

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

氏 名（ふりがな）		所 属	役 職
①研究代表者		ぬかざわ けい	宮崎大学工学部
		糠澤 桂	
②技術研究 開発テーマ	名称	宮崎県小丸川流域における治水と生態系の総合評価のためのモデル開発	
③研究経費（単位：万円）		平成30年度	平成31年度
※端数切り捨て。		205万円	178万円
		令和元年度	99万円
		総 合 計	
		482万円	
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏 名		所属機関・役職（※令和2年3月31日現在）	
鈴木 祥広		宮崎大学工学部・教授	
井崎 博史		宮崎県庁県土整備部・副主幹	
穴井 幸康		九州電力株式会社技術部・課長	
① 研究の目的・目標（様式地河-1、地河-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）			
1997年の河川法改正により河川整備は治水・利水・環境の3要素から行われることとなった。しかし、これら要素を同時に満たす河川整備の意思決定に資するツールは確立されていない。気候変動に伴い河川流況が改変されると予想されるため、将来における適切な治水対策を検討するのみならず、河川環境や生態系を併せて評価可能なモデルの開発が希求される。 そこで本研究課題の最終的な目的は、小丸川流域において分布型流出モデルを開発し、それを活用して治水と環境の総合評価を可能とするモデルを開発することである。 以下に本研究課題の遂行過程において設定する目標を示す。 ① 流域内の水循環を予測可能な分布型流出モデルを開発すること ② 流域内の生物調査により基礎データを蓄積し、生息場予測モデルを構築すること ③ 上記により、治水と環境を総合的に評価・予測する枠組みを構築すること 以上の個々の目標を達成することにより、流域内の外力の変化に伴う高精度な流量予測が実現されることや、流域内の基礎情報として河川環境整備に有益な河川生物の情報が提供可能になることが見込まれる。また、気候変動下において外力の変化に対する流況や環境の応答を総合的かつ定量的に評価可能なモデルが整備されることが見込まれる。 流況データを生物予測モデルへ統合できた場合には、河川管理者が検討する河川整備計画案に対して、それによる治水上の効果と共に、生態系へのインパクトを定量的に示すことが可能となる。さらに、気候変動による水害の頻発化・激甚化を踏まえて、将来気候（RCP8.5など）下における生態系保全を考慮した河川整備計画の意思決定に貢献するのみならず、将来的には、小丸川流域で開発されたモデルを全国の河川流域に適用することも可能と考える。			

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

①小丸川水系内における網羅的な生物調査と生物予測モデルの構築

(1) 調査地点

調査地点は、宮崎県小丸川流域の下流から上流までの82地点とした(図8-1)。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500 m以上離れていること、水深は最大を股下までとした。

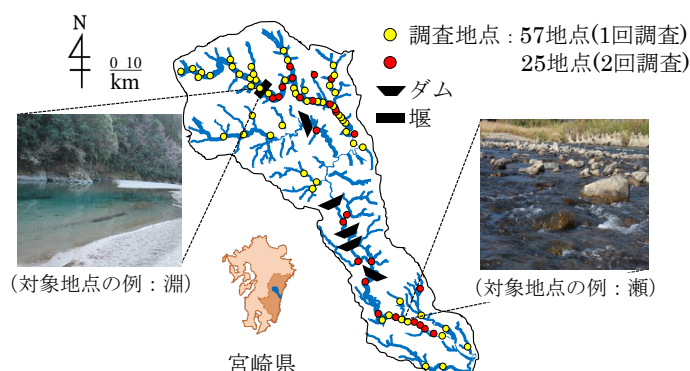


図 8-1 宮崎県小丸川水系の調査地点

(2) データセット

底生動物の定量採取は、各地点において異なるハビタットを対象とした。具体的には瀬、淵、瀬と淵の3通りである。各地点において無作為に選定した4ヶ所においてサーバーネットを河床に設置し底生動物を定量採集した。淵においては柄付きのサーバーネットを設置して1分間のかく乱により採集した。採取された底生動物はエタノールで固定し、実体顕微鏡にて可能な限り種や属まで同定し、これらをまとめて分類群とした。

環境変数は、現地において観測した項目(e.g., 河床材料, 流速, 樹冠)とGISデータを基礎とする項目(e.g., 標高, ダム指標)に分類される。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) 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。

