

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00592

研究課題名(和文) 出水攪乱に対する河川生態系の応答のモデル化と河川環境管理への応用

研究課題名(英文) Modeling responses of river ecosystems to disturbance and its application

研究代表者

吉村 千洋 (Yoshimura, Chihiro)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：10402091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：河川において流量変動は物理生息場、一次生産、水質などに支配的に影響している。本研究では分布型水文モデルを基盤として、流量変動による河床攪乱に対して河川生態系(河道内地形、河床附着膜、魚類)が示す応答を流域スケールで解明・モデル化し、そのモデルを河川環境管理に活かす方法を開発した。相模川流域を対象として解析した結果、流量の季節的変動パターンが魚類の分布と密接な関係を示し、さらには先行する環境条件を活用することでモデル精度が向上することが明らかになった。そして、出水攪乱に対する河道内地形の応答を衛星画像に基づき評価する手法、また、出水攪乱に対する河床附着膜の応答のモデルについても開発した。

研究成果の概要(英文)：Flow fluctuations in rivers have dominant influence on physical habitats, primary production, water quality, and the like. In this study, based on the distributed hydrological model, we elucidated and modeled the response of river ecology (river channel topography, riverbed adhesion membrane, fish) to riverbed disturbance caused by flow variation on the basin scale. The analysis of the Sagami River basin has revealed that the seasonal fluctuation pattern of the flow rate shows a close relationship with fish distribution and that model accuracy is improved by integrating the preceding environmental conditions. We also developed a method of evaluating the response of the topography of the river channel using satellite image and a model of the response of the riverbed periphyton to the water discharge disturbance.

研究分野：環境工学

キーワード：河川生態系 出水攪乱 生息場評価 種分布モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的背景

河川において流量およびその変動性（以下、流況）は支配的に物理的生息場・水質・一次生産などに影響しており、さらに生物群集の構造や多様性と複合的な関係にある(Poff et al. 1997)。例えば出水時には、河床せん断力が増加し、河床材および水生生物が下流に流されると同時に、瀬淵構造のような水生生物の生息場が更新される(Bunn et al. 2002)。一方、流量が安定する低水時期間には、水位低下による瀬の割合増加、太陽光が河床に到達することによる付着藻類の増加、水温変化の増幅などが生じる。つまり、流量変動による自然現象としての攪乱は、生物群集に支配的な影響を及ぼしており、特に河床の生物群集は出水攪乱と安定時の遷移プロセスのバランスで構成されると考えられている。

よって、このような河川に成立する生物群集や生態系は、出水攪乱の影響を歴史的に強く受けて、このような物理条件に適応した特徴的な群集が定着していると考えられる。日本の河川では、地形や気候条件により短期間の出水が頻発し、流量変動に応じた河床攪乱や土砂輸送がしばしば見られる。このような河川に生息する生物は、そのような流量変動に適応（進化）した何らかの生態学的特徴を有している。例えば、ヨシノボリ属の魚類は吸盤状になった腹びれにより基質に張り付くことができ、出水時でも流されずに特定の生息場に留まることができる (Ito et al. 2006)。また、アユのように流量の季節的変動に適応した形で、生活史パターンを示す生物も多い。以上より、出水は一時的に生物量を減少させるが、その結果として生じる攪乱は河川生態系の維持機構として重要な役割を果たしている。

しかしながら、攪乱の生態学的役割に関する知見は生物種個別の生態や生活史に着目した研究、もしくは河川での断片的な調査研究に限られるため、環境管理に活用できるレベルまで知見の体系化やモデル化が進んでいない。この点、河川生態学において今後取り組むべき課題の1つとして認識されており、今後の発展が求められている。

このような中、本研究グループでは分布型水文モデルを相模川などに適用し、流量の再現結果に基づき流況の要素を流域スケールで評価する手法を開発してきた。次のステップとして、この流況評価手法を出水攪乱に対する生態系応答の理解とモデル化へ活用することは大きな学術的発展が期待できる。

