

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15101

研究課題名(和文) 流出解析に基づく流域一貫の河川生息場モデルの高度化：流況と空間解像度に着目して

研究課題名(英文) Improving catchment scale stream habitat models based on a runoff analysis:
focusing on flow regime and spatial resolution

研究代表者

糠澤 桂 (Nukazawa, Kei)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：20725642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：対象領域の宮崎県小丸川流域において水系内の流量を精度良く再現可能な分布型流出モデルを整備し、ダムや気候変動による河川流量の変動(流況改変)を流域規模で定量化した。さらに、小丸川上流域を対象に、細かい空間スケールにおける流速や水深の計算を実施するためのパラメータ校正を実施している。

小丸川流域内の82地点において底生動物群集のデータ収集を行い、機械学習手法のランダムフォレストと勾配ブースティングによる分布モデルを構築した。水理変数や流況改変の代替指標によって底生動物の分布がより正確に再現できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発された分布型流出モデルは高精度で流域全体の流量予測が可能である。これにより得られた、気候変動や河川整備に伴う広域での流量改変程度に関する知見は学界のみならず社会的に価値が高いと言える。さらに、詳細な水理変数を広域的に再現する試みは、世界的にもほとんど存在せず、新たな広域河川環境評価手法として学術的に意義深いと言える。

流域網羅的な底生動物群集データは流域管理の基礎データとして有益である。水理学的・水文学的変動を踏まえて河川生物の広域分布を予測する試みは存在せず、研究成果は学界においてインパクトが大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：We have developed a distributed runoff model that can accurately reproduce the flow rate in the Omaru River basin in southwest Japan. We then quantified fluctuations in river flow rate (flow regime alteration) due to dams and climate change on a basin scale. Furthermore, we are calibrating parameters to calculate the flow velocity and water depth on a fine spatial scale for the upper reaches of the Omaru River.

We collected data on benthic invertebrate communities at 82 sites in the Omaru River basin for 3 years, and constructed species distribution models by machine learning algorithms, random forest and gradient boosting. These models suggest that the distribution of benthic animals can be reproduced more accurately by using hydraulic variables and proxy indicators of flow regime alteration.

研究分野：河川生態学

キーワード：分布型流出モデル 底生動物 気候変動 機械学習 流況改変

1. 研究開始当初の背景

1997年の河川法の改正により河川整備に環境の観点が増加されることとなった。しかし、現在の環境評価は限定的な調査データに基づく定性的なものが大半であり、河川管理者にとって有益な流域一貫での環境評価手法は確立していない。この課題を解決し得るのが、限定的な生物調査と環境データを関連付けて広域生物分布を予測可能な生息場モデルである。これにより、気候変動や土地利用変化等のインパクトに対する生物の応答が定量化出来るため、保全施策に有益な手法として期待されている。生息場モデルは生物地理学の分野で多様な生物種に適用されてきたが、河川生物については開発が遅れている。その理由として、河川生物の生息環境に関わる環境変数 (e.g., 水理量) の整備が不十分なことが挙げられる。

この課題を解決するために、応募者は宮城県名取川流域を対象に、水文学や河川工学の分野にて水資源量や洪水ピーク流量推定等に用いられてきた分布型流出モデルの生息場(分布)モデル開発に利用する研究を遂行してきた (e.g., Nukazawa et al., 2017¹⁾)。しかし課題として、1) 流出解析の解像度 (250m) では、生物の局所的な水理嗜好性 (e.g., 瀬を好む種) の考慮が困難なこと、2) 河川生物の生息分布に関わる「環境流況」の人為的影響による改変程度を考慮していないこと、の2点が挙げられる。流量の規模や継続時間等から構成される環境流況は、河川生物の営巣活動を左右することが知られている²⁾。生息場モデルにおいて適切な予測因子が使用されない場合、他地域や将来予測への適用において誤った予測結果をもたらすことが想定される。以上より、本研究課題によって、生物地理学的なバックグラウンドを有する生息場モデルにおいて、流域内の水理学的な変動や流況の改変程度を導入し、上述した学術的課題の解決を目指す。

