

## 11 治水と環境が両立した持続可能な河道管理技術の開発

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：流域水環境研究グループ長 服部 敦

研究担当グループ：流域水環境研究グループ（流域生態チーム、自然共生研究センター）、  
寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

### 1. 研究の必要性

河川、湖沼などの水域において生物多様性の損失傾向が続いている。今後は具体的な河川環境の管理目標を設定し、生物多様性の損失の回復と良好な状態の維持が急務となっている。一方で、地球規模の気候変動により水害の頻発化・激甚化が懸念されている。整備対象とする河道計画流量の増加に伴い、河道掘削の必要性も増加している。そこで、管理目標を明確にしながら、防災・減災と自然環境を一体不可分なものとして捉え、これらが一体化した河道管理を推進することが必要となっている。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、河川環境の保全・形成地区の設定に基づく河道計画・設計・維持管理技術の開発を目的とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 河川景観・生物の生育・生息場等に着目した空間管理技術の開発
- (2) 河道掘削等の人為的改変に対する植生・魚類等の応答予測技術の開発
- (3) 治水と環境の両立を図る河道掘削技術・維持管理技術の開発

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和 3 年度までに実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 河川景観・生物の生育・生息場等に着目した空間管理技術の開発

本研究は、河川景観、生物の生育・生息場の観点から環境の質が高い区間・箇所を保全すべき拠点と位置づけ、拠点抽出技術を開発するとともに、生物については保全対象となる生物が持続的に生育・生息できるための面積や配置方法についての研究を行うものである。平成 28～令和 3 年度は、保全すべき拠点を抽出する技術の開発を行った。

河川の景観・利用の観点からは、人々の利用の可能性が高い「水辺拠点」を設定し、既存文献分析及び事例調査から、水辺拠点を抽出するための評価軸（案）を検討した。さらに、評価軸の指標化およびしきい値について検討を行った。

検討結果から、「拠点整備に必要な空間スペース」、「良好な景観・自然環境がある」、「地域の社会環境から利用可能性が高い」に関する 11 の評価軸が得られた。また、評価軸の指標化について検討を行った。「拠点整備に必要な空間スペース」に関する評価指標として W/D を提案した。河岸空間の広がりや表現した W/D は、利用ポテンシャルとの良好な対応関係が見られ、河岸空間の利用ポテンシャル評価指標になると考えられる。「良好な景観・自然環境がある」、「地域の生活環境から利用可能性が高い」に関する評価軸の指標化について複数河川を対象にケーススタディを行った結果、水辺拠点の判別に重要な観点が得られた。判別への寄与度が高かった評価指標は、「都市公園からの距離」、「1km 圏域内の人口総数」、「観光地からの距離」、「河川利用施設の有無」、「橋からの距離」等であった。これらの項目を利用可能性が高い水辺拠点を評価する指標として提案し、地図上に評価指標の分布の図示化を行った。

生物に関しては、植物について、保全すべき植物群落が持続的に成立する箇所を保全優先地区（ホットスポット）とし、これらの分布と成立条件を明らかにした。沈水植物群落は、成立後の年数が新しく土砂が堆積せず、さらに湧水が流入するたまりに持続的に成立することが分かった。抽水植物群落（ヨシ群落）では、地形変化のないところで持続的に成立し、堆積により他の群落へ遷移することから、地形が堆積傾向にない箇所を保全優先地区として抽出した。鳥類については、全国の一級水系を対象に、河川・湿地生態系の指標となりやすい渉禽類の出現傾向を精査し、河川環境における近年の現状を把握した。その結果、内陸淡水域を利用する種が多く水系で近年見られなくなっていることが示唆された。また、利根川水系をケーススタディとして、渉禽類の分布と堤内外地を含めた環境要因との関係性について解析を行った。その結果、種によって、堤内の水田がその分布に大きく寄与しており、堤内地・堤外地を含めた横断的な視点が保全において重要となることが示唆された。次に利根川水系における各渉禽類の季節性を加味し、渉禽類の分布と堤内外地を含めた環境要因との関係性について再解析を実施した。その結果、秋渡り期に多種のサギ類の出現地点数が明確に増加するなど、各渉禽類種によって河川の利用頻度が季節的に変化することが明らかになった。また、各季節によって渉禽類の出現に必要な環境は変化しており、河川域における渉禽類の保全には、季節性を踏まえた検討が重要であることが示唆された。さらに実河川（那珂川水系那珂川）における水鳥類を対象とした現地調査に着手し、ワンド、砂礫地といった河川環境と周辺の水田において水鳥類の利用状況の季節的な比較を進めた。現地調査により、河川域の水鳥類の利用頻度にはピークがみられ、特に周辺水田の農閑期に河川域の利用種数が増加する傾向がみられた。このことは生息適地解析の結果が現地調査によって実証されたことを示すものである。また、本研究の発展形として那珂川における鳥類相把握のための eDNA の検討を実施した。eDNA の解析では、多くの種を同時に検出できる一方で、移行帯で採餌する小型種を検出しにくい傾向が示唆された。まだ検討段階であるものの、これらの結果は河川域における鳥類のモニタリングや環境影響評価、自然再生の効果検証に重要な視座をもたらすものである。

## (2) 河道掘削等の人為的改変に対する植生・魚類等の応答予測技術の開発

直轄河川については、河道掘削等の人為的インパクトを最小化し、河道掘削後の水域・陸域環境の生物多様性の向上、維持管理の簡素化に資する河道掘削方法の開発を行った。

陸域では、河道掘削による砂礫河原再生と樹林化抑制を低コストで行うために、旧流路部を活用し洪水流を陸域へ導水する水路掘削と平面掘削の併用による砂礫河原再生を国道交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所と共同で平成 28 年度に実施し、同掘削法に一定程度の有用性があることを確認した。平成 29、30 年度は、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）画像を人工知能 AI（Artificial Intelligence）を用いて分析し、植物群落界の自動検出と表層土壌材料の判読および、その結果を活用した植生図の自動作成技術の可能性を検証した。平成 29、30、令和元年度は、PCC（Plant Community Cluster）植生動態モデルの構築と、中小面積の植生群落の遷移の再現性の向上による同モデルの改良、急流河川への適用による同モデルの実装性の確認を進めた。令和 2、3 年度は、航空レーザ測量成果を用いた植生のモニタリング法として、植生の繁茂域を識別する河川景観判読 AI と、維持管理費の算定根拠の一つになる樹木体積の推定技術の開発を進めた。河川景観判読 AI は、河川環境管理に求められる植物群落、群集レベルでの自動判読を念頭に、自然裸地、草地などの景観要素の判読が可能な AI を、ランダムフォレストを技術のベースとして開発し、九頭竜川における試行から一定程度の判読精度を有することを確認した。また、樹木体積の推定技術の開発は中国地方整備局浜田河川国道事務所と共同で実施し、高津川の直轄管理区間を対象に実装性を確認した。

水域では、現在は魚類等の生息環境を考慮するなどのため、主に平水位以上での河道掘削が実施されているが、今後は魚類の生息・産卵環境に重要な河床を含む低水路河道掘削が増大することが想定される。そのため、河川整備に伴う低水路掘削に際し、魚類生息環境の保全を図るため、魚類生息・産卵環境とリーチスケールでの河床地形・底質との関連性を評価・把握することを目的として研究を実施している。平成 28 年度は、ウグイを対象に、河川水辺の国勢調査結果と、物理生息場モデルによる平均合成適性値及び交互砂州の形成領域区分パラメータ  $BI^{0.2}/H$  との関係を検討した。平成 29 年度は、魚類生息場などの河川環境上重要な河床地形の alcove の内、底質が悪化しサケ産卵床数が減少していた alcove の産卵環境を改善のため、主流路から導水するための小規模掘削を実施し、その有効性について検討した。その結果、サケの産卵環境改善としての掘削路造成の有効性

について確認した。また、別の河川において、低水路掘削後の河床変動により形成された分流地形と砂州前縁部において河床間隙水温を計測、分流地形が水温環境としてはサケ卵の発眼生育環境に適していることを確認した。平成 30 年度は、平成 29 年度に引き続き、豊平川において小規模掘削路造成箇所を追跡調査を行った。この試験地は平成 29 年に試験掘削を実施した後にサケ産卵床数の増加がみられたものの、平成 30 年のサケ遡上期前に増水により掘削路が閉塞した。閉塞後の平成 30 年度の産卵床数は、掘削以前の水準に戻った。閉塞後も alcove 内に一定の流速があったが平成 29 年と比較すると遅くなり、河床表面粒径には大きな変化が見られなかった。alcove 上流部付近の水深は浅くなった。以上から、産卵床の減少は流速、水深の変化も要因の一つにあると想定され、小規模河道掘削の必要性が示唆された。令和元年度は、豊平川のサケ産卵床における生卵率と水質等の関連について調査した。産室の DO が低い産卵床の生卵率は低く、DO が生卵率の低下に影響を与えた可能性が高く、また産室の電気伝導度が高いことが生卵率の低下につながった可能性がないとは否定できない結果が確認された。このように豊平川でサケが多数産卵する区間内でも、主流路や副流路など、大きく区分したエリア毎に地下水の影響などで河床間隙水の水質・水温の特徴が異なることが明らかになった。令和 2 年度は、産卵床における生卵率と産卵環境との関係について分析するとともに、サケ産卵床として重要な砂州微地形の形成過程を明らかにするために、数値実験による単列砂州地形の変化過程を把握確認し、実際の河道微地形との類似点などについて、考察を行った。令和 3 年度は、サケ産卵環境に重要な浸透流環境を把握し、分流部の産卵環境のモニタリングを実施した。以上を踏まえて、増水時の変動状況など、分流部の維持管理方法等について考察した。

中小河川では、河川計画から河道設計までを一体的に行うツールとして、「三次元の多自然川づくり支援ツール」を開発することを目的とする。平成 28 年度は、河道の三次元地形を迅速に処理可能な河道地形編集特化型ツールのプロトタイプを開発した。同時に、河川環境評価ツール (EvaTRiP) の開発を行い、植物流出評価や魚類生息場評価の機能を整備した。平成 29 年度は、河道地形編集特化型ツールのプロトタイプの改良を行った。平成 30 年度は、三次元地形編集ができるプロトタイプをベースとして、iRIC ソフトウェアを基本ソフトウェアとする河川横断面での設計が可能な河道地形編集ツール (RiTER Xsec) の開発を行った。令和元年度は、河道地形編集ツール (RiTER Xsec) の機能を強化し、i-construction に対応できる開発を進めた。令和 2 年度は、EvaTRiP をベースに専門家から河川管理者まで様々なレベルのユーザーのニーズを満たす高度な河川環境評価を可能にする河川環境評価ツール (EvaTRiP Pro) の開発を行った。令和 3 年度は、開発した一連のツールについて広報活動を充実させ、普及に努めた。

### (3) 治水と環境の両立を図る河道掘削技術・維持管理技術の開発

本研究は、維持管理上有利な河道掘削技術の開発を目指して、低水路掘削河道の河床変動応答特性の把握を目的に実施している。平成 29 年度は、単列砂州発生領域における河道を部分拡幅した際に生じる砂州地形の形成状況を調べる移動床実験を実施した。実験は河道幅に対し拡幅後の幅を 1.8 倍とし、拡幅延長を河道幅の 5 倍から 30 倍までの 4 ケースで行った。今回の実験条件下では、自由砂州 (単列砂州) が拡幅によって形成された強制砂州の影響を受けずに一定速度で移動するケースが観察された。また、平面二次元流況計算により、流量低下後の水深流速を把握した結果、側壁と自由砂州に挟まれた部分に深掘れ箇所が見られ、流速がほとんどみられない部分の形成が見られた。これは、水生生物の生息場や産卵場として重要な機能を有している alcove 地形が形成される可能性が示唆された。平成 30 年度は、低水路河道内で底泥が堆積した水裏部 (alcove) の底質改善および流況改善のために実施した小規模河道掘削の効果を検証するため、平面二次元河床変動計算を行い河床粒径の変化などを計測した。その結果、小規模河道掘削を行わない場合では底泥の洪水時のフラッシュと再堆積を繰り返すこと、小規模河道掘削を実施した場合は比較的小規模な洪水でも底泥をフラッシュさせることが分かり、河道掘削の優位性が認められた。令和元年度は、効率的な維持管理の観点からも、中長期的に維持可能で適切な河道断面の設定について、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌河川事務所と共同で検討した。その結果、流下断面の拡大を図る必要があった豊平川を対象に、長期的に安定し得る川幅を検討した上でサケ産卵可能な敷高と樹林化抑制を図るための敷高をそれぞれ設定して掘削した。その際、掘削しない場合と掘削した場合とを河床変動計算及び物理予測モデル (PHABSIM) により比較して、サケ産卵可能域の維持が図られる事について、予測確認した。

令和3年度は、河道掘削から1年後の掘削箇所河床間隙水質などのモニタリング調査を実施し、掘削面における産卵床位置との比較を行い、掘削の影響を把握した。また予測計算により、掘削による陸域と水域の高低差の拡大抑制などの効果について確認し、維持管理、ライフサイクルの課題を検討した。

陸域においては、河川中流域（扇状地河川、セグメント1）の砂礫河原を対象に、洪水営力の活用による砂礫地から草地等への植生遷移の緩和が期待できる河道掘削法を検討した。平成30年度は、ビッグデータを用いたネットワーク分析から、樹林化に至る河川景観の特徴を抽出する技術を構築した。また、アンサンブル予測技術を植生動態モデルに適用することで、洪水による植生遷移の不確実性について多面的に検討し、その成果は、梯川における河川整備の参考として活用された。令和元、2年度は、河川中下流域（セグメント2）を対象として、掘削方法ごとの土砂堆積と植物繁茂の特徴を施工事例等から明確化するとともに、掘削断面の持続性が期待できる河道掘削の実現に向けた断面設計フローを整理した。高水敷の掘削面に堆積する土砂の堆積速度を抑制するために、陸上掘削だけでなく、水中掘削を組み合わせた河道掘削を検討することの重要性を示した。さらには、治水機能を低下させる主因である河道内樹木に焦点をあて、治水・環境面での機能を満足しつつ、樹木の伐採・運搬コストの縮減への貢献を目指し、河道内植生の維持管理の進め方を検討した。令和3年度は、植生管理の効率化を目指し、河川の水位や流下能力を左右する一因であり、水理解析に用いるパラメータの一つである粗度係数を、航空レーザ測量成果と河川景観判読AIを活用して出力するプログラムを開発した。

中小河川では、効果的・効率的な河道計画・設計プロセスの提案、および、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの開発を行うことを目的とする。この課題に対し、令和元年度は、「3次元の多自然川づくり支援ツール」を含めた、事業規模に応じた効果的・効率的な河道計画・設計プロセスについて整理した。令和2年度、令和3年度は、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの開発として、バーチャルツアーと仮想現実を用いた環境予測・評価システムとして河川景観評価ツールを完成させた。



## DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE RIVER MANAGEMENT TECHNOLOGY CONSIDERING BOTH FLOOD CONTROL AND ENVIRONMENT

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Water Environment Research Group  
HATTORI Atsushi

**Research Group** : Water Environment Research Group, Cold-Region Hydraulic and Aquatic  
Environment Engineering Research Group

### **Abstract** :

We developed a technology to extract bases to be conserved in rivers. From the viewpoint of river landscape and recreational use, to reasonably develop a riverfront, it is desirable to select a section that is highly available to people and to carry out development and maintenance intensively. In this study, we investigated ten study sites that were actively used after the development and examined the evaluation axes contributing to extraction of high need sections. We obtained three evaluation axes, “enough space for activity,” “good landscape/natural environment,” “high availability from social environment around the river.”

Moreover, we performed a case study to materialize the evaluation axes. On studying ten waterfront areas, which were developed on one river, the evaluation index was found to correspond to that of the riverfront usage form. For example, areas for playing sports were located more than 1 km away from other parks, such that the functions of the sports ground do not conflict with those of the other parks. In "good landscape/natural environment", "high availability from social environment around the river." evaluation axes, case analyses of several rivers have provided important perspectives for identifying waterfront sites. From the viewpoint of living things, the conservation priority area was set as the conservation priority area where the communities are sustainably targeted for the plant communities to be preserved, and the distribution and formation conditions of these were clarified. We studied the occurrence tendency and habitat types for wading birds in both river and landside environments in Japan. As a result, the wader species, which inhabit inland freshwater bodies, have recently decreased in Japanese rivers. In addition, it was clear that wide paddy fields contributed significantly to the appearance of these waders. As a result, the environment required for the occurrence of waders changed with each season, and the importance of the surrounding environment such as rice paddies was significant for many species. This suggests the necessity of considering the seasonality and the arrangement of the surrounding environment for the conservation of wading birds in river areas.

UAV images were analyzed using AI (Artificial Intelligence) to automatically detect plant community boundaries and distinguish surface soil materials, and these results were examined on a potential to automatically make a vegetation map in FY2017 and 2018. The PCC Vegetation dynamics model was developed by FY2018, and was improved by applying to a river which has a steep riverbed slope in FY2019. The result applying to the Tedoru river showed the conventional model overestimated riparian forest areas, on the other hand, the improved model explained distribution of plant community clusters. In FY2020 and 2021, as a method for monitoring vegetation using aerial laser survey results, we developed a river landscape identification AI that identifies vegetation areas and a tree volume estimation technology that can be used as a basis for calculating management costs.

And we showed validity to channelize to connect sandbar with mainstream as rehabilitation of the salmon spawning habitat. In addition, we surveyed hyporheic temperature at the river after removed sand bar. It was confirmed that side channel is warmer than sandbar front. it means suitable for the salmon egg growth as the water temperature environment. To effectively promote the conservation and regeneration measures of the spawning bed environment, it is critical to analyze the survival rate of hatching salmon eggs towing to

the differences in river environments. Herein, to clarify the relation between the survival rate of hatching and environment in the spawning bed, the relation between the survival rate of salmon eggs up to the eyed-egg stage and water quality was investigated. Consequently, results showed that the low dissolved oxygen concentration likely decreased the survival rate up to the eyed-egg stage.

Also, we improved the prototype of the river channel topography editing model tool which can process the three-dimensional topography of the river channel. This tool will be able to facilitate the change of the topography shape on simulation and examine quickly some river channel topography plans. In addition, we improved the tool which can judge the external force carried away plant communities using the Washing Out Index (WOI) and the environmental evaluation of the habitat about general fish. Radical river development of small and medium-sized rivers is also carried out during disaster recovery, and how well the plan is planned in this situation It is important to be able to do so. However, it is difficult to pay attention to the environment and the use of the river because the project is carried out within a time constraint. Therefore, it is important to have a tool to support the creation of a multi-natural river that can give careful consideration to the environment and evaluate the project in a timely manner. It is required. Nowadays, 3D surveying technology and BIM are becoming more and more widespread, and the advantages of these technologies are being utilized in river development. It can not be said that the process of channel planning has been established. In response to this issue, we are proposing an effective and efficient river channel planning and design process that is appropriate to the scale of the project, as well as a new process that can be applied to the project. At the same time, we developed a tool to support the development of multiple natural rivers. In addition, we developed a new data management system for river BIM that combines the data archiving and management part with the actual The proposal was divided into two parts: the part that is operational at the construction site and the part that is operational at the construction site, and an arrangement that envisages mutual interaction.

In terrestrial areas, a channel excavation method was studied for a gravel-bed river in the middle reaches of rivers, which is expected to mitigate the vegetation transition from bare bar to grassland and forest, by utilizing flood forces. In FY2020 and 2021, we revealed characteristics of sandy materials accumulation and vegetation growth for each excavation method in the middle and lower reaches of rivers, and suggested a cross-sectional design method to realize river channel excavation that can be expected to sustain excavated shapes. Furthermore, focusing on trees in flood plain, which are the main cause of flowability reduction, the study examined how to proceed with vegetation management, aiming to contribute to reducing the cost of cutting and transporting trees while satisfying flood control and environmental functions.

Radical river development of small and medium-sized rivers is also carried out during disaster recovery, and it is important to know how well we can plan for this situation. However, it is difficult to pay attention to the environment and the use of the river because the project is carried out within a time constraint. Therefore, it is necessary to have a tool to support the creation of multiple natural rivers that can take into account the details and evaluate them quickly. At present, 3D surveying technology and BIM are becoming more and more widespread, but we have not been able to establish a river channel planning process that allows us to utilize the advantages of these technologies in river development. In response to this problem, we proposed an effective and efficient river channel planning and design process based on the scale of the project, and in parallel, developed a multi-natural river planning support tool for this process. In addition, we proposed a new data management system for riverine BIM, which is divided into two parts: one for archiving and managing data and the other for operation at the actual construction site.

