抜本的な環境改善が強く望まれている。

従来の水質規制や水質管理ではなく、都市沿岸域に特化した新たな環境改善策が必要と考えられる。そこで、これまで積極的な利用がなされてこなかった発電所や事業所からの取放水や排水(人工的な水輸送系)を利用し、停滞水域の流動・水質を総合的に制御することを発案し、環境改善の可能性と具体的な方策について検討を始めるに至った。

### 2. 研究の目的

埋立地や港湾、水路網等で形成される都市沿岸域では、陸域から大量に流入する汚濁物質の滞留や海底に堆積した有機物の分解による栄養塩の溶出など、高い閉鎖性に起因した水質汚濁が生じている。このような都市沿岸域の水環境改善に向けて、長年にわたり水質規制や負荷削減施策など種々の改善策が講じられてきたが、未だ抜本的な改善には至っていない。

本研究では、これまでのような流入水の水質規制や負荷削減等の方策ではなく、沿岸域に立地する事業所の取放水や排水を積極的に利用した総合的な流動制御により、閉鎖性水域の水交換を促進し、劣化した水環境の改善を目指すものである。

流況・水質の現況が把握されている大阪湾沿岸域を研究対象として、水環境への影響を、現地調査と数値シミュレーションによって予測・評価し、取放水や排水を利用した効果的な環境改善方策を検討する。また、発電施設等の新設・更新時に実施される事業アセスメントの課題を抽出し、汚濁が進行した沿岸域におけるアセスメントのあり方についての検討も行う。

### 3. 研究の方法

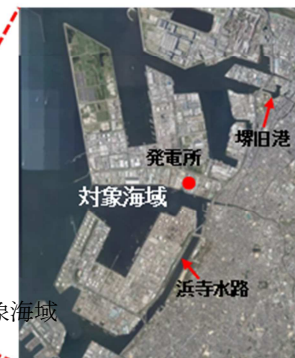
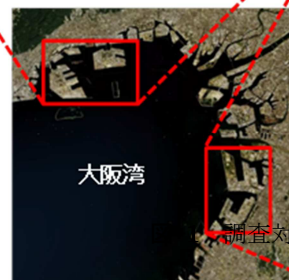
#### (1) 資料の収集分析

取放水・排水に関する基礎資料を収集し、数値シミュレーションにおける流出流量などの計算諸元を確定するとともに、収集した既往の観測データを用いて水温、濁り、クロロフィル等の分布特性を明らかにし、取放水・排水の拡散状況と影響域を把握した。



#### (2) 現地調査

発電所周辺海域の流動水質構造と放流水の挙動特性を明らかにするために、既往の観測データが入手できなかった湾奥東部港湾域において、2018年12月と2019年10月に流況・水質の現地観測を実施した。あわせて採水と底泥のサンプリングも行い、持ち帰って水質分析および底泥の栄養塩溶出実験と酸素消費実験を行った。また、海域の成層構造や貧酸素水塊の消長も捉えるために夏季から冬季わたって水質の長期観測も実施した。



#### (3) 数値シミュレーション

シミュレーションには、複雑な沿岸地形を滑らかに表現できる非構造格子を用いた FVCOM と SCHISM を用いた。現況調査データを基に再現計算を実施し、モデルパラメータの最適化

を行った。2つの発電所（北部および東部）の取放水口の位置や取放水形式、放流水の流量や水質などを変化させた場合のシミュレーションを行い、周辺海域の流動、水質に及ぼす影響について解析を行った。さらに、粒子追跡法や断面輸送量計算により、水交換量の変化についても定量的評価を行った。

#### (4) 環境改善策の提案

取放水・排水を利用した環境改善策について、解析結果を基に評価・検討を行った。また、事業アセスメントのあり方についても課題の抽出を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 事業所排水量の資料分析

図-2に $1\text{m}^3/\text{s}$ 以上の排水を行う上位9ヶ所の事業場の位置と排水量を示す。排水量が $1\text{m}^3/\text{s}$ 以上の事業場は全て発電所または下水処理場であり、湾奥部に集中していた。特に、発電所の取放水量はいずれも $30\text{m}^3/\text{s}$ を超えており、他の事業場の排水量に比して1桁大きい。なお、神戸に立地する発電所については、発電所に隣接する製鉄所からの排水との合計の排水量を示しており、更新時には取放水量の倍増が計画されている。

