

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630208

研究課題名(和文) 流動水質モデルと社会経済モデルの統合による新たな水環境施策評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of an Integrated Model of Water Quality and the Economy for Valuation of Ecosystem Services

研究代表者

入江 政安 (Irie, Masayasu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00379116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水環境改善施策の新たな評価手法として、海域の流動水質モデルおよび陸域の社会経済モデルが連動する統合モデルを構築した。本モデルは、一定の環境基準の下で、水域における環境保全・創造のための施策が実施されることに伴い、陸域からの汚濁負荷排出規制が緩和されると仮定して、海域における環境施策の効果を陸域の生産額の変化により評価する新たな統合的評価法である。海域側モデルでは、流動・水質・底質・干潟の各モデルを統合し、陸域側では動学的応用一般均衡モデルを導入することにより、生態系の持つ多様なサービスを精度良く評価するとともに、施策の長期的な効果を予測することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：As a new approach to evaluation of water quality benefits, this study attempted to construct an integrated model of water quality and a regional economy. In the model, a suit of hydraulic submodels that account for water flow, water quality, early diagenesis, and aquatic cultures in tidal flats are integrated with a computable general equilibrium model that accounts for consumption, production, and waste water treatment activities. The integrated model was then used to simulate the impacts of alternative water-quality regulations on water quality and economic activity. An innovative aspect of the study is that the integrated model can be used quantify the value of ecosystem services as the avoided loss in economic output --- for example, the economic value of an increased shallow-water area is the increase in the value of economic output due to the associated increase in allowable pollution loads that are made possible by the increased environmental capacity for nutrient absorption.

研究分野：環境水理学

キーワード：流動水質モデル 水環境 応用一般均衡モデル 経済価値 水環境施策評価 大阪湾 生態系モデル
干潟

1. 研究開始当初の背景

日本の沿岸域はリザーバーとしての干潟や浅水空間を回復させないまま、水質の回復のために下水道の整備や下水処理の高度化による供給量の減少を図った結果、需要も供給も少ない「縮小均衡」型の水域になりつつあると言える。水質が向上するという一点においてはこの方策も間違いではないが、生物多様性や豊かな海という観点からは望まれている形ではない。

研究代表者らはこれまで、3次元流動水質モデル(EFDC)と静学的な社会経済モデル(応用一般均衡モデル)の結合により、経済成長の早期からの水質規制が沿岸陸域の経済に及ぼす影響は非常に大きく(試算では、高度経済成長期も大阪湾のCODを4mg/l以下で維持しようとする、2005年のGDPを0.5%押し下げる影響をもつ)、陸域の経済規模が大きすぎることが沿岸域の環境保全を難しくしている可能性を示した。この計算では、地形改変はこれまでの変遷と同じにしているため、干潟・浅水空間は一方的に減少し、海域は「縮小均衡型」の構造へと推移している。陸域の経済活動への影響をできるだけ減じつつ、海域のリザーバーとしての効果(環境容量)を維持し続ける方策はなかったのか、これから転換することは可能なのか?について研究することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、浅水空間の保全・創造施策の経済価値について、流動水質モデル(3次元流動水質モデル)と社会経済モデル(応用一般均衡モデル)を連結した統合モデルによる新たな評価方法を提案することを目的とする。本研究が目指すのは、少ない浅水空間と高度な下水処理という、栄養塩循環の観点からすれば「縮小均衡型」の海陸の循環構造から「多くの浅水空間と適切な下水処理」という「高環境容量型」の海陸循環構造への転換であり、従来、企業が排水処理費用として負担していた費用を早期から水域環境の保全創造へ振り分けることで、実現しようというものである。なぜ浅水空間がなくなったのか?を流動水質モデル・社会経済モデルの連結で説明することにより、沿岸域における環境施策の新たな評価法を提案する。具体的には図1に示すとおりである。海域の環境改善策により、陸域からの排出規制が緩和されることを仮定し、その緩和により陸域の生産活動が増加することを想定している。このとき、海域の環境改善策は陸域の(水環境施策とは直接関係しない産業を含めて)あらゆる産業の生産額の増加により評価されるため、海域の環境改善効果についてはあくまでも水理学的検討に依り、陸域では他の産業への波及効果も検討する経済モデルで検討することになる。従来の環境改善施策に比べて、包括的であり、応用に富む構造となっている。

