

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04273

研究課題名（和文）瀬戸内海における外洋起源有機物の動態とCODの制御限界

研究課題名（英文）Dynamics of ocean-origin organic matter and control limit of chemical oxygen demand in the Seto Inland Sea

研究代表者

中谷 祐介（Nakatani, Yusuke）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20635164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：瀬戸内海では、化学的酸素要求量CODの環境基準達成率が低く、その原因解明が求められている。本研究では、瀬戸内海における難分解性の外洋起源有機物の動態を解明し、近年のCOD異変への影響を明らかにすることを目的とし、三次元流動水質モデルを用いた解析を行った。その結果、瀬戸内海では人為的に制御することができない外洋起源CODが最大で6割、少なくとも2割程度存在していることが明らかとなり、瀬戸内海の水質管理において決して無視できない量であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、瀬戸内海における外洋起源有機物の動態を解明し、CODの制御可能性とその限界を定量的に示したことで、今後の水質管理方針の抜本的見直しに資する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In the Seto Inland Sea, the achievement rate of the environmental standard for chemical oxygen demand (COD) is low, and there is a need to clarify the cause of this low COD. In this study, a three-dimensional flow and water quality model was used to analyze the dynamics of organic matter of open-ocean origin in the Seto Inland Sea and to clarify its influence on the recent COD anomaly. As a result, it was found that the amount of oceanic COD that cannot be artificially controlled is up to 60% and at least 20% of the total COD in the Seto Inland Sea, and it is considered to be an amount that cannot be ignored in the water quality management of the Seto Inland Sea.

研究分野：環境水理学

キーワード：瀬戸内海 化学的酸素要求量 外洋起源有機物 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

瀬戸内海では、高度経済成長以降に過剰な汚濁負荷が流入した結果、富栄養化が進行し、赤潮や貧酸素水塊などの水質問題が深刻化した。これに対処するために、1979年度からは水質総量規制が開始され、陸域から流入する化学的酸素要求量 COD (Chemical Oxygen Demand)、全窒素 TN (Total Nitrogen)、全リン TP (Total Phosphorus) の負荷量が削減された。その結果、TN と TP については瀬戸内海のほぼすべての湾灘で環境基準を達成した。しかしながら、COD に関しては近年横ばい、あるいは一部海域では微増傾向がみられ、環境基準の達成率は70%台にとどまっている。今後、海域の COD が低下しない原因を科学的に解明し、もし非制御系要因の影響により環境基準値を達成することが不可能な場合には、現行の環境基準の見直しを検討する必要も考えられる。

陸域負荷の削減施策が進められてきたにも拘わらず、海域の COD が当初の予想ほど低下しない原因はいくつか考えられているが、その一つとして、太平洋から流入する外洋起源の有機物が影響している可能性がある。外洋の中低層に存在する有機物は、一次生産による生成から数十年～数百年が経過しており、易分解成分は既に微生物分解されているため、大半は難分解性の溶存有機物であると考えられる。瀬戸内海に存在する有機物のうち、難分解性の外洋起源有機物が相当の量を占めているのであれば、それをバックグラウンド値として考慮した上で、環境基準値を再評価する必要がある。

外洋水が瀬戸内海の水質に及ぼす影響に関しては、TN・TP については多くの既往研究がある。応答法やバックグラウンド法による粗い見積もりではあるが、瀬戸内海に存在する TN・TP のうち外洋起源が占める割合は概ね60%程度とされている¹⁾。しかし、外洋起源の COD に関する既往研究は少なく、瀬戸内海と外洋域の COD の長期変動について統計的相関を調べた程度にとどまっており、因果関係や機構は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、瀬戸内海における難分解性の外洋起源有機物の動態を解明し、近年の COD 異変への影響を明らかにすることである。外洋起源有機物が瀬戸内海の COD に及ぼす影響に着目した研究はこれまでもなされてきたが、それらは瀬戸内海と太平洋の COD 観測値の相関を調べるのみにとどまっている²⁾。外洋起源有機物の動態について、力学的なアプローチから因果関係の解明を試みる点が本研究の特色である。今回、外洋起源有機物の動態を解明し、COD の制御可能性とその限界を定量的に示すことで、瀬戸内海における今後の水質管理方針の抜本的見直しに資する知見が得られると期待される。