大阪湾奥部沿岸（神戸市長田区～堺市）に立地する事業場からの排水量と河川

流量の年平均値（2014年）について、兵庫県・大阪府別の比較を図-3に示す。大阪府域には一級河川である淀川や大和川が流入するが、その流量の約50%にも相当する事業場排水が流入していた。一方、兵庫県内では中小河川しか存在しないため、発電所からの大量の放流水を含む事業場排水量は河川流量の4倍もの値を示していた。さらに、事業場排水の内訳を見ると、発電所からの放流水が事業場排水の大半を占めていることがわかる。このことより、高閉鎖性海域の流動制御には、発電所取放水を用いることが効果的と考えられる。

#### (2) 現地調査・分析

① 湾奥東部港湾域の発電所の放水口が位置する浜寺泊地周辺における、海表面と海底直上の水質の水平分布（2019年10月17日）を図-4、5に示す。調査水域の北側奥の放水口周辺では温排水による表層水温の上昇がみられるとともに、石津川からの淡水供給の影響も現れていた。Chl. aは港内の閉鎖性の強い水域で高い値を示し、DOも高くなっていった。また、浜寺水路では、表層水の貧酸素化もみられ、放水口前面海域では冷却用に取水された底層水の影響で低DO域が広がっていた。底層については、水深の深い窪地と浜寺水路においてほぼ無酸素を示し、強い嫌気状態にあることがわかった。なお、12月に実施した水質調査結果では、周辺海域よりは低DOを示していたが貧酸素は解消されていた。調査で得られたこのような水質状況は、隣接する堺旧港や北部港湾域でも同様の傾向を示しており、大阪湾の高閉鎖性沿岸域の特性を表していると考えられる。

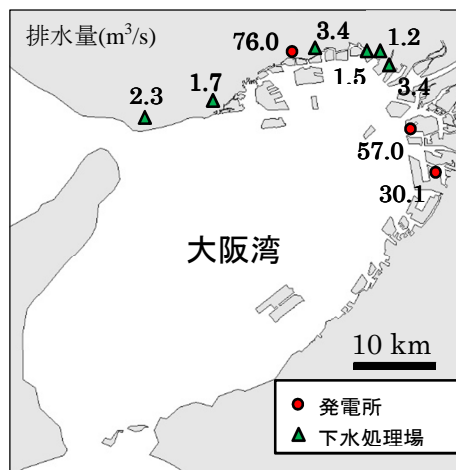


図-2 事業場（ $1\text{m}^3/\text{s}$ 以上）からの排水

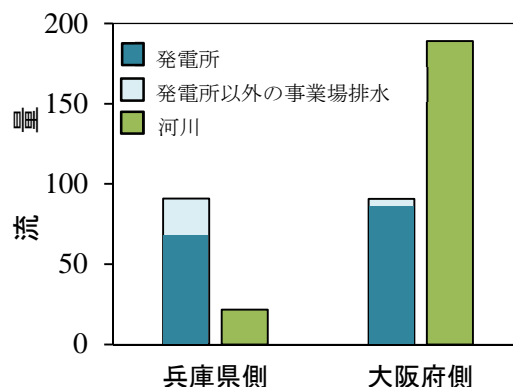


図-3 大阪湾奥部における事業場排水量と河川流量

図-4 水質分布（海表面）

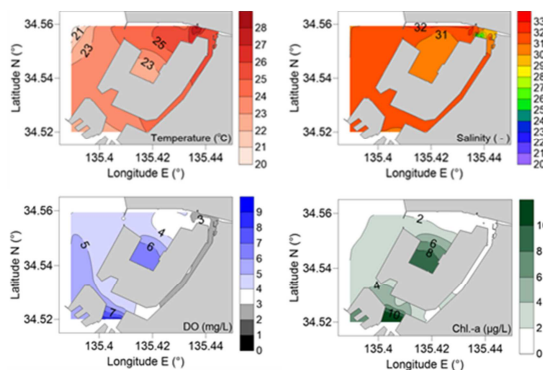
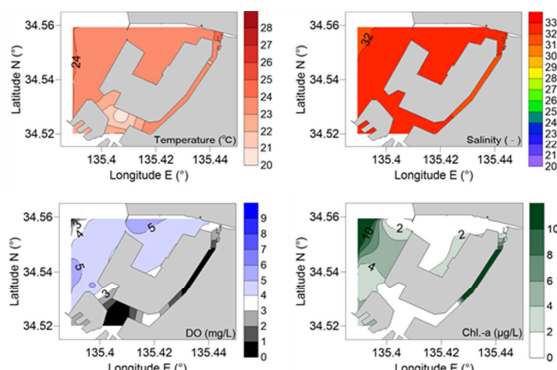
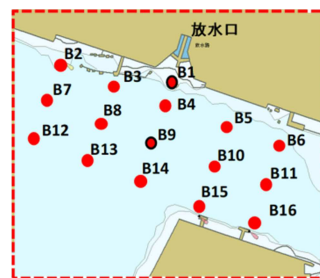


