

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06576

研究課題名(和文) データ同化と多項式カオスを用いた湖沼・河川・沿岸域の物質循環解析の高度化

研究課題名(英文) Integrated biogeochemical cycle analysis of lakes, rivers, and coastal areas using data assimilation and polynomial chaos

研究代表者

入江 政安 (Irie, Masayasu)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00379116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：湖沼、河川、沿岸における水環境解析において用いられる数値モデルには、モデルの再現性を大きく左右する境界条件やモデル内パラメータ(係数)があり、それらは大概、不確実性を多く含んでいる。このパラメータの修正は、これまでは使用者の経験に頼ることが多く、修正の自動化、高度化が求められている。本研究では、データ同化技術と多項式カオス展開によるパラメータ修正法を確立し、降雨出水時の河川流量、湖沼における水温分布、沿岸域の植物プランクトン濃度および貧酸素水塊の再現性を向上させる技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水環境や災害への社会の注目がますます高まる中で、数値モデルへの期待も大きい。数値モデルは高度になればなるほど、計算に必要なデータの種類と量も多くなる。しかし、現地から得られる情報はそれほど急には増えない。この手の研究の多くはモデルの高度化や細緻化に力を注がれるが、本研究は、モデルが原始的でも高度化されていても必ず生じる、データ不足による不確実性を解消しようとする普遍的な取り組みであった。また、そのために、最先端のデータ同化手法を活用している。本研究は水環境解析における社会的意義を有し、当該研究分野における技術向上の面でも有効な検討であったと言える。

研究成果の概要(英文)：Numerical models used for water environment analysis in lakes, rivers, and coastal areas require boundary conditions and model parameters that can easily interfere the model skill and generally bear many types of uncertainties. The estimation of these parameters often relies on the user's experience. This study developed automated methods to estimate parameters using data assimilation techniques and polynomial chaos expansion, and improved the simulation of river flow rate during rainfall, water temperature distribution in lakes, phytoplankton distributions and hypoxia in coastal areas.

研究分野：環境水理学

キーワード：データ同化 多項式カオス展開 分布型流出モデル 流動水質モデル 4次元変分法 アンサンブルカルマンフィルタ パラメータ推定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、水域内の物質循環研究で得られる新たな知見は既存の数値モデルに新たなコンパートメントとして組み込まれ、モデルはさらに細緻化している。既存モデルの改良や既存モデルで再現性が不足している点の検証が十分になされない場合も少なくなく、新たに高度なモデルのコンパートメントが組み込まれ、より一層多くの初期値、境界条件、モデルパラメータが追加され、もって、新たな不確実性を生む。また、細緻化されたことにより、他の研究者にとって使いにくいモデルが構築されることにもなる。この現状はこの研究分野全体の研究の底上げには貢献しておらず、水域の物質循環解析全体に影響を及ぼす普遍的な取り組みが必要である。

データや知見の不足による境界条件やモデルパラメータの不確実性はいずれのモデルでも抱えている普遍的問題であり、複合的な要因が1つの結果になって現れるこの問題を解消できる手法の開発は広範な影響力を持つことができる。研究代表者らはこの手法開発を沿岸域において先行して取り組んでおり、水圏における多様なモデル解析でも同様に検討可能か、という点にたどり着く。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで研究代表者らが内湾の流動水質底質モデルに適用していたデータ同化および多項式カオス展開 (Polynomial Chaos Expansion, PCE) を用いて、湖沼水環境モデル、水文流出過程モデル、内湾流動水質モデルにおいて再現性の向上を図るとともに、不確実性の大きい境界条件や物質循環モデル内のモデルパラメータを最適化する方法の高度化、一般化を図ることである。流動・物質循環モデルの再現性低下要因を発見し、パラメータを修正する新たな技術を用いて、湖沼、河川、沿岸域でのモデル適用時の典型的な再現性低下現象を防ぐことが可能か検討し、物質循環モデルの最適化を行うスキームを提案することにより、モデルが「正しく」精度向上される技術の開発を行う。