2. 研究の目的

本研究は宮城県小丸川流域を試験領域として、基礎データを収集すると共に、分布型流出モデルを活用して生物生息場モデルの高度化に資する予測変数を整備することを目的とする。以下に詳細な目的を示す。

- 1) 流域内の網羅的な底生動物群集・環境データを収集する。
- 2) 高精度に流域内の流量を再現可能な分布型流出モデルを構築し、気候変動やダムによる流況改変を流域内で定量・比較する。
- 3) 分布型流出モデルの高解像度化を実施し、空間的に詳細な水理学的変数を取得する。
- 4) 機械学習モデルにより底生動物群集の生息場モデルを開発し、流況改変や水理変数の予測変数としてのポテンシャルを検討する。

3. 研究の方法

(1) 現地調査およびデータ収集

宮城県小丸川流域内の上流～下流において62地点の瀬および14地点の淵、6地点の瀬・淵混合地点を含む82地点の調査地点を設定した。調査項目は底生動物群集、環境指標 (e.g., 河床材料、流速、樹冠) である。82地点のうち25地点 (瀬19地点、淵6地点) は2020年に二回目の調査を実施している (総データ数: n=107)。選定条件として、調査可能な瀬または淵を有すること、一定以上の集水面積 (約1.25 km²) を有すること、近接する調査地点と距離が約500m以上離れていること、水深は最大を股下までとした。瀬の調査はまず、各地点で無作為に選定した4ヶ所においてサーバーネットを河床に設置し、2cm以上の礫を手に取り、表面の水生昆虫をブラシで落とし網に流し込んだ後に、足で河床を攪乱し底生動物を網に捕集した。淵の調査は各地点で無作為に選定した水深股下以下の4ヶ所において柄付きのサーバーネットを河床に設置し、1分間足で攪乱し底生動物を網に捕集した。

底生動物生息場モデルにおける環境変数として、現地において観測した項目とGISデータを基礎とする項目 (e.g., 標高、ダム指標) を採用した。前者については、例として流速はプロペラ式流速計 (VR-301, KENEK) によって各地点5ヶ所まで測定した6割水深流速の平均値を採用した。後者については国土数値情報の標高・傾斜度5次メッシュと土地利用細分メッシュデータ、河川データを使用した。標高データより集水面積と傾斜度を求めた。Cooper et al. (2017)³⁾において提案された16種類のダム指標を適用した。ダム指標はダム数・ダム位置、河川、貯水容量、集水面積のデータを用いて計算され、4つのグループに分類される;(1)ダムによって分断された河川区間に関する指標、(2)ダム数とダム密度に関する指標、(3)ダムまでの距離に関する指標、(4)ダムの貯水容量に関する指標。

流出モデルの入力値として、地域気象観測データと地上気象観測データから降水量、気温、風速、日照時間、雲量、

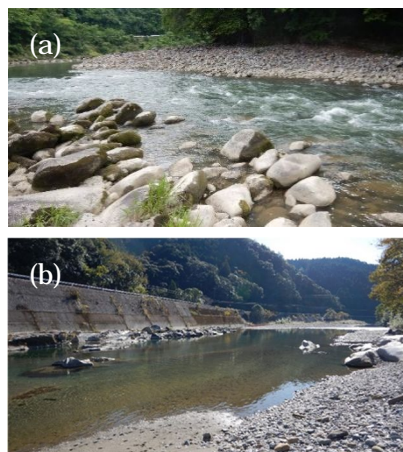


図-1 調査地点の(a)瀬, (b)淵

気圧、相対湿度を利用した。気温、風速、降水量は観測地点のデータをもとに、重みつき距離平均法で空間補間して流域全体で面的に入力した。モデルの境界条件としてダム・発電放流量データを使用し、パラメータ校正および精度検証のため各ダム流入量データと水文水質データベースの流量データを使用した。

将来気候データは、8つの全球気候モデル(GCM)からそれぞれ月ごとの地上気温と降水量のデータを入手した。評価期間はそれぞれ近未来(2031年~2050年)と遠未来(2081年~2100年)の2期間とした。代表濃度経路(RCP)シナリオとして、RCP2.6, RCP4.5, および RCP8.5の3つのシナリオを選択した。