図-5 水質分布（海底直上）





② 図-6 に放水口周辺の詳細な水温、DO の鉛直構造を示す。放水口から放出された温排水は、水温約 29°C、DO 約 2 mg/L を有し、前面海域に拡がっていた。東側では石津川からの淡水流入の影響により、水面下 2~3m に低 DO のピークが現れ、特異な鉛直構造を有していた。温排水の環境影響評価では、主に水温や流動への影響が検討されてきたが、水温と同様に低 DO 水が港域に拡がるのがわかった。一方、埋立地を挟んで隣接する港域では 30m<sup>3</sup>/s もの貧酸素化した底層水が取水により港外に除去されており、その効果は大きいと考えられる。



(3) シミュレーション解析

① 湾奥北部港湾域に立地する発電所周辺海域における、海水交換日数の算定を行った結果、いずれのケースも交換日数に大きな変化は見られなかった。これは、この海域の流況が潮流に強く支配されていることと、この発電所では取放水が同じ港域内で行われているためと考えられる。このことから、この港域では取放水量の増加は必ずしも海水交換を大きく促進することにならず、残差流を強化する方向に取放水を行うことによって、港湾スケールの混合拡散を促進させることが可能と考えられる (図-7、8)。また、表層の低塩分水塊を取水し底層に放水しても、港湾スケールの密度分布に大きな変化は生じなかった。これは、放流水が低塩分高温となり密度が大きく低下したことによる。

この港域の流況・水質改善のためには、港内の残差流系を考慮して取放水の量に加え、取放水口の位置や向きを決定する必要があることがわかった。

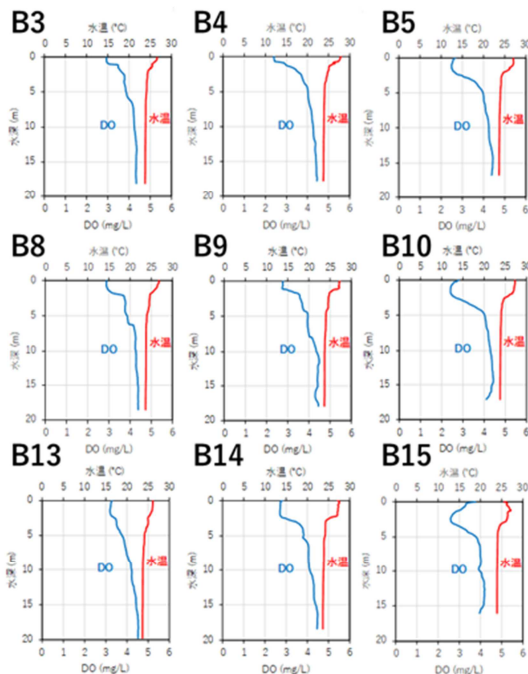


図-6 放流口全面の水温、DO 分布

② 湾奥東部港湾域に立地する発電所周辺海域

における、表層の残差流を図-9 に示す。取放水がない場合 (case01) は、現況 (case02) に比べて浜寺水路を時計回りに流れる残差流が強くなり、南側の港域にも弱い残差粒が発生していた。この結果より、温排水の流入により港域の表層流動が弱化したことが予想される。この流況の変化は上層で顕著であるが、下層では変化はほとんど見られなかった。また、他の期間の計算も行ったところ、計算時期によって時計回りの残差流の強弱は変化したが、どの場合も温排水放流の影響は港域に拡がっていた。

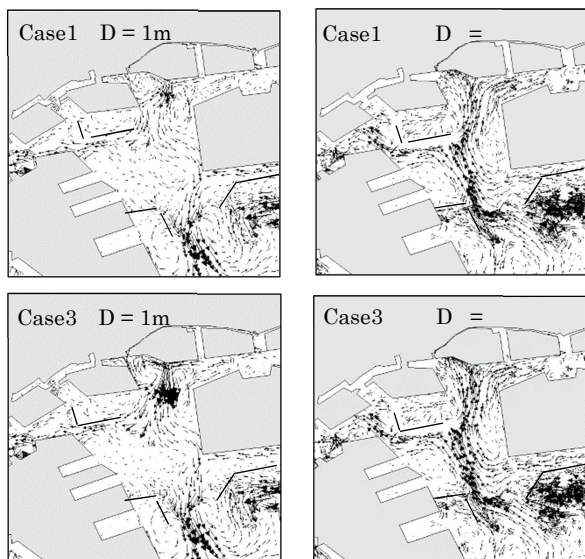


図-7 水深 1m (左) と 10m (右) の残差流 (上: 現況, 下: 計画流量 (現況×2))