具体的な検討を進める中で、設定したより詳細な目的は以下の通りである。

R) 河川において

R-1: 分布型流出モデルにおいて4次元変分データ同化法 (アジョイント法)、多項式カオス展開のそれぞれを用いてパラメータの最適化技術を構築する。

R-2: 分布型流出モデルを用いて、河道内水温分布を予測し、その将来予測を実施することにより、河川生態系への影響予測を行う技術を開発する。

R-3: 洪水予測システムへの応用に向けたアジョイント法による河川水位へのデータ同化とそれがもたらす予測精度への影響について検討する。

R-4: 流量の少ない河川において、その流量の再現予測に影響を与えるパラメータについてニューラルネットワークを用いて解析する。

L) 湖沼において

L-1: 浅水湖沼において水温の日成層などにより弱く形成される貧酸素水塊、アオコの発生を精度良く再現できる流動ならびに水温モデルを検討する。

L-2: もう一方の高度な同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ法の、アンサンブル (複数の予測モデル) で不確かさを代替する特徴を利用した4次元変分法 (Ensemble-based Variational data assimilation; EnVar) によるデータ同化システムを新たに構築し、貯水池モデルに適用し、不確実性のあるモデルパラメータの最適化を試みる。

C) 沿岸域において

C-1: アンサンブルカルマンフィルタ法を用いて、内湾における流動水質モデルのモデルパラメータの最適化技術を進展させると共に、そのパラメータの推定技術の体系化を図る。

C-2: 上記の、湖沼でも用いた EnVar を東京湾に適用し、貧酸素水塊を再現することでその適用性を評価する。

3. 研究の方法

R-1: 揖保川における降雨流出の計算を石塚らのモデルを用いて実施し、加えて、4次元変分法のために必要となる接線形モデルとアジョイントモデルを構築した。構築したモデルを用いて、2015年夏期の1820 m³/sの出水を含む期間において、データ同化を実施した。また、流出量の変化に影響の大きいパラメータを抽出し、モデルパラメータ値の最適化を実施した。一方、PCEを用いたパラメータ修正も、パラメータの感度解析を実施し、修正すべきパラメータの組み合わせを選定した上で、パラメータの最適化を実施した。

R-2: 水環境解析への展開として、加古川を対象に、既存の分布型流出モデル Rainfall-Runoff-Inundation model (RRI モデル) に、熱供給および熱輸送を考慮する水温モデルを新たに加えて構築し、河川水温の再現を行った。また、気候モデルの出力である将来気候データを用いて、河川水温への影響予測とアユの生態に及ぼす影響を予測評価した。

R-3: 陰解法の Abbot-Ionescu Scheme (AIS) を導入した1次元不定流モデルとそのアジョイントモデルを構築し、淀川水系の木津川に適用した。上流端条件として木津川飯岡地点の水位から換算された流量、下流端条件として八幡橋地点水位を与条件とし、粗度係数、対象区間の横流入量を状態変数として修正することにより、観測水位を同化した。ただし、簡単のため、河道は単断面として取扱い、2013 (平成25) 年9月に発生し、淀川流域に甚大な被害をもたらした台風18号での飯岡地点の予測水位の検討を行った。

R-4：香川県にある一級河川・土器川（流域面積：127 km²）を対象とした。全計算期間は1993-2007年の計15年間とし、入力データとして、日平均風速、日照時間、日降水量、日平均気温の4項目を与えた。教師信号は土器川（祓川橋地点）の日平均流量とした。1993年から2003年を学習期間とし、入力データと教師信号を用いてANNの重みを決定した。つぎに、2004年から2005年を試験期間として過学習を判断し、学習済みのANNに入力データを与え、出力結果と教師信号とのRMSE（平均二乗誤差平方根）を算定した。そして、2006年から2007年を検証期間とし、最適なANNの入力パラメータを用いて河川流量予測を行い、その予測精度をRMSEによって評価した。

L-1：浅水湖沼で、日中の熱供給により弱く形成される水温成層の数値モデルによる再現は多くの困難が見込まれたことから、鉛直座標系のゆがみのないz座標系モデルを採用したモデルのうち、非静水圧モデルによる将来的な検討も視野に入れることのできる、非構造格子-非静水圧-z座標系モデルであるStanford unstructured-grid, nonhydrostatic, parallel coastal ocean model (SUNTANS)の導入を図り、貧酸素化が顕著であった2010年9月の霞ヶ浦の水温成層の再現を行った。平均の格子幅は200 mで、鉛直方向に30層に分割した。