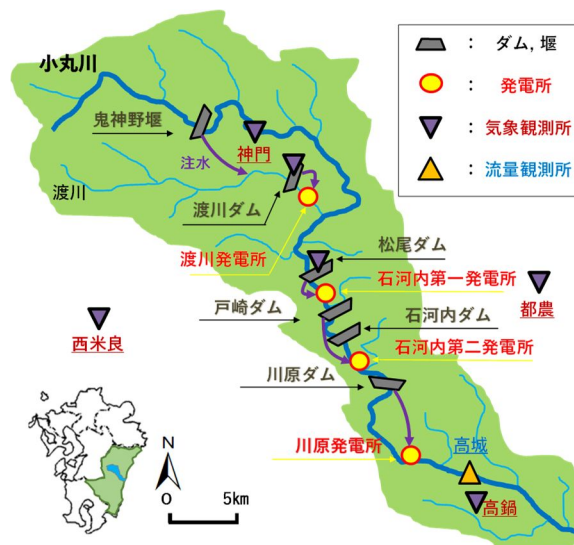


図-2 小丸川流域とダム、発電所、観測所の位置

(2) 分布型流出モデル

宮城県名取川流域において開発された分布型流出モデルを一部改変して小丸川流域に適用した⁴⁾。評価期間は2010年から2019年の10年間とした。本モデルでは、直接流を kinematic wave 法、基底流を貯留関数法、河道流を dynamic wave 法、融雪に degree-day 法、蒸発散量に修正 Penman-Monteith 式を用いて計算した。2010年1月1日~2019年12月31日の10年間を対象に、3地点(渡川ダム、松尾ダム、高城観測所)において各年または10年間のNS係数、PBIASを算出し、小丸川流域の流出計算の精度検証を行った。一般的に、NS係数は0.7以上の時、PBIASは±15%の範囲内の時に、流出解析の再現性が高いとされている。また、PBIASの値が負であればモデルは過大評価、正であれば過小評価していることを表す。

ダムや取水堰による取水や放流量操作等を考慮しない流出解析(以下、ダム無し条件)、ダムや取水堰による取水や放流量操作等を考慮する流出解析(以下、ダムあり条件)、ダム無し条件における気温と降水量のデータに将来気候データを使用した流出解析(以下、将来気候条件)を実施した(図-2)。将来気候条件においては、2将来期間×3RCPシナリオ毎に、8GCMの流出解析値から平均値を算出し、この6通りの平均値を流況改変の評価に使用した。

流況改変の評価のために、33指標からなる水文改変指標(Indicators of Hydrologic Alteration; IHA)を使用した⁵⁾。IHAは河川生態系への影響に関連付けて5つのカテゴリーに大別される。例として、1)季節的な流れの変動パターン(各月の流量中央値)、2)極端な流況(干ばつ・洪水など)の発生頻度と持続期間(e.g., 1~90日間移動平均最大・最小値)等が挙げられる。ダム無し・ダムあり・将来気候の3条件毎に、河道部として定義したメッシュ(以下、河川メッシュ)における日毎流量からIHAを算出し、ダム無し条件とダムあり条件の各IHA値、ダム無し条件と将来気候条件の各IHA値の変化率または変化程度を流域全体で求めた。

分布型流出モデルにおいて異なる空間解像度のDEMデータを用いて流出解析を実施した。まず、ALOS衛星画像データから空間解像度30, 100, 250mのDEMを取得し、ArcGIS等により窪地処理を含む流出計算に用いるための補正を実施すると共に流向データを取得した。空間解像度の変更に伴い最適なパラメータ及び計算時間間隔を検討し、流量・水深・流速の計算を実施した。なお、本検討は事業期間終了後も継続中であるため、以下で底生動物生息場モデルに用いた水理変数は現地において観測されたデータとなる。