(2) 本研究で明らかにする内容

関東地方の河川を対象として、着目する生態系要素は河道内地形、魚類、付着膜（藻類）とする。まず、流況評価の観点からの分布型水文モデルの最適なパラメータ同定手法を

提案し、さらにその再現精度が評価される。その上で、流況分布と河道内地形および魚類各種の分布を統計的に関連付け、付着膜については瀬淵（リーチ）スケールを対象として、現地調査および培養実験により河床攪乱による剥離やその後の再生産のプロセスを解明する。これにより、リーチおよび流域スケールでの地形と生物の時空間分布を解明すると同時に、環境影響評価に活用可能なモデルを開発する。

(3) 学術的な特色

水資源管理を主目的として開発されてきた分布型水文モデルを、河川生態系の理解および管理へ応用する点に本研究の特色および新規性がある。分布型水文モデルにより時空間的に流域内の流量を記述したり、ダム放流操作や気候変動などの河川流量に対する影響をモデルで再現したりすることも可能である。一方、河川生態学分野では河床の生物群集に対する出水攪乱の影響が調査ベースで記述されつつある。たとえば、ダム操作により人工的に出水を起こし、河床付着膜を剥離する試みが行われている。しかしながら、これらの接点、つまり河川生態系における流況の役割については、技術的限界や調査の難しさが障害となっていてほとんど研究が進んでいない。本研究では、すでに相模川や利根川に適用されている分布型流出モデルを基盤として、調査ベースでは取り組むことが難しい、流域スケールで出水攪乱に対する河川生態系の応答を解明しようとするものであり、河川生態学および河川環境管理技術における大きな発展が見込まれる。

(4) 研究の意義

ダムによる流況改変が進んだ結果、在来種の減少と外来種の定着が深刻な問題となっており(Liermann et al. 2012)、影響緩和に向けた取り組みは重要な課題である。例えば、アユなど社会的価値の高い種やキンブナなどの絶滅危惧種の保全などを達成するためには、魚類種により異なる生息環境の選好性の把握が必要となる。2012年河川砂防技術基準（国土交通省）において、ダム放流に関して生態系保全の観点から適切な流量変動や攪乱が重要との提言がなされた。しかし、明確な基準や手法が提示されておらず、影響緩和を目的とした施策は未だ模索段階にある。一方、近年の研究から、人工的な洪水の発生や最低流量の増加によって、消失した生息場の復元や、底生動物群集の種構成変化等が生じるなどの知見が明らかになっている(Robinson 2012)。これらの知見を活用した流況操作によって従来のダムが及ぼす環境影響を、モデルを活用して緩和することで、魚類群集を含めた河川生態系の保全を効果的に実現することを狙いとしており、本研究の意義は学術的にも社会的にも高い。

2. 研究の目的

河川において流量変動（流況）は物理生息場、一次生産、水質などに支配的に影響しており、河川の生物多様性維持機構とも密接な関係にある。また、河床の生物群集は出水攪乱による影響と安定時の遷移プロセスのバランスの上で成立していると考えられる。しかし、攪乱が引き起こす生物群集の時間的遷移を定量的に記述できるモデルは存在しない。そこで、本研究では分布型水文モデルを基盤として、流量変動による河床攪乱に対して河川生態系（河道内地形、河床付着膜、魚類）が示す応答を流域スケールで解明・モデル化し、そのモデルを河川環境管理に活かす方法を開発することを目的とする。これにより、河川生態系の動的特性の理解を進め、さらには水資源や河川環境の管理を効率的に実施する方法を提案する。