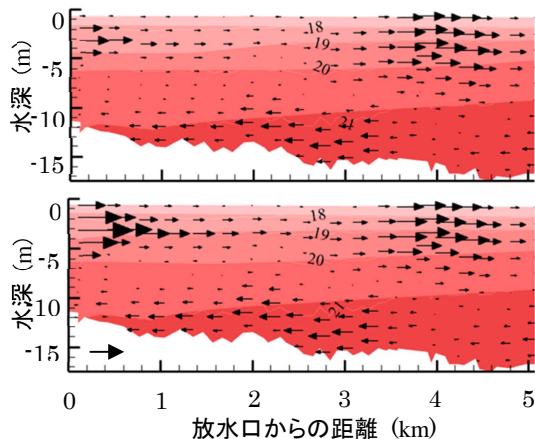


図-8 密度  $\sigma_t$  と残差流の鉛直分布 (上: 現況, 下: 計画流量 (現況×2))

③ この東部港域における取放水の水交換への影響を評価するために、3水深に分けて、0~10m、11~20m、21~30mの各層それぞれに仮想粒子を配置し、その挙動計算を行った。0~10mに初期配置した場合の結果を図-10に示す。粒子の港外への流出や残留状況が可視化され、その違いが現れている。流出率(=流出粒子数/初期粒子数)によって水交換を表せば、図-11のように得られた。case3は放水口の位置を、case4は放水口の向きを変化させた場合の結果である。上層では各ケースで10%程度の差異があったが、底層ではほとんど違いがなかった。放水量の残差流への影響は、放水口付近で大きく現れているが、水交換性の向上には大きくは現れなかった。これは、水交換が放水流量とともに、港域スケールに大きく依存するためと考えられる。この港域スケールでは、温排水量に比して港口での潮汐による水交換量が極めて大きく、実質 $30\text{m}^3/\text{s}$ の水交換量が付加されても、その量は相対的に少ないために、効果が大きく現れなかったものと考えられる。

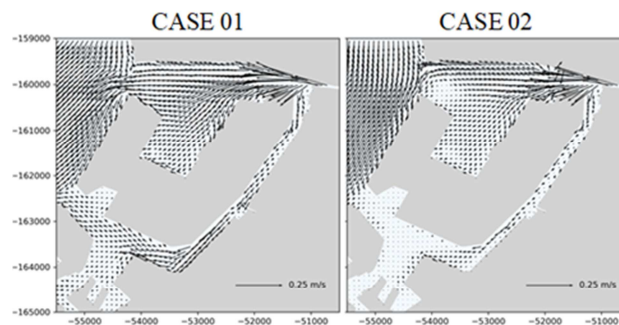


図-9 表層残差流分布  
(左：取放水なし，右：現況)

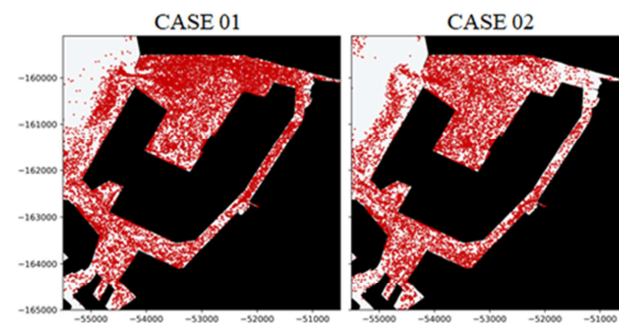


図-10 上層粒子の5日後の平面分布  
(左：取放水なし，右：現況)

#### (4) 水質改善方策

① 観測結果と解析結果より、発電所の取放水を用いて水域の水質改善を行う場合には、流況改善による港域の水交換向上という視点だけではなく、水質悪化した水塊の排除という視点から、貧酸素化した底層水や富栄養化した水塊を冷却水として取水し、港外へ排水するというような直接的な物質の系外除去が最も効果的と考えられる。また、底層放流による鉛直混合と水平循環の促進も、範囲は限定的であるが港内の水質改善に有効と考えられる。

② 発電所取放水は大きな運動量と熱量を有しており、流動制御や水質改善に大きなポテンシャルを有していることが明らかとなった。しかし、これまで施設の新設や更新時の事業アセスメントにおいては、「環境保全」が謳われ、周辺環境に悪影響が及ぶ恐れがある場合には、「回避、低減、代償措置」を講ずることになっている。つまり、環境へのマイナス効果の低減が「環境への配慮」と考えられている。都市沿岸域では、環境の「保全」ではなく「改善」、「再生」、「創造」が望まれている。このような海域では事業の環境へのプラス面も評価し、水環境の改善施策と一体化した事業アセスメントの実施が必要と考えられ、そのための法整備も望まれる。