L-2：EnVarの特徴として、解析対象期間の連続した解析結果が得られること、複数のパラメータを同時に推定可能であることが挙げられる。本手法を貯水池に適用し、不確実性のあるパラメータの最適化を試みた。対象領域における各種条件の不確かさの程度を見積もるための背景データとして、過去の調査データの収集や現地での水質計測・水中カメラによる水色調査の結果から、初期アンサンブルの調整を実施した。

C-1：海洋モデルRegional Ocean Modeling System (ROMS)に改良を加えた水質モデルを用いて大阪湾に適用し、クロロフィル濃度および溶存酸素濃度の鉛直分布データを同化した。プランクトンの増殖速度や枯死速度などのモデルパラメータの値を最適化する技術を確認するため、双子実験により検証すると共に、水質の再現性が改善しやすいモデルパラメータの組み合わせを検討した。

C-2：L-2で開発した新たなデータ同化手法を東京湾の貧酸素状態を再現するために用いて、検証を行った。

4. 研究成果

本研究では、研究代表者が沿岸域においてのみ適用していたデータ同化技術と多項式カオス展開によるモデルの高度化、高精度化について、河川、湖沼のモデルにも展開し、パラメータの最適化を通じたシミュレーションの高度化技術を確認した点で、得られた成果の意義は大きい。

河川での研究成果

R-1の検討では2年間にわたり、異なる2つの検討を行った。1年目の検討を踏まえて、モデルの改修を行った後半の検討では、ピーク流量の大幅な修正はなされなかったものの、観測でのピーク時刻に比べて、同化前計算では30分〜1時間早くピークを迎えていたのに対し、同化計算によるパラメータ推定により、同化後はこのピーク時刻を遅らせるよう、パラメータが修正され、計算値と観測値との差が210 m³/sあった時点で、90 m³/sまで縮小することができた。

それぞれのパラメータを個別に修正を図ったところ、粗度係数は観測地点上流20kmまで遡って修正され、ピークを遅らせるために粗度係数が増大する方向に修正された。貯留定数は中下流部でやや増大し、同化地点近傍では減少するよう修正された。(図-1) 修正された粗度係数は洪水ピークを遅らせるために、当初の粗度係数に比べて、河床勾配の小さいところほど粗度係数が大きくなっており、データ同化が意図通りに機能していることが分かる。(図-2)