3. 研究の方法

関東地方の河川（相模川と利根川）を対象とし、既往の分布型水文モデルと流況指標を組み合わせることで流況の空間分布を評価すると同時に、流況評価の観点での最適なパラメータ同定方法を探った。そして、河川生態系の要素として河道内地形、付着膜（藻類）、魚類に着目し、文献情報、リモートセンシング、現地調査、室内実験から、各生態系要素の時系列変化に関する実績データを得た。その上で流況と生態系要素の各流域内分布の対応関係を記述するモデルを作成して、河床攪乱に対する生態系応答を明らかにした。最終的には、このモデルにより流域内での水資源配分に関するシナリオ解析を実施することで、新たな河川環境の管理手法を提案した。

課題1. 流況分布の再現を目的とした分布型流出モデルの適用

相模川と利根川を対象として、分布型水文モデル (GMHM) (Yang et al. 2002) により出水攪乱を含めた流況を空間的に内挿した。このモデルにより2009年までの10年以上の流量は既に再現できるため、直近の気象観測データを入手することで、流量再現期間を2015年まで延長した。これにより、流域内の本川および主要な支川のすべての区間 (250m ごと) において、1時間毎の流量を出力した。

その上で、各ダムの操作ルールや取水量などを考慮することで実績流況の再現を行い、その後自然流況やダム操作ルールを変更した場合などの複数ケースを再現できるようにした。各ケースで出力される流量 (各河道区間での時系列データ) に対して流況改変指標 (IHA8) 適用することで、各区間における流量変動 (以下、流況) を水生生物の生活史に関連する複数の観点 (指標) から定量評価した。この際に、観測流量と同地点の再現流量の両方で重要な流況指標を算出し、各

指標の再現精度を評価し、精度が悪い場合はパラメータの同定手法を変更して再計算した。たとえば、低水流量の再現精度が悪い場合は、流量の対数変換値を使うなど何らかの重み付けをすることで、流況の重要な5つの側面がバランスよく再現できる手法を探った。

課題2. 出水攪乱に対する河道内地形の応答のモデル化

河道内地形の変化を現地観測および衛星画像により定量的に記述する。本研究室では、2014年5月から相模川の3川合流点に定点カメラを2台設置しており、1時間に1枚の頻度で河道内地形を撮影している。この定点観測を継続し、オルソ化した画像を解析することで河道内地形の変化を詳細に把握した。また、河道内地形の空間分布を把握するために、既存の航空写真や衛星画像 (ALOS, ALOS2, GeoEye) を入手し、可視光と近赤外の反射輝度を使い水面抽出を行うことで河道形状を評価した (Henshaw et al. 2013)。また、次の課題で流況や河道内地形と生物相の対応を調べるため、河道内地形は水生生物の生息場に着目して分類 (瀬、淵、ワンドなど) を行い、水際線および生息場構造の経時的な変化を整理した。そして、これらの河道内地形の変化と各河川区間の流況との対応を多変量解析により明らかにすると同時に、両者の対応関係を経験的にモデル化した。この際に、河川構造物による土砂堆積や土砂還元の影響も考慮して結果を評価した。

課題3. 出水攪乱に対する河床付着膜の応答のモデル化

中津川 (相模川の支川) での現地調査およびその河床付着膜を使った室内実験により、出水攪乱に対する瀬における付着膜の応答の評価およびモデル化を行った。中津川では、上流部に位置する宮ヶ瀬ダムの管理者と連携することで、フラッシュ放流前後のダム下流部における付着膜の時間遷移を調査により明らかにした。フラッシュ放流はある程度計画的に実施されるため、実環境下での実験として出水攪乱の影響を調べることができる。並行して、中津川で得られる付着膜を東京工業大学の実験室に持ち帰り、付着藻類の増殖および剥離のプロセスを明らかにするための実験を循環水槽で行った (Trudeau & Rasmussen 2003)。この実験では、河川の付着膜を河床材 (礫) に付着している状態で実験室に運び、その河床材の下流部に付着膜のない基盤 (礫やタイル) を水槽内に敷き詰めることで、出水攪乱後の瀬における付着膜の増殖と剥離のプロセスを様々な流速条件下で再現した。