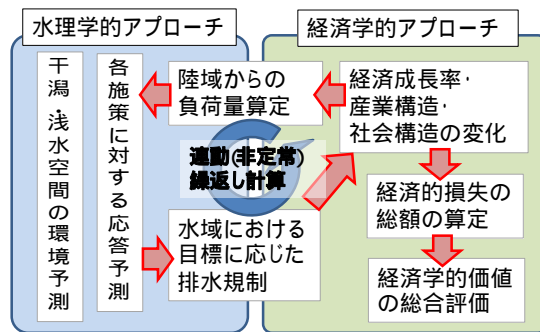


図1 本研究が目指す評価手法

3. 研究の方法

(1) 現地調査および基礎データの収集

研究対象とする大阪湾において、定量化が依然として難しい底泥からの栄養塩の回帰について、モデルの再現性を裏付けるための、現地調査を2013年、2014年の両年で実施した。

合わせて、汚濁負荷発生量の推定精度を向上させるため資料の収集と過去の検討の精査を実施した。

(2) モデルの構築

a) 海域モデルの構築

本研究で用いたEFDCによる長期の水質再現および予測に必要な、モデルの精度を確保するために、モデルの境界条件の見直し等を実施し、検証した。

本研究開始前においては底質モデルを組み入れておらず、流入負荷量と水質の再現結果から、逆算的に底質からの栄養塩回帰量を推定していた。従って、水質規制の変化に伴う底質の応答を予測することはできなかった。本研究では底泥を好気層と嫌気層の2層で取り扱うモデルを導入した。

あわせて、干潟を含めた浅水空間における生態系のもつ機能をモデル化するため、そのうちの1つである二枚貝による水質浄化能力を表現する二枚貝モデルを導入した。

b) 陸域モデルの構築

本研究では陸域の社会構造、産業構造、またその変化を表現する術として、一般応用均衡モデルを採用している。社会を構成する各主体はそれぞれの利益を最大化しようとし、社会に市場メカニズムが存在すれば、各主体の供給行動、需要行動を決める均衡条件が存在しうる。一般応用均衡モデルは、企業や家庭の行動を数式によりモデル化し、与えられた経済の中でどのように調和(均衡)するかを推定するものである。本研究では近畿地域産業連関表をもとに、近畿地域を対象に一般応用均衡分析を行った。

本研究でモデルの精度向上に寄与しているのは動学化である。動学化とは経済学用語であり、非定常化を意味する。多くの動学的応用一般均衡モデルは過去のデータのみが将来に影響し、将来に予想される変化は過去(現在)の行動に影響しない逐次型の動学モ

デルを採用しており、本研究でも同じく採用した。本研究では、各年における各企業が生産に投入する資本の減耗率を現実の産業連関表から求め、外生的に与えるとともに、前年度に汚濁負荷排出規制が強化された場合、次年度への投資が減少し、家計の資本賦存量が減少する。それによって、各企業の生産が圧迫されるという構造になっている。

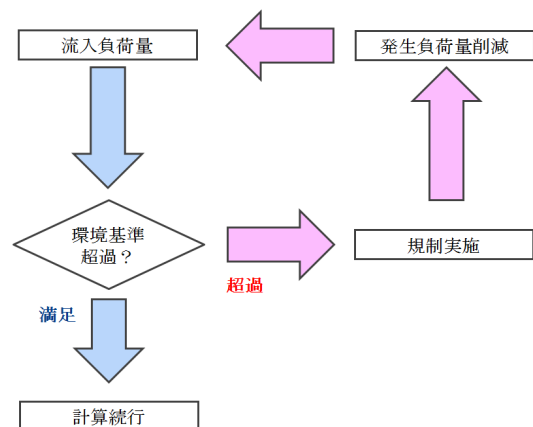
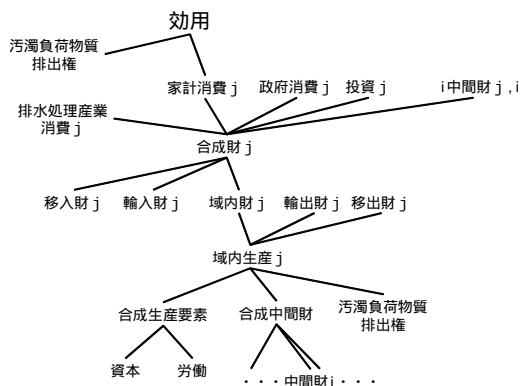


図3 長期連動解析のイメージ

図2 本研究で用いた応用一般均衡モデルの概要

(3)モデルによる解析

本検討では、一つの例として、大阪湾奥部淀川河口において、1950年以前に消失した干潟が保全されていた場合の経済価値を推定する。まず、淀川河口を北東端とし、紀伊水道に南側境界、播磨灘に西側境界を設けた計算領域を設定し、湾奥部を500mメッシュ、沖側を1kmに分割し、鉛直方向に等間隔の10層に分割した。計算期間を1951年から2010年としたため、その期間の埋め立てなどによる地形変化を考慮している。気象条件は2000年からの10年間の1時間毎データを各時間において平均して与えた。海域に与えられる汚濁負荷量は、計算期間中の近畿地域産業連関表を基にして産業別に推定し、西田ら(2012)の調査結果を用いて、大阪湾への流達負荷量を推定した。また、新たに組み込んだ二枚貝の初期値は花町ら(2010)の伊勢湾の値を採用した。

陸側においては、家計と政府、15分類の産業、企業が購入する排出権を生産する排水処理産業を考慮している。これにより、汚濁負荷原単位が大きい産業は規制が強化された場合に負担が大きくなる。生産額は1951年から2005年の近畿地域産業連関表を基にし、社会会計表を作成して、動学的な計算を実施する。シナリオによる生産額の変化に伴い、産業分類ごとに算定されている排出原単位を乗じて総計した汚濁負荷量を変化させることにより、海側のモデルにおける新たな流入負荷量として与え、海域と連動する。

(4)水質に関する排出権取引(水質取引)の検討

本研究の主眼は、浅水空間の浄化機能のような環境サービスを評価するにあたり、浅水空間によって代替可能な規制シナリオによる経済損失を、流動水質モデルと社会経済モデルを連動させることによって推計することでその評価を行おうというものである。従って、環境サービスの経済価値は、代替的な規制シナリオをいかに定義するかにも依存すると考えられる。一方、経済学においては、(一定の条件下では)排出権取引によって規制による経済損失を最小化できると考えられている。もしそのような理論予測が本研究の対象流域においても成り立つのであれば、規制シナリオに排出権取引を組み込むことによってより有益な経済評価を行うことが可能と考えられる。しかしながら、既往研究では幾つかの水質取引の形態が提示されているため、本研究への適用の可能性を考慮するに当たって、基礎的な調査を行う必要がある。

4. 研究成果

(1)大阪湾の底質と栄養塩の回帰量の推定

底泥間隙水中のNH₄-N濃度分布を図4に示す。NH₄-Nは、湾奥の地点Sta.1、2と湾西のSta.4、5でそれぞれ似た分布を示し、湾奥と湾西で濃度が大きく異なる。一方、PO₄-PはSta.1、2では底泥深くにおいて濃度が大きい、0~2cmの表層においては地点毎の大きな濃度差は見られなかった。水深別の面積と今回の回帰速度実験結果から推定した大阪湾全体の1日あたりの回帰量は、NH₄-Nで11.8 ton/day、PO₄-Pで0.83 ton/dayであった。これらは大阪湾に流入する1日あたりの晴天時陸域負荷量のそれぞれ72%と23%に相当する。

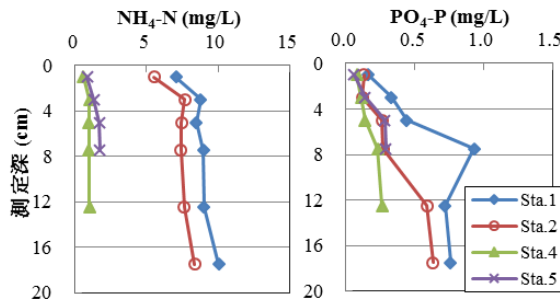


図4 大阪湾内の4地点における底泥内上層におけるアンモニア態窒素およびリン酸態リンの間隙水内鉛直分布 (Sta.1が最も湾奥、Sta.5が最も沖側)

また、得られたデータおよび既往のデータを基に、Anggara et al. (2009)による底質モデルを用いて、間隙水内水質と底泥から海水中への物質回帰量の再現予測を行った。このモデルを採用した場合、底質内の物質循環および底質内の物質の鉛直分布を詳細かつ精度良く表現できたが、栄養塩の水中への回帰量については、実際より高い値が得られることが多かった。このため、先に述べたように、本研究の統合モデルを用いた底質モデルは底泥鉛直層内を2層に分割したやや簡易化されたモデルを採用することで、水中への回帰量の推定精度を重視した。