(3) 底生動物生息場モデルの構築

底生動物生息場モデルを機械学習の手法であるランダムフォレスト(RF)と勾配ブースティング(GBM)により構築した。まず、計算対象地点が少ないダム指標を、サンプルサイズの低下を防ぐために除外した。その後、107サンプル中3サンプル以上で「在」を記録した分類群の在/不在(分布)を応答変数とするモデルを構築し、各変数の重要度の平均値を算出した。

底生動物の分布予測における水理変数ならびにダム指標の寄与を評価するために、1)水理変数とダム指標ならびにそれ以外の重要度が低い半数の変数を除外したモデル、2)1)に水理指標またはダム指標を加えたモデルを構築して予測精度を比較した。この際、冗長な予測変数を除外するために、予測変数間における Spearman の順位相関係数が0.8を超える変数のうち、RFにおける変数重要度の低い指標を除外した。予測精度は、AUC(Area Under Curve)に基づくランダムデータ分割交差検証法(80%:訓練データ, 20%:検証データ)を10反復実施してその平均値により評価した。AUCとは、ROC(Receiver Operating characteristic Curve)曲線下の面積のことであり、二値分類アルゴリズムの性能を示すために用いられる指標である。評価対象の予測変数を用いたモデル、用いないモデルによって算出された底生動物の生活型ごとのAUC群間において対応のあるt検定を行った。

4. 研究成果

(1) 流出解析によるダムと気候変動による流況改変の定量化

10年間におけるNS係数とPBIASは、それぞれ渡川ダム地点で0.921と4.0%、松尾ダム地点で0.964と3.9%、高城地点で0.957と4.0%であった。よって、小丸川流域において高い再現性を持つ分布型流出モデルが適用されたと言える。また、ハイドログラフを見ると、総じて流量の再現性は高いものの、降水量の大きなイベント時には、全ての地点で流量計算が観測値に対し過小評価する傾向を有していた(図-3)。これは流域全体の降水量分布を5地点の観測所から空間補完しているため、台風時やゲリラ豪雨による降雨の時空間的な異質性を入力に反映できていない事が原因と考えられる。

ダムと気候変動による流況改変程度を比較すると、ダムの方が多くのIHAを改変する、すなわち河川流況を大きく改変することが分かった。これは取水に伴う流量減少の影響が大きく、例えば各月の流量中央値、移動平均流量の最大値(30~90日間)、移動平均流量の最小値において大きな負の改変率を示していた。その一方で、気候変動による流況改変は、局所的にはダムよりも改変程度は小さいものの、多くの低流量指標が上流域の広範囲において減少していた。従って、気候変動によって、流域規模で見た場合には広域における河川生物の生息環境に影響(e.g., 生息場面積の減少)が生じることが示唆された。また、放射強制力の大きいシナリオにおいて、日最大流量が増加することが予測され、この傾向は上流域において顕著であった(図-4)。これは、将来気候条件下においては上流域でかく乱強度が増加することを示唆する結果と言える。

(2) 底生動物生息場モデルにおける水理指標と流況改変指標の有用性

表-1に底生動物と環境変数の基礎統計量と有意差検定の結果を示す。瀬と淵の調査結果を比較すると、多くの変数で有意差が確認された。例えば、流速と水深それぞれは瀬・淵間で有意差が確認された($p < 0.01$)。また、総個体数密度($p < 0.01$)、分類群数($p < 0.05$)について、淵よりも瀬の方が有意に高い結果となった。本研究で淵を調査することで2018年における瀬のみの調査からは確認されなかった分類群が確認された(e.g., トウヨウモンカゲロウ, シリナガマダラカゲロウ)。これにより、淵を含む低流速または停滞水域のスペシャリストの分布情報を得ることが出来たと言える。