3. 研究の方法

本研究では、河口 - 湾灘 - 外洋に至るマルチスケールの力学現象をシームレスに解析可能な瀬戸内海の三次元数値流動モデルを構築し、その再現性を検証した。構築した数値モデルを用いて、外洋起源有機物に見立てた保存性トレーサの移流拡散計算を行い、瀬戸内海における外洋起源有機物の存在量と変動を解析した。さらに、有機物を起源別・形態別に細分化した低次生態系モデルを開発し、炭素、窒素、リン、酸素の動態を考慮した物質循環解析を行うことで、瀬戸内海における各起源の COD の分布を推定した。

4. 研究成果

(1) 瀬戸内海 - 太平洋領域の高解像モデルの構築

三次元流動モデルにはSCHISM (Semi-Implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model)³⁾を使用した。計算領域は瀬戸内海から太平洋の黒潮流路を含む東西南北約700 kmの領域とした。水平方向の格子サイズは瀬戸内海領域では150 m～1.5 km程度とし、太平洋領域は約5 kmとした。鉛直方向には多重 σ 座標系LSC² (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cell)を採用し、最大84層に分割した。

初期条件および外洋境界条件にはMOVE/MRI.COM-JPN (以下、MOVE) による海面高度、水温、塩分、流速の出力値を使用した。さらに、外洋境界にはグローバル潮汐モデルFES2014による主要28分潮の潮位・潮流振動も加えた。流入境界には一級水系27河川、中小河川86河川の計113河川を考慮した。淡水流入量には、分布型流出モデルを瀬戸内海とその周辺海域の集水域に適用し、解析雨量を入力とした水文流出計算により得られた値を与えた。一級河川の流量について計算値を観測値と比較したところ、Nash-Sutcliffe係数の平均値が0.7以上を示し、モデルによる流量再現性が良好であることが確認された。水面の熱収支には短波放射、長波放射、顕熱、潜熱を考慮し、降水量と短波放射には、AMeDASの沿岸測候所の毎時観測値を補間して与えた。長波放射には米国環境予測センターNCEPが公開する全球気候モデル出力値(NCEP-CFSR、あるいはNCEP-CFSv2)を使用し、顕熱および潜熱はバルク式より求め、気温・気圧・比湿・風向・風速には気象庁メソ数値予報値GPV-MSMを与えた。

瀬戸内海に存在する19箇所の検潮所を対象に、主要8分潮の振幅と位相について観測値と計

算値を比較したところ、ともに相関係数が 0.99 を上回り、高い精度で潮汐場が再現された (図-1)。また、広域総合水質調査の全測定地点のデータを用いた水温・塩分の再現性の検証では、観測値と計算値の RMSE は表層と底層の水温ではそれぞれ 1.14 °C と 1.19 °C、塩分では 0.65 と 0.52 と良好であることが確認された (図-2)。

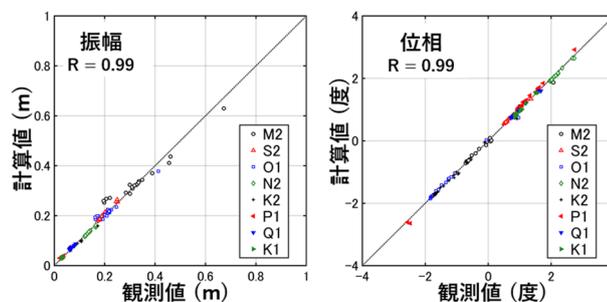


図-1 主要8分潮 (振幅, 位相) の再現性

(2) 外洋境界条件に用いる海洋プロダクトによる解析結果への影響

外洋起源有機物の動態を解析するにあたっては、外洋境界条件の設定が重要となる。そこで、境界条件の設定に使用する海洋データプロダクトの違いがシミュレーション結果に及ぼす影響を評価するために、上記の MOVE データの代わりに HYCOM+NCODA GOFS 3.1 (以下、HYCOM) データを用いた場合についても同様の計算を行い、結果を比較した。

結果の一例として、日本南岸を流れる黒潮の流路位置を表す指標として、本州最南端に位置する潮岬から黒潮流軸までの南方距離について両計算結果を比較した (図-3)。MOVE データを用いた計算ケースでは黒潮流路は良好に再現されていることが確認された。一方、HYCOM データを用いた計算ケースでは、黒潮は実際よりも離岸した流路をとる傾向が強く、特に 2017 年 8 月以降の黒潮大蛇行期に顕著であった。これは HYCOM が日本南岸の冷水渦の規模を過大評価していることが主な原因と考えられた。さらに、両計算ケースでは瀬戸内海と外洋との水交換量にも大きな差が生じるなど、境界条件に用いる海洋プロダクトの違いが瀬戸内海の流動計算に及ぼす影響は無視できないことがわかった。空間解像度の高い MOVE を用いた計算のほうが観測データの再現精度が高かったことから、以降の解析では MOVE データを使用することとした。