さらに、多項式カオス展開を用いたパラメータ推定では、修正されたパラメータを用いた流

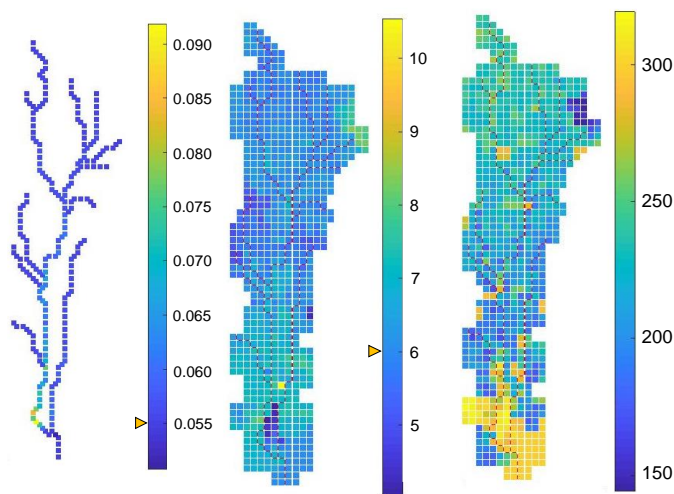


図-1 パラメータの修正結果（左：河道の粗度係数，中：タンク III の貯留係数，右：降水量分布）

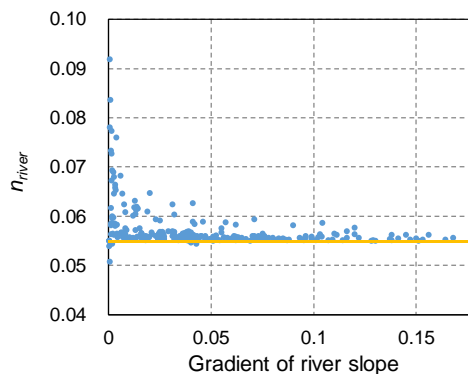


図-2 河床勾配と修正された粗度係数の関係（降水量分布）

量の再現計算では、観測値との誤差を 25–40 % 減少させることができた。河道の粗度係数の修正を行うことで効果的に再現性を向上させることが可能ではあるが、粗度係数を修正しない場合、例えば、タンク I の最大貯留水深とタンク III の貯留定数の修正を行う組み合わせが、下流地点での流量修正に最も大きな効果をもつ組み合わせであることが示された。多項式カオス展開を用いたパラメータ修正ではこのような多角的な検討も行えることを示した。

R-2 の検討では、年間の水温の再現を評価し、年間を通じた二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 1.39 °C で、十分とは言えないが、一定の再現性能を得た。再現性が低下するのは、日変動における日中の水温上昇時、出水時の水温低下時であった。再現性能を確保した水温モデルを用い、気象庁気象研究所による地球温暖化予測情報第 8 巻の将来気候データを用い、加古川の将来水温の予測を実施した。一年を通して現在期間に比べて将来期間の水温が高く、平均すると将来期間の方が約 2.1 °C 水温が高くなる結果となった。ただし、将来において降水量の多くなる 8 月

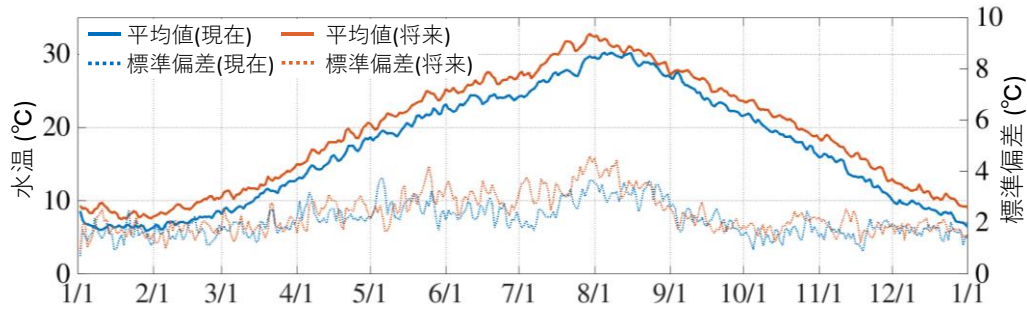


図-3 国包地点での現在期間と将来期間における水温の年変動

においては、水温の上昇量は約 1.3 °C であり、年間平均値より小さくなった。また、アユの摂餌が水温 28°C 以上になると止まるという既往研究を参考に、将来のアユの生息可能域を予測した。継続して 28°C 以上となる時間のうち、最大継続時間を現在と将来で算出したところ(図-4)、200 時間を越えない領域が、現在の鮎の生息域と合致しており、その観点から見た場合、将来のアユの生息可能域が流域全体で 8% 減少することが予測された。

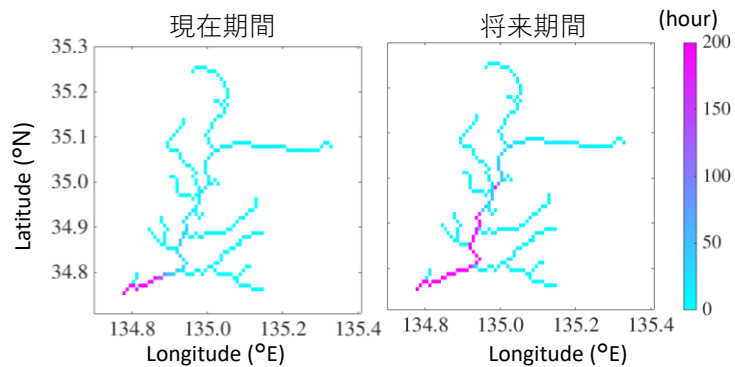


図-4 水温が 28 °C となる期間の最大継続時間

R-3 の検討では、粗度係数調整後、現時刻から 6 時間先までの水位予測を実施した結果、2 乗誤差 (RMSQ/PO: 予測値と実績値の 2 乗誤差を最大水深の 2 乗で割った値) が基準値 3% (河川砂防技術基準、国土交通省) 以下であり、精度は非常に高いことがわかった。本研究で導出した 1 次元不定流モデルを対象にしたアジョイント・コードが有効であることが示された。