流速と水深を予測変数に用いたモデルにおいて、目では8目において、生活型では6生活型に

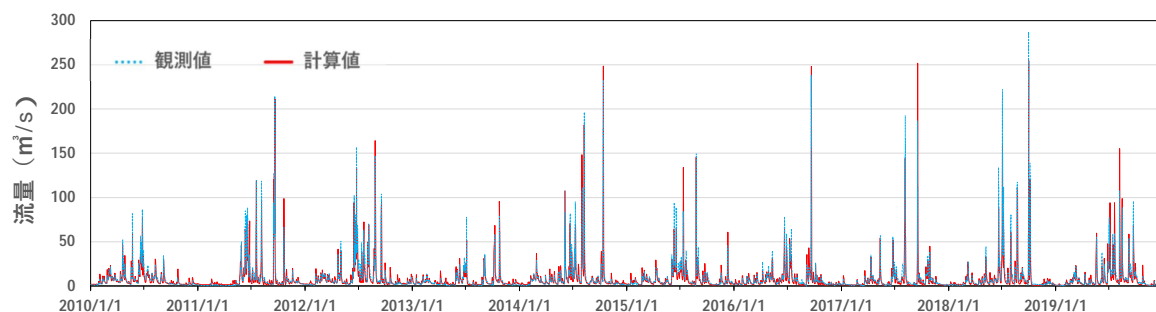


図-3 2010~2019年における渡川地点のハイドログラフ

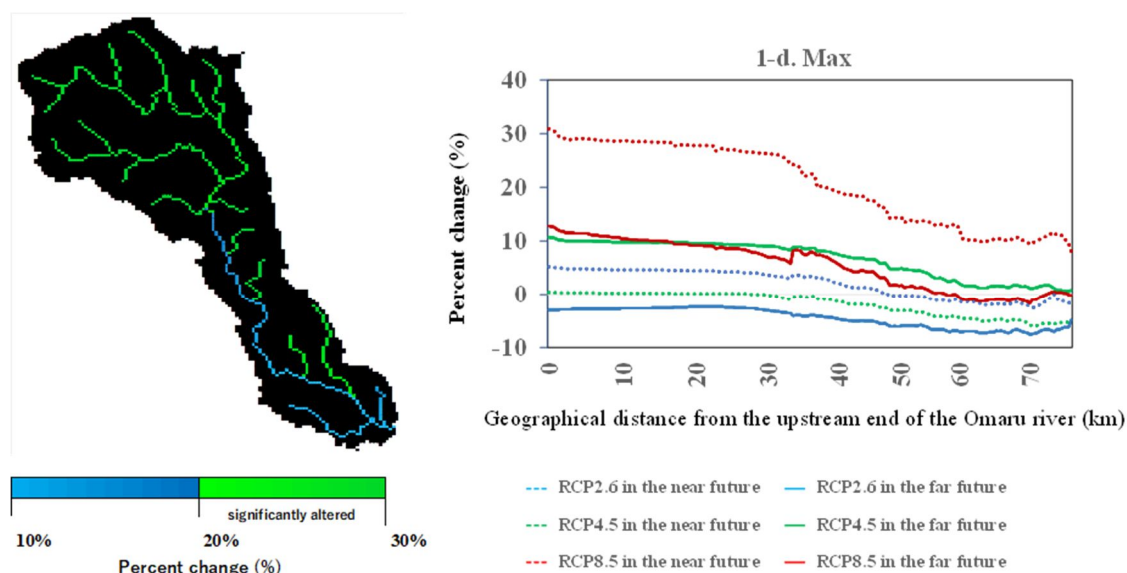


図-4 各気候変動シナリオにおける日最大流量(1-d. Max)の改変率の河川縦断的な推移およびRCP8.5の近未来における空間分布。

表-1 環境変数と主要な底生動物指標の基礎統計量と瀬・淵間の環境変数における有意差検定結果。有意差を検出した項目には、 $p < 0.05$ の時*、 $p < 0.01$ の時**を付した。

	瀬 (n=62)		淵 (n=14)		有意差 瀬-淵
	平均±SD.	範囲	平均±SD.	範囲	
標高 (m)	271.99±169.53	4.41-776.80	271.69±77.85	12.4-356.86	
集水面積 (km ²)	127.74±1798.86	16-5956	1570.29±1416.13	51-5897	
傾斜度	0.033±0.06	0-0.26	0.0068±0.016	0.0001-0.059	**
流速 (cm/s)	56.83±19.89	18.68-123.45	21.59±13.15	4.76-46.78	**
水深 (cm)	23.07±7.92	8.38-39.63	56.41±10.71	35.2-70	**
水温 ()	14.99±1.49	11.50-18.00	13.81±1.49	11.5-16.2	*
pH	7.55±0.23	7.12-8.47	7.85±0.11	7.60-7.99	**
EC (μs/cm)	49.99±15.53	26.2-102.8	50.75±6.16	43.5-65.5	
河床材料 (mm)	100.68±60.04	12.40-280.66	60.09±33.71	25.71-169.95	**
総個体数密度 (ind./m ²)	1701.10±1256.61	168-6500	872±712.85	48-2556	**
分類群数	35.56±10.89	12-65	31.21±13.86	12-61	*

において、平均 AUC は良好なモデル精度の基準である 0.7 以上となった。流速と水深をモデルに考慮することによって、考慮しないモデルから有意に精度が向上した生活型としては、滑行型 ($p < 0.05$)、携巢型 ($p < 0.01$)、遊泳型 ($p < 0.05$)、匍匐型 ($p < 0.01$)、造網型 ($p < 0.05$)であった。本研究でサンプリングされた遊泳型は、瀬、淵のどちらも好む水理選好性を有することが報告されている⁶⁾。よって、いずれかの水理環境を好む生態を分類群毎に表現できたことが考えられる。生活型としては有意差が確認されなかったものの、固着型においてアシマダラブ属やコマドアミカ属は、RF、GBM のいずれにおいても精度が大きく向上した (図-5)。これら分類群は高流速を好むことが知られており、水理学的変動を予測変数に導入することで分布範囲をより正確に予測できることが示された。

ダム指標を予測変数に用いた場合には、3 生活型 (掘潜型、匍匐型、滑行型) において有意な精度の向上が確認された。特に重要な変数は、ダムに分断された河川区間の延長であった。これは、ダムによる分断に伴う移動分散範囲の制限や、支流による生物相・多様性の維持機構の限定化によって、多くの底生動物の分布が規定される事実を示唆する。

ダム指標を予測変数に用いた場合には、3 生活型 (掘潜型、匍匐型、滑行型) において有意な精度の向上が確認された。特に重要な変数は、ダムに分断された河川区間の延長であった。これは、ダムによる分断に伴う移動分散範囲の制限や、支流による生物相・多様性の維持機構の限定化によって、多くの底生動物の分布が規定される事実を示唆する。

参考文献

- 1) Nukazawa, K., Kazama, S., Watanabe, K., Catchment-scale modeling of riverine species diversity using hydrological simulation: application to tests of species-genetic diversity correlation. *Ecohydrology*, Vol. 10 (1), e1778, 2017.
- 2) Poff, N.L., Allan, D.J., Bain, B.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C. : The Natural Flow Regime, *BioScience*, Vol.47, pp.769-784, 1997.
- 3) Cooper, A. R. Infante, D. M. Daniel, W. M. Wehrly, K. E. Wang, L. and Brenden, T. O. : Assessment of dam effects on streams and fish assemblages of the conterminous USA, *Science of The Total Environment*, Vol.585, pp.879-889, 2017.
- 4) 峯田陽生, 糠澤桂, 中尾彰吾, 鈴木祥広, 分布型流出モデルを用いた小丸川水系におけるダム・堰による流況変化の縦断的評価, *土木学会論文集 G (環境)*, Vol.76, No.5, pp.I_65-I_74, 2020.
- 5) Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. and Braun, D.P. : A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, Vol.10(4), pp.1163-1174, 1996.
- 6) Poff N.L., Olden J.D., Vieira N.K.M., Finn D.S., Simmons M.P., Kondratieff B.C., Functional trait niches of North American lotic insects: traits-based ecological applications in light phylogenetic relationships, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 25, pp. 730-755.