**Key words** : *river channel excavation, control of woods over growth*, restoration of gravel riverbed, unmanned aerial vehicle, artificial intelligence, National Survey on River Environment, alcove, Plant Community Cluster, Vegetation Dynamics Model, Civil engineering Information Management

## 11.1 河川景観・生物の生育・生息場に着目した空間管理技術の開発

### 11.1.1 河川環境の保全・形成に資する拠点抽出・配置技術に関する研究

担当チーム：流域水環境研究グループ（流域生態）  
研究担当者：中村圭吾、鶴田舞、田和康太、尾崎光政

#### 【要旨】

人々の水辺利用及び生物の生育・生息場それぞれについて、優先的に取り組む地区の抽出手法の検討を行い、最終的に双方を勘案した利用・保全手法、及び適切な配置に関する手法を提示した。

河川の景観・利用の観点からは、人々の利用の可能性が高い「水辺拠点」を設定し、既存文献分析及び事例調査から、水辺拠点を抽出するための評価軸（案）を作成した。また、評価軸の指標化について5河川を対象に多変量解析を実施し、水辺拠点の抽出に重要な観点および考え方を検討した。

生物に関しては、保全対象とする植物群落を対象に、群落が持続的に成立する箇所を保全優先地区とし、これらの分布と成立条件を明らかにした。鳥類を対象とした保全優先地区の抽出技術の開発では、全国の一級水系を対象とした鳥類の出現傾向を精査し、特に河川環境における渉禽類の生息地タイプ別の現状を把握した。また、利根川水系における渉禽類の分布と堤内外地を含めた環境要因との関係性についてその季節性を考慮し、解析を行った。さらに実河川の野外調査に基づき堤内外の環境を踏まえた水鳥類の生息場評価を行った。

キーワード：河川水辺の国勢調査、ホットスポット、鳥類、植生基本分類、河川景観、水辺利用

#### 1. はじめに

陸水域における生物多様性の損失は、現在もその傾向が続いており、深刻な課題となっている<sup>1)</sup>。レッドデータブックのRL掲載種（1002種）のうち50%以上は、生活の全てもしくは一部を淡水域に依存するものである。現状では、洪水等の自然現象や河川の管理に伴い河川環境がどのように変化するか科学的に十分解明されていないが、河川環境の評価手法を確立させ、河川環境の管理目標を具体的に設定することが急務となっている<sup>2)</sup>。

目標設定していくうえで、環境の質が高い区間等は保全を前提とする必要があるが、自然環境、河川景観、人の利用の観点からこうした拠点的な区間を抽出する技術は確立されていない。例えば、平成26年3月に改訂された「美しい山河を守る災害復旧基本方針」（以下、「美山河」という）において自然環境、河川景観の観点から重点的に保全を図る区間・箇所（重点区間・箇所）が位置付けられ、これらの区間・箇所ではグレードを上げた災害復旧を行う道筋が示されたが、その具体的な抽出手法は未確立となっている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、①河川景観、人の利用から見た水辺拠点の抽出技術の開発、②生物の生育・生息場の視点から見た保全優先地区の抽出技術の開発、③生物の適正な生息・生息場配置技術の開発、の3つの達成目

標を設定し、河川景観、生物の生育・生息場の観点から環境の質が高い区間・箇所を保全すべき拠点と位置づけ、拠点抽出手法を開発する。また、生物については保全対象種が持続的に生育・生息するための生育・生息場の面積、配置に関する研究を行う。

本報告では、令和3年度までに実施した達成目標①（2章）、②（3章：植物・植生、4章：鳥類）及び③（5章）に関する研究内容・成果について述べる。

#### 2. 河川景観、人の利用から見た水辺拠点の抽出技術に関する研究

下記に示す手順で検討を行う。

- 1) 水辺拠点の評価軸の設定
- 2) 水辺拠点の評価指標の検討
- 3) 水辺拠点の抽出技術の開発

平成28年度は1) について、水辺空間整備事例及び既存文献等の調査・分析を行い、人々の利用の可能性が高い区間（以下、「水辺拠点」という）を抽出するための評価軸を検討した。平成29年度は2) のうち、水辺拠点の整備に必要な空間スペースを評価する指標について検討を行った。平成30・令和1年度は、残りの評価軸の指標化に向けた評価指標候補の検討を行い、令和2・3年度は、多変量解析を用い、評価指標の絞り込みを行ったうえで、こ

れまで検討した評価指標を活用した3) の検討を行った。

## 2.1 水辺拠点の評価軸の設定

### 2.1.1 方法

以下の手順で検討を行った<sup>3)</sup>。

#### 1) 事例調査

周辺の景観や地域整備と一体となった河川改修を行い、良好な水辺空間の形成が行われた事例の事業箇所における河川整備・事業計画や都市計画、景観関連法令の適用状況、景観資源等に関するデータを収集し、美山河の重点区間等の判断基準と比較した。

#### 2) 既往文献調査

既往の水辺空間整備計画に関わる指針<sup>4)~6)</sup>を参照し、水辺拠点として重点的に整備すべき場所として参考となる事項を整理した。

加えて、景観に係る環境影響評価のガイドライン<sup>7)~8)</sup>も参照した。環境影響評価では、評価対象事業の影響を人と自然との豊かなふれあいの観点から評価するために必要

な調査事項等が示されている。評価対象となる事業は予め決まっており、整備箇所の抽出に用いられるものではないが、水辺拠点の評価軸を漏れなく設定しているか確認する上で参考とした。

文献調査の結果と1) の結果を比較し、水辺拠点の評価軸(案)を作成した。

### 2.1.2 事例調査結果

各事例の事業実施箇所に関する事項を表-1にまとめた。

美山河の重点区間の判定基準に該当する事例は一乗谷川のみであった(表-1参照)。景観法の制定(2004年)以前の整備事例が多いことも影響していると思われるが、重点区間の条件のみでは利用ポテンシャルの高い場所の抽出には不十分と言える。そこで、評価軸の検討に資するため、各事例における特徴的な景観・自然環境についてもまとめた。

重点箇所の判定基準は、表-1中「①または②のいずれかに該当し、かつ特別な配慮が必要と判断される箇所」で

表-1 水辺空間整備事業の実施箇所に関する事項

対象河川	茂流川	横手川	子吉川	阿武隈川	和泉川	一乗谷川	糸貫川	太田川	津和野川	白川	
事業名称(事業期間)	ふるさとの川モデル事業(1990-1997)	ふるさとの川モデル事業(1988-2001)	癒しの川整備事業(1998-2002)	渡利水辺の楽校整備事業(1995-2000)	ふるさとの川整備事業(1990-1997)	ふるさとの川整備事業(1995-1999)	北方町あすまちづくり(2014-2015)	基町環境護岸整備事業(1976-1983)	ふるさとの川モデル事業(1991-1996)	緑の区間河川整備事業(2006~)	
重点区間	景観関連法令における景観重要地域	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	自然環境関連法令の重要地域	×	×	×	×	○(特別名勝)	×	×	×	×	
その他特徴的な景観・自然環境	旧河道の河畔林が市街地内に残存(家屋敷) 湧水が水源で水質が良い 在来の動植物による良好な自然環境を形成	城下町の風情(段丘の斜面) 鳥海山横手城址を眺望 市内を大きく蛇行しながら流れる 大淵、小淵、ケヤキ等の河岸樹木	右岸背後に河岸段丘の斜面 水際のヤナギ、ヨシ群落が自然土壌を形成 かつて柔らかな印象	アシが生い茂る河原 信夫山、弁天山を眺望 かつて福島河岸があり、隣接する蔵こ米を運んでいた	台地を刻んだ谷戸 台地崖線の斜面林 農地、農家の付帯(農村的景観)	山間に囲まれた細長い谷地形 高度成長期前は笹が乱舞していた 一乗谷城の外堀として利用していたと思われる石垣の出土	清流の水質 伊弉山を眺望	山並みが川面に映える 良好な河岸緑地 原爆被災した石積み水割 干満により干涸が出現、消失 雁木(船着場) 原爆ドームを眺望	城下町の面影を残す武家屋敷 史跡、名勝等に観光客が集まる 町並みの屋根に石州瓦が用いられている 堀割の水路や川に鯉が泳ぐ 青野山を眺望	大甲橋からの眺望(川面に映る橋の緑と遠景の立木)は「森の都田山」は「森の都くまもと」を象徴 熊本城の外堀として機能していた 石積み護岸 山火が流下	
重点箇所	①市街地(人口集中地区; DID地区)	○	○	△(一部区間)	○	△(一部区間)	×	×	○	○	
	①市街地周辺部(市街地から5km以内)	○	○	○	○	○	×	○	×	○	
	②学校・公園・病院等の公共施設が存在(1km以内)	○(小学校、公園等)	○(小学校、病院、市役所等)	○(病院、市役所、駅等)	○(小学校、県庁等)	○(小学校、公園等)	○(小学校等)	○(小学校、公園等)	○(公園等)	○(小学校、病院、駅等)	○(小学校、公園等)
	②史跡・歴史的記念物等が存在(1km以内)	×	○(県有形文化財、城址等)	○(県有形文化財)	○(城址、御倉邸)	×	○(国特別史跡等)	×	○(世界遺産、国史跡等)	○(国史跡等)	○(市有形文化財)
川と地域の関わり	河道改修により直線化・コンクリート化 柵があり近寄りづらい 急速な市街地化から旧河道の自然を保全(市まちづくり計画)	送り盆祭り、カマクラ等観光客が集まる 施設整備されておらず日常生活に少ない 川とふれあうまちづくり(市中心市街地活性化計画)	ボートや釣り等市民と川のつながりが容易 隣接する医療施設がリハビリ等で河川利用 堤防天端にサイクリングロード	県庁前の福島市の顔となる場所 植生に阻まれ水際近くに近づけず利用が困難 川を軸としたまちづくり計画	河道改修により矢張護岸の直線化 水際に近づけず日常生活に少な 斜面林保全制度(市) 川を軸としたまちづくり計画	地域住民の生活との関わりが容易 川の整備と並行して史跡の発掘及び復元(県)、公園化事業(市)	土地区画整理事業、公園整備構想(町)	戦災復興の区画整理による緑地(公園)整備計画 に河岸緑地も位置づけ(市) シジミ獲り等市民に親しまれる場所	灯籠流し 川沿いに点在する観光施設をつなぐ動線があり、水際付近に歩道が少ない 伝統的文化的都市景観保存地区に指定(町条例)	花見の場所 水際に近づけず日常生活に少ない 川幅が狭く治水上のネック箇所 市に親しまれる 都市景観保存地区に指定(町条例)	
ポテンシャル	河岸に利用可能なスペースがある		○(高水敷:祭り等で利用)	○(高水敷)	○(鏡川原、高水敷)			○(高水敷)	○(高水敷)		
	沿川に取り込める敷地(公園、緑地等)がある	○(旧河道、河畔林)				○(斜面林)	○(史跡公園)	○(公園整備予定箇所)		○(観光施設)	

あり、多くの人の目に触れる可能性が高い場所等が想定されている。全ての事例が①または②に該当しており、重点箇所<sup>②</sup>の判定基準は利用ポテンシャルの高い場所の抽出に寄与していると言える。②のうち、実際に拠点整備時に考慮されたものについて、表-1 中に下線を引いてある。

また、著者らの既往調査<sup>9)</sup>では、水辺拠点の整備方針の検討過程において、川と地域の状況及び人々と川との関係を、過去から将来への時間軸で把握・予測することが重要であることを示している。そこで、各事例における“川と地域の関わり”（日常・イベント利用、アクセス性、整備課題、まちづくり関連計画等における川の位置づけ等）についても整理した。さらに、“河岸空間の利用ポテンシャル”についても記載した。

### 2.1.3 既往文献調査結果及び評価軸（案）の作成

既往の水辺空間整備計画に関わる指針において、水辺拠点として重点的に整備すべき場所として挙げられていた事項を図-1 内に●印で示す。●印の事項と 2.1.2 の事例調査の結果は対応関係が見られたことから、評価軸（案）とした。

2.1.2 の事例には見られたものの、指針<sup>4)~6)</sup>では言及されていなかった事項は、

- ・ 「その他特徴的な景観・自然環境」における地域を象徴する眺めや眺望点（代表的な眺望点の一つである橋・橋詰については指針6）に記載あり）
- ・ 重点箇所<sup>②</sup>の判定基準<sup>②</sup>に関するもの
- ・ 「川と地域の関わり」における川周辺の動線
- ・ 「河岸空間の利用ポテンシャル」における、河岸の利用可能スペース

であった。4点目はそのまま評価軸に設定した。他の3項目については、景観に係る環境影響評価のガイドラインに書かれている調査事項を参照し、「地域を特徴付ける眺め」、「不特定多数の人が集まる場所」、「利便性・利用性が高い場所」と名付けて評価軸（案）とした。図-1 内に下線を引いて示す。なお、「地域を特徴付ける眺め」は、評価軸（案）「自然風景として質の高い場所」の中にまとめた。

### 2.1.4 評価軸（案）の取りまとめ

2.1.3 で得られた 11 の評価軸（案）を3つに区分した（図-1）。まず、拠点整備に必要な空間スペースがあることが重要であり、これを評価軸群【1】として「河岸空間の利用ポテンシャル」の2つの評価軸を当てはめた。

次に、川と地域の利用ポテンシャルを景観・自然環境（評価軸群【2】）と社会環境（同【3】）に分け、該当する評価軸を振り分けた。評価軸群【2】のうち、法令等で保全が指定されているものが美山河の重点区間に該当する。後者は【3-1】背後地の利用可能性、【3-2】川と地域の関わりに細区分した。重点箇所に関連するものは、【3-1】及び【2】b)の「歴史的な街並みや構造物」である。

2.1.2 の事例は全て評価軸群【2】・【3】の双方に該当していたが、【3】については【3-1】【3-2】のいずれにしか該当しないものもあった。例えば郡武隈川の事業箇所は、県庁前の福島市の顔とも言える場所だが、高水敷に植生が繁茂しており人々の利用が困難であった（【3-2】に該当しない）。この課題を改善すべく整備方針が策定された。

なお、各評価軸は必ずしも独立ではないが（例えば、干潟は“自然風景として質の高い場所”、“自然環境が良好な場所”の両方に記載がある。太田川では干潟でジミ獲り

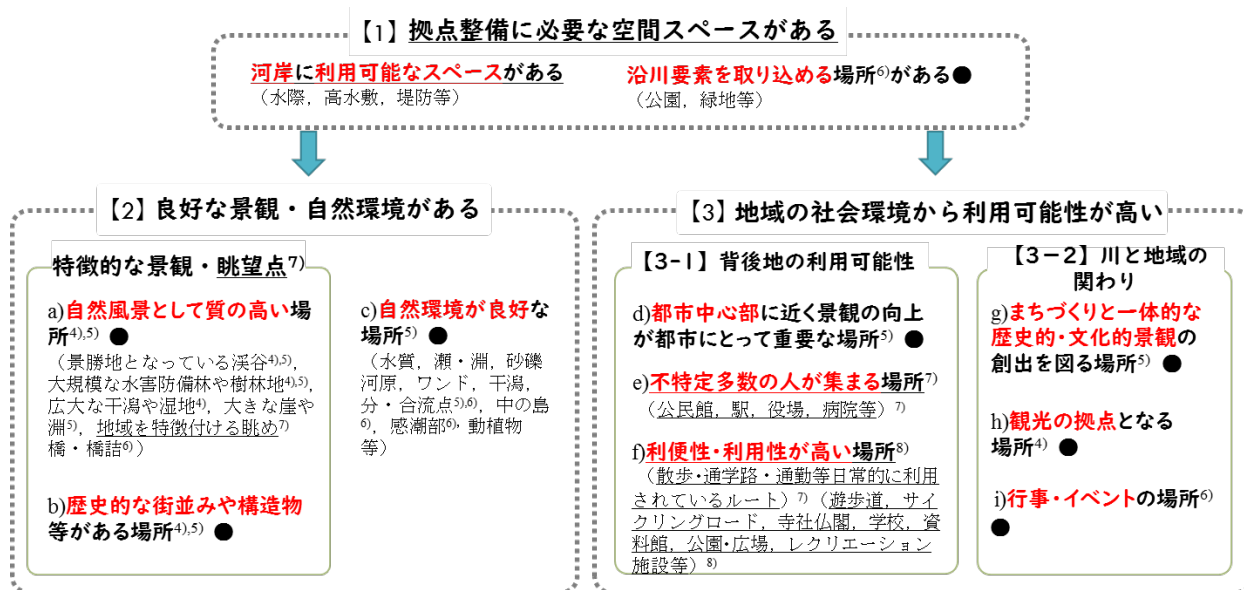


図-1 水辺拠点の抽出に資する評価軸（案）



が行われており、“まちづくりと一体的な文化的景観の創出を図る場所”とも言える)、利用ポテンシャルの高い場所をできるだけ漏れなく抽出することに重点をおいて取りまとめた。

2.2 水辺拠点の評価指標の検討

2.2.1 整備に必要な空間スペースに係る評価指標

3次元的な広がりを持つ空間のうち、河岸横断面形状に着目し、整備に必要な河岸空間の広がりやを簡易に評価する指標について検討した<sup>10)</sup>。

(1)方法

河川区域のうち平水時に水に浸からない範囲を“河岸空間”と呼び、検討の対象とした(図-2)。水平方向の広がりWは、河岸空間を構成する高水敷、護岸、堤防、管理用通路等の水平幅の合計値、水面からの比高Dは平水位面から河岸空間の最高高さ(堤防天端高または堤内地盤高)と設定した。2.1と同様の事例を対象とし、各事例から横断面を1箇所選定して、W、D及びW/Dを算定した。対象事例の概要を表-2に示す。

比較対象として、各事例の河川改修計画において、計画高水流量を流しうる標準的な横断面(以降、「標準断面」という)(勾配 1:0.3~1:2 の単断面または複断面)が設定されていた場合(茂漁川、和泉川、一乗谷川、津和野川)には、同様にW/Dを算定した。一乗谷川の横断面図の例を図-3に示す。

(2)結果

各事例におけるW-D関係を図-4に示す。図中の数字はW/Dの算定値である。整備後のW/Dの範囲は6.0~19.3であった。一方、河岸幅が広がられた事例(茂漁川、和泉川、一乗谷川、津和野川)における標準断面のW/Dは1.5~3.2であり、両者の間に河岸空間の利用ポテンシャルを分ける境界があるものと考えられる(図中に記載したW/D=5のライン辺り)。W/D=5は、河岸空間が全て緩勾配斜面で形成されていると仮定した時の勾配1:5に相当する。勾配が1:5より緩くなると、利用率と利用形態(人の活動種類)が増加すると言われており<sup>11)</sup>、利用ポテンシャルの

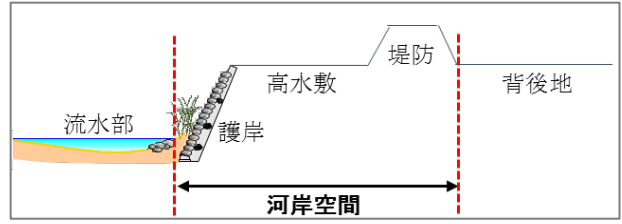


図-2 “河岸空間”の対象範囲

表-2 対象事例とその概要

調査対象	流程	河川規模(川幅)	横断形状
石狩川水系 茂漁川 (北海道恵庭市)	中流域	中小河川 (16~50m)	堀込
雄物川水系 横手川 (秋田県横手市)	上流域	中小河川 (65~135m)	堀込 (一部築堤)
子吉川水系 子吉川 (秋田県由利本荘市)	下流域 (感潮域)	直轄河川 (90~150m)	築堤
阿武隈川水系阿武隈川 (福島県福島市)	中流域	直轄河川 (190~220m)	築堤
境川水系 和泉川 (神奈川県横浜市)	中流域	中小河川 (15~40m)	堀込
九頭竜川水系一乗谷川 (福井県福井市)	上流域	中小河川 (10~12m)	堀込
木曾川水系 糸貫川 (岐阜県北方町)	中流域	中小河川 (23~90m)	堀込
太田川水系 太田川 (広島県広島市)	下流域 (感潮域)	直轄河川 (130~160m)	築堤
高津川水系 津和野川 (島根県津和野町)	上流域	中小河川 (30~40m)	堀込 (一部特殊堤)
白川水系 白川 (熊本県熊本市)	下流域	直轄河川 (75~80m)	特殊堤

境界位置と相応する。

表-3には、事例調査を通じて得られた設計の自由度及び利用形態と、利用ポテンシャル(W/D)の対応を整理した。W/Dが大きくなると、管理用通路・散策路に加え緩勾配斜