R-4 の検討では、土器川流域の流量予測において、ニューラルネットワークへの最適な入力データ項目は日降水量と日平均風速であることが分かった。日平均気温と日照時間については、考慮しないケースの方が予測精度は高いことから、河川流量予測においては入力データとしての重要性が低いことが示された。

湖沼での研究成果

L-1 の検討では、霞ヶ浦西浦湖心の水温で再現性能を検証したところ、対象期間を通じての RMSE は 0.93°C で良好な再現性能を得た。再現性が低下するのは、水深の浅い霞ヶ浦では、日射による水温の日成層が形成され、観測で得られる表層の水温上昇に追従できない日があるほか、出水による急激な水温低下に追従できないことがあるのが原因であった。

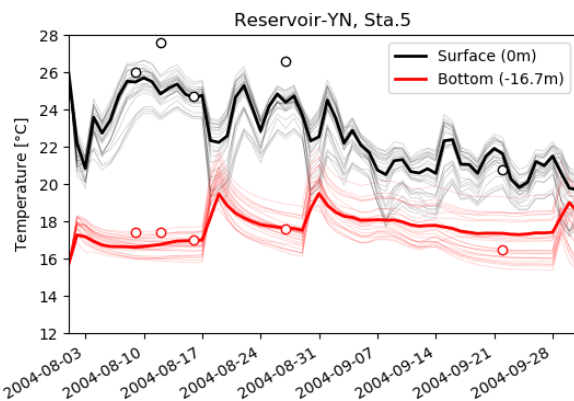


図-5 貯水池モデルにおける表層および底層水温の解析結果と観測データ (太線: 同化計算、細線: 初期アンサンブル計算、丸点: 観測データ、黒色: 表層、赤色: 底層)

得られたモデルを用いて、日射、風、河川流入の影響を評価した結果、日射は水温成層の主役となり、風は、対象期間においては、水温を低下させる効果を持っていることを明らかにした。また高精細な水平非構造格子を採用したことにより、表層において発生する藍藻類が複雑な湖岸地形にトラップされ、入江部でアオコ状態になる様子が再現できた。

L-2 の検討では、貯水池内 3 測点における水温鉛直プロファイルデータを元に、河川流入量、流入水温、10m 相当風速、底面摩擦係数、日射の透過に関する係数を最適化の対象としてデータ同化を行った。2 ヶ月間計 5 回程度の観測データを同化した結果、観測データを満たす水温場を再現されていることがわかる。(図-5) 貯水池の物質収支を解析する上で重要な上流からの流入に関するデータには不確実性が大きく、今回の解析から、推定前の条件はピーク流量を過大に評価していた可能性があるなどの知見が得られた。

沿岸域での研究成果

C-1 の検討では、双子実験において、修正すべきモデルパラメータの組み合わせを検討した結果、植物プランクトンの P-I カーブの初期勾配を修正しない組み合わせが最も良い同化性能を示し、また、パラメータ修正により、より再現性の高いモデルを得ることができた。同化システムの検証を行う双子実験では、1 週間程度の同化により、良い再現結果を得ることができた。

C-2 の検討では、東京湾を対象とし、定点観測データを同化対象とし、底層貧酸素水塊の分布を推定した、複数の水質モデルパラメータを最適化することで、貧酸素水塊の消長を再現することに成功した。