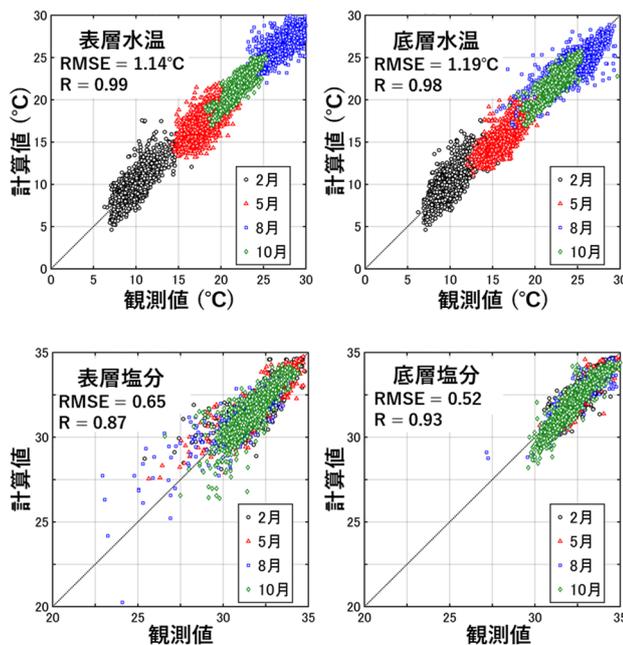


図-2 水温・塩分の再現性

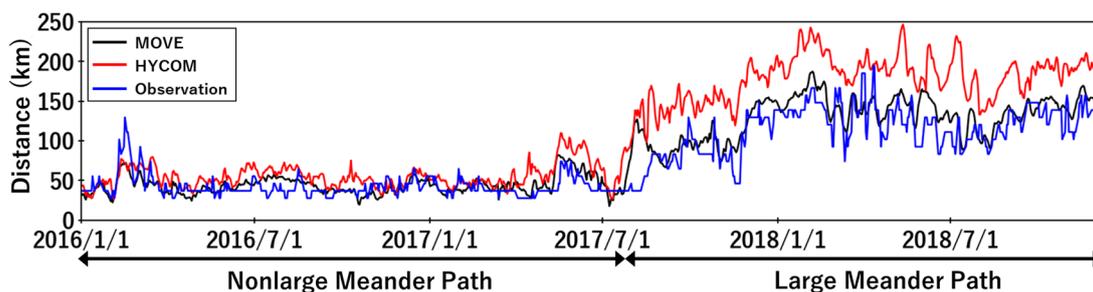


図-3 潮岬から黒潮流軸までの南方距離

(3) 外洋起源有機物の挙動解析

外洋水に含まれる有機物は、大部分が難分解性溶存有機物であるため、外洋性の溶存態有機炭素 (DOC) を保存性のパッシブトレーサーとして移流拡散計算を行い、瀬戸内海における外洋起源有機物の分布と挙動を解析した。外洋境界条件の設定には、Global Ocean Data Analysis Project Version 2.2021 より収集した DOC の観測データを基に、水深依存の関数を構築して与えた。

解析結果の一例として、2018 年 7 月における外洋起源 DOC の空間分布を図-4 に示す。河口付近では河川水により希釈されて濃度低下がみられたが、外洋起源 DOC は瀬戸内海全域でほぼ一様に分布しており、濃度範囲は最大で約 55 mol/L (=0.66 mg/L)、最小で約 35 mol/L (=0.42

mg/L)であった。

瀬戸内海における外洋起源 DOC 濃度の年変動は、いずれの湾灘においても小さく、ほぼ一定であった。河川からの淡水流入が多い湾灘では希釈による濃度変化がみられたものの、外洋起源有機物は瀬戸内海全域において時空間的にほぼ均一に存在していることがわかった。