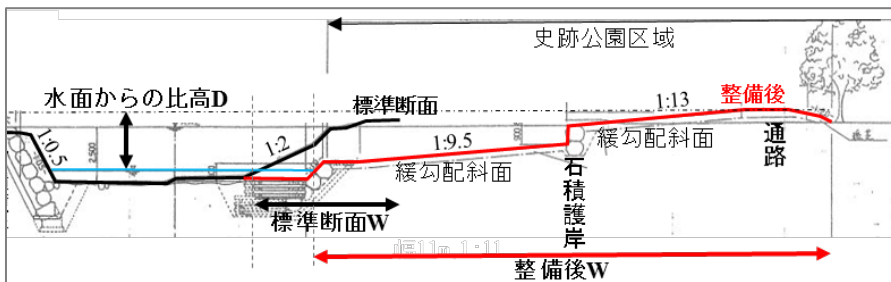


図-3 一乗谷川整備箇所での代表的な横断面及び写真



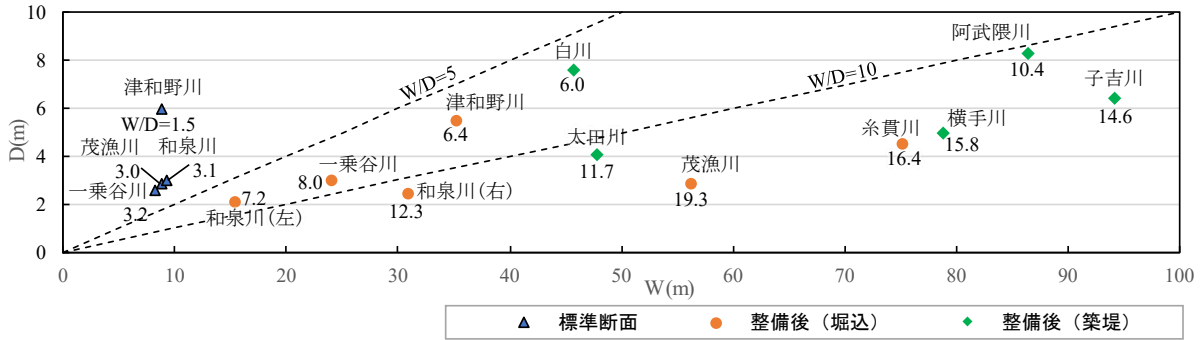


図-4 代表横断面のW-D関係及びW/Dの算定結果

面や平場の形成が可能となり（設計自由度の向上）、それに伴って利用形態が増加している。以上より、河岸空間の広がりや表現したW/Dは、水辺拠点整備の目安となる空間スペースを評価する指標（評価軸a、b共通）として適用性があると考えられる。

なお、W/Dが小さい場合、堤内地と一体的な整備（沿川要素を取り込む）を検討する（Wを増大させる）ことで、利用ポテンシャルが増大し、様々な利用形態に対応する空間の形成が可能になると言える。一方、水面との比高Dが大きいと、利用ポテンシャルは減少する。Dが大きくなる要因は主に河川規模と河川改修による河道掘削であり、Dを減少させることは現実的ではない。白川のように、勾配を立てた断面を設定する等によりできるだけ狭い幅で高低差を付け、利用ポテンシャルを変化させずに平場や緩勾配斜面の設置スペースを生み出すことが考えられる。なお、護岸の設計基準や人間工学の観点（見えの面積や仰角の大きさが圧迫感を与える<sup>12)</sup>）から、高低差の付け方には限度がある。

2.2.2 景観・自然環境及び生活環境に係る評価指標

図-1に示す評価軸群【2】及び【3】について、残る9つの評価軸の指標化を検討した。

(1)方法

実河川のデータを用いたケーススタディを行った。評価軸群【2】及び【3】に関連する指標候補を熊本県・緑川の資料から設定し、それら候補をデータ取得の容易性等を勘案したうえで、複数河川を対象に水辺拠点を判別しうる評価指標及び重要度の分析をした。

1) 評価指標候補の作成

評価指標の作成にあたり、候補となる項目の選定は熊本県・緑川の国管理区間をモデルとして実施した。緑川では、「緑川水辺空間計画（案）」<sup>13)</sup>が策定されており、地域の歴史や自然環境、利用、景観等の基礎情報が「緑川水辺空間マップ」（以下、「マップ」という、計14枚）にまとめられている。マップに掲載されている情報の出典は、河川

表-3 利用ポテンシャルと設計・利用形態の対応整理

利用ポテンシャル	設計の自由度	利用形態
W/D ≤ 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>①管理用通路（天端）+ 1:2勾配斜面</li> <li>【一乗谷川・茂漁川標準断面】</li> <li>②管理用通路（天端）+ 積み護岸+散策路（水際）</li> <li>【和泉川・津和野川標準断面】</li> </ul>	管理用通路・散策路： ・ <b>拠点利用</b> （風景鑑賞、釣り等） ・ <b>線的使用</b> （散策、ジョギング、サイクリング）
5 < W/D ≤ 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>③上記①の斜面勾配を緩くする（1:5~1:10勾配）</li> <li>【和泉川(左)】</li> <li>③に加えて平場（1:10勾配より緩い）（天端または水際）</li> <li>【津和野川・一乗谷川】</li> <li>上記②に加えて平場（天端または水際）</li> <li>【白川】</li> </ul>	上記に加えて、斜面（1:5~1:10勾配）： ・ <b>拠点利用</b> （座る、寝転がる、休む） ・ <b>線的使用</b> （歩いて上り下りする） 平場（1:10勾配より緩い）： ・ <b>線的使用、拠点利用</b> （レクリエーション、イベント等） ・ <b>河岸空間を全体的に利用</b> （複合的活動）
10 < W/D	上記に加えて、 ・平場や緩傾斜斜面、散策路（高水敷） 【茂漁川・横手川・子吉川・阿武隈川・糸貫川・太田川】	上記に加えて、 ・ <b>線的使用</b> （自由な動線での移動、散策） ・ <b>拠点利用</b> （ピクニック、野草摘み、スポーツ等）

整備計画、河川水辺の国勢調査（以下、「水国」という）、水系の歴史調査業務報告書等である。

評価指標候補は、図-1の評価軸に沿って設定し、88の指標を候補とした（図-5）。参照したデータはマップの他、水国<sup>14)</sup>、水質調査<sup>15)</sup>、国土数値情報、国勢調査、全国道路・街路交通情勢調査、地方公共団体等の公表資料とした。

2) 評価指標の選定

前項で作成した88の評価指標に対し、複数河川のデータを用いた多変量解析により、水辺拠点を判別するうえで重要な指標の選定を行った。

ケーススタディに用いた河川は緑川のほか、流域の都市化の状況や地域のバランスを考慮し、5河川（緑川、那珂川、木曾川、吉野川、千曲川）を対象に実施した。

<p><b>【2】 良好な景観・自然環境</b></p> <p>a) 自然風景として質の高い場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・特徴的な景観</li> <li>・橋からの眺め</li> <li>・自然公園の面積</li> </ul> <p>b) 歴史的な街並みや構造物等がある場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・歴史的施設</li> <li>・史跡、文化財</li> </ul> <p>c) 自然環境が良好な場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・水質指標 (BOD75%値)</li> <li>・瀬淵、干潟、湛水区間、感潮区間等河道特性</li> <li>・生物の生息地</li> <li>・重要種</li> <li>・遊水地や水源地</li> </ul>	
<p><b>【3-1】 背後地の利用可能性</b></p> <p>d) 都市中心部に近い</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・人口総数、密度</li> <li>・D I D面積、市街化区域面積</li> <li>・土地利用種別面積</li> </ul> <p>e) 不特定多数が集まる場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・公共施設 (役場、病院、公民館、図書館等) からの距離</li> </ul> <p>f) 利便性・利用性が高い場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・周辺道路からのアクセス性</li> <li>・バス停、鉄道駅、ICからの距離</li> <li>・日常的に利用する施設 (学校、都市公園) からの距離</li> </ul>	<p><b>【3-2】 川と地域の関わり</b></p> <p>g) まちづくりと一体的な文化的・歴史的景観の創出を図る場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・河川利用施設</li> <li>・都市マス、景観計画等に記載の地域資源との関係</li> </ul> <p>h) 観光の拠点となる場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・観光施設からの距離</li> </ul> <p>i) 行事・イベントの場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・イベント利用</li> </ul>

図-5 景観・自然環境及び生活環境に係る主な評価指標候補

判別する水辺拠点は、「川の通信簿」<sup>16)</sup>実施箇所に加え、水国 (河川空間利用実態調査) の対象となっている定点区間に設定されている地点のうち、水辺整備が行われている地点とした。また、水辺拠点との比較対象として1km毎の距離標地点 (以下、「代表点」と呼ぶ) を設定した。代表点のうち水辺拠点到近接しているものについては、水辺拠点と比較対象との特性の違いを明確に分析できるようにするため、水辺拠点の1km圏域と重なる1km圏域を持つ代表点は分析から除外した。これら「水辺拠点」、「代表点」を目的変数とし、両者を判別するためのモデルの作成を行った。

説明変数について、多変量解析を行う前に、前項で作成した評価指標候補のうち、現場での適用を想定し、容易にデータを取得することが難しい変数を取り除いた。また、今回、人々の利用の可能性が高い区間の環境ポテンシャルを計測する指標を開発する目的から、分析が現況の利用状況に左右されないよう、図-5 の評価軸 i に相当する利用者数やイベント開催状況といった現況の空間の利用にかかる変数も取り除いた。その結果、評価指標候補を30変数に減らし、これらの変数を用いて各河川を対象に多変量解析を行った。

多変量解析にはランダムフォレスト法を用いた。実行する前に、各説明変数間の相関係数が0.7以下 (あるいは-0.7以上) になるよう変数の絞り込みを行い、そのうえでランダムフォレストを実行し、対象の各河川における重要な特徴量の選定を行った。特徴量の変数重要度の解析にあたってはR version 4.1.0 の Boruta パッケージを用い、統計的有意性の水準を0.01、解析回数を100回に設定し

た。

また、Boruta により重要とされた変数に対しては、random Forest パッケージを用い、各説明変数の部分従属プロットを実行した。これは、他の説明変数の作用を平均化してその影響を除去することで、把握したい説明変数が目的変数に与える効果の正負を把握するものである。

(2) 分析結果

1) Borutaによる抽出結果と考察

多変量解析の結果、対象5河川のうち、複数の河川で重要であると示された特徴量の相対重要度を図-6に示す。

ほぼすべての河川 (4河川以上) で有意に重要とされ、候補とされた変数の中で一番重要であるとされたのは「都市公園からの距離」「1km圏域内の人口総数」「観光地からの距離」の3変数であり、ついで大半の河川 (3河川以上) で有意に重要とされたのは、「河川利用施設の有無」「橋からの距離」の2変数であった。

また、「1km圏域内の史跡文化財の個数」「小学校・幼稚園・保育園からの距離」「博物館・図書館等からの距離」「1km圏域内における都市計画区域面積」「BOD75%値」「W/D」は、先の5項目ほど有意で重要である河川数が多いものの、いずれかの河川で有意に重要な指標とされた。

一方で、図-5 の評価軸 f に相当する、交通量や最寄りの鉄道駅、バス停、ICからの距離などの交通の利便性に関する指標は重要とはならなかった。

2) 抽出変数の傾向

各河川とも後背地の土地利用等の社会環境や自然環境の性格が大きく異なるため、これら指標に対してすべての河川に一律に適用できるしきい値を設けることは困難だが、説明変数の部分従属プロットを行うことで、説明変数が水辺拠点到与える効果の正負を把握することは可能である。

図-7 は一例として那珂川の「観光地からの距離」にお

	那珂川	緑川	千曲川	吉野川	木曾川
河川利用施設の有無	0.685 *	0.602 *	0.429 *	0.265	棄却
史跡・文化財の個数(1km圏内)	0.386 *	0.194 *	棄却	棄却	棄却
橋からの距離	0.447 *	1.000 *	棄却	0.590 *	棄却
博物館・図書館等からの距離	0.373 *	0.439 *	0.233	0.424	棄却
小学校・幼稚園・保育園からの距離	0.226 *	0.266 *	棄却	棄却	棄却
都市公園からの距離	1.000 *	棄却	0.326 *	0.624 *	1.000 *
人口総数(1km圏内)	0.706 *	0.200 *	0.278	0.778 *	0.692 *
都市計画区域総計(1km圏内_単位:ha)	0.136	棄却	1.000 *	0.401	棄却
観光地からの距離	0.773 *	0.107	0.331 *	1.000 *	0.810 *
W/D	0.147	棄却	棄却	棄却	0.882 *
BOD75%値	棄却	棄却	0.508 *	棄却	0.393

図-6 対象5河川における相対重要度。各河川において最も重要な指標の特徴量を1とした相対値で示した。有意であった変数はアスタリスクで示した (Boruta, P<0.01)



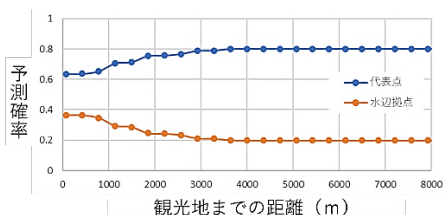


図-7 部分従属プロットの例 (那珂川 観光地からの距離)

ける部分従属プロットの結果である。横軸に水辺拠点と観光地との距離をとり、青色の線は水辺拠点として選択される確率を示している。グラフから見て取れるように、この場合、観光地の距離が遠くなるほど、その地点が水辺拠点として選定される確率が低くなることを示している。

今回、選定されたすべての変数に対し、河川ごとに部分従属プロットを行った結果、重要な施設や観光資源との距離が近いほど、あるいは、その個数が多いほど水辺拠点に正の影響を与えるという結果が得られた。ただし、「1km圏域内における都市計画区域面積」については面積の大小による明確な傾向が見受けられなかった。

これらから、水辺拠点としてのポテンシャルの高い場所は、周辺の人口が多いことのほか、公園や文教施設、観光資源に近く、それらとの回遊が期待される地点や、多様な利用のために十分なスペースが取れること、親水性を感じられるため水質条件が満たされていることが重要であることが明らかになった。

3) 利用可能性が高い水辺拠点を評価する指標の提案

以上より、複数河川で重要とされた11変数のうち、面積の大小による明確な傾向が見受けられない「1km圏域内における都市計画区域面積」を除いた10変数を利用可能性が高い水辺拠点を評価する指標案として提案した(図-8)。図中で「★」をつけた5指標は、多変量解析の結果、大半の河川で有意に重要とされており、水辺拠点の選定の際には特に重要な指標とした。その他の5指標については、それらに次いで水辺拠点の選定の際には参考とされるべ

き指標とした。

図-1で示した評価軸との対応を照らし合わせてみると、評価軸群【1】は「W/D」、評価軸群【2】に対応する指標として「橋からの距離」「BOD75%値」等、評価軸群【3】に対応する指標として「人口総数」「文化財」「公共施設との距離」等と、分析前に除いた評価軸iに関するもの以外の評価軸それぞれに対応する変数が抽出されており、水辺拠点の抽出に資する評価軸との対応関係を確認した。

2.2.3 利用可能性の高い水辺拠点の選定の進め方

1) 那珂川における視覚化のケーススタディ

今回提案した評価指標にはしきい値を設けなかったことから、地図上に評価指標の分布を図示化することにより評価指標の妥当性を試みた。

試行は那珂川をモデルケースに実施した。図-8で示した評価指標案のうち、施設位置に関する指標(「文化財」「橋」「公共施設」「学校」「都市公園」「観光資源」)については、その位置を地図上にプロットした。また、「1km圏内の人口総数」は、便宜的に「1km圏域内におけるDID地区面積」により図示化した。両変数の那珂川における相関係数は0.97であり、非常に高い相関性を有しており、代替で図示化しても問題ないと判断した。上記の指標をプロットした地図の抜粋を図-9に示す。

また、「W/D」「BOD75%値」「河川利用施設の有無」は、目的変数とした距離標地点ごとに情報があるため、距離標に沿った1kmおきの情報をプロットした。一例として「河川利用施設」の結果を図示した地図の抜粋を図-10に示す。

これら表示した評価指標の情報と、すでに水辺拠点として活用されている地点との関係性について考察すると、以下のことが考えられる。

今回、図-9, 10では都市域近郊の状況を示しているが、水辺拠点となっている場所はDID地区の近傍であり、文教施設などの都市施設との距離が近いことが分かる。また、都市部でだけでなく流域全体を見渡してみると、既に河川

環境要素		単位	考え方	評価の目安・解釈等	評価
空間スペース	1. 河岸の利用可能スペース	無次元	・堤防裏法尻から平水位水際までの距離を、堤防天端から平水位までの高さで除いた値の大きさにより、 <b>河岸に利用可能なスペースの規模</b> を評価	・一般的に5以上で利用可能、10以上であると高く利用可能	+
良好な景観	2. 文化財(半径1km圏内)	個数	・歴史的な街並み建造物等の存在や、水辺に近づきたくなる良好な水質などの <b>良好な景観・自然環境</b> を評価	・境内を含めた社寺、碑、歴史的建造物の存在を評価	+
	3. 橋からの距離	m		・橋から水辺空間の視認性が高いかに加え、そこから良好な景観が得られるかを評価	- ★
良好な自然環境	4. BOD75%値	mg/L	・ <b>景観の向上による受益者が多い場所</b> を評価	・AA類型: 1mg/L以下、A類型: 2mg/L以下	-
	5. 人口総数(半径1km圏内)	人		・近隣地域の人口の多寡を評価 ・都市部ではDID地区の分布とふれあいの場の位置関係評価も有用	+
背後地の利用可能性	6. 公共施設 距離(図書館・博物館等)	m	・散歩・通学路等、日常的に利用されているルートとの近さなどの <b>利便性・利用性が高い場所</b> を評価		-
	7. 学校(小学校以下) 距離	m		・対象となる施設との距離に近いほど河川利用者を呼び込む素地が大きい	-
	8. 都市公園 距離	m			- ★
川と地域の関わり	9. 河川利用施設(1km区間内)	個数	・河川空間内に立地する河川公園やグラウンド、隣接駐車場などの存在やこれらの利用者数など、 <b>不特定多数の人の集まりやすさ</b> を評価	・河川公園の存在や駐車場の立地を評価	+
	10. 観光地 距離	m		・川との <b>一体的な利用が期待される観光の拠点</b> となる場所を評価	・観光地に近いほど河川利用者を呼び込む素地が大きい

図-8 利用可能性の高い水辺拠点の評価指標案。評価「+」は多い(高い)ほど良好である。また、「★」は特に重要な評価指標

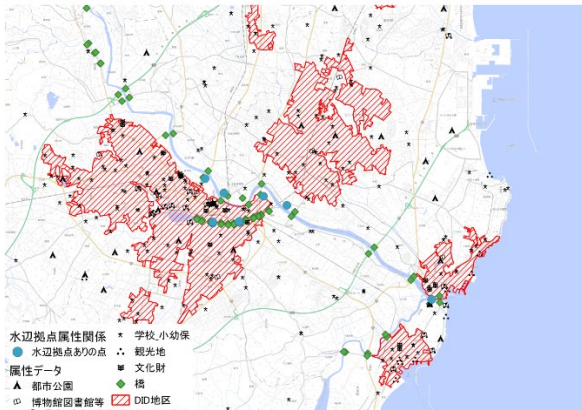


図-9 評価指標の分布と水辺拠点の重ね合わせ図の例  
(那珂川 抜粋)



図-10 河川利用施設の状況と水辺拠点の重ね合わせ図の例  
(那珂川 抜粋)

利用施設があるところや、橋からの距離の近い場所が水辺拠点として立地しやすい傾向が見て取れた。また、DID 地区から遠い地区、すなわち人口総数が高くない地域では観光地や都市公園の近くにあることが水辺拠点の立地には重要であることが明らかになった。また、W/D の指標は、郊外で水辺拠点となっている地点はすべて 10 以上の指標値となっていた。

以上より、都市部と、それ以外の地域においてそれぞれ求められる水辺拠点の役割の違いが見て取れる。

都市部においては、日常的に使われる都市施設との距離や人口の多さが重要となっており、空間スペースの広さよりむしろ日常の生活のなかでいかに憩いの場として機能し、使われるかが重要であることが分かる。

一方、郊外部においては、人が集まりやすい既存の公園や観光資源などの回遊性が重要であるという結果を得た。つまり、遠方からの利用も見据え、周辺にどのような施設があり、それらとの連携を考慮し選定することが望ましい。また、水辺拠点そのもので様々な利活用が行えるよう、空間スペースが十分に取られている箇所に設けること

が望ましい。

また、この結果からは、水辺空間の選定のみならず、選定的前提となる計画段階のコンセプト策定においても、どのような利活用がなされるかの検討が重要となることが示唆される。

なお、「BOD75%値」については数値の傾向と水辺拠点の立地との傾向は見受けられなかった。これは図-6 のとおり、那珂川において「BOD75%値」は重要な指標とはされなかったことから明らかである。

## 2) 水辺拠点選定の考え方

図-8 で示した水辺拠点の評価指標案では、特に重要な指標であると考えられる「★」印のついた 5 指標と、それに次いで参考とされるべき 5 指標とに分類した。この考えに基づき、水辺拠点の選定を考える時には、まず、特に重要な指標である 5 指標から一次的に抽出したのち、W/D などの空間スペースの有無や、自然環境の特性などを考慮し、最終的な適地を探すことが望ましいと考えられる。

実際の水辺拠点の選定に際しては、自治体などのニーズから複数の候補地が提案され、そこから絞り込みが行われるプロセスをとると考えられる。今回示した評価指標案は、このプロセスの中で、客観的に、利活用の可能性の高い候補地を絞り込む際に活用できるものと考えている。

## 2.3 まとめ

これまでに得られた主要な成果を以下に示す。

- 水辺拠点の抽出に資する評価軸として、「拠点整備に必要な空間スペースがある」、「良好な景観・自然環境がある」、「地域の生活環境から利用可能性が高い」に関する 11 の評価軸が得られた。
- 「拠点整備に必要な空間スペースがある」に関する評価指標として W/D を提案した。河岸空間の広がり表現した W/D は、利用ポテンシャルとの良好な対応関係が見られ、河岸空間の利用ポテンシャルの評価指標になると考えられる。また、この指標は河川規模によらず一律に適用することが可能であり、汎用性が高いものと思われる。
- 「良好な景観・自然環境がある」、「地域の生活環境から利用可能性が高い」に関する評価指標として 10 の指標を提案した。このうち特に重要な指標としては、「都市公園からの距離」、「1km 圏域内の人口総数」、「観光地からの距離」、「河川利用施設の有無」、「橋からの距離」の 5 つを提案した。これら評価指標の空間分布を地図にプロットし、水辺拠点選定に活用する考え方を提示した。