以上の現地調査と室内実験では、付着膜の遷移過程を付着膜の現存量、Autotrophic Index (AI, 強熱減量/クロロフィル a)、藻類の種類構成、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}C$) を経時的

にモニタリングすることで、河床付着膜の応答を評価し、一般的な藻類増殖モデルを適用することでモデル化を行った。さらに、付着膜の $\delta^{13}\text{C}$ を現存量や種構成と対応付けることで、河床近傍の流速と藻類の炭素摂取機構の関係を記述すると同時に、 $\delta^{13}\text{C}$ を活用して付着膜特性の遷移状態を示す新たな指標を提案することを試みた。

課題4. 出水攪乱に対する魚類群集の応答のモデル化

相模川と利根川流域で実施されている魚類調査結果を用いて、各魚類種の分布に影響を与える主要な環境要因(含流況指標)の推定を試みた。相模川では神奈川県水産試験場の調査結果(1992~1999年)を、利根川流域での同様の結果を活用した。魚類調査結果(生存の有無、密度、種多様性)に内在する空間的自己相関の影響を地理空間データ解析により定量評価することで、在来魚種ごとに出水攪乱に対する応答を適切にモデル化した。モデルの説明変数には、課題1~3で得られる流況(生活史に基づき指標を選択)、生息場構造、瀬における付着膜、水質(文献情報)、河川構造物(ダムや堰)との位置関

係を用いた。モデル構造は一般化線形モデル、主成分回帰、もしくはRidge回帰とし、予測精度に基づき最適なモデルを選択して有意な環境要因の抽出を行う。一般化線形モデルの適用は確実に可能であるが、説明変数の選択が恣意的になりやすいため、客観的に説明変数の設定が可能である主成分回帰とRidge回帰も合わせて適用した。

4. 研究成果

課題1. 流況分布の再現を目的とした分布型流出モデルの適用

まず流況分布の再現を目的として分布型流出モデルを相模川およびトンレサップ川(カンボジア)に適用した。相模川流域においては、分布型水文モデル(GMHM)により出水攪乱を含めた流況を空間的に内挿した。これにより、流域内の本川および主要な支川のすべての区間(250mごと)において、1時間毎の流量を出力することができた。その上で、幾つかの水利用シナリオに対応する流量を推定し、水生生物の生活史に関連する流況改変指標を用いることで流域内の流況およびその改変度を定量評価した(図1)。

[成果論文⑥⑨]