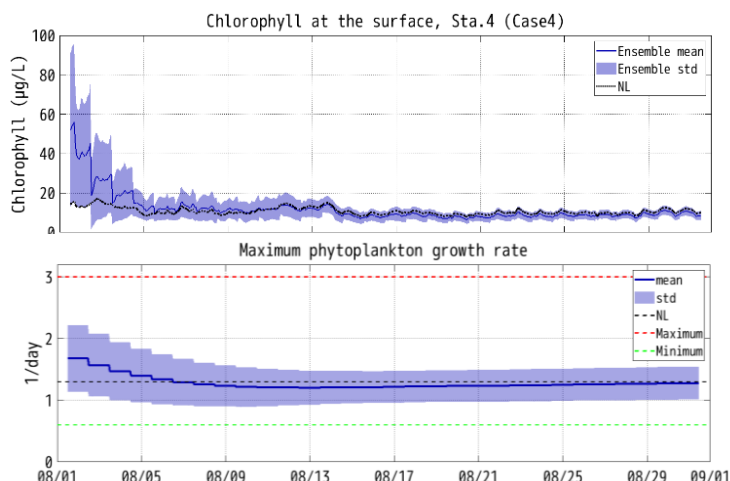


図-6 双子実験におけるクロロフィルの状態推定（上、青線が黒線に近づく、同化効果が現れていることを示す。）と植物プランクトンの増殖速度の時間変化（戻るべき黒破線の値に時間を経るに従い、青線が近づいていることが分かり、同化システムが正しく機能し、モデルパラメータが修正されていることを示している。）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件(うち査読付論文 2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 小田航平, 入江政安, 戸井博彬, 石塚正秀, 田中耕司 | 4. 巻 74(5) |
| 2. 論文標題 アジョイント法を用いた分布型流出モデルのパラメータ推定 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 I_145-I_150 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_145 | 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 Putika Ashfar Khoiri, Masayasu Irie, Hiroaki Toi and Masahide Ishizuka | 4. 巻 75(2) |
| 2. 論文標題 Parameter estimation of a distributed hydrological model for the Ibo river basin with polynomial chaos expansion | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) | 6. 最初と最後の頁 I_247-I_252 |
| 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 オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Masayasu Irie, Hiroaki Toi, Masahide Ishizuka, Kohji Tanaka and Shuzo Nishida | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Parameter estimation of a distributed hydrological model using the adjoint method: A case study in the Ibo river watershed, Japan | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 E-proceedings of the 38th IAHR World Congress | 6. 最初と最後の頁 4692-4701 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3850/38WC092019-1775 | 査読の有無 無 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 井上凌, 野田晃平, 小田航平, 入江政安 |
| 2. 発表標題 多項式カオス展開を用いた大阪湾奥部のクロロフィル・D0分布の再現性向上に関する検討 |
| 3. 学会等名 2018年度日本流体力学学会年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中尾明浩, 戸井博彬, 入江政安 |
| 2. 発表標題 加古川の流出解析におけるアジョイントデータ同化適用の試み |
| 3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石橋日菜子, 宮本えりか, 柴尾葵, 吉原航平, 石塚正秀 |
| 2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた土器川流域における河川流量予測の入力データ項目の検討 |
| 3. 学会等名 平成31年度土木学会四国支部第25回技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yueyi Wang, Masayasu Irie, Shunsuke Komuro, Guillaume Auger and Ayato Kohzu |
| 2. 発表標題 Numerical Experiments to Evaluate Effect of External Forces on Temperature Stratification in Lake Kasumigaura, Japan |
| 3. 学会等名 2020 IAHR-APD Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉野泰司, 高橋祐馬, 入江政安 |
| 2. 発表標題 アンサンブルカルマンフィルタを用いた水質モデルパラメータの最適化と 大阪湾のDO収支への影響評価 |
| 3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究で得られた成果を用いて、関連論文2本を投稿中である。

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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 今村 正裕 (Imamura Masahiro) (50371498) | 一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員 (82641) | |
| 研究分担者 | 石塚 正秀 (Ishizuka Masahide) (50324992) | 香川大学・創造工学部・教授 (16201) | |
| 研究分担者 | 中谷 祐介 (Nakatani Yusuke) (20635164) | 大阪大学・工学研究科・助教 (14401) | |
| 研究分担者 | 田中 耕司 (Tanaka Kohji) (50817385) | 大阪工業大学・工学部・教授 (34406) | |
| 研究協力者 | 岡田 輝久 (Okada Teruhisa) (40817962) | 一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員 (82641) | |