### 3. 河川水辺の国勢調査データを用いた保全優先地区の抽出技術に関する研究 (植物・植生)

植物群落を希少性、典型性、特殊性、外来性の観点から評価した研究 (前中期プロジェクト研究) では、千曲川では沈水植物群落および抽水植物群落、揖斐川では沈水植物群落がそれぞれ保全優先度の高い群落として抽出された<sup>19)</sup>、<sup>20)</sup>。これらはいずれも氾濫原に特有の植物群落であるが、近年の河床低下にともなう冠水頻度の低下などにより、近年、急激に縮小している種群である。

平成 28 年度は、これらの植物群落が持続的に成立する箇所を保全優先地区 (ホットスポット) とし、群落の分布を決定する環境条件について、土砂堆積などの地形変化や成立後の年数に着目して明らかにした。以下に、千曲川の抽水植物群落と、揖斐川の沈水植物群落を対象として保全優先地区を抽出した事例を示す。

#### 3.1 抽水植物群落を対象とした保全優先地区の抽出 (千曲川での事例)

##### 3.1.1 調査地

千曲川の直轄管理区間 (KP52~108km) の約 56km を調査地とした (図-11)。河道内に、湿地や大小さまざまなワンド、たまりなどの氾濫原水域が形成されている。本調査地では、1981 年頃より河道の局所的な洗掘が進行し、流路と高水敷の比高差が拡大していることが報告されている。地区を抽出した事例を示す。

##### 3.1.2 資料調査

河川水辺の国勢調査 (以下、「水国」という。) の 1994 年、1999 年、2004 年、2008 年の植生面積データを用いて、ヨシ群落と沈水植物群落の分布の変遷を把握した。また群落ごとに 1km を 1 区間として区間単位で各群落パッチの面積を集計した。千曲川のヨシ群落については、1994 年にヨシ群落として認識された各群落パッチが 2008 年に何の群落に遷移したかについて、水国の植生図を用いて把握した。

##### 3.1.3 統計解析

ヨシ群落からの遷移後の植生間で、地形変化 (堆積・侵食) を比較した。比較にあたっては、すべての変数の分布に正規性が確認されなかったため、ノンパラメトリックな分散分析法である Kruskal-wallis test と Steel dwass の全群比較を採用した。全群比較については、R version 3.0.2 を使用した。

##### 3.1.4 結果と考察

水国の植生調査結果から、調査地 (52-108km) のヨシ群落は、最近 15 年間で約 230ha から約 7ha へと大幅に減少したことが示された (図-11)。千曲川では、1998 年 8 月

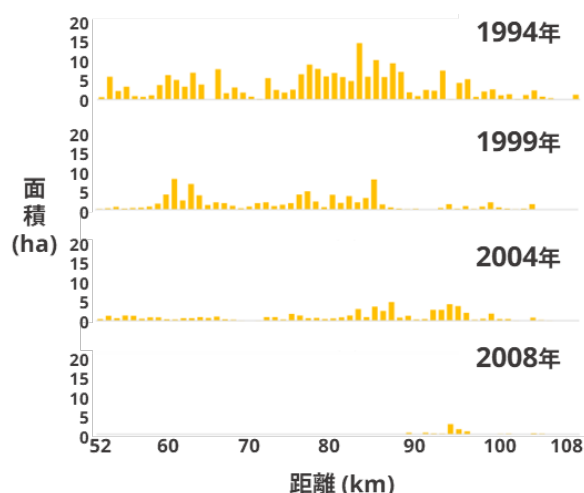


図-11 千曲川(KP52-108km)におけるヨシ群落の変遷

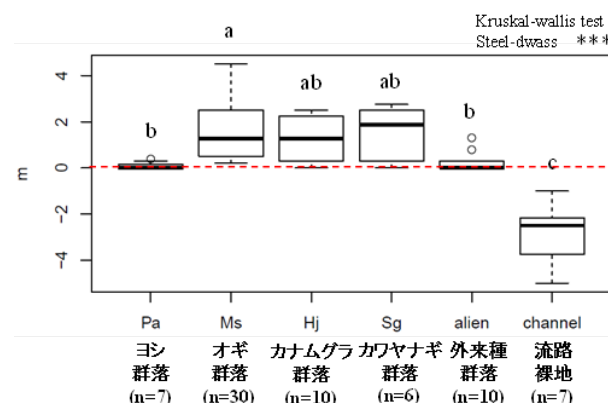


図-12 植生遷移後の地形変化 (ヨシ群落からの遷移、1994年→2008年)

と 1999 年 8 月に 2000 m<sup>3</sup>/s を超える大きな洪水が発生し、調査範囲内の植生の大部分が流失したことが報告されている<sup>21)</sup>。このため、1994 年から 1999 年にかけてのヨシ群落の大幅な減少は、これらの大洪水によって引き起こされたと考えられる。ヨシ群落が消滅した箇所は、その後、流路や裸地へと変化していたほか、オギ群落やカナムグラ群落などの他群落や、ハリエンジュなどの外来種群落へと遷移した (図-12)。ヨシ群落が維持された箇所は、全パッチのわずか 10%程度であった。

ヨシ群落が流路や裸地へと変化したところでは、侵食により 2.5m 程度 (中央値) の地盤の低下が起こった (図-12)。一方、他の植物群落へと遷移したところでは、外来種群落を除きいずれも土砂が堆積した。ヨシ群落からの遷移の頻度が最も高かったのはオギ群落であり、全体の 30% 近くを占めた。ここでは、1994 年から 2008 年の 14 年間



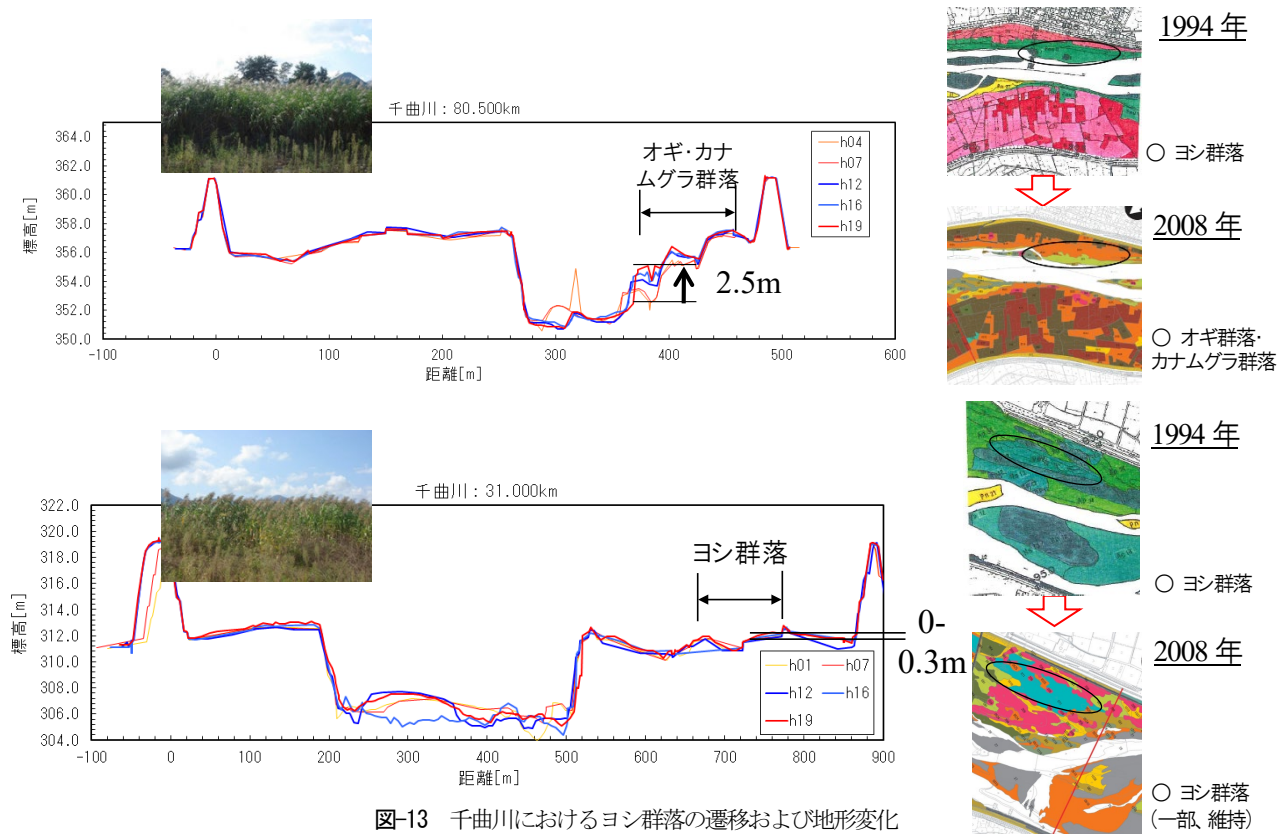


図-13 千曲川におけるヨシ群落の遷移および地形変化

(水国の植生図および定期横断測量図を使用、

上：KP80.5km(オギ群落、カナムグラ群落に遷移)、下：KP31.0km(ヨシ群落が一部維持)

で、1.3m 程度(中央値)の土砂の堆積がみられた(図-12、図 13)。オギは砂礫による埋没を受けても、幹の節から新しい根やシュートを出すことですばやく群落を回復させる<sup>23)</sup>。また千曲川において、植生と表層細粒土層厚との関係を調べた既往研究によれば、オギ群落の成立条件として、厚く堆積した表層細粒土層の存在をあげている<sup>21)</sup>。各群落の構成種を示した群落組成表から、ヨシ群落内には、もともと多くの箇所でおギが生育していたことが示されている。このため 1998 年から 1999 年の大洪水によってヨシ群落が出たのち、高水敷上に土砂が堆積したところでは、土砂による埋没に耐性を持ち、地下茎によって拡大するオギが優占し、洪水前のヨシ群落からおギ群落への遷移が起こったと考えられる。

これに対し、ヨシ群落が維持されたところでは顕著な地形変化は起こらなかった(図-12、図-13)。ここでは、地下茎を発達させながら、土砂が厚く堆積した条件のもとで広がるオギが拡大できず、もともと高い被度で生育していたヨシが再生できたものと考えられる。

ヨシ群落は、日本の氾濫原湿地にみられる代表的な植物群落のひとつである。しかしヨシ群落では、近年、河川改

修などの開発や、侵略的外来植物の侵入などによる消失や変質が進行していることが報告されている<sup>23)</sup>。千曲川のヨシ群落内では、最近になって外来種の割合が増えてきており、とくに 2004 年以降、特定外来生物のアレチウリもみられるようになった。これはアレチウリが千曲川で急増し始めた時期と一致している。また 2004 年以降、ヨシ群落がハリエンジュ群落をはじめとする外来種群落へと遷移した。ハリエンジュは河川の増水によって植物体の一部や種子が運ばれ、これらが漂着したところでいち早く発芽し、空間を占有することで拡大する<sup>24)</sup>。ヨシ群落がハリエンジュ群落へと遷移したところでは、ヨシ群落が維持されたところと同様、顕著な地形変化はみられなかった(図-12)。ハリエンジュの種子は、洪水時に高水敷上の広範囲に分散し定着することが知られている<sup>24)</sup>。種子定着後、短期間に土砂が厚く堆積したところでは、発芽したハリエンジュの実生は埋没によって枯死すると考えられるため、土砂が堆積しなかったところで群落が成立したのであろう。

以上のように、全国的な傾向と同様、千曲川でもヨシ群落の大幅な縮小と、オギやハリエンジュなど他群落への遷移が確認され、この要因のひとつに土砂の堆積が影響して

いる可能性が示唆された。一方、ヨシ群落が持続的に成立したところでは、地形変化は起こっておらず、現在、ヨシ群落が見られる箇所のうち、地形変化が起こっていない箇所では、今後もヨシ群落が持続的に成立する可能性があり、これらを保全優先地区として抽出した。

### 3.2 沈水植物群落を対象とした保全優先地区の抽出(揖斐川における事例)

#### 3.2.1 調査地

揖斐川では、後背湿地が形成され自然堤防が発達する河口からの距離31~50kmの区間を調査地とした。調査地の河道内には大小さまざまなワンドやたまりが形成されている。このうち32~39kmでは、2000年から2007年にかけて河積拡大のための高水敷掘削が実施されている。

#### 3.2.2 資料調査

水国(揖斐川)の1997年、2002年、2007年、2012年の植生面積データを用いて、沈水植物群落の分布位置を把握した。また群落ごとに1kmを1区間として区間単位で群落パッチの面積を集計した。沈水植物群落は、角野<sup>25)</sup>に掲載される沈水植物が優占する群落とした。

#### 3.2.3 現地調査

2014年の航空写真を判読し、長さ20m以上のワンド、たまりを抽出した。抽出されたワンド・たまりのうち、河川の縦断方向に200m間隔で取得された定期横断測量ラインが水域を跨ぐものを調査対象とした。その結果、19箇所のたまり、7箇所のワンドが調査対象となった。ワンド、たまりの区別として、1977年、1981年、1987年、1993年、2002年、2006年、2014年の航空写真から本川と常時接続していると判断されたものをワンド、それ以外をたまりとした。

調査対象とした26箇所の調査方形区では、すべての高等植物の被度(%)を5%刻みで記録した。同じ調査方形区内で水深、泥厚、水温、透視度、流速、pH、電気伝導度(以下、EC)、溶存酸素量(以下、DO)、全窒素(以下、T-N)、全リン(以下、T-P)を計測した。

上記に加え、1977年、1981年、1987年、1993年、2002年、2006年、2014年の航空写真を用いて、26箇所のワンド、たまりの成立年代を把握した。また26箇所の地形変化(堆積・浸食)状況について、各ワンド、たまりを横断する定期横断測量ラインのうち、2011年と2002年のデータを用いて最近9年間の最深部の標高値の差を算出した。

#### 3.2.4 統計解析

26の調査方形区で得た植生データ(すべての植物の被度)をもちいて氾濫原水域の植生分類をおこなった。植生の分類に用いたプログラムは TWINSPAN(Two-way

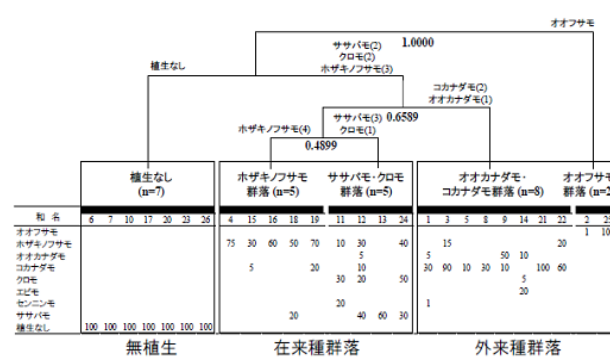


図-14 TWINSPAN による沈水植物群落の区分  
(デンドログラム中の数字は固有値、種名は指標種を示す)

Indicator Species analysis)である。分類された植生タイプ間で、13の環境因子(水深、泥厚、水温、透視度、流速、pH、電気伝導度(EC)、溶存酸素量(DO)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、地形の変化(堆積/侵食)、ワンド・たまり成立後の年数、高等植物の種数を比較した。次に植生のある調査区を対象に、ワンド・たまり(在来種優占/外来種優占)間で、これらの13因子と在来種の割合、外来種の割合を比較した。比較にあたっては、すべての変数の分布に正規性が確認されなかったため、ノンパラメトリックな分散分析法である Kruskal-wallis test と Steel dwass の全群比較を採用した。

#### 3.2.5 結果と考察

##### ①沈水植物群落の分布状況の変遷

水国の調査結果から、在来の沈水植物群落が5~10年間という極めて短期間のうちに、ジャヤナギアカメヤナギ群落やオオフサモ群落などの他群落へと遷移するか、開放水面(無植生)へと変化したことを示した。放棄されたため池では10~20年間で植生が消滅するか他の群落へと遷移したことが報告されているため、河川の氾濫原水域における沈水植物群落の遷移は、近年の放棄されたため池を上回る速度で進行している可能性がある。

##### ②沈水植物群落の成立条件

TWINSPANにより、揖斐川の氾濫原水域に成立する沈水植物群落は、種組成データから5つの群落に分類された(図-14)。

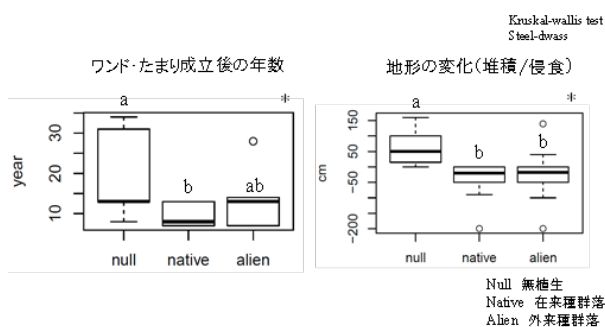


図-15 植生タイプ間の環境条件の比較 (有意な項目のみ表示)

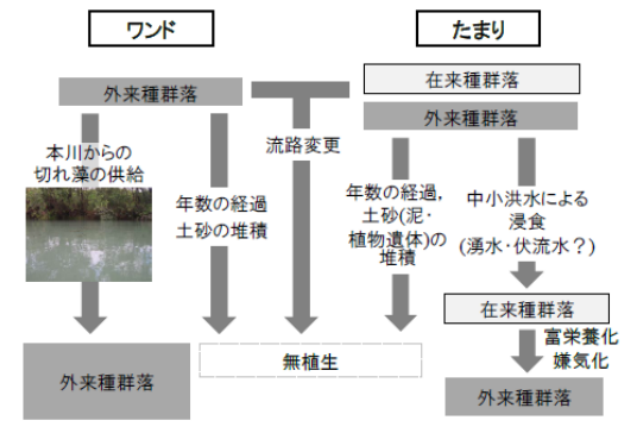


図-17 揖斐川の氾濫原水域における沈水植物群落の変遷 (模式図)

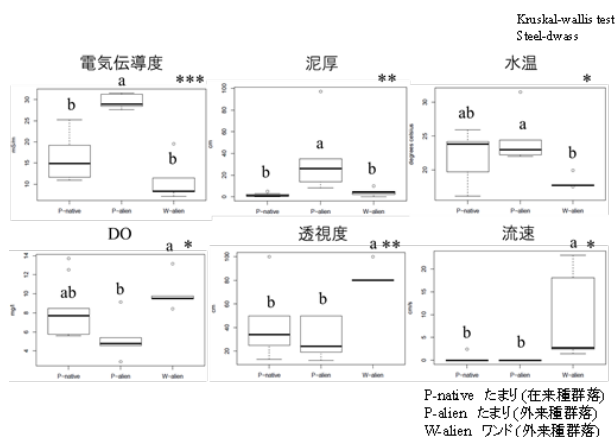


図-16 ワンドとたまりにおける環境条件の比較 (ワンドには外来種群落のみが成立)

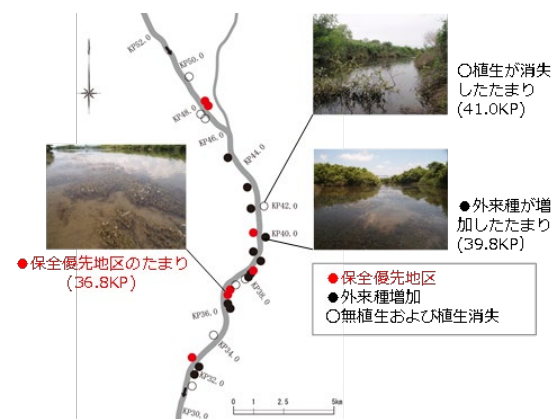


図-18 揖斐川におけるワンド・たまりの分布と保全優先地区

無植生、在来種群落、外来種群落の3つの植生タイプ間で、13の環境因子を比較した結果、植生のない氾濫原水域は、成立後の年数が古く、地形が堆積傾向にあることが示された(図-15)。2002年から2011年にかけての地形変化をみると、無植生の調査地では堆積が確認され、逆に侵食がみられた在来種群落および外来種群落と有意に異なった(図-15)。定期横断測定の結果から、無植生の水域では、最近9年間で50cm、年平均では5.5cm程度の堆積(中央値)が起こった(図-15)。

これは揖斐川高水敷の掘削箇所において掘削後の土砂堆積速度を推定した値である年間5~12cm<sup>20)</sup>に当てはまる。この数値を濃尾平野北部における原生的な氾濫原の後背湿地堆積物の堆積速度とされている年間0.12~0.2cm<sup>27)</sup>と比較すると、27.5~45倍程度となり極めて大きいことがわかる。このように短期間で集中的に起こる土砂供給によって埋土種子や植物体が埋没し、種子の発芽阻害や植物体の枯死が起こった可能性がある。