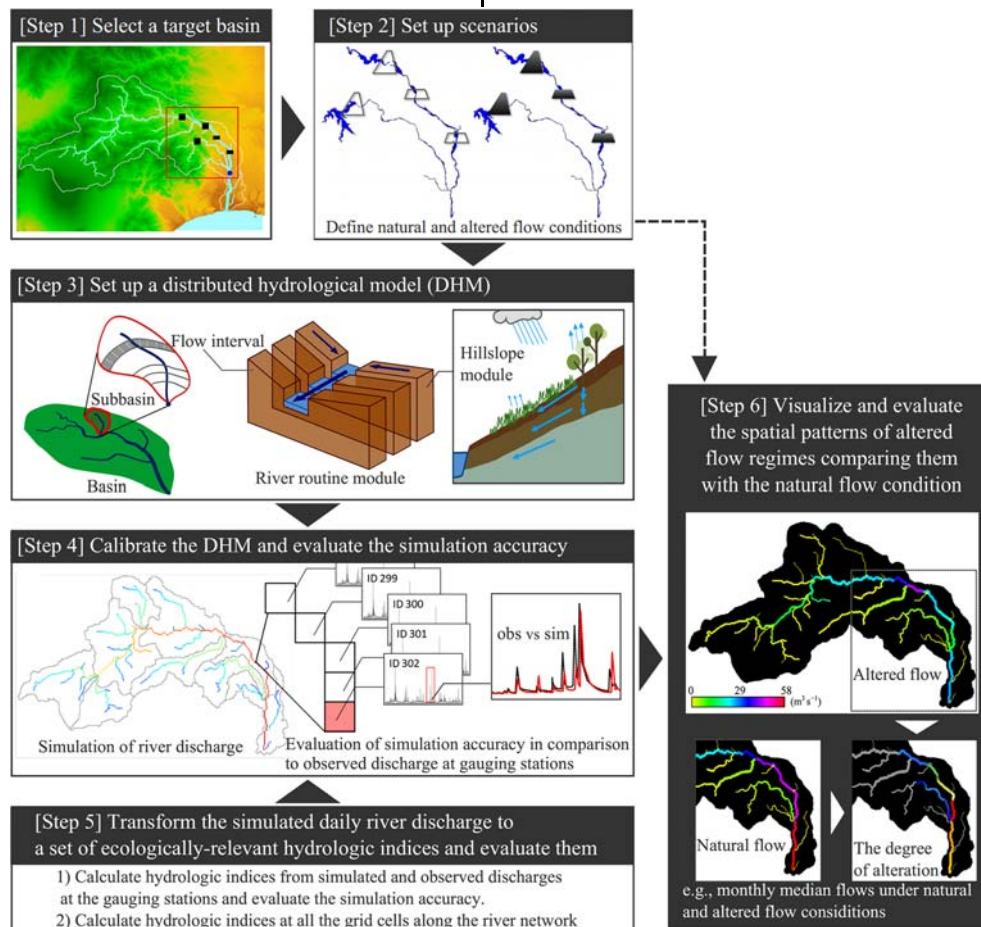


図1. The framework for evaluating the spatial pattern of flow regimes using a hydrological model (Ryo et al. 2015).

課題2. 出水攪乱に対する河道内地形の応答のモデル化

出水攪乱に対する河道内地形の応答を衛星画像に基づき評価した。河道内地形の空間分布を把握するために、既存の航空写真や衛星画像 (ALOS) を入手し、可視光と近赤外の反射輝度を使い水面抽出を行うことで河道形状を評価した (図2)。そして、4年間の衛星画像を幾何補正することで重ね合わせが可能となり、経時的な河道変化を定量的に評価した。さらに、水深推定が可能な範囲では、河道内地形を水生生物の生息場に着眼して分類 (瀬、淵、ワンドなど) し、水際線および生息場構造の経時的な変化を整理することも可能であることを示した。これにより日本の主要河川であれば、経時的な河道変化 (主要な生息場) を定量的に評価することが可能であることを示した。

[成果論文③]

課題3. 出水攪乱に対する河床付着膜の応答のモデル化

出水攪乱に対する河床付着膜の応答のモデル化に取り組んだ。中津川で得られた河床付着膜を使った室内実験を実施して、出水攪乱後における付着膜の増殖過程を様々な流

速条件で確認することができ、増殖速度と流れの条件を対応させるモデルを構築した。(図3)

[成果論文⑤]

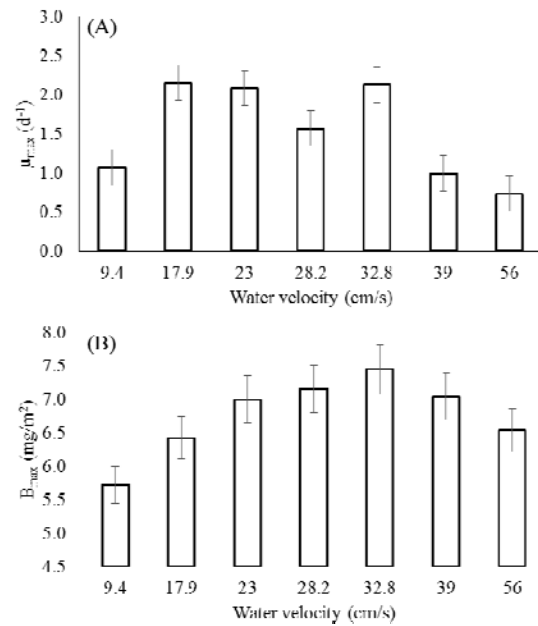


図3. Effect of water velocity on (A) μ_{max} and (B) B_{max} of Chl-a. Vertical bars represent standard deviation of three replicate determinations.