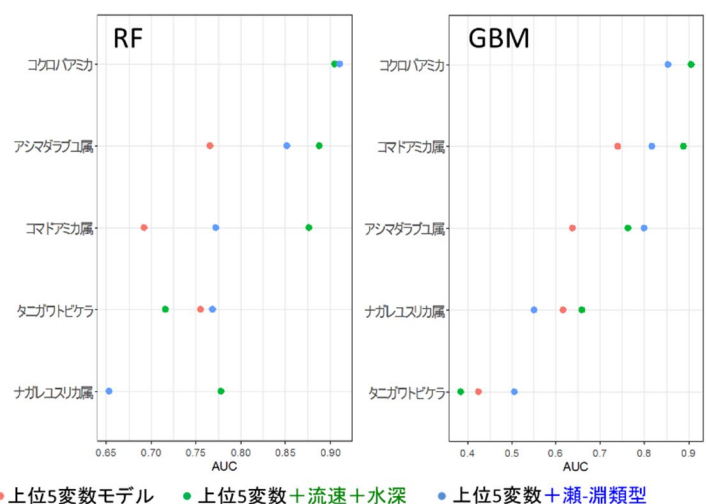


図-5 固着型の底生動物におけるランダムフォレスト (RF) と勾配ブースティング (GBM) による予測精度結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Nukazawa K., Shirasaka K., Kajiwara S., Saito T., Irie M., Suzuki Y.	4. 巻 748
2. 論文標題 Gradients of flow regulation shape community structures of stream fishes and insects within a catchment subject to typhoon events	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 141398
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scitotenv.2020.141398	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 峯田陽生, 糠澤桂, 中尾彰吾, 鈴木祥広	4. 巻 76
2. 論文標題 分布型流出モデルを用いた小丸川水系におけるダム・堰による流況改変の縦断的な評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集G（環境）	6. 最初と最後の頁 I_65-I_74
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 -

1. 著者名 糠澤桂, 有働祐也, 鈴木祥広	4. 巻 75
2. 論文標題 宮崎県小丸川水系の底生動物の個体数変動における餌資源因子の影響評価	5. 発行年 2019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_511-I_516
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9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田中凌央, 糠澤桂, 鈴木祥広
2. 発表標題 ランダムフォレストを用いた底生動物分布モデルにおけるダム指標の有用性評価
3. 学会等名 第55回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 峯田陽生, 糠澤桂, 鈴木祥広
2. 発表標題 分布型流出モデルを用いた小丸川流域におけるダムと気候変動による流況改変の評価
3. 学会等名 令和3年度西部支部研究発表会 (オンライン)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mineda H., Nukazawa K., Tanimura Y., Suzuki Y.
2. 発表標題 Evaluation of altered flow regimes by dams and climate change in the Omaru River network using a distributed hydrological model
3. 学会等名 International Conference on Sustainable Water Resources Management ? Global Challenges & Opportunities - (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nukazawa K.
2. 発表標題 Catchment scale modeling of riverine species diversity using hydrological simulation
3. 学会等名 Guest Lecture in Water Resources Engineering Dept. Engineering Faculty, Universitas Brawijaya (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中凌央, 糠澤桂, 鈴木祥広
2. 発表標題 ダムの影響を考慮した機械学習による底生動物分布モデルの構築
3. 学会等名 2020年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 (webリアルタイム)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nukazawa K., Chiu M-C., Kazama S., Watanabe K.
2. 発表標題 Contrasting adaptive genetic consequences of stream insects under changing climate
3. 学会等名 The 5th International Conference on Climate Change 2021 (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 糠澤桂, 宇都宮将, 鈴木祥広
2. 発表標題 瀬と淵の水理学的変動を考慮した水系内の底生動物分布予測の検討
3. 学会等名 応用生態工学会2020年度Web研究発表会 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 糠澤桂
2. 発表標題 宮崎の河川におけるダムによる生態影響評価研究
3. 学会等名 第23回日本水環境学会シンポジウム (オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 糠澤桂, 有働祐也, 鈴木祥広
2. 発表標題 宮崎県小丸川水系の底生動物の個体数変動における餌資源因子の影響評価
3. 学会等名 第64回水工学講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 風間聡, 小森大輔, 峠嘉哉, 糠澤桂, 横尾善之, 渡辺一也	4. 発行年 2020年
2. 出版社 理工図書	5. 総ページ数 194
3. 書名 河川工学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

糠澤桂のウェブサイト http://kein.starfree.jp/home.html

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
---------	---------