本研究では、各水域の洪水攪乱の程度は把握しなかったが、本川と常時接続するワンドは、流速が速く透視度が高いといった物理的条件によって特徴づけられていた(図-

16)。これは本川との接続頻度が高いために、本川の影響が反映されたものであるといえる。また現地調査時、揖斐川ではオオカナダモなど大量の外来種の切れ藻が本川の流路内を流下していた。とくに本川と常時接続しているワンドでは、こうした切れ藻が供給される機会が多く、発生した不定根により水底に定着する<sup>28)</sup>ことで短期間のうちに外来種群落が発生したと考えられる。一方、本川から切り離され孤立したたまりでは、年数の経過とともに、易分解性有機物の堆積による嫌気過程の進行<sup>29)</sup>が起こっていると考えられる。外来種が優占するたまりは、低DO、高泥厚、高ECによって特徴づけられており(図-16)、外来種群落は、ワンドだけでなく、孤立し嫌気的な環境となったたまりにも適応した植物群落であるといえる。

ササバモ、ホザキノフサモなどの在来種群落は、たまりのみに成立したが、これらは、泥厚とECが低いことで特徴づけられた。原田ほか<sup>20)</sup>は、揖斐川のたまりのなかに湧水に依存しているものがあることを指摘している。たまり



の在来種群落は、伏流した流路の水や湧水の流入による小規模な攪乱を受けることで維持されている群落かもしれない。しかしこうしたたまりも、易分解性有機物の堆積による嫌気過程が進行することで、外来種群落へと遷移していくことが想定される(図-17)。

### ③保全優先地区(ホットスポット)の抽出

在来の沈水植物群落は、成立後の年数が新しく土砂が堆積せず、湧水が流入するたまりにおいて経年的に成立していた。全26のワンド、たまりのうち7つがこれらに該当し、これらを保全優先地区として抽出した(図-18)。このように、保全対象群落と地形・環境条件との対応関係を解析することで、保全対象群落の成立条件を把握し、保全優先地区(ホットスポット)が抽出可能であることが確認された。

## 4. 鳥類を対象とした保全優先地区の抽出

河川環境は多種の鳥類種の生息場所となっており<sup>30)</sup>、鳥類群集の多様性保全の場として重要な役割を果たしている。しかし、近年の河川環境の改変によって、鳥類の生息域が限定され、多種の鳥類が激減の一途をたどっている。これに加えて、国内では河川域において鳥類群集を対象とした保全生態学的研究例が少なく、近年の出現傾向や具体的な鳥類のホットスポット等は明らかにされていない。そこで、本研究では、既存の河川水辺の国勢調査(以下、水国)における鳥類データを用い、近年の各水系における鳥類の出現傾向を精査し、さらに、河川の植生や水域、自然裸地等の物理環境と、出現する鳥類との関係性を明らかにするため、解析した。

### 4.1 河川性鳥類の定義・抽出

河川を利用する鳥類は、その生活型により、3つの分類群に大別することができる。その3つとは、発達した水かきを持ち、水面に浮かぶことのできる「水禽類」、水辺を長い脚で歩行しながら採餌する「渉禽類」、そして生活の中心は陸上だが、採餌場所や営巣場所に水域を利用する「水辺の陸鳥」である<sup>31) 32)</sup>。本研究では、まず、これらの3分類群の鳥類を「河川性鳥類」と定義し、国内の鳥類生態が詳細に記述されている既存の文献<sup>33)37)</sup>を踏まえ、国内に生息する河川性鳥類の抽出を行った。抽出の手順として、図-19のフローに従った。

その結果、51種の水禽類、95種の渉禽類、49種の水辺の陸鳥がそれぞれ抽出された。

- ① 参考文献において以下の記述がある種を抜粋
  - ① 河川・湖沼・湿地に生息
  - ② 河口域に生息
  - ③ 溪流に生息
- ※1 海岸の崖・沖合や海洋に生息する種は除外
- ※2 迷鳥(複数の参考文献で分類されている者)および外来種は除外

② ①で抜粋された種をリスト化  
このうち、複数文献で出現した種を抽出⇒「河川性鳥類」と暫定

類型	水禽類	渉禽類	水辺の陸鳥
代表種			
主な利用場所	発達した水かきを持ち、水面に浮いて採餌する	水際(移行帯)や浅瀬を長い脚で歩いて採餌する	基本となる生活の中心は陸域だが、河畔林、ヨシ原、河原等の河川環境も利用する
主な鳥類	カモ科、カモメ科、カイツブリ科、ウ科など	シギ科、チドリ科、サギ科、コウノトリ科、トキ科、クイナ科など	オオタカ、トビなどの猛禽類やオオヨシキリ、セキレイ類など

図-19 河川性鳥類の定義と種類

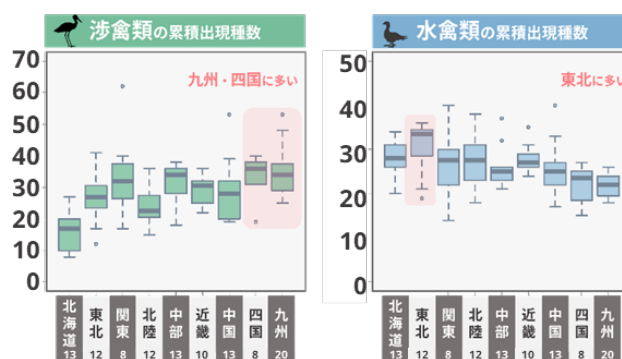


図-20 全国の一級水系における渉禽類と水禽類の地域別出現傾向(各地域下の数字は対象水系数を示す)

### 4.2 河川性鳥類の地域別出現種数の比較

河川性鳥類の地域ごとの出現傾向を把握するため、水国の鳥類調査結果1-4巡目のデータを利用した。なお、水国の鳥類調査では、2006年からの4巡目調査を契機に、それまでのラインセンサス調査から、スポットセンサス調査へと、調査方法が大きく見直されている。そのため、鳥類の個体数データは使用せず、鳥類種の出現データのみを使用することとした。水系ごとに1-4巡目調査で出現した鳥類の累積種数を集計し、比較した。河川性鳥類のうち、河川への依存度が特に高いと考えられる水禽類と渉禽類を対象とした。

水国において出現した水禽類の累積種数は東北地方に多く、渉禽類の累積種数は九州地方に多い傾向があった

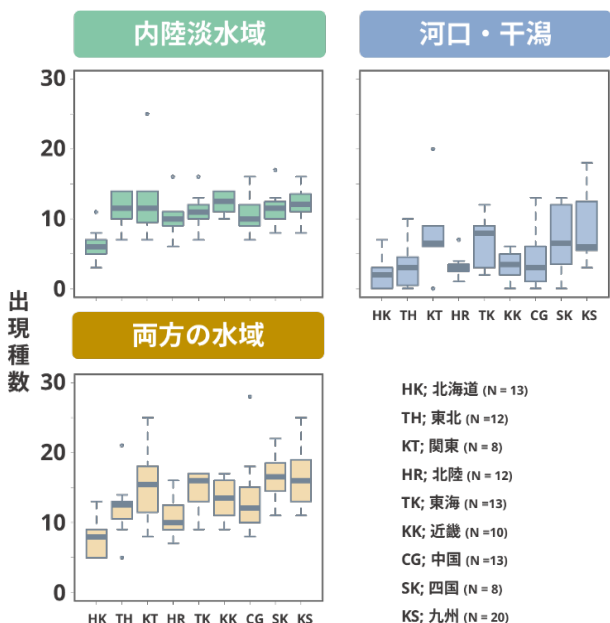


図-21 生息地タイプごとにみた渉禽類の各地域における出現状況

(図-20)。水禽類について、東北地方には、ガン類の一大越冬地が集中していること<sup>38)</sup>、渉禽類については、九州や四国に干潟が多いことを反映していると推察される<sup>39)</sup>。

### 4.3 各地域の河川における渉禽類の生息タイプ別出現状況

渉禽類は、雑食性や動物食性を示すことが知られており、湿地や干潟、浅瀬で魚類や両生類、爬虫類、甲殻類、昆虫類、貝類、環形動物類など、様々な動物群を採餌する<sup>37)</sup>。

また、渉禽類には、大陸間を季節的に移動する種が多い。このように渉禽類には頂点捕食者かつ高い移動能力を有している種が多いため、湿地生態系や河川生態系の指標となりやすい<sup>40)</sup>。そのため、水国で出現した渉禽類の生息地タイプについて、①主に河川や、湖沼、水田などの内陸淡水域を利用する種、②主に河口や干潟を利用する種、そして③内陸淡水域と河口・干潟のどちらも利用する種に分類し、地域ごとの出現状況を調べた。

1~4 巡目の全国 (109 水系) の水国調査において出現した、対象となる渉禽類は 11 科 81 種であった。最多はシギ科の 37 種であり、それに続いてサギ科 15 種、チドリ科 11 種、クイナ科 7 種となった。内陸淡水域利用種には、北海道以外の地域では大きな差がみられない一方で、河口・干潟利用種や両方の水域を利用する種は、関東や東海、四国、九州といった地域に多かった。これらの地域は、東アジア・オーストラリア地域フライウェイの中で重要拠点となる干潟を多く含む地域となっている<sup>39)</sup>。また、内陸淡水域利用種については、各地域内でもばらつきが小さく、河川が内陸淡水域利用種にとって、重要な生息環境となっている、

つまり内陸淡水域を利用する渉禽類の多くが、どの地域でも記録されていることがわかる (図-21)。

### 4.4 渉禽類の近年の河川域における出現傾向の把握

水国において、2 巡目調査から 4 巡目調査まで同じ調査期間で継続的に鳥類調査が実施されていた 57 水系分のデータを抽出し、各渉禽類の近年の出現傾向を精査した。なお、先述の通り、水国の鳥類調査は 4 巡目以降大きく変更されているため、本解析では、渉禽類の在不在データのみを扱った。57 水系のうち、便宜的に 10 水系以上で出現した渉禽類を対象に、①安定、②減少傾向、③増加傾向といった出現傾向のパターン化を試みた。各渉禽類について、①~③の各パターンが全出現水系数に占める割合をそれぞれ、安定率、減少率、増加率として算出した (図-22)。

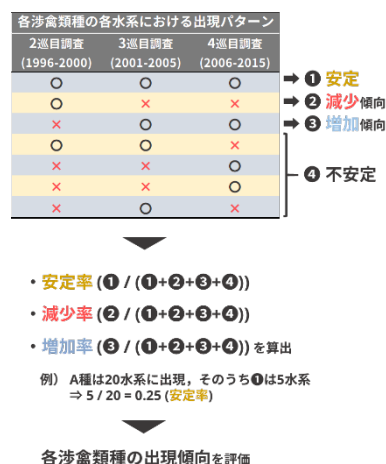


図-22 各渉禽類の出現パターン類型化と各割合の求め方

57 水系のうち、44 種の渉禽類が 10 水系以上で記録されていた。しかしながら、そのうちの 10 種 (23%) については、減少率が 0.20 以上であった。これらの種には、内陸淡水域を利用し、湿生草地で国内繁殖する種が含まれていた。今回扱ったデータからは、各種の繁殖状況まで分からなかったが、全国的に河川域で湿地環境が減少している可能性がある。また、これらの渉禽類の多くが、希少種に指定されており<sup>41)43)</sup>、河川域においても、その危機的な状況

表-4 減少率が0.20以上 (20%以上) の渉禽類の一覧

IUCN<sup>41)</sup>・環境省<sup>42)</sup>: 各レッドリストで準絶滅危惧以上に指定の種。国際希少<sup>43)</sup>: 国際希少野生動物種に指定の種。

渉禽類種	出現水系数	安定率	減少率	増加率	生息地	国内での繁殖場所	希少種指定
							IUCN 環境省 国際希少
クイナ	25	0.08	0.40	0.16	内陸淡水	湿生草地	
オグロシギ	14	0.07	0.36	0.00	両方	—	○
ミヤコドリ	10	0.10	0.30	0.00	河口干潟	—	○
タマシギ	14	0.00	0.29	0.07	内陸淡水	湿生草地	○
クロサギ	14	0.00	0.29	0.00	河口干潟	樹上・岩壁	
ムナグロ	30	0.10	0.27	0.07	両方	—	
ヨシゴイ	20	0.15	0.25	0.10	内陸淡水	湿生草地	○
タカブシギ	18	0.00	0.22	0.11	両方	—	○
キョウジョシギ	25	0.04	0.20	0.12	河口干潟	—	
メダイチドリ	35	0.17	0.20	0.09	両方	—	○



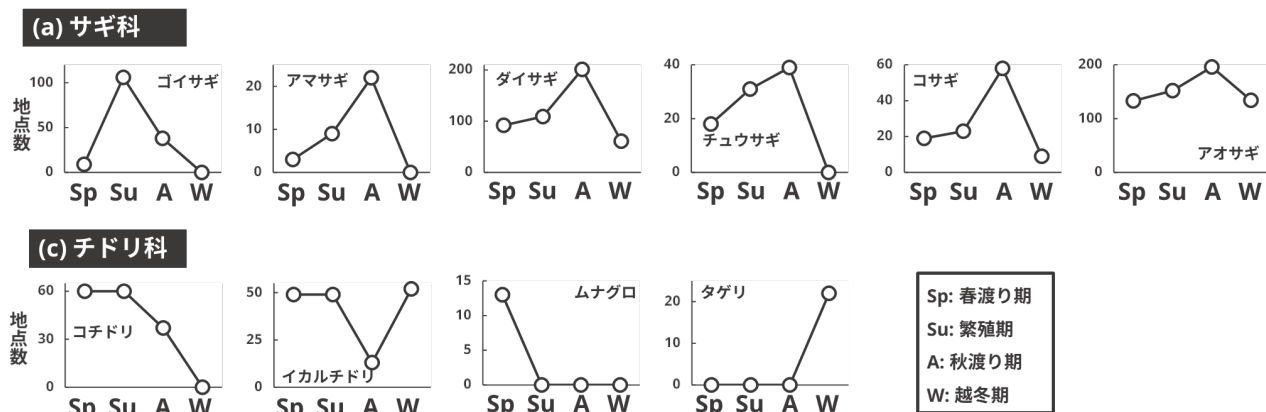


図-23 サギ科とチドリ科の季節ごと出現地点数

が示唆される (表-4)。

#### 4.5 利根川水系における堤内外地の環境を踏まえた渉禽類の保全優先地区抽出方法の検討

河川域における鳥類の保全優先地区を検討するには、その行動範囲などを踏まえると、河川内だけでなく、堤内地の環境も合わせて検討する必要がある。ここでは、国内有数の渉禽類の生息環境である利根川水系における検討例を報告する。今回、対象河川として、利根川水系利根川下流、江戸川、小貝川、鬼怒川、渡良瀬川とした。2007年春期から2008年冬期にかけて実施された水国における鳥類スポットセンサスデータ(1kmピッチで河川側の半径200m範囲内にいる鳥類データ)から、各地点の対象種の存在を抽出した。なお、この調査では、鳥類の春渡り期、繁殖期、秋渡り期、および越冬期の計4期に分けて調査が実施されているため、季節ごとの解析を実施した。

まず、各渉禽類が季節ごとに河川をどのように利用しているか明らかにするため、4期ごとに出現地点数をまとめ、季節変化を調べた。季節ごとに10地点以上で記録された渉禽類に加え、全調査期間で10地点以上記録された渉禽類を含む4科21種を解析対象とした。

各地点と周辺の植生および物理環境との関係性を明らかにするため、第6回・第7回自然環境保全基礎調査植生調査で整備された1/25,000植生図のGISデータを用いた<sup>44)</sup>。各調査地点を中心に半径200m、500m、1km、2.5km(サギ類のみ)のバッファを発生させ、その中に含まれる植生および物理環境を抽出した。これらを14の環境要因(森林、河畔林、湿生草地、乾生草地、水田、畑地、開放水域、自然裸地、造成地、市街地、緑の多い住宅地、工場、人工草地、果樹園)に分類した。4科21種の渉禽類について、調査地点ごとの在・不在を目的変数、14の環境要因の面積を説明変数に設定し、ランダムフォレスト法により

解析した。ランダムフォレスト法では、目的変数に対する説明変数の相対変数重要が算出されるため、どの環境要因が渉禽類の存在に影響しているかを理解しやすい。この解析方法は保全生態学における既往研究でも頻りに用いられている<sup>45)、46)</sup>。ランダムフォレスト法については500本のCART樹木を構成し、解析した。相対変数重要度により、各渉禽類の存在と関係性の強い要因に着目し、変数従属度を図示した。これらの解析には、R version 3.4.3のrandomForestパッケージを用いた。

#### 4.6 利根川水系における渉禽類の出現地点数の季節変化

調査地では、7科42種の渉禽類が記録されていた。分類群別では、シギ科の19種が最も多く、サギ科8種、チドリ科8種と続いた。その他、クイナ科やミヤコドリ科、セイタカシギ科、ツバメチドリ科が出現した。

解析対象となった渉禽類のうち、本稿ではサギ科とチドリ科の結果に着目する。サギ科とチドリ科の出現地点数の季節変化を示した(図-23)。

ゴイサギを除く5種の出現地点数のピークは、いずれも秋渡り期であった。先行研究では、農閑期に水田よりも河川においてサギ類の個体数が増加し、農繁期でも8月になると水稻の伸長のよってサギ類は田面で採餌しなくなることが観察されている<sup>47)</sup>。5種のサギ類(アマサギ、ダイサギ、チュウサギ、コサギ、アオサギ)にとって、水田の餌場としての価値が低下する時期に、その採餌場所を河川域に依存するようになったことが考えられる。ゴイサギのみ繁殖期にピークがみられた理由については、本種が非繁殖期には夜行性だが、繁殖期になると日中の採餌時間が増大するため<sup>48)</sup>、日中の出現地点数が繁殖期に増加したものと考えられる。

チドリ科について、コチドリでは春渡り期と繁殖期に地点数が多く、秋渡り期に地点数が半減し、越冬期には観察

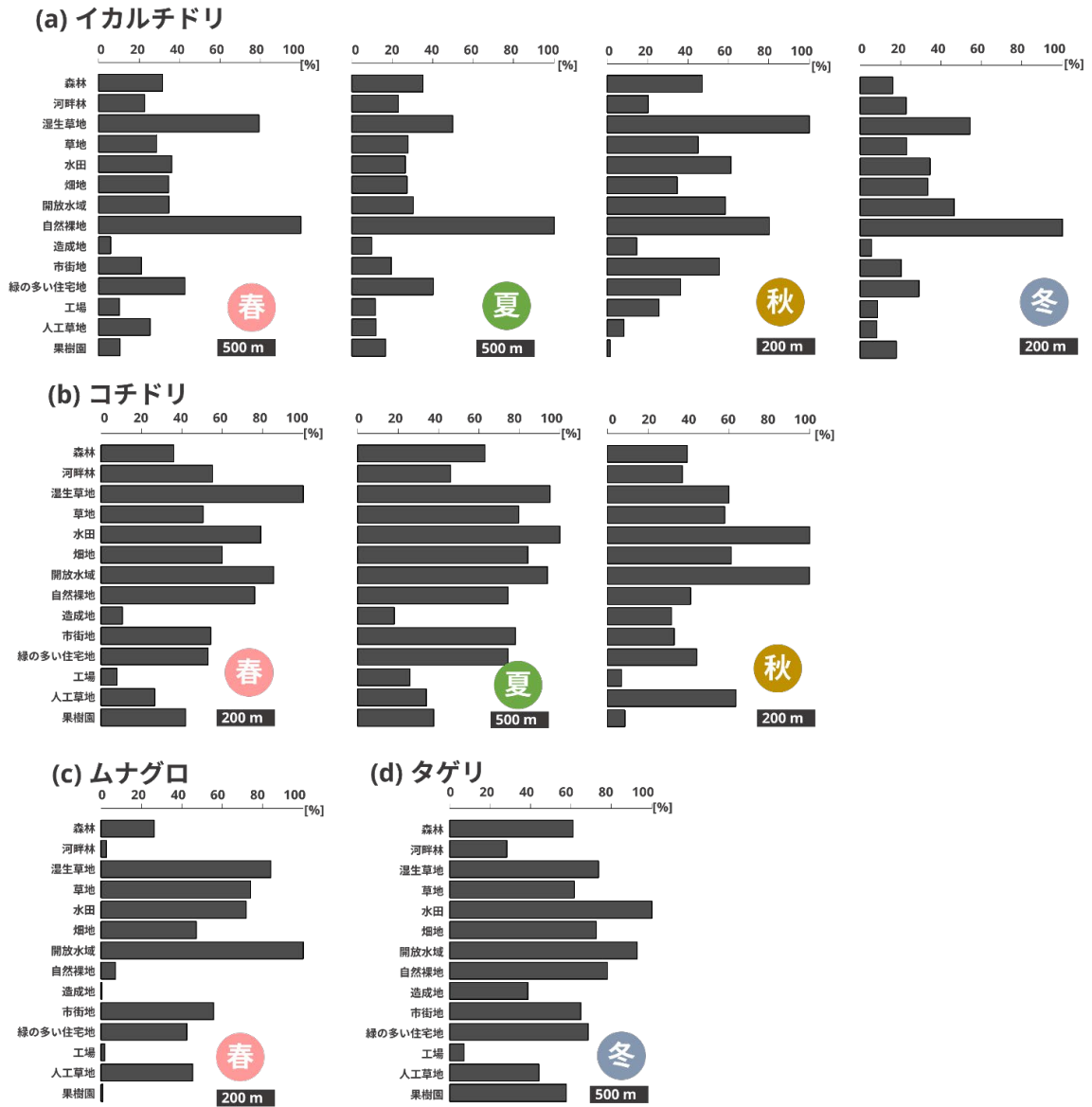


図-24 ランダムフォレストの結果に基づいた利根川水系における季節を考慮したチドリ科各種の出現に重要な堤内外環境。棒グラフは相対変数重要度 [%] を示す。各棒グラフで示されたバッファにおける解析が最も精度が高かった。