(3) 統計分析

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)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171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ダム指標の寄与を評価するために, 1) ダム指標とそれ以外の重要度が低い半数の変数を除外したモデル(ダム指標なしモデル), 2) 1)にダム指標を加えたモデル(ダム指標ありモデル)を構築して予測精度を比較した。この際, 冗長なダム指標を除外するために, 予測変数間におけるSpearmanの順位相関係数が0.8を超えるダム指標のうち, 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。ダム指標なしモデル, ダム指標あり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($n=171$ 分類群 $\times 2$ モデル)において対応のあるt検定を行った。

(4) 結果と考察

a) 分布予測における変数重要度の評価

計算対象地点が少ないダム指標を除外した24項目の予測変数を用いて構築した171分類群のRFによると, ダム指標以外の予測変数において最も重要性の高い変数は標高であり, 次いで集水面積, 水深, 流速が相対的に重要な変数との結果になった。これより, ダム指標なしモデルにおける7項目の予測変数は標高, 集水面積, 水深, 流速, 瀬・淵類型, 地形傾斜度, 水温とした。また, ダム指標においてはUNDR (上流の総流路長あたりのダムの数) や, DMCT (下流かつ主流にある

ダムの数)の重要度が高く、その他のダム指標についても、他の環境項目よりも明瞭に重要性が高い傾向が確認された。最終的に、UNDR、STOT（ダムに分断された河川区間の延長）、SCA（ダムに分断された河川区間の集水面積）、USR（上流の河川総延長あたりの上流にあるダムの総貯水容量）をダム指標ありモデルに採用した。

b) ダム指標を用いた分布予測モデルの精度

ダム指標を予測変数に加えることで、掘潜型 ($p<0.01$)、匍匐型 ($p<0.01$)、滑行型 ($p<0.05$) の3生活型において精度の向上が見られた(図8-2)。また、他の5生活型のうち4生活型(e.g., 固着型)においても精度の増加が確認された。よって、ダム指標は底生動物の分布予測において有効であると言える。一方、ダム下流区間で造網型トビケラ等の優占が一般的な傾向として知られている造網型では、分布予測の精度向上は見られなかった。

生活型ごとにダム指標ありモデルにおける平均変数重要度をみると、総じてSTOTはいずれの生活型においても他のダム指標と比べて重要度が高い結果となった(図8-3)。これは、ダムによる分断が生活型に関わらず底生動物の分布に影響していることを示唆している。つまり、ダムによる影響は粗粒化や流況改変等の環境改変以外にも、分断に伴い移動分散範囲が制限されることや、支流による生物相・多様性の維持機構が限定化されること等を通じて、多くの底生動物の分布における制限要因となっている可能性があると言える。

滑行型は他の生活型と比べて相対的にUSRが重要な結果となった。これは、貯水しない鬼神野取水堰下流において、他のダム下流と比べて滑行型の応答が異なることが理由と考えられる。小丸川水系の特徴として、渡川ダム以下のダム下流では、ダム湖由来の濁水をしばしば受容することが挙げられる。従って、貯水容量に関する指標であるUSRが濁水の長期的な影響を間接的に表現していると仮定すると、付着藻類の発達阻害を通じてそれを餌資源とする滑行型の分布に影響が生じたことが推察される。

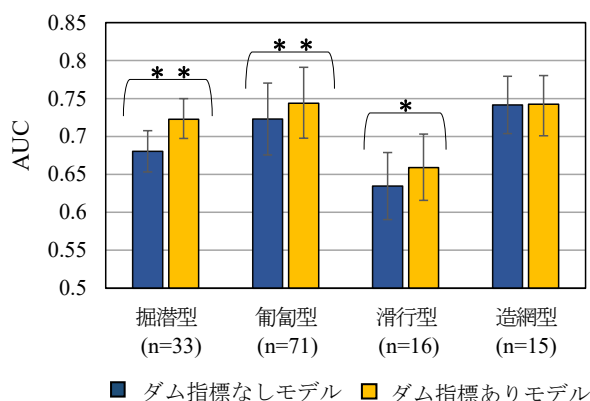


図 8-2 ダム指標なしモデル、ダム指標ありモデルの生活型ごとの予測精度。各生活型においてモデル間の AUC 値において有意差を検出した項目には $p<0.05$ の時*, $p<0.01$ の時**を付した。括弧内は生活型ごとのモデル化対象とした分類群数を表す。

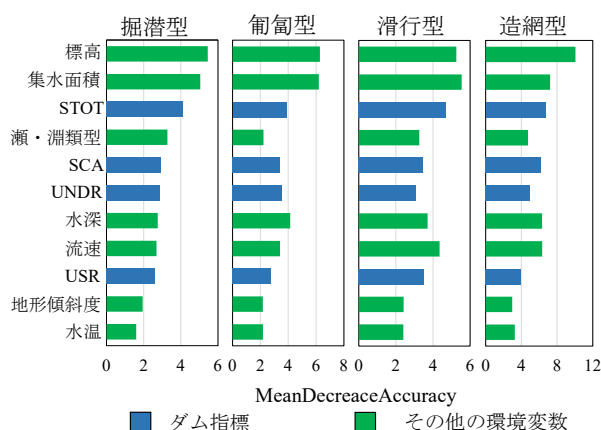


図 8-3 ランダムフォレストによる 135 分類群の底生動物分布モデルの 4 生活型ごとの平均変数重要度

②小丸川流域を対象とした分布型流出モデルによる流況改変評価

(1) 水文データの取得

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、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。

(2) 分布型流出モデルの構築と精度検証

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（峯田，糠澤ら，2020）。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。その後，10年間を対象に，3地点（渡川ダム，松尾ダム，高城観測所）におけるNash-Sutcliffe効率係数（以下，NS係数）を算出し，流出解析の精度検証を行った。一般的に，NS係数は0.7以上の時に流出解析の再現性が高いとされている。

(3) 流況改変の評価

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。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（Richter et al., 1996）。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（i.e. 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; 1~90-d. Max, 1~90-d. Min）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。変化率または変化程度は，絶対値が20%または20 dayよりも大きいと有意に流況改変が発生していることを示す。さらに，総合的な流況改変評価として，有意に改変したIHAがない時に流況改変なし，指標数が1~10指標，11~20指標，21指標以上の時に，それぞれ小程度，中程度，大程度の流況改変が発生していると定義されている（Yang et al., 2017）。

(4) 結果と考察

a) モデルの精度検証

10年間におけるNS係数は，渡川地点で0.921，松尾ダム地点で0.964，高城地点で0.957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と言える。

b) ダムによる流況改変の評価

ダム直下減水区間において，有意に改変したIHAは23~26指標であり，大程度の流況改変が発生していた（図8-4，図8-5）。鬼神野堰直下減衰区間では，中程度の流況改変（12~20指標）が発生していた（図8-4，図8-5）。全地点に共通して，各月の流量中央値，移動平均流量最小値において大きな負の改変が発生していた。従って，流量規模の低下が河川生物の生息場面積の減少を通じて河川生物の群集構造に影響している可能性がある。また，かく乱の指標でもある移動平均流量最大値は減少する結果となり，これは上流のダムによる洪水調節が原因と考えられる。

発電所下流において発電放流を受容することによって，有意に改変したIHAは16~21指標とダム直下から減少することが示された（図8-4，図8-5）。多くの月の流量中央値は正の有意な改変となったが，これは安定的な発電を行うために一定量の取水・放流を行ったため，結果として各月の流量中央値がダム無し条件より大きくなる場合が多くなったと考えられる。

c) 気候変動による流況改変の評価

2将来期間×3RCPシナリオの全6通りの将来気候条件において，小丸川流域全体における有意に改変したIHAは0~10指標の範囲にあり，小程度の流況改変が発生することまたは流況改変が発生しないことが予測された（図8-4，図8-5）。全6通りの将来気候条件に共通する特徴として，小丸川上流域の多くのメッシュにおいて2日間上昇値の正の改変が予測され，流量の少ない上流域や支

流ほど有意に改変した指標数が多い傾向が示された。RCP8.5では2将来期間両方において、流域全体でRCP2.6, RCP4.5より有意に改変した指標数が多く、ほとんどの河川メッシュにおいて小程度の流況改変が発生することが予測された。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。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。

d) ダムと気候変動の影響評価と比較

小丸川本川や渡川では、将来気候条件よりダムあり条件の方が多くのIHAを有意に改変し、各IHAを大きく変化させていた（図8-4）。一方で、流域全体で見ると、将来気候条件はダムの影響が及ばない最上流や支流の流況改変をもたらし、その改変は下流域に比べて大きいことが分かった（図8-5）。特に、放射強制力が最も高いRCP8.5において、多くのIHAを有意に改変させる傾向があった。

流況改変は小程度でもその改変へ脆弱な種（e.g., 高流速・低流速選好種）にとっては個体群消失のリスクに繋がり、結果として生物多様性が失われる可能性が指摘されている。そのため、水系内の総流路延長の多くを占める支流における生物多様性保全のためにも、気候変動の影響緩和および適応のための環境保全施策が重要である。

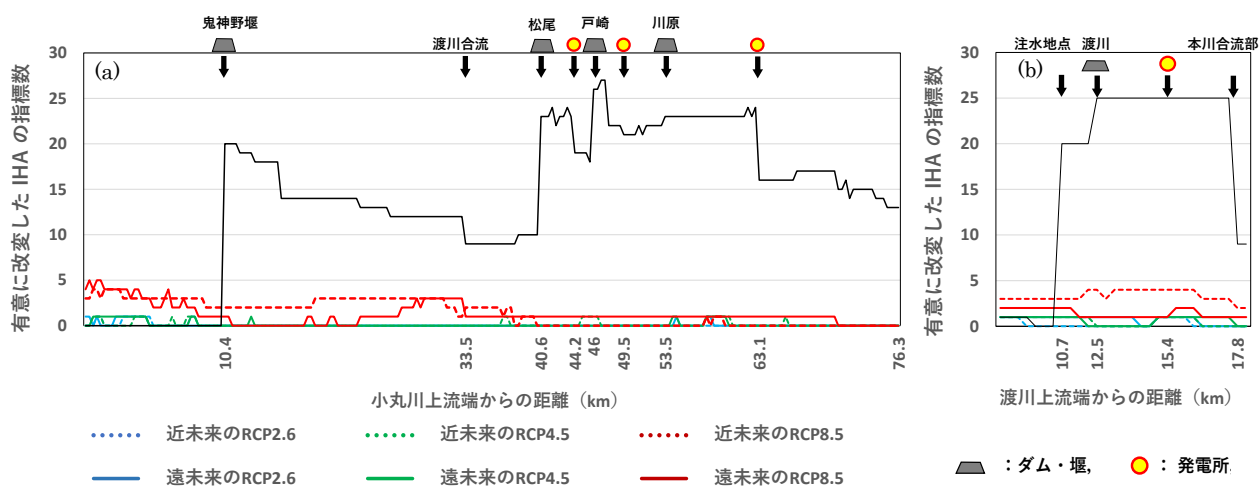


図 8-4 本川と渡川を対象にしたダムあり条件と将来気候条件下における有意に改変した IHA の指標数。
(a) は本川における有意に改変した IHA の指標数。 (b) は渡川における有意に改変した IHA の指標数を示す。
本川に位置する発電所は上流から順に、石河内第一発電所、石河内第二発電所、川原発電所である。

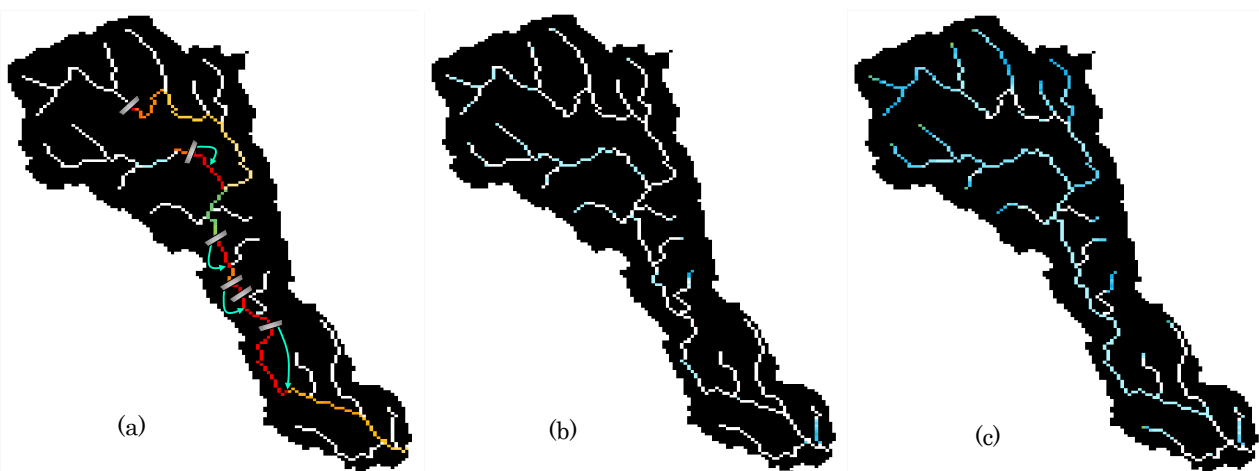


図 8-5 有意に改変した IHA の指標数マップ
(a) ダムあり条件における有意に改変した IHA 指標数マップ
(b) 近未来の RCP4.5 における有意に改変した IHA の指標数マップ
(c) 遠未来の RCP8.5 における有意に改変した IHA の指標数マップ
矢印はダムから発電放流先への導水を示している。

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

【関連する査読付き論文】

Nukazawa, K., Shirasaka K., Kajiwar S., Saito T., Irie, M., Suzuki, Y., Gradients of flow regulation shape community structures of stream fishes and insects within a catchment subject to typhoon events. Science of the Total Environment, Vol.748, 141398, 2020.

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・堰による流況改変の縦断的評価, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.5, pp.I_65-I_74, 2020.

糠澤桂, 有働祐也, 鈴木祥広, 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_511-I_516, 2019.

【関連する学会発表】

田中凌央, 糠澤桂, 鈴木祥広, 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, 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), 2021年3月16日.

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・堰による流況改変の縦断的な評価, 第28回地球環境シンポジウム(オンライン), 2020年9月23日.

糠澤桂, 有働祐也, 鈴木祥広, 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, 第64回水工学講演会, さいたま市, 2019年11月6日.

【企業とのタイアップ状況】

小丸川水系には宮崎県の所有する多目的ダムが2基(渡川ダム, 松尾ダム), 九州電力株式会社の所有する一般水力の発電ダムが3基存在する(戸崎ダム, 石川内ダム, 川原ダム). このため, 本研究により下流の河川生物の生息場にとって適した放流量を決定出来れば, ダム管理者にとって求められる河川環境に配慮した運用が出来る. 共同研究者に九州電力株式会社の技術者も含まれており, 今後の研究協力体制も整っていると言える.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

なし

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

3年目は当初計画から変更があったものの大きな研究進捗があった。特に、中間評価における指摘事項であるダムや洪水かく乱の影響を考慮した研究が適切に実施されたと考えている。

分布型流出モデルによる流量再現精度は10年間の計算によって検証され、水文改変指標の導入により、流域全体で河川の出水かく乱や環境・生態系に関わる流況（環境流況）を予測できるようになった。さらに、気候変動下の気温・降水量データの整備も完了し、気候変動データの流出モデルへの入力とダム・発電放流量のモデルへの利用によって、気候変動とダム運用によるかく乱・環境流況の改変を定量化・比較可能となった。この成果はその一部が2020年に土木学会論文集に掲載（峯田ら、2020）されたのみならず、現在はインパクトの高い国際誌への掲載を目指して論文を執筆している。

機械学習による生物予測モデルにおいて、ダムの影響を表現する指標を予測変数として導入した。これは、世界的にも類を見ない研究事例であり、我が国を始めとする水系内に取水・横断構造物の多数ある流域における生物予測モデルの精度・確度向上をもたらす成果と言える。今後は、かく乱・環境流況指標を生物モデルに導入することによって、環境に配慮したダム放流のあり方を河川政策に役立てていくことを検討している。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究課題により、小丸川において流域全域を対象として精度よく流量やかく乱強度、環境流況を予測可能な分布型流出モデルが構築された。これによって、気候変動とダム運用の変化に伴う流量変化や環境流況変化を流域全体で定量化することが可能となる。よって、今後の研究の進展により将来気候条件における降雨分布が判断されれば、高水流量のより高精度な再現計算が可能となり、河川整備計画上有用な情報となり得る。また、ダムの運用をどのように変化させれば、適切な環境流況が維持されるか、定量的かつ河川縦断的に評価することが可能なため、整備計画において明確な基準によって環境への配慮が可能となる。

研究期間を通して取得した流域内の網羅的な生物（魚類、底生動物、付着藻類）と環境（水温等）のデータは流域環境管理において有益である。これらデータを用いた、ダムの影響を考慮した底生動物群集の生息場適性モデルにより、流域内の河川生物多様度・健全度のパターンが理解される。今後に分布型流出モデルによる流況データを生息場モデルの予測変数として導入することによって、ダムの運用変化によって、生物多様度・健全度がどのように変化するかを予測することが出来る。これにより、上述した環境流況変化の基準から一歩進んで、生物多様度変化の基準を河川環境管理に導入することが期待される。

宮崎県には河川整備の点検や適切な環境保全に関する意見交換の場として複数の委員会が組織されている。本研究の研究対象流域である小丸川流域に関しても、宮崎県河川国道事務所が事務局となり小丸川学識者懇談会と中部流砂系検討委員会が運営されている。応募者と共同研究者の鈴木は本委員会の構成委員として密な情報交換と連携関係を有しているため、研究成果の実務への反映に向けて良好な基盤が形成されていると言える。