(2)水質取引の可能性と適用への課題

本研究の対象水系のように、支流が存在し、被害想定額が流下方向に線形に変化しない場合において Hung and Shaw (2005)によって提示された TRS 型水質取引モデルと Farrow et al. (2005)によって提示された DTRS 型の水質取引モデルを考慮した結果、いずれのモデルでも、水質取引の市場均衡が、汚染削減費用を最小化するような社会的最適解を到達しないケースが有ることが明らかになった。

また、水質取引モデルを本研究に適用する為には、COD 負荷に関する流域全体の総量規制を、流域内の各点源汚染者へ排出権という形で初期配分を行い、その初期配分に対する各点源汚染者の汚濁削減費用に関するコスト関数を推計する必要がある。残念ながら、本研究で開発された流動水質モデルでは、各点源汚染者からの汚濁と流域の水質との関係を十分な精度で評価できるまでに至っていないこと、また CGE を使った社会経済モデルでも各点源汚染者の費用関数を推計できるほどの精度が無いことから、どのいずれの条件も満たしていない点を考慮し、排出権取引モデルの陸域モデルへの取り込みについては本研究では見送った。

(3)環境施策評価において新たな評価手法として活用できるモデルの提案

以上のような種々の検討から、海域における環境保全創造施策の経済価値の推定を通じて、施策の統合的評価が行える手法を構築

した。図5に統合モデルの概要と各モデル間で交換される情報を示す。流動水質モデルは底質モデルから無機態窒素・リンの回帰量および底泥による酸素消費量の情報を得る。また、二枚貝モデルから、二枚貝による有機態窒素・リンの除去量の情報を得る。本研究の干潟モデルでは二枚貝の動態のみを同時に計算しているが、それ以外の生物相も構造的には考慮可能である。あるいは、近年研究が進んでいるブルーカーボンに関する研究によって得られる干潟の CO₂ フラックスの調査結果など、新しい知見が得られれば、干潟の浄化能力として新たに取り込むことが可能で、統合モデルを構成する各モデルの中で、最も改善の余地がある。

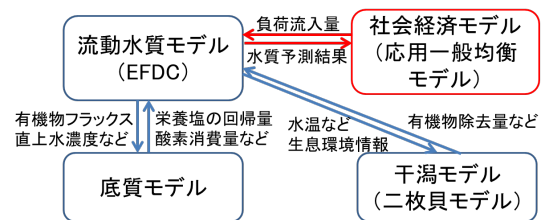


図5 構築した統合モデルとモデル間の引き渡される情報

本研究における流動水質モデルと社会経済モデルの連携は、目標として設定可能な環境基準や目標値が存在し、それを維持・達成するために、環境施策による環境改善によって陸域における排出量規制が緩和されるという仮定が前提条件となる。流動水質シミュレーションにおいて、一定の環境基準を維持するために許容できる汚濁負荷流入量を推定する。それが現状の汚濁負荷流入量より大きい場合、陸域における排出規制が緩和される。社会経済モデル側において、生産に必要な排出処理費用が減額され、生産増につながる。

環境施策の経済価値の算定には、実際に陸域からの排出量規制が緩和される必要はなく、つまり経済価値の算定においては代替法的なアプローチとなる。規制緩和による生産増に伴う排出量の増加は速やかに社会経済モデル内で反映されるなど、応用一般均衡モデルの長所を活用できる。また、流動水質シミュレーション結果はその施策が実施された場合の海域における水質改善効果を(新たな流入負荷量の値を用いたシナリオによる計算を実施する前に)一時的に推定することが可能である。また施策の効果を、流入負荷量の緩和可能量を評価指標として、定量的に評価することができるため、水環境改善施策の環境面、経済面の双方を同時に評価することができる。この点は本統合モデルの大きな特徴と言える。

(4)モデルの再現性評価

1950年からの60年間にわたる水質の変化を再現した。図6に現況の長期計算による湾

奥部大阪港内の表層 COD および T-P の経年変化を示す。点で示した観測値は公共用水域データベースの値を用いている。両者を見る限り、概ね良好な結果が得られていることを示している。しかし、特に、負荷原単位の推定の際に必要なデータが無く、また、発生負荷量と流入負荷量の比の根拠が不足する計算期間前半の負荷量については十分な精度が得られていない可能性があり、両者の計算期間全般の再現精度に影響を与えている可能性がある。

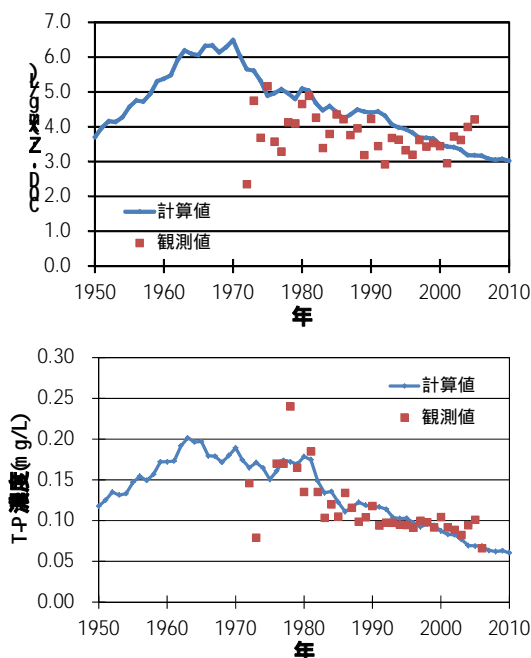


図6 大阪港内の表層 COD および TP の長期変化

(5) モデルによる干潟保全の効用にかかる長期連動計算結果

図7に仮想的な環境基準「湾奥の環境基準点の表層 COD 平均値が 5mg/l 以下」を達成するために許容される COD 負荷量の経年変化を示す。今回の試算では湾奥の COD が 5mg/l を越える 1970 年前後に主に規制が強化される。干潟を保全するシナリオ、保全しないシナリオとも、1963 年において年間約 13.9 万 t を上限値とする規制が必要となった。干潟が保全されない場合、1970 年以降も同じく 13.9 万 t/年の上限を維持せざるを得ないが、干潟が保全されたシナリオの場合、1970 年において、14.3 万 t/年、と上限が緩和されるものと試算された。

上記の規制が実施された場合の保全するシナリオによる近畿地域の生産額から保全しないシナリオの近畿地域生産額を差し引いた生産額増加分の経年変化を図8に示す。生産額の差は 1970 年の差の 43 億円に始まり、以降 2010 年までの累計で 1556 億円となった。この値が、大阪湾において失われた干潟が保全されていた場合に回避可能な経済損失であり、干潟保全施策の経済価値を表現してい

る。

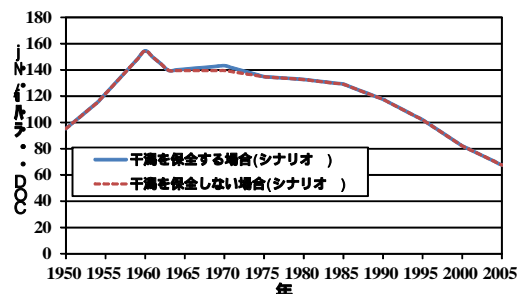


図7 COD の発生負荷量の推移

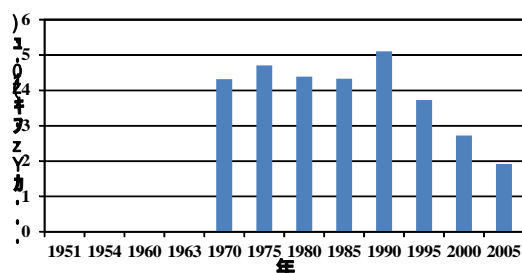


図8 干潟を保存した場合に生じる域内生産額の差額 (10 億円)

(6) 今後の課題

水理学分野において、陸域との連結は殆ど、産業や家庭等からの排出負荷量を取り扱う程度のことが多かった。全産業を考慮することや、海域の環境改善が陸域の産業に及ぼす影響を考慮することはこれまで殆どできていなかった。本研究ではこれらの点を解決することができた点で挑戦的である。例えば、本モデルでは排出規制の強化は生産額に対する排出原単位の大きい産業がより大きな影響を受け、また、排出総量規制に直接的に関連しない産業も波及効果により影響を受ける。

一方で、このモデルを実際の環境施策評価に用いるためには、様々な課題が多い。例えば、容易に推察できるのは産業連関表から推定される域内汚濁負荷発生量と実際に流入する負荷量の違いの問題であり、あるいは、過去にさかのぼって評価する場合の水質データの不足の問題である。

また、本検討では、1990 年からの 10 年間で見た場合、炭素除去量は 174 mg/m²/day¹ 相当であると算定された。この除去量は既往の知見(日比野ら、2009)の範囲に収まるものだが、この値によって、施策の経済価値が大きく変わる。この面においては干潟を含む浅水空間の浄化能力について、より詳細な調査が待たれる。また、環境容量の増加につながるような、新たな環境浄化能力の発見があった場合には、経済価値も相応に変化する点は本研究で構築したモデルの難点と見ることでもできる。さらに、海域モデルにおいても、

COD やリン、窒素の経年変化について再現性が十分でない可能性もあり、モデルのさらなる精度向上が必要である。

本挑戦的萌芽研究終了後、他の環境施策についても検討を行い、モデルの妥当性の検証が必要である。また、環境基準の値や期間の変更を行い、様々なシナリオにおいて評価することで、モデルの妥当性と環境施策への適用可能性を検討していく予定である。

<引用文献>

- Anggara Kasih et al. (2009) Numerical model on the material circulation for coastal sediment in Ago Bay, Japan, *J. Marine Systems*, Vol. 77, pp.45-60.
- Farrow et al. (2005), Pollution trading in water quality limited areas: Use of benefits assessment and cost-effective trading ratios, *Land Econ.*, Vol. 81(2), pp. 191-205.
- Hung and Shaw (2005), A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits, *J. Environ. Econ. Manage.*, Vol. 49, pp. 83-102.
- 西田ら (2012) 大阪湾流域における栄養塩負荷の変遷と現況調査、土木学会論文集 G(環境)、Vol. 68、No. 7、pp. 751~760
- 花町ら (2010) 成長モデルを用いた伊勢湾伊勢地区におけるアサリ資源量の変動要因の推定、水工学論文集、第 54 巻、pp.1603~1608
- 日比野忠史ら (2003) 干潟浄化能力の定量的評価手法の提案、海岸工学論文集、第 50 巻、pp.1071-1075

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

- (1) Masayasu Irie, Tomo Yamaguchi, Shuzo Nishida and Yusuke Nakatani, Modeling of water quality in tidal river network in Osaka, Japan, *Journal of Water and Environment Technology*, Vol. 13, No. 3, 2015 (印刷中)
- (2) Yoshifumi Konishi, Jay S. Coggins, and Bin Wang, Water-quality trading: Can we get the prices of pollution right?, *Water Resource Research*, Vol. 51, 2015. DOI:10.1002/2014WR015560.
- (3) 入江政安・山中敦史・田淵貴久・多部田茂、陸域の人間活動の定量化および漁業の域内物質循環への影響評価に関する三大湾比較、土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 71、No. 2、2015 (印刷中)

[学会発表](計 4 件)

- (1) 井田洋介・加藤秀一・入江政安・西田修

三、流動水質モデルと経済モデルを用いた干潟造成事業の経済学的評価に関する検討、土木学会関西支部年次学術講演会 (大阪市立大学) 2013.6

- (2) 西本佳名子・岡田輝久・入江政安・中谷祐介・西田修三、大阪湾における底質からの窒素・リンの溶出に関する 2013 年調査、第 48 回水環境学会年会 (東北大学川内北キャンパス) 2014.3.
- (3) 岡田輝久・西本佳名子・入江政安・西田修三、大阪湾における底質から窒素・リンの溶出および間隙水質に関する数値解析、第 48 回水環境学会年会 (東北大学川内北キャンパス) 2014.3.
- (4) 入江政安・井田洋介、流動水質モデルおよび陸域経済モデルを用いた長期連動解析による干潟保全の経済評価に関する試算、沿岸域学会研究討論会 (茨城大学水戸キャンパス) 2015.7.

[図書](計 0 件)

[産業財産権](計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 政安 (IRIE, Masayasu)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00379116

(2) 研究分担者

小西 祥文 (KONISHI, Yoshifumi)
上智大学・国際教養学部・准教授
研究者番号：40597655

西田 修三 (NISHIDA, Shuzo)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40172663

中谷 祐介 (NAKATANI, Yusuke)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20635164