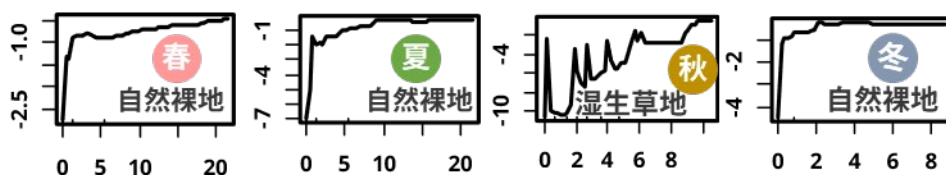
されなかった。イカルチドリでは秋渡り期に地点数が激減したが、その他の季節はほぼ同程度の地点数であった。ムナグロは春渡り期のみ、タゲリは越冬期のみ出現した。これら4種のチドリ科について、コチドリは夏鳥、イカルチドリは留鳥、ムナグロとタゲリはそれぞれ旅鳥と冬鳥とされる<sup>37)</sup>。留鳥であるイカルチドリは一年の多くの季節において河川をよく利用していることがうかがえる。

#### 4.7 利根川水系における渉禽類の出現に重要な環境

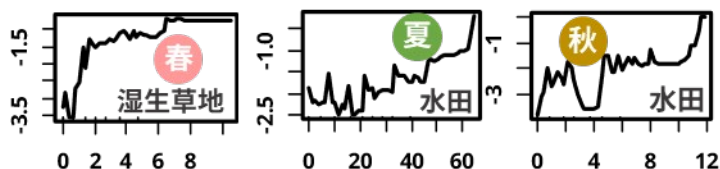
大半の種の出現に関して、周辺農地、特に水田の面積が寄与した（水田依存型）。水田の場合、各種の出現に対して正の寄与を示すことが多かった。その一方で、自然裸地や開放水域、湿生草地といった河川内に形成される環境のみが生息に寄与している種（河川依存型）も存在した。

図-24 はチドリ科4種の季節ごとに実施したランダムフォレストの結果である。各種のバッファについては、最も解析精度の高かった結果を示している。イカルチドリで

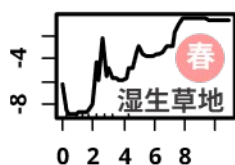
## (a) イカルチドリ



## (b) コチドリ



## (c) ムナグロ



## (d) タゲリ

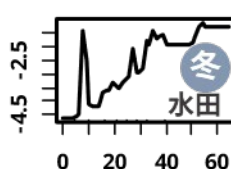


図-25 ランダムフォレストにより最も相対変数重要度が高かった特徴量における各渉禽類種の出現に対する変数従属度の推移。横軸は各特徴量の面積 [ha] を示す。

はどの季節を通じても自然裸地の重要度が高かった。また、秋渡り期には湿生草地の重要度が最も高かった。これらの変数はいずれもイカルチドリの出現に対し正に寄与した。特に春渡り期、繁殖期、冬期について、いずれも自然裸地の面積が 0.5~1.0 ha 程度になると急激に従属度が上昇した (図-25)。その一方でコチドリでは自然裸地の相対変数重要度よりもいずれの時期も開放水域や水田のほうが高かった。これに加え、春渡り期には湿生草地、繁殖期には湿生草地、草地、畑地の重要度も高かった。春渡り期の湿生草地、繁殖期の水田、秋渡り期の水田はコチドリの出現に対し正の寄与を示した (図-25)。春渡り期のムナグロでは、開放水域の相対変数重要度が最も高く、ムナグロの出現に対し正に寄与した (図-25)。越冬期のタゲリでは水田の相対変数重要度が最も高く、タゲリの出現に対し正に寄与した (図-25)。このように各渉禽類種の生息に寄与する環境は種ごとに大きく異なることが示された。コチドリとイカルチドリはどちらも砂礫地に営巣するが、コチドリは水田や畑地といった堤外環境にも大きく依存して分布するのに対し、イカルチドリでは自然裸地の他に秋期に湿生草地の重要度が高い程度であった。そのため、対象河川で

は、イカルチドリがより河川に形成される環境に依存した分布を示すと考えられる。イカルチドリの選択されたバッファは 200 m から 500 m の範囲であった。つまり 12.6 ha から 78.5 ha の面積内に 0.5~1.0 ha 以上の砂礫地がある地点で、イカルチドリが出現する可能性が高いことを示している。またタゲリについても、周辺 (堤内) に水田の存在する地点を好んで分布する可能性が高いと考えられる。

#### 4.8 堤内地環境も踏まえた河川における渉禽類の保全優先地区の考え方

ランダムフォレストによる解析で示されたように、各鳥類の生態的特性によって、堤内外地に必要な環境やその面積は異なるため、種によって堤内地を含めた横断的な視点で保全優先地区を検討・配置していく必要がある。チドリ科を例にとると、メダイチドリやムナグロ、タゲリのような、旅鳥や冬鳥の「堤内外採餌」パターンには、採餌場所となる湿地環境の確保が重要となる。図-26は主にセグメント2区間 (自然堤防帯) での湿地確保の考え方をまとめたものである。堤内地にも水田やため池などの湿地があり、河川域にも湿地がある場合は、堤内・堤外を合わせて必要な湿地面積を確保することとなる (パターン①)。例えば



図-26 堤外地（河川域）と堤内地の状況を踏まえた湿地面積確保の考え方。セグメント2（自然堤防帯）を想定。

利根川下流域のように、河川周辺にハス田や湿地が存在する河川では、周年、採餌可能な湿地が堤内地にも確保される。しかしながら、こうした堤内地の水田環境では、急速に開発や耕作放棄等による土地変化が進められる可能性があるため、その動向を注視しつつ、現存する堤外の湿地を保全していくべきである。またハス田等が存在せず、乾田化の進む水田地帯では、基本的に水稻の作付期以外、水田を利用することができない。その場合、季節的に河道内湿地の重要性が増してくる（パターン②）。さらに、堤内地に水田などの湿地が存在しない場合、河道内の湿地が特に重要となり（パターン③）、堤内・堤外どちらにも湿地が存在しない場合は（パターン④）、河道内でより多くのコストをかけて自然再生や維持管理を含めた湿地環境の整備を図る必要があるだろう。

#### 4.9 那珂川水系那珂川（関東）における堤内外地を踏まえた水鳥類の生息適地解析と野外調査による実証

実河川における既存データを用いた生息適地解析と、現地調査における結果を比較するため、那珂川水系那珂川（関東）に着目した。2013年に那珂川水系で実施された水国の鳥類調査データを活用し、4.5節で記述した利根川水系と同様の方法で4科10種の渉禽類の生息適地解析を実施した。那珂川の水国・鳥類調査データは2013年春季から2014年冬季にかけて四季に実施されたものである。調査地点数は計196地点であった。

10種の渉禽類の出現地点の季節変化は利根川の結果と同様の傾向を示した（図-27）。夏鳥のゴイサギを除くサギ科4種（夏鳥のチュウサギ、留鳥のダイサギ、コサギ、ア

オサギ）については秋渡り期に顕著なピークがみられた。クイナ科の留鳥であるオオバンのピークは越冬期であった。チドリ科の夏鳥であるコチドリとイカルチドリは春渡り期と繁殖期に出現地点数が多かった。シギ科の旅鳥であるキアシシギは春期に、留鳥であるイソシギは秋期にピークがみられた。ランダムフォレストの結果、アオサギやコチドリ、イソシギ、キアシシギにとって水田の寄与率が高く、各種の出現に対し正に寄与した。これらの結果から、各種の渡り性だけに起因するのではなく、留鳥についても河川の利用時期には明確なピークが認められること、種によっては河川域における分布に周辺の水田面積が関係することが明らかになった。

コチドリ、イカルチドリ、オオバンの3種については、ランダムフォレストによる解析の結果、各種の出現に対し正に寄与する変数に明確な閾値がみられた。コチドリでは、夏期に水田と畑地が正に寄与し、どちらもコチドリの出現に対して約5haで変数従属度が飽和状態となった。イカルチドリについては、夏期に自然裸地が正に寄与し、約1haで飽和状態となった。オオバンでは越冬期に開放水面が正に寄与し、約5haで飽和状態となった。これらの結果を踏まえ、各種の出現地点と変数従属度の閾値以上を示す地点を地図上で重ね合わせた。概ね各種の出現地点と閾値以上を示す地点は一致している傾向がみられる。この地図から示される通り、砂礫地に営巣する繁殖生態を持つイカルチドリとコチドリでは、その分布域および生息適地が大きく異なっており、イカルチドリでは中上流域の砂礫地が、コチドリでは中下流域の周辺に水田や畑地が存在する地点が生息適地と推察される。

次に水国データの解析結果を踏まえ、2020年の夏期（6月）、秋期（10月）、2021年の冬期（2月）、春期（5月）、冬期（12月）、2022年の春期（3月）に那珂川水系那珂川の河道内砂礫地とワンド・たまりおよび周辺水田において水鳥類（水禽類+渉禽類）を対象とした生息状況調査を実施した。この調査では、那珂川の砂礫地およびワンドと周辺にある水田を対象とし、各調査地で出現した水鳥類を記録した。調査地点は18kpから23kpまでである。その結果、水鳥類の出現種数は水田では農繁期である5月、6月にピークを示し、その他の季節では種数が減少した（図-29）。その一方で砂礫地では10月、2月、12月、3月といった農閑期に当たる時期に多種の水鳥が記録された。調査地の水田地帯では、6月にはサギ類を主とした渉禽類が採餌場所としてよく利用している一方で、乾田化が進行してい



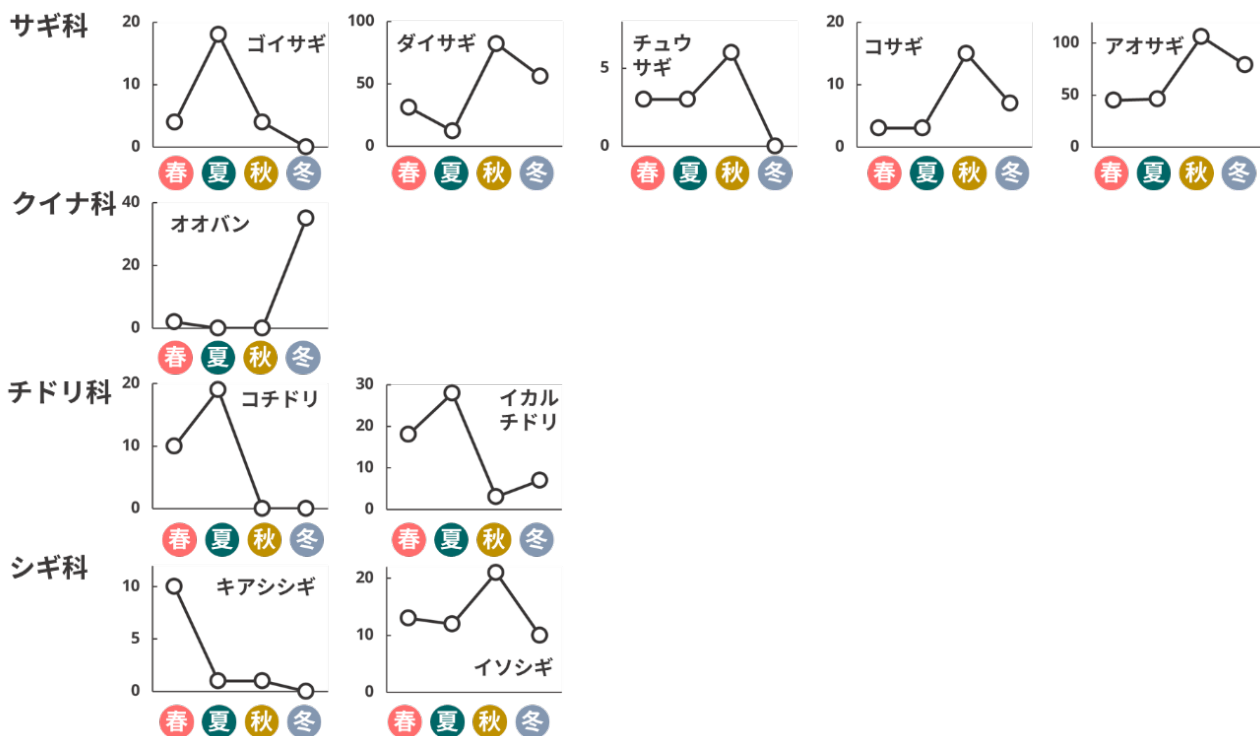


図-27 那珂川における10種の渉禽類の出現地点数の季節変化。

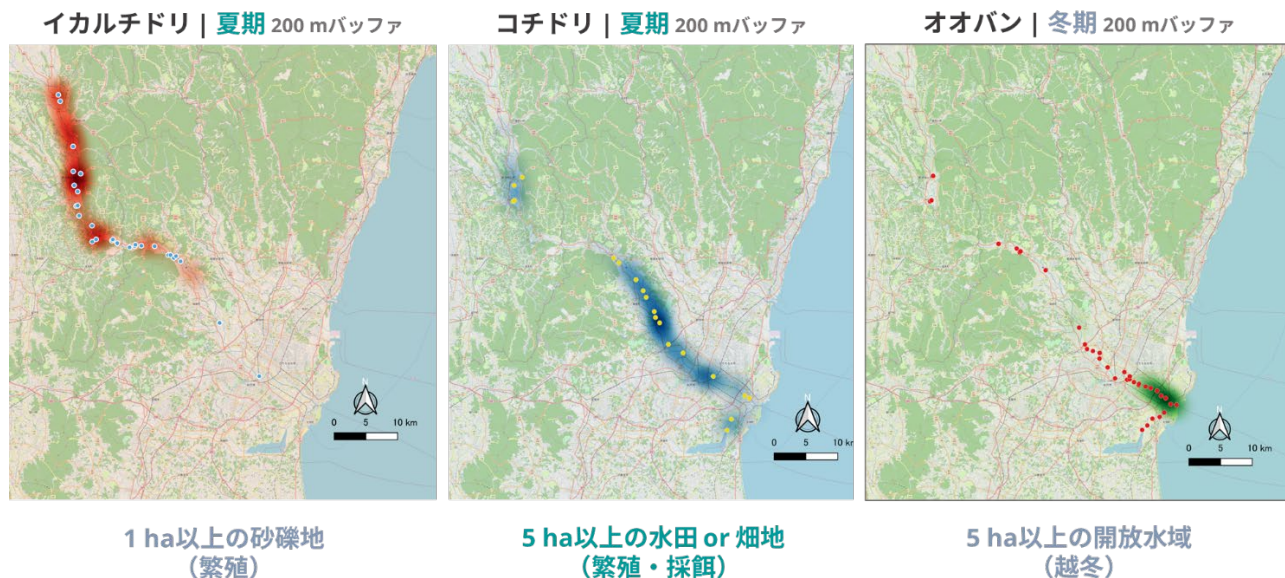


図-28 那珂川における渉禽類3種の分布地点と生息適地の重ね合わせ。分布地点はサークルで示した。鳥類の分布データは水国データに基づく。背景地図にはOpenStreetMap ((C) OpenStreetMap contributors) を使用。

るため、秋期や冬期の水鳥類にとっての餌場としてのポテンシャルは低下すると考えられる。その一方で、那珂川の砂礫地は、水田の農閑期における重要な採餌環境として水鳥類の採餌環境となっていることが示唆された。しかしながら、調査地点のワンド・たまりでは水田や砂礫地に比べ

て記録される鳥類種が少なく、採餌環境として十分に機能していないことが推察された。調査地のワンドの大きな特徴として、陸域から水域の移行帯が少ないこと、またその傾斜も急峻であることが挙げられる。前項で提案した河川における湿地創出に関して、ただ単に湿地を造成するだけ

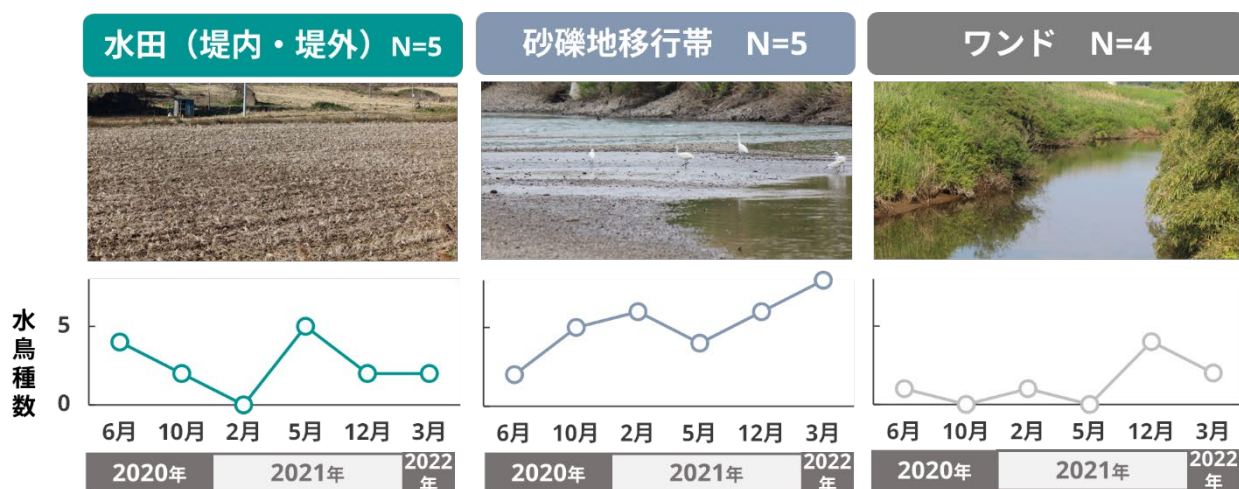


図-29 那珂川の現地調査における水鳥の出現種数

でなく、緩やかな移行帯を維持することでより多くの水鳥類（特に渉禽類）の採餌環境を確保できる可能性が高い。

なお野外調査では、イカルチドリは河川域の砂礫地のみにしか出現しなかった一方で、コチドリは河川砂礫地と堤内の農地（畑地）の両方に出現した。この結果は、生息適地解析の結果と共通するものであり、各種の生活史を十分に把握したうえで生息地の確保や再生を堤内外の環境を踏まえた横断的視点で進めていくことの重要性がデータ解析と野外調査から改めて示された。

#### 4.10 那珂川の鳥類を対象とした環境 DNA 解析と観察調査の比較

近年、対象水域の生物相を把握するために水域における環境 DNA（以下、eDNA）を解析する技術が急速に発展しており、鳥類にもその技術が応用され始めている。なかでも、多種同時検出法（メタバーコーディング、以下 MB 解析）では、対象地の鳥類相を把握できる可能性がある。しかしながら、対象水域において鳥類の MB 解析と生息状況調査とが同時に実施された例はなく、その有効性が判然としない。そこで筆者らは、那珂川（関東）の様々な河川環境において、河川水中に含まれる鳥類の eDNA に対し MB 解析を実施した。また同時に実施した鳥類の観察調査の結果と照合することで各調査方法の特性を比較し、今後の河川域における鳥類相の把握に対する MB 解析の有効性について検討した<sup>49)</sup>。

2021 年 4 月と 10 月における調査および採水の結果、MB 解析と観察調査に共通して生息し、検出された種の特徴として、水面を遊泳するカモ類やオオバンといった水・渉禽類や待ち伏せ型の採餌方法を得意とする大型渉禽類のサギ類（ダイサギ、コサギ、アオサギ）が挙げられた。

その一方で観察調査だけで確認された種の特徴として、コチドリやセグロセキレイ、ハクセキレイといった小型かつ水際で探索型の採餌を行う渉禽類や水辺の陸鳥が挙げられた。また、MB 解析のみで検出された種や、MB 解析でのみ検出されたが、他の時期には観察された種も存在した。以上の結果は、従来の観察調査に加えて MB 解析を補完的に実施することにより、対象水域のより網羅的な鳥類相を把握できる可能性があることを示唆するものである。しかしながら、MB 解析にも検出しにくい鳥類のグループがあることを認識したうえで、複数の調査方法を組み合わせることで実施することが河川の鳥類相の把握には重要と考えられる。

#### 5. まとめ

景観、人の利用からみた重点区間の抽出技術に関しては、「水辺拠点」を設定し、既存文献分析及び事例調査から、拠点を抽出するための評価軸（案）を検討した。また、評価軸の指標化について検討し、利用可能性の高い水辺拠点を判断する 10 の評価指標を提案した。

生物に関しては、沈水植物・抽水植物を対象に、保全すべき植物群落が持続的に成立する箇所を保全優先地区とし、これらの分布と成立条件を明らかにした。また、鳥類について、渉禽類の出現傾向解析、利根川水系を対象とした渉禽類 4 科 21 種の分布と堤内外地を含めた周辺環境との関係性の解析を、季節性を考慮して実施した。さらに、那珂川水系那珂川を検討箇所として、渉禽類をはじめとする水鳥類の生息状況を、堤内外の環境を踏まえ調査した。最後に、今後の研究の発展形として、那珂川を対象に eDNA の MB 解析を実施し、現地調査との比較で出現す