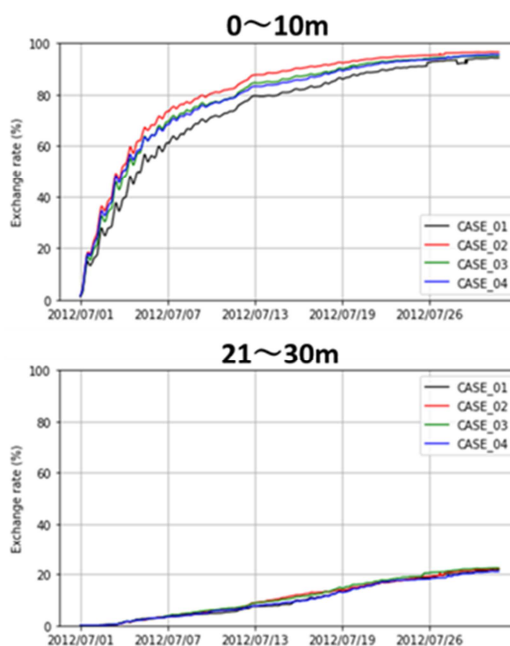


図-11 粒子の港外流出率の経時変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>西田修三・岡田浩明・中谷祐介・中友太郎           | 4. 巻<br>73              |
| 2. 論文標題<br>発電所取放水を利用した高閉鎖性海域の流動制御に関する検討 | 5. 発行年<br>2017年         |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集B2 (海岸工学)              | 6. 最初と最後の頁<br>1195-1200 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |
| 1. 著者名<br>西田修三, 中谷祐介, 広瀬太芽              | 4. 巻<br>75              |
| 2. 論文標題<br>高閉鎖性海域における水質および底質の調査解析       | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集B2 (海岸工学)              | 6. 最初と最後の頁<br>1039-1044 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |
| 1. 著者名<br>石崎裕大, 中谷祐介, 西田修三              | 4. 巻<br>75              |
| 2. 論文標題<br>深層学習と非線形時系列解析を統合した水質推定手法の開発  | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集B1 (水工学)               | 6. 最初と最後の頁<br>81-99     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |
| 1. 著者名<br>西田修三, 山西悟志, 中谷祐介, 入江政安        | 4. 巻<br>76              |
| 2. 論文標題<br>高閉鎖性海域の水質底質特性と発電所取放水の影響解析    | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集B2 (海岸工学)              | 6. 最初と最後の頁<br>-         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-               |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>中谷祐介, 戸村祐樹, 西田修三                    | 4. 巻<br>76      |
| 2. 論文標題<br>非構造格子モデルを用いた瀬戸内海 太平洋領域における外洋水の挙動解析 | 5. 発行年<br>2020年 |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集B2 (海岸工学)                    | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難        | 国際共著<br>-       |

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>中谷祐介, 石橋春佳, 西田修三        |
| 2. 発表標題<br>河川感潮域の流動・水質に及ぼす海岸埋立ての影響 |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会年会               |
| 4. 発表年<br>2018年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中谷祐介, 石崎裕大, 西田修三                  |
| 2. 発表標題<br>自己回帰駆動ディープニューラルネットによる大阪湾底層DOの変動予測 |
| 3. 学会等名<br>瀬戸内海研究フォーラム                       |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中谷祐介, 石崎裕大, 西田修三                  |
| 2. 発表標題<br>深層学習とカオス時系列解析の統合モデルによる内湾底層DOの変動予測 |
| 3. 学会等名<br>第53回日本水環境学会年会                     |
| 4. 発表年<br>2019年                              |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>西田修三                     |
| 2. 発表標題<br>港湾域を含む沿岸海域の環境管理          |
| 3. 学会等名<br>水工学に関する夏期研修会（土木学会）（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2017年                     |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>西田修三                  |
| 2. 発表標題<br>水と栄養の動きから水環境を考える      |
| 3. 学会等名<br>海の再生全国会議（国土交通省）（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2018年                  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)              | 備考 |
|-----------|--|------------------------------------|----|
| 研究<br>分担者 | 入江 政安<br><br>(Irie Masayasu)<br><br>(00379116)   | 大阪大学・工学研究科 ・准教授<br><br><br>(14401) |    |
| 研究<br>分担者 | 中谷 祐介<br><br>(Nakatani Yusuke)<br><br>(20635164) | 大阪大学・工学研究科 ・助教<br><br><br>(14401)  |    |