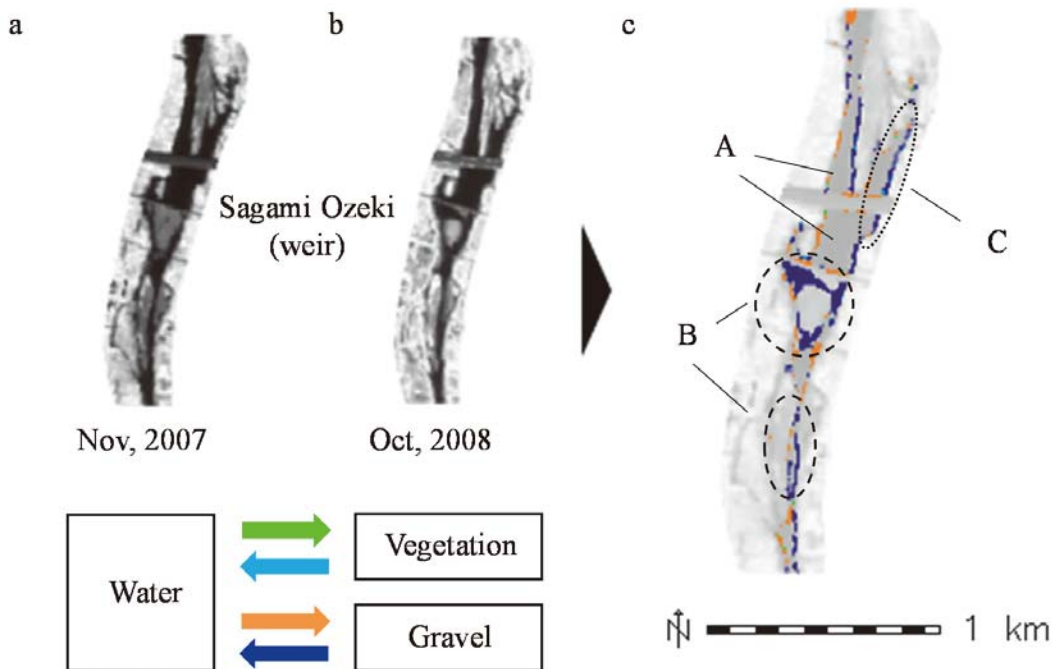


図2. Near Infrared satellite images around Sagami Ozeki in (a) 2007 and (b) 2008, and (c) the estimation of river channel morphological changes between them (light green for “water to vegetation”, light blue for “vegetation to water”, orange for “water to gravel”, deep blue for “gravel to water”). The circled parts are representatives of watercourse (A), riverbank and sandbar (B), and typical erroneous trend (C).

課題4. 出水攪乱に対する魚類群集の応答のモデル化

課題1で作成した分布型流出モデルを基盤として、出水攪乱に対する魚類群集の応答のモデル化にも着手した。相模川流域を対象としてすべての河道区間(250mごと)における、流況、その他の生息場条件、観測された魚類分布を整理した上で、モデル化へ向けて試行的な統計処理を実施した。

まず、洪水・渇水などの水文学的事象は河川生態系にとって重要な環境要因であることから、事象が発生する季節性を適切に評価するために循環統計を用いた新手法を提案した。この手法により流域規模の魚種数と洪水・渇水の発生タイミングとの関係性を評価した結果、大・中規模洪水の周期性は在来種魚類種数(流域面積当たり)と有意な非線形関係が確認でき、中規模かく乱仮説が支持された。さらに、小規模洪水の周期性と在来種魚類種数との関係も合わせて検討した結果、洪水の周期性と魚類の種多様性の間に一定の関係があることが示唆された。