る鳥類相にどのような特徴があるのかを明らかにし、河川域の鳥類モニタリングや自然再生の事前事後評価に対するMB解析の有効性を検討した。

## 参考文献

- 1) 生物多様性国家戦略2012-2020～豊かな自然共生社会の実現に向けたロードマップ～、2012.9 閣議決定。
- 2) 社会資本整備審議会:安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方について [答申]、2013.4。
- 3) 鶴田舞、中村圭吾、萱場祐一:利用ポテンシャルが高い水辺拠点の評価手法の検討、河川技術論文集 25、2019。
- 4) 「河川景観の形成と保全の考え方」検討委員会編:河川景観デザイナー「河川景観の形成と保全の考え方」の解説と実践、財団法人リバーフロント整備センター、2008。
- 5) 島谷幸宏:河川風景デザイン、山海堂、1994。
- 6) 土木学会編:水辺の景観設計、技報堂出版、1988。
- 7) 環境省総合環境政策局環境影響評価課:環境影響評価技術ガイド 景観、2008。
- 8) 自然とのふれあい分野の環境影響評価技術検討会編:環境アセスメント技術ガイド 自然とのふれあい、財団法人自然環境研究センター、2002。
- 9) 鶴田舞、星野裕司、坂本貴啓、中村圭吾:地域の個性を反映した水辺空間の整備方針検討過程に関する調査、景観・デザイン研究講演集、No.14、pp.238-246、2018。
- 10) 鶴田舞、萱場祐一:河岸の横断面形状に着目した空間利用ポテンシャル評価指標の提案、河川技術論文集 23、2017。
- 11) 北村信正:造園実務集成 公共造園篇 1 計画と設計の実際、技報堂出版、1972。
- 12) 小柳武和:土木施設景観の計量心理的評価手法に関する研究、土木学会第 31 回年次学術講演会、第 4 部門、pp.98-99、1976。
- 13) 国土交通省熊本河川国道事務所:緑川水辺空間計画(案)～まもろう!つなごう!緑川～、2018。
- 14) 国土交通省熊本河川国道事務所:緑川河川水辺環境調査(底生動物・空間利用実態)業務報告書、2015。
- 15) 国土交通省九州地方整備局:九州地方一級河川の水質現況、2017。
- 16) 国土交通省河川環境課:「川の通信簿」実施マニュアル(案)、2003。
- 17) 篠原修編:景観用語辞典、彰国社、1998。
- 18) 星野裕司:空間のスケール、風景のとらえ方・つくり方九州実践編、共立出版、2008。
- 19) 片桐浩司、池田茂、傳田正利、萱場祐一:河道内氾濫原における水生植物群落の劣化要因の解明とその再生にむけて、河川技術論文集 22、2016。
- 20) 片桐浩司、池田茂、大石哲也、萱場祐一:揖斐川の氾濫原水域における沈水植物群落の分布と成立条件、応用生態工学 19、pp.55-65、2016。
- 21) 末次忠司、藤田光一、服部敦、瀬崎智之、伊藤正彦、榎本真二:礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答、遷移および群落拡大の特性—多摩川と千曲川の礫河原を対象として—、国土技術政策総合研究所資料 161、2004。
- 22) 石川慎吾:河川植物の特性、「河川環境と水辺植物—植生の保全と管理」(奥田重俊・佐々木寧編)、pp.71-92、ソフトサイエンス社、東京、1996。
- 23) 小幡智子、石井潤、角谷拓、鷺谷いづみ:渡良瀬遊水地における過去の掘削履歴が絶滅危惧植物の現在の分布に及ぼす影響と影響評価地図、保全生態学研究 17、pp.221-233、2012。
- 24) 外来種影響・対策研究会編:河川における外来種対策の考え方とその事例、リバーフロント整備センター、2008。
- 25) 角野康郎:日本水草図鑑、文一総合出版、東京、1994。
- 26) 原田守啓、永山滋也、大石哲也、萱場祐一:揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程、水工学論文集 59、pp.1171-1176、2015。
- 27) 堀和明、田辺晋:濃尾平野北部の氾濫原の発達過程と輪中形成、第四紀研究 51、pp.93-102、2012。
- 28) 外来種影響対策委員会:河川における外来種対策の考え方とその事例、「改訂版—主な侵略的外来種の影響と対策—」、財団法人リバーフロント整備センター、東京、2008。
- 29) Ponnampertuma F.N.: The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24、pp.29-96、1972。
- 30) 村上正志:鳥類、「河川生態学」(中村太士編)、pp.150-154、サイエンティフィック、東京、2013。
- 31) 江崎保男:河川の鳥類群集、「水辺環境の保全—生物群集の視点から—」(江崎保男・田中哲夫編)、pp.152-176、朝倉書店、東京、1998。
- 32) 中村登流:野鳥の図鑑—水の鳥①、保育社、大阪、1986。
- 33) 中村登流・中村雅彦:原色日本野鳥生態図鑑<陸鳥編>、保育社、大阪、1995。
- 34) 中村登流・中村雅彦:原色日本野鳥生態図鑑<水鳥編>、保育社、大阪、1995。
- 35) 高木清和:フィールドのための野鳥図鑑—野山の鳥、山と溪谷社、東京、2000。
- 36) 高木清和:フィールドのための野鳥図鑑—水辺の鳥、山と溪谷社、東京、2002。
- 37) 高川晋一、植田睦之、天野達也、岡久雄二、上沖正欣、高木憲太郎、高橋雅雄、葉山政治、平野敏明、三上修、森さやか、森本元、山浦悠一:日本に生息する鳥類の生活史・生態・形態的特性に関するデータベース「JAVIAN Database」、*Bird Research* 7、pp.9-12、2011。

- 38) 横田義雄・呉地正行・大津真理子：日本のガンの分布、羽数および生息状況、鳥 30、pp.149-161、1982.
- 39) JR Conklin, YI Verkuil, BR Smith: Prioritizing migratory shorebirds for conservation action on the East Asian-Australasian Flyway, WWF-Hong Kong, Hong Kong, 2014.
- 40) Kushlan, J. A.: Responses of wading birds to seasonally fluctuating water levels: strategies and their limits, Colonial Waterbirds, Vol. 9, No. 2, pp. 155-162, 1986.
- 41) IUCN 2020. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1. <http://www.iucnredlist.org>. (閲覧日：2020.6.5)
- 42) 環境省【鳥類】レッドリスト 2020. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/113667.pdf> (閲覧日：2020.6.5)
- 43) 環境省国際希少野生動植物種一覧. [https://www.env.go.jp/nature/kisho/global/beppy2\\_hyo1.pdf](https://www.env.go.jp/nature/kisho/global/beppy2_hyo1.pdf) (閲覧日：2020.6.5)
- 44) 環境省自然環境局生物多様性センター自然環境 Web-GIS. 第 6 回・第 7 回自然環境保全基礎調査植生調査. <http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-006.html> (閲覧日：2020.6.5)
- 45) Herrick K A, Huettmann F, & Lindgren MA : A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions, Veterinary research 44: 42, 2013.
- 46) 上原匡人・今井秀行・岩本健輔・太田格・海老沢明彦・吉野哲夫・立原一憲：ドロクイ属 2 種の分布および生息環境：近年の沿岸域の改変と交雑個体の出現の関係、魚類学雑誌 62、pp.13-28、2015.
- 47) 中島拓、江崎保男、中上喜史、大迫義人：水田と河川、コウノトリ野生復帰地での餌場の相対的価値：豊岡盆地に生息するサギ類を指標として、保全生態学研究 11、pp.35-42、2006.
- 48) 遠藤菜緒子、佐原雄二：ゴイサギ (*Nycticorax nycticorax*) の繁殖期の日周活動と採餌場の利用、日本鳥学会誌 48、pp.183-196、2000.
- 49) 田和康太、篠原隆佑、菅野一輝、村岡敬子、中村圭吾：河川域の鳥類を対象とした環境DNA解析と観察調査の比較—那珂川を事例として—、河川技術論文集 28、印刷中、2022.



## 11.2 河道掘削等の人為的改変に対する植生・魚類等の応答予測技術の開発

### 11.2.1 陸域における河道掘削を念頭においた河道内植生の管理技術に関する研究

担当チーム：流域水環境研究グループ（流域生態）

研究担当者：中村圭吾、傳田正利、溝口裕太

#### 【要旨】

令和2年度までに、河道内の植生変化（植生遷移）を予測するためのPCC植生動態モデルの開発と改良を梯川と手取川において実施した。また、効率的な河道管理を見据えて、航空レーザ測量から得られる3次元点群データの活用による樹木体積の推定技術を開発した。令和3年度は、河川景観判読AIの開発を実施した。河川環境管理に求められる植物群落、群集レベルでの自動判読を念頭に、開放水面、自然裸地、草地、樹林地などの景観要素の判読が可能なAIを、航空レーザ測量成果等を入力データ、ランダムフォレストを技術のベースとして開発した。九頭竜川の直轄管理区間における試行計算から、対象河川を増やし、強化学習の実行による同AIの判読性能を高める必要はあるものの、一定程度の判読精度を有することを確認した。

キーワード：植生動態モデル、航空レーザ測量（LP）、河川景観判読、樹木資源量解析

#### 1. はじめに

近年、河川では草本や樹木群といった「安定植生域」が増加してきている。安定植生域の増加は、外来種の侵入・拡大、生物多様性の劣化、流下能力の低下、維持管理費の増大等、様々な問題を招いている。土木研究所の既往研究において、安定植生域増加の要因となる樹種の行き過ぎた生育を抑制する工法を開発した<sup>1)</sup>が、樹林化後の対応法を提案した側面が強い。戦略的な河道管理を行うためには、安定植生域が生じない河道管理が必要となる。

河道管理の研究・実務においては、「河道掘削」は、洪水攪乱を促し、氾濫原的環境の創出を通し環境復元すること、安定植生域への遷移<sup>2) 3)</sup>を遅らせることが報告されている。今後は、これらの知見を活用し、「河道掘削」が持つ環境復元、安定植生域抑制の機能に着目し、治水・環境の二つの目的を適切なコストで両立させる河川管理技術が求められる。上記の目的達成には、河川の物理環境と植生遷移の因果関係の解明、これらの因果関係に基づく植生動態の将来予測を行う技術が必要となる。

平成28年度は、研究全体の流れを俯瞰する目的で、実際の河道掘削の事業計画・評価に参加し、平成29年度は、国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所と共に検討した信濃川水系千曲川冠着地区における旧流路部を活用した水路掘削と平面掘削の併用による砂礫河原再生事業による砂礫河原再生効果の検証と効果

発生機構の報告、土木研究所と民間4社（国際航業（株）、（株）建設技術研究所、パシフィックコンサルタンツ（株）、（株）国土開発センター）との共同研究において実施した植生動態の監視技術として、近年、技術革新と普及が著しい無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle；以下、「UAV」と記述する。）、人工知能（Artificial Intelligence；以下、「AI」と記述する。）を植生の初期侵入に大きな影響を与える表層土壌材料把握等に適用した事例を報告した。

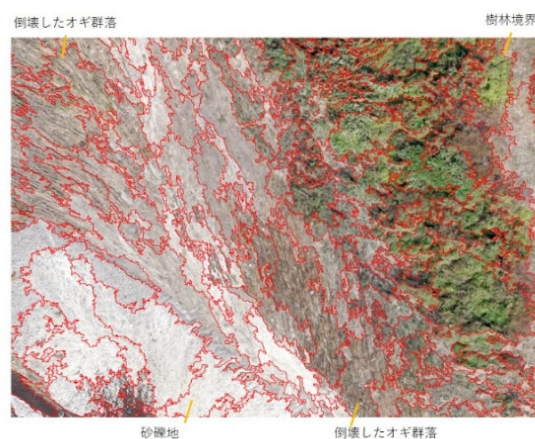


図-1 平成29年度におけるUAV画像・AIを用いた植生図の自動作成結果

その結果、UAV画像とAIを用いた植生図の自動作成の可能性の確認、空間指標である群落クラスタ

(Plant Community Cluster ; 以下、「PCC」と記述する。)の植生動態モデルの中小面積の植物群落動態の再現の成功、CIM 技術の適用による河道内地形・植生動態の再現の可能性を確認した。さらに、PCC 植生動態モデルを梯川水系梯川の河川改修計画に適用し、提案・概成した PCC 植生動態モデル、UAV 画像、AI を用いた植生図の一般性の検証を行った。

令和元年度は、平成 30 年度までに開発してきた PCC 植生動態モデルを急流河川に適用することで、当該モデルの汎用性の向上を図った。様々な検討により、妥当性が高いと判断された植生遷移の判別関数の改良を行い、手取川を対象に再現計算を実施した。従来モデルでは河畔林を過大に推定していたが、改良モデルでは、攪乱系草地とススキ系草地の混在を表現することができた。

近年、全国的に河川を対象とした航空レーザ測量が実施され、航空写真や 3 次元点群データの蓄積が進んでいる。令和 2 年度には、3 次元点群データ等を用いた樹木体積の推定技術の開発を、国土交通省中国地方整備局浜田河川国道事務所と連携し、日本海に面する高津川水系高津川(直轄管理区間)において実施した。この技術開発は、維持管理の視点からみた最適な河道内の植生管理に不可欠となる植生(特に、樹木)繁茂状況のモニタリング技術であり、また、効率的な河道管理を実現するための中核的な技術でもある。現地調査と、試験伐採から取得した現地データを用いて、航空レーザ測量等による樹木体積の推定技術を構築した上で、その実装性を確認した。当該技術は、適用例に限られるため、さらなる検証は必要であるものの、その有用性が認められた。また、令和 3 年度は、航空レーザ測量によって取得される航空写真と 3 次元点群データを活用した河川景観判読 AI の開発を試みた。河川環境管理に求められる植物群落、群集レベルでの自動判読を念頭に、開放水面、自然裸地、草地、樹林地などの景観要素の判読が可能な AI を、様々な手法のうち、エクस्पレイナブル AI であるランダムフォレストを技術のベースとして開発した。九頭竜川の直轄管理区間における試行計算から、対象河川を増やし、強化学習の実行による同 AI の判読性能を高める必要はあるものの、一定程度の判読精度を有することを確認することができた。

本報告書では、はじめに、PCC 植生動態モデルの現地河川への適用について、梯川における適用事例(2章)と、手取川における改良した PCC 植生動態モデ

ルの適用事例(3章)を示す。次に、植生や、河川景観の判読技術に関する研究成果として、UAV 画像を用いた植生図の作成(4章)と、航空レーザ測量による航空写真と 3 次元点群データを用いた河川景観判読技術の構築(5章)を示す。最後に、3 次元点群データ等を用いた樹木体積の推定技術(6章)を報告する。

## 2. 梯川における PCC 植生動態モデルの適用

### 2.1 梯川の概要

梯川は、その源を石川県小松市の鈴ヶ岳(標高 1,175m)に発し、山間部を北流して手取川と梯川とによって形成された扇状地を西に蛇行し、小松市街地を貫流し、前川を合流した後、日本海へ注ぐ、幹川流路延長 42km、流域面積 271km<sup>2</sup>の一級河川である(図-2)。梯川は、明治期までは小松市や能美市付近を蛇行して流れ水害が頻発していたため、明治期以降、捷水路の開削などの事業が行われ、現在では、引き堤による流下能力の改善が行われている。引き堤事業後には、堤外地に現在の高水敷よりも広い高水敷の形成が予測される。流量特性は、秋期に台風起因する出水があり、既往最大流量が約 667m<sup>3</sup>/s である。

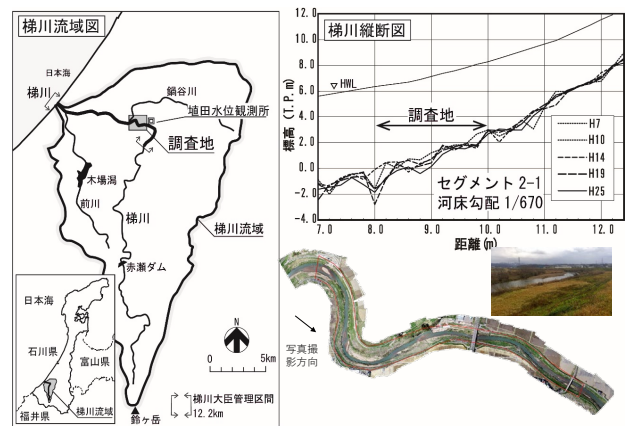


図-2 梯川の概要

しかし、平水流量は約 15 m<sup>3</sup>/s であるため、広がる高水敷上には定期的な攪乱が期待できず、樹林化の進展が懸念される河川である。引き堤という全国でも珍しい事業により流下能力を改善し、植生管理にも取り組む点で、PCC 植生動態モデル、UAV 画像・AI を用いた植生図の作成等の新たな試みを行うのに適していると考え、2019 年(H31年)に研究を実施した。

本研究では、梯川の中流部、佐々木・荒木田地区(以下、「調査地」と記述する。)を対象とした。調査地は、

梯川中流部（直轄区間 8.1 km～10.5km）の縦断勾配変化地点に位置する蛇行区間である。捷水路の開削等による単調な河道が続く下流区間と比較して、低水路の水域には明瞭な瀬・淵が、低水路の河岸域には砂礫帯が形成される。河岸域は主にツルヨシ群集が生育する。高水敷には、広大なススキ群落形成される等、生物生息空間が良好な区間である。しかし、近年、ススキ群落内に樹林の侵入・形成が進み、河川管理上の問題となっている。梯川流域で進む引き堤事業後は、現在よりも広い高水敷が形成され、ススキ群落の定着が期待される反面、樹林化の進展が懸念されている区間である。調査地を含む梯川においては、1993年（H5年）、1998年（H10）、2002年（H14）、2008年（H20）、2013年（H25）に河川水辺の国勢調査（以下、「水国」と記述する。）による植生調査（以下、前述の期間を「水国作成期間」と記述する。）が行われ、景観・植物群落遷移の時系列的な把握が可能な区間となっている。

## 2.2 梯川の河川改修計画における PCC 植生動態モデルの適用を通じた一般性の検証

平成 28 年度までの検討で、PCC 植生動態モデルの開発・改良を行った。PCC 植生動態モデルの初期モデルは、対象区間で支配的な PCC の空間分布再現は可能であるが、小規模な PCC の再現ができない問題点があった。小規模な PCC を構成する植物群落の一部には、近年減少傾向にあり、その内部に重要種を内在する湿性植物群落等が含まれる。PCC 植生動態モデルが小規模な植物群落を再現することは、植物群落の保全・再生計画を立案する上で欠かすことができない機能である。

平成 29 年度までの検討では、PCC 植生動態モデルが小規模な植物群落を再現できない点の改良を行った。PCC 植生動態モデルは、平水位からの比高、水際からの距離、出水時の掃流力から、植物群落を類型化した後、平水位からの比高、水際からの距離、出水時の掃流力と植生遷移経路の頻度から、平水位からの比高、水際からの距離、出水時の掃流力の個別の遷移確率を算定する。さらに、評価関数により、最も遷移確率が高い PCC を選定する手順で遷移確率を特定する。しかし、この評価関数は、物理環境特性への適応幅が広い PCC が支配的な PCC に遷移するという誤りを生む。

この対策として、平成 29 年度においては、遷移確率の高い群落を評価対象から外し、評価を行うことにより、吉野川、那珂川において小規模群落の再現性が向上した。この結果を受け、平成 30 年度は、実際の

河川改修計画に本手法を適用し実用性を検証するとともに、PCC 遷移二段階評価手法の一般性を検証した。

## 2.3 PCC 遷移二段階評価手法の評価と一般性の検証

### 2.3.1 対象データと方法

調査地における水国作成期間の内、2008 年（H20）、2013 年（H25）に作成された河川環境基図の植物群落を解析対象とした。地理情報システム（ESRI 社、ArcMap10.6）を用いて、2 時期 {2008 年（H20）、2013 年（H25）} の植物群落と、水際からの距離、平水位からの比高、掃流力の 3 因子を関連付けた。その後、各時期における植物群落を分類し、PCC を作成した。更に、2 時期における PCC の変化と 3 因子の関係性の確率密度関数を作成した。その後、以下の、評価関数で総合遷移確率を算出した。

$$E_s = \frac{P_{wd} + P_{ew} + P_t}{3} \quad (1)$$

ここに、 $E_s$ : 総合遷移確率、 $P_{wd}$ : 水際からの距離に基づく遷移確率、 $P_{ew}$ : 平水位からの比高に基づく遷移確率、 $P_t$ : 掃流力に基づく遷移確率である。

総合遷移確率を用いて評価する場合、梯川におけるススキ群落のように、生育面積が大きく 3 因子に広い選好性を持つ植物の場合、他の植物群落よりも総合遷移確率が著しく高くなる。そのため、総合遷移確率の算出、遷移する植物群落の特定を複数回に分け実施した。具体的には、総合遷移確率が著しく高く、数値でススキ群落への植物群落遷移が推定された場合は対象グリッドの植物群落遷移を確定する。遷移を確定した対象グリッドを除去した後、再度、総合遷移確率を算出し、植物群落遷移を確定する方式とした（以下、「PCC 遷移二段階評価手法」と記述する。）。

### 2.3.2 PCC 遷移二段階評価手法の評価と一般性の検証

PCC 遷移二段階評価手法の一般性を確認するため、一段階の評価で行った場合、PCC 遷移二段階評価手法を用いた場合で評価を行った。

図-3 に H25 植生図の観測データ、PCC 遷移二段階評価手法適用前（モデル補正前）、PCC 遷移二段階評価手法適用後（モデル補正後）の順でデータを示す。モデル適合率は、モデル補正前 75%だったものが、モデル補正後 85%に向上した。本手法は、吉野川水系吉野川、那珂川水系那珂川、信濃川水系千曲川でもモデルの再現性が向上しており、一般性があると考えられる。今後は、他の河川においても検証を行い、一般性

の確認を行う必要があると考えられる。

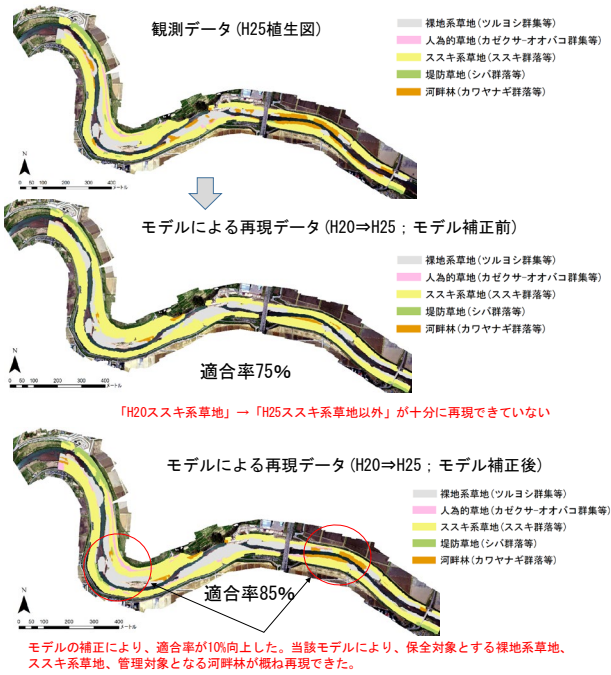


図-3 PCC 遷移二段階評価手法の有効性の検証

### 3. 手取川における PCC 植生動態モデルの適用

#### 3.1 手取川の概要

手取川は、その源を白山（標高 2,702m）に発し、尾添川、大日川などの支川を合流しながら白山市鶴来大国町付近に至り、これより山間部を離れ石川県の誇る穀倉地帯である加賀平野を西流し、白山市湊町付近にて日本海に注ぐ、幹川流路延長 72km、流域面積 809km<sup>2</sup> の一級河川である。急流河川である手取川の河床勾配は、緩やかになる河口付近でも 1/353 程度である（図-4）。したがって、洪水時のエネルギーは大きく、河床材料の移動にともない滞筋は動きやすいため、護岸の基礎や、河川敷が浸食作用を受けやすい。

手取川の直轄区間では、河床低下が進んでいる。図-5に示すように、例示する断面では、1979年（S54）と2007年（H19）の低水路河床高を比較すると標高 65.4m から 64.2m に低下している。この要因としては、1979年までに竣工した手取川上流のダム群の存在と、近年では禁止されているがかつては砂利採取が行われていたことなどが挙げられる。

また、図-6に示すように、近年においては、河道に

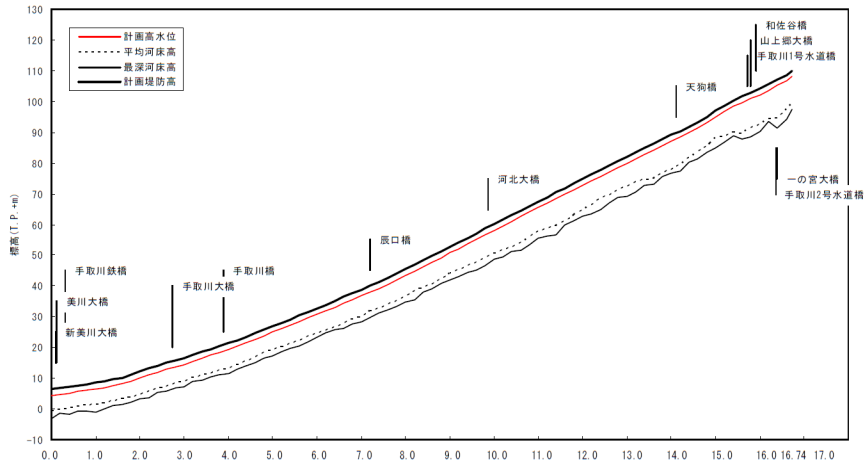


図-4 手取川の縦断面図

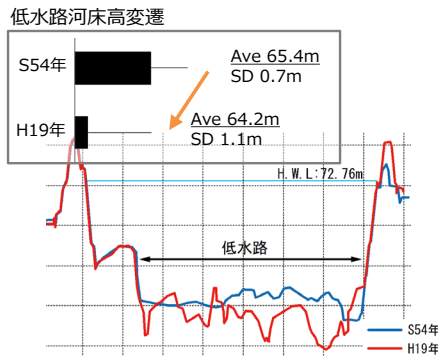


図-5 低水路河床高の経年変化



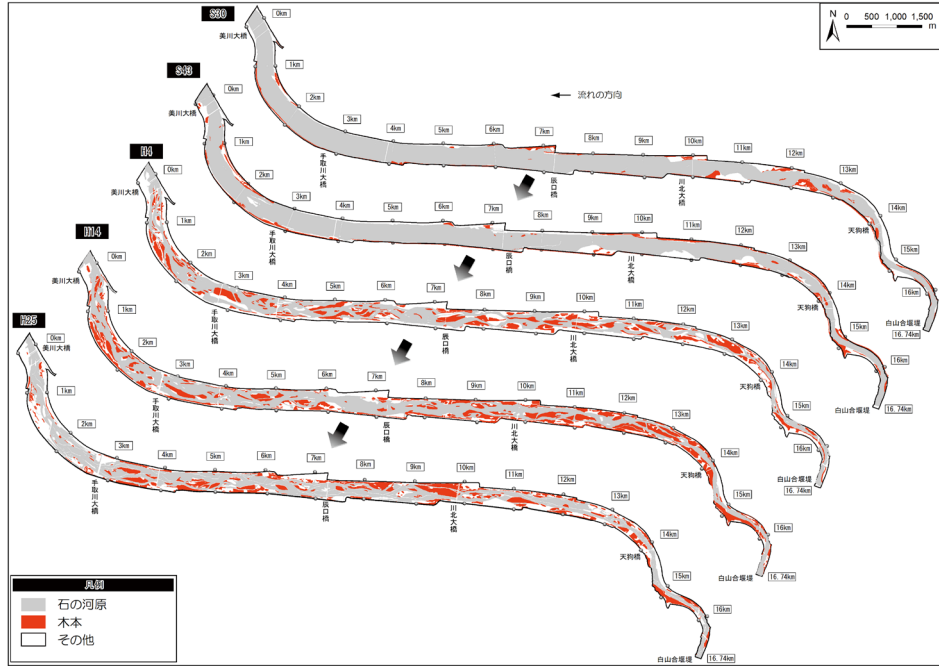


図-6 直轄区間における樹木の繁茂域の変遷

占める樹木の繁茂域の割合が大きい。対象年は、1955年 (S30)、1968年 (S43)、1992年 (H4)、2002年 (H14)、2013年 (H25) であり、これら5ヵ年分の航空写真を判読することで図を作成している。ここからわかるように、1968年までは砂礫河原が広がっており、樹木の繁茂域は限定的であったが、1992年には急激に樹林化が進行し、それ以降についても広い繁茂域を保っている。

### 3. 2 PCC 植生動態モデルの適用

平成30年度までに開発したPCC植生動態モデルは、流路の固定化が進んだ河川の比較的攪乱作用を受けにくい高水敷を想定し、開発と検証を進めてきた。梯川をはじめ、いくつかの河川に適用し、PCC植生動態モデルの再現性の高さを確認することができた。

令和元年度は、これまで開発を進めたPCC植生動態モデルを手取川に適用することとした。そもそも、対象とした手取川は、これまでの対象河川と比べて河床勾配が大きく、河床材料の移動も活発であることから、水際部が洪水攪乱を受けやすい特徴を持つ。そこで、急流河川にも適用可能なPCC植生動態モデルに発展させるために、植生遷移の判別関数の改良を中心に、モデルの汎用性の向上を図った。具体的には、水際近傍の攪乱卓越域と、それ以外の履歴効果卓越域にわけて判別関数を用いることとした。すなわち、攪乱卓越域では、洪水攪乱によって水際が変化する手取川

の特徴に鑑みて、植生遷移の初期に裸地面へと侵入する攪乱系草地在、攪乱作用により破壊されるプロセスを導入した。

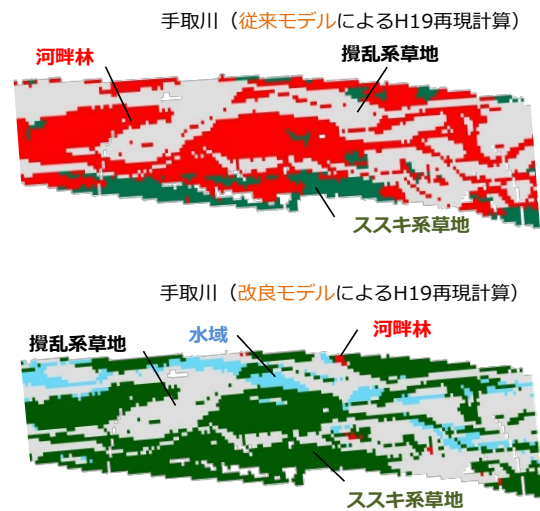


図-7 手取川における植生動態モデルの適用

その結果を図-7に示す。ここでは、上段に従来モデル、下段に改良モデルによる再現計算の結果を示す。なお、植物群落の分類については、従前の方法にしたがって、クラスタ分析により類型化を行い、河畔林、攪乱系草地、ススキ系草地に分類した。従来モデルで

は、水際部の攪乱作用が植生に与える影響を考慮できていなかったため、大部分が河畔林に遷移する結果となった。他方、改良モデルでは、水際部に主として繁茂する攪乱性草地が、洪水時の攪乱作用によって破壊されるプロセスを導入したことから、攪乱性草地、ススキ系草地の混在を表現することができた。

#### 4. UAV 画像と AI を用いた植生図の自動作成の一般化への取り組み

##### 4.1 植生図の自動作成の概要

平成 29 年度までの研究により、UAV 画像を対象に水域・植物群落等の境界を識別した後、画素・標高値等の情報に基づき、UAV 画像と AI を用いた植生図の自動作成が可能となった。しかし、この方法は、画像解析ソフトウェア、SfM、GIS、AI ツールに関する解析経験がない場合には実施が難しいものであった。

特に、UAV 画像と AI を用いた植生図の自動作成における境界抽出においては、市販ソフトのオリジナルアルゴリズムである教師無し分類手法を適用した。このオリジナルアルゴリズムには独自のセグメンテーション法（UAV 画像を構成する画素特性に基づき、画素特性が類似する画素をオブジェクト化したもの）が用いられており、利用するには高額なライセンス料が必要となっている。

以上のような背景から平成 30 年度は、一般的に普及する画像解析手法とその手法を実装するソフトウェアを用いて簡単に植生図の自動作成を行えるかを検討した。その初期段階として既往の画像解析技術で汎用的に普及する ISODATA 法の水域・植物群落の境界を識別できるかの試行を行った。4.2 節に ISODATA 法の概要、4.3 節に ISODATA 法の結果を示す。

##### 4.2 ISODATA 法の概要と一般的な教師無し分類手法である k-means 法との違い

ISODATA 法は、画像解析における教師無し分類手法（教師データを必要とせず、画素等の属性情報の類似性に基づく分類手法）の一つである。教師無し分類手法で頻繁に用いられる手法としては k-means 法があげられるが、k-means 法とは分類クラスの変異性において異なっている。

k-means 法は、あらかじめ指定したクラスに画素を分類するのに対し、ISODATA 法は設定したピクセル数に満たないクラスを他のクラスと結合させる、または、消去する点、クラス間の統計的距離が設定した距離よりも短い（類似している）場合にはクラスを

結合させる点において、k-means 法と異なる。ISODATA 法は、個々の画素の値への変化を緩和させ、人間の認識に近いクラス数に落ち着かせ特性がある。そのため、H30 年度は、ISODATA 法を選択し、試行的に、UAV 画像と AI を用いた植生図の自動作成を行った。

##### 4.3 ISODATA 法適用の結果と UAV 画像と AI を用いた植生図の自動作成への適用可能性

図-8 に ISODATA 法画像分類結果の検証を上から、H25 植生図の観測データ、植生図の自動作成結果の順に示す。ISODATA 法は、砂礫河原部（A 部）、ススキ群落部（B 部）、河岸植生部（主としてヤナギ類、C 部）の位置、面積、境界を良好に抽出した。本手法は、市販の GIS ソフトウェアに実装されているアルゴリズムであるため、特別なソフトウェアの購入等が必要ない。今後、これらの手法の一般性の検証が進み、植生図の自動作成を可能とするモデルモジュールの配布が可能となれば、UAV 画像の更なる活用が可能となる。

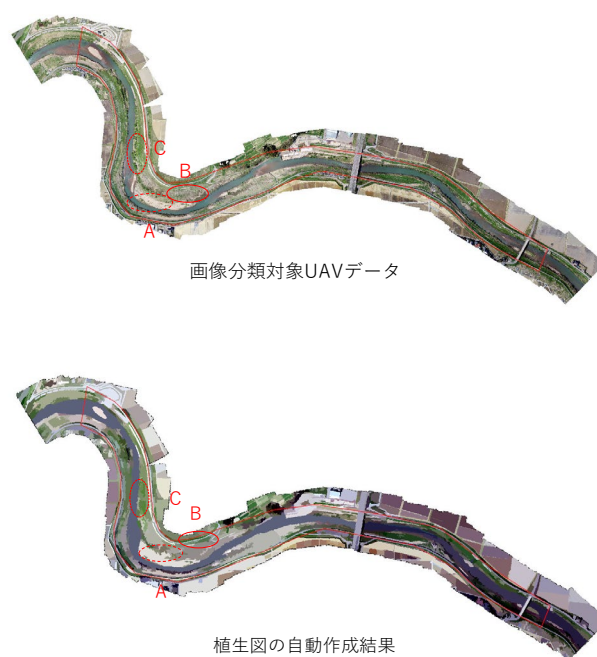


図-8 ISODATA 法画像分類結果の検証

#### 5. 航空レーザ測量成果を用いた河川景観判読の自動化の取り組み

##### 5.1 はじめに

令和元年度には、原則として点群測量により河川定期縦横断測量を実施することが、事務連絡（国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室）と

して通達された。したがって、今後一層、航空レーザ測量等によって取得される航空写真と3次元点群データが、全国各地の河川において蓄積されるものと期待される。したがって、昨今、様々な技術が開発されている UAV 画像を用いた画像解析に加えて、航空レーザ測量による航空写真と3次元点群データを活用した河川景観の自動判読技術を確認することが河川における植生管理の効率化に貢献すると考えられる。令和3年度には、航空レーザ測量成果を活用した河川景観判読 AI の開発を試みた。河川環境管理では、植物の群落、群集レベルでの類型化が重要である。したがって、本研究では、そのような判読性能を有する AI への発展を念頭に、景観単位での判読が可能な河川景観判読 AI の開発を試みた。具体的な景観要素は、開放水面、自然裸地、草地、樹林地、施設地とし、水理解析に用いられる重要なパラメータの一つである粗度係数の違いを表現できる程度に類型化した。また、将来的には植物群落、群集の判読性能を有する AI への発展を念頭に、水国調査における植物群落、群集項目との整合性に配慮して、本研究で対象とする景観要素を設定した。

## 5.2 河川景観判読 AI の開発

本研究で構築した河川景観判読 AI は、機械学習の一つであり、エキस्पレイナブル AI として有名なランダムフォレストを技術のベースとした。

景観要素は、対象地である九頭竜川の18~30kpにおいて、水国（2015年）で確認された53の植物群落などを開放水面、自然裸地、草地、樹林地、施設地に集約することで5分類とした。学習もしくは検証データは、九頭竜川での航空レーザ測量成果（2016年）に基づいて、8種類のラスターデータを準備した。それぞれ、オルソ画像（航空写真）、近赤外オルソ画像、DEM（Digital Elevation Model）、比高図（DEM-水面高）、樹高図（DSM[Digital Surface Model]-DEM）、赤色立体地図（DEM、DSM）、レーザ反射強度分布図である。また、水国の調査データ（2015年）を参考に、それらデータの堤外地5kmを、5つの景観要素のいずれかに分類した。また、AIは、8種類を入力データとし、不純度（ジニ係数）が0になるまで条件分岐を繰り返す、ランダムフォレスト（分類木）を構築した。ここでは、100のモデルが作成され、それらの多数決による結果が、出力される景観要素となる。また、河川景観の判読を実行する上で、その基本単位となるポリゴンを生成する必要があるため、本研究では、セグメン

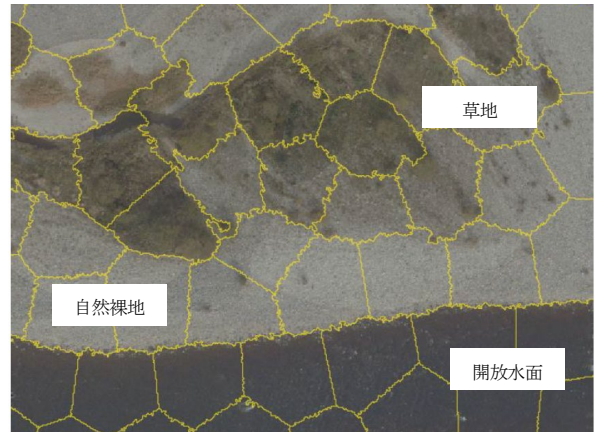


図-9 slicによるセグメンテーションの例

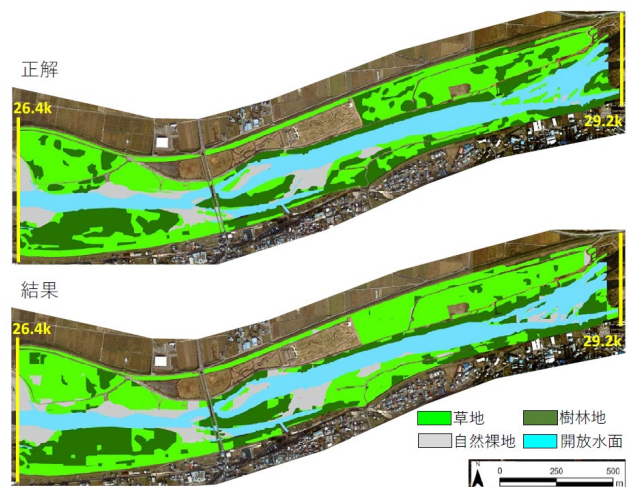


図-10 河川景観判読 AI による試行結果 4)

テーション手法の一つである slic を採用した。図-9には、slicによるセグメンテーションの結果を例示する。開発した河川景観判読 AI は、九頭竜川を対象に試行計算を実行した。九頭竜川の18~26kpを学習データ、26~30kpを検証データとし、施設地を除く4つの景観要素を対象に判読精度を確認した。

## 5.3 河川景観判読 AI による試行結果

河川景観判読 AI による試行結果を図-10に示す4)。まず、判読精度を概観すると、景観要素ごとの検出率（recall）は、開放水面72.7%、自然裸地90.3%、草地75.6%、樹林地62.2%となった。高い検出率を期待した開放水面であったが、水際や細流を自然裸地や、樹林地に誤判読したために、72.7%の検出率に留まった。この他、植物の高さが異なると考えられた草地と樹林地は、樹高図を入力データとすることで、判読精度の高まりを期待したものの、両者が混同されるケー



スを多く認め、それぞれ、75.6%、62.2%の検出率となった。しかしながら、樹林地を除く検出率は70%を超え、とりわけ、自然裸地については、90.3%と非常に高い検出率を得ることができた。対象河川を増やし、強化学習を実行することで、さらにAIの判読性能を高める必要があるものの、一定程度の判読精度を有することを本試行計算から確認した。今後は、草地と樹林地の判読精度の向上を図るとともに、生長・拡大能力の高さ故に、管理対象となり易い、ヤナギ類、ハリエンジュ、タケ・ササ類を景観要素に加えるなど、河川景観判読AIの機能を高めることも重要だと考えられる。

## 6. 航空レーザ測量等から取得される3次元点群データ等を用いた河道内樹木の資源量解析

航空レーザ測量は、河川地形の把握を本質的な目的としており、計測される陸域-水域を含む地面の標高(DEM: Digital Elevation Model)が河川管理における基礎情報として利用される。他方、そのプロセスにおいて、樹木の高さや、その形状などを捉えることができるデータが生成(例えば、DSM [Digital Surface Model]など)されるものの、その活用が十分に進んでいるとは言い難い。

河川における植生管理は、治水、環境、維持管理において欠かすことのできない重要なテーマである。とりわけ、樹木の