各湾灘の COD 濃度に占める外洋起源割合 (2011年～2018年の平均値)を算定したところ、外洋起源 COD 濃度は全湾灘で同程度であり、0.42～0.67mg/Lを示した(表-1)。流入負荷量や内部生産量が大きい大阪湾などでは、外洋起源の占める割合が18.7～28.5%と低い一方で、外洋に近い豊後水道や紀伊水道では割合が高く、最大で60.8%にも及ぶ結果となった。これらの結果から、瀬戸内海では人為的に制御することのできない外洋起源 COD が最大で6割、少なくとも2割程度存在していることが明らかになった。

これは瀬戸内海の COD 管理において決して無視できない量であり、環境基準の検討においては外洋起源有機物量をバックグラウンド値として考慮する必要があると考えられた。

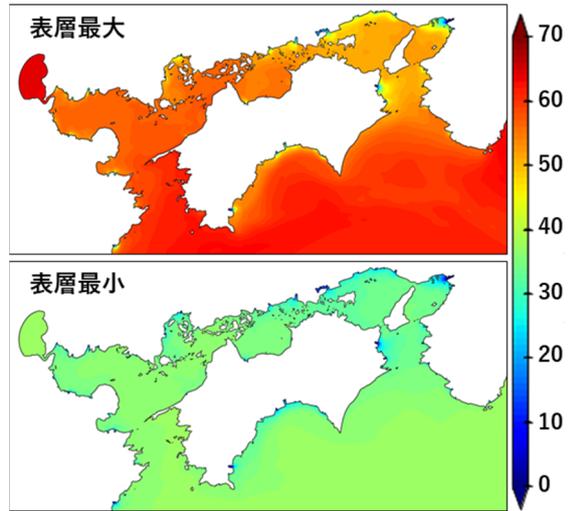


図-4 外洋起源DOC (mol/L)の表層分布

表-1 各湾灘のCODに占める外洋起源割合 (%)

	豊後水道	伊予灘	周防灘	広島湾	安芸灘	燧灘	備後灘	備讃瀬戸	播磨灘	大阪湾	紀伊水道
最大	60.3	47.6	35.9	32.6	40.7	34.6	31.9	31.3	35.4	28.5	60.8
最小	39.1	31.0	23.3	21.3	26.5	22.6	20.7	20.4	23.1	18.7	39.9

(4) 有機物を起源別・形態別に細分化した低次生態系モデルの開発

従来の低次生態系モデルでは、有機物の動態は比較的簡略に表現されていることが多い。そのため、植物プランクトン、炭素、酸素、窒素、リンに関する生物化学過程を数理的に表現した低次生態系モデル CE-QUAL-ICM⁴⁾をベースに、有機物コンパートメントを起源別・形態別に細分化し、沿岸海域の有機物動態をより詳細に解析できる低次生態系モデルを開発した(図-5)。具体的には、有機物の起源を陸域起源、内部生産起源、外洋起源の3つに区分し、さらに陸域起源および内部生産起源の有機炭素については、難分解性懸濁態、易分解性懸濁態、難分解性溶存態、易分解性溶存態の4つに区分した。また、外洋起源の有機炭素については、難分解性溶存態のみを考慮した。

開発したモデルを用いて、2016年10月の瀬戸内海における流動水質シミュレーションを実施し、表層 COD 濃度に占める起源別割合の分布を解析した(図-6)。その結果、陸域起源 COD は主に河口沿岸域10km以内に限定され、湾灘沖合ではほとんど存在しないことが確認された。一方、内部生産起源 COD は陸域から流入する栄養塩を利用して一次生産が行われるため、河口付近を中心に高い値を示した。また、停滞性が強い瀬戸内海中部海域では、植物プランクトンの代謝・被捕食によって生

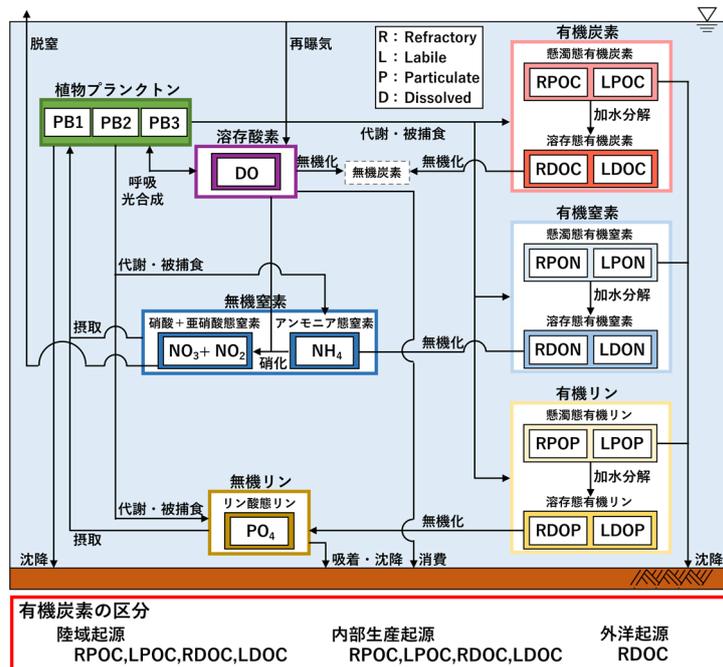


図-5 有機物を起源別・形態別に区分した低次生態系モデル

成された難分解性溶存有機物が蓄積することで、高い濃度値を示した。この結果より、当該海域で報告されている近年の COD 濃度の上昇が、植物プランクトン由来の難分解性有機物に起因する可能性が示唆された。外洋起源 COD については、保存性トレーサーを用いた解析結果と同様に、瀬戸内海全域でほぼ一様に分布していることが確認された。

また、各湾灘における表層 COD の起源別内訳を算定した結果、いずれの湾灘でも外洋起源 COD が 30%以上を占め、特に外洋に近い豊後水道や紀伊水道では 50%以上に達していた(図-7)。さらに、内部生産起源 COD は備後灘などの中部海域で 50%以上を占めており、これが海域 COD に大きな影響を及ぼしていることが確認された。豊後水道や紀伊水道においても、内部生産起源 COD は 30%以上を占めており、その影響の大きさがあらためて確認された。

本研究では 2016 年 10 月のみを対象とした解析を行ったが、瀬戸内海の COD 濃度は河川出水や季節変動などによって大きく変動すると考えられるため、今後はより長期間の解析を行う必要がある。また、低次生態系モデルのパラメータには依然として大きな不確実性が残されており、特に植物プランクトンの生理生態に関する素過程については、さらなる研究が必要である。そのため、本研究で示した内部生産起源 COD の評価には精度向上の余地が残されていることに留意する必要がある、この点については今後の課題である。

<謝辞>

本研究を進めるにあたり、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援(課題番号:EX22707)を受け、大阪大学サイバーメディアセンターの大規模計算機システムを利用した。気象庁 GPV-MSM データは京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースより、気象研究所が提供する MOVE/MRI.COM-JPN Dataset はデータ統合解析システム DIAS より収集した。あわせてここに記し、感謝の意を表します。

<引用文献>

- 1) 矢吹芳教, 小野純子, 相子信之, 中嶋昌紀, 田中咲絵, 駒井幸雄: 日本近海の太平洋側外洋水の COD の長期変動と瀬戸内海の COD の変動に及ぼす影響, 水環境学会誌, 40(5), 189-197, 2017.
- 2) 武岡英隆: 沿岸海域における外洋起源栄養塩の見積もり方法とその問題点, 沿岸海洋研究, 43(2), 105-111, 2006.
- 3) Zhang, Y., Ye, F., Stanev, E. V. and Grashorn, S.: Seam-less cross-scale modeling with SCHISM, Ocean Modelling, 102, 64-81, 2016.
- 4) Cerco, C. and Cole, T.: Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay, Journal of Environmental Engineering, 119(6), 1006-1025, 1993.

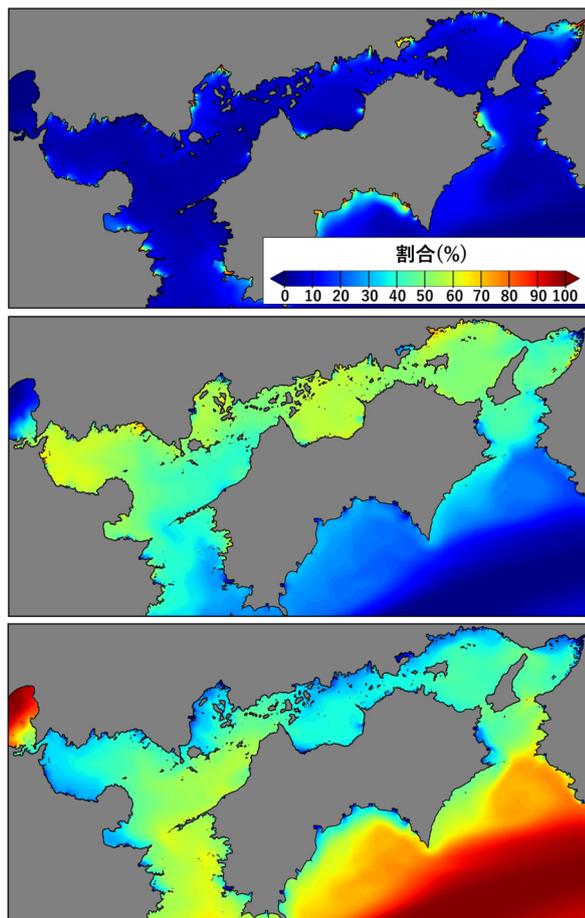


図-6 表層COD濃度に占める起源別割合(上段:陸域起源, 中段:内部生産起源, 下段:外洋起源)

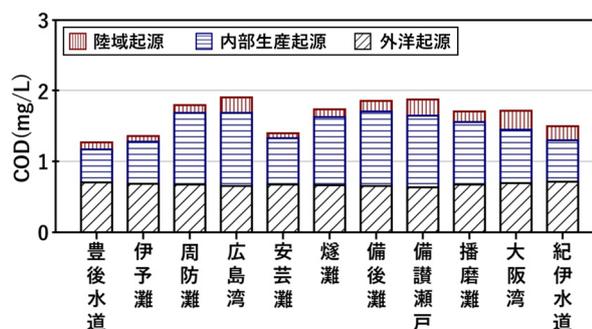


図-7 表層CODの起源別内訳(2016年10月平均)

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 3件）

1. 著者名 鹿島千尋, 中谷祐介, 山根成陽, 戸村祐希	4. 巻 78(2)
2. 論文標題 瀬戸内海における外洋起源有機物の挙動解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_757 ~ I_762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_I_757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 山根成陽, 鹿島千尋, 中谷祐介	4. 巻 78(6)
2. 論文標題 過去30年の降雨パターンと土地利用の変化が瀬戸内海への淡水流入量に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 II_89-II_97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.78.6_II_89	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 鹿島千尋, 中谷祐介	4. 巻 79
2. 論文標題 地形改変による瀬戸内海の流動変化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-17055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kashima Chihiro, Nakatani Yusuke	4. 巻 -
2. 論文標題 The Selection of Ocean Boundary Conditions on Coastal Hydrodynamic Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 40th IAHR Congress	6. 最初と最後の頁 345-353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3850/978-90-833476-1-5_iahr40wc-p0785-cd	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Kashima Chihiro, Nakatani Yusuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Behavior analysis of open ocean water in the Seto Inland Sea by using particle tracking	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 34th International Ocean and Polar Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 鹿島千尋, 中谷祐介, 山根成陽
2. 発表標題 瀬戸内海のCODに占める外洋起源有機物の割合
3. 学会等名 第29回瀬戸内海研究フォーラム in 和歌山
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷祐介, 鹿島千尋, 山根成陽, 出口博之
2. 発表標題 瀬戸内海における外洋起源有機物の動態解析
3. 学会等名 第14回JHPCNシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鹿島千尋, 戸村祐希, 山根成陽, 中谷祐介
2. 発表標題 高解像非構造格子モデルを用いた瀬戸内海の埋め立てによる流動影響解析
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山根成陽, 鹿島千尋, 中谷祐介
2. 発表標題 分布型流出モデルを用いた瀬戸内海の過去30年の淡水流入特性の解析
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomura, Y. and Nakatani, Y.
2. 発表標題 Dynamics analysis of refractory organic matter from the Pacific Ocean in the Seto Inland Sea
3. 学会等名 Coastal and Estuarine Research Federation (CERF) 26th Biennial Conference, 16th Estuarine Coastal Modeling Session (ECM16) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鹿島千尋, 中谷祐介
2. 発表標題 地形変化が瀬戸内海の流動に及ぼす影響の数値解析
3. 学会等名 第30回瀬戸内海研究フォーラムin山口
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中谷祐介
2. 発表標題 外洋起源有機物の動態が瀬戸内海のCOD濃度に及ぼす影響
3. 学会等名 国立環境研究所 地方環境研共同研究全体会合(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中谷祐介
2. 発表標題 スパコンを活用した瀬戸内海の水環境シミュレーション
3. 学会等名 スパコンセミナー「のぞいてみようスパコンの世界 『富岳』を見て、聞いて、知って」(招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------