その上で、水文モデルを基盤として、相模川流域の魚類の種分布をモデル解析により明らかにした。まず、18種の魚種の分布をモデル化し、先行する環境条件を種分布モデルに組み込むことでその重要性を検証した。その結果、7魚種の分布に対しては先行する水文学的条件(前年の流況)の重要性が示され、確認割合の低い2種については先行する水文学的条件を用いてのみ予測することができた。つまり、適切な時間スケールで各生活史と関連する先行する環境条件を種分布モデルに組み込むことで、種の分布の時間変化をよりよく説明できることが明らかとなった。さらに、生物種の分布は複数の空間スケールにおける階層的な環境要因の影響によって決まるため、各環境要因が種分布に対してどのようなスケールで寄与しているかを説明する新たなモデルも開発した。

[成果論文①②④⑦⑧]

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 9 件)

①Importance of antecedent environmental conditions in modeling species distributions. Ryo M, Yoshimura C, Iwasaki Y. (2018) *Ecography* 41: 825-836. doi:10.1111/ecog.02925 (査読有)

②河川の洪水・渇水の周期性と魚類種数の関係:循環統計を用いた評価. 山崎雅貴, 梁政寛, 吉村千洋, 城山理沙(2018) 土木学会論文集 B1, 74(4), I_295-I_300 (査読有)

③陸域観測技術衛星(ALOS)を活用した相模川低地部の河道形状変化の推定. 松前大樹, 吉村千洋, 梁政寛(2017) 応用生態工学 20(1): 25-32 (査読有)

④ Assessing bluegill (*Lepomis macrochirus*) habitat suitability using partial dependence function combined with classification approaches. Shiroyama R, Yoshimura C (2016) *Ecological Informatics* 35: 9-18. Doi: 10.1016/j.ecoinf.2016.06.005 (査読有)

⑤Nonlinear relationship between near-bed velocity and growth of riverbed periphyton. Ateia M, Nasr M, Ikeda A, Okada H, Fujii M, Natsuike M, Yoshimura C. (2016) *Water* 8: 461. doi:10.3390/w8100461 (査読有)

⑥Seasonal changes in the inundation area and water volume of the Tonle Sap River and its floodplain. Siev S, Paringit E, Yoshimura C, Hul S. (2016) *Hydrology* 3:33. doi:10.3390/hydrology3040033 (査読有)

⑦ Classification technique of machine learning as species distribution model for exotic fish in rivers. Shiroyama R, Yoshimura C. (2016) 土木学会論文集 B1, 72(4): I_1153-I_1158. (査読有)

⑧河川魚類の個体数に影響を及ぼす多様な環境要因の相対的重要度の評価:繁殖時期に着目して. 梁政寛, 吉村千洋, 岩崎雄一(2016) 土木学会論文集 B1, 72(4): I_455-I_450. (査読有)

⑨Evaluation of spatial pattern of altered flow regimes on a river network using a distributed hydrological model. Ryo M, Iwasaki Y, Yoshimura C, Saavedra OCV (2015) *PLoS ONE* 10(7): e0133833. doi: 10.1371/journal.pone.0133833 (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

①山崎雅貴, 梁政寛, 吉村千洋, 城山理沙. 河川の洪水・渇水の周期性と魚類種数の関係:循環統計を用いた評価. 土木学会水工学講演会. 2018年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 千洋 (YOSHIMURA, Chihiro)

東京工業大学・環境・社会理工学院 土木・環境工学系・准教授

研究番号: 10402091

(2) 研究分担者

サーベドラバレリアノ オリバー

(Oliver C, SAAVEDRA V.)

東京工業大学・大学院理工学研究科(工学系)・特任准教授

研究者番号: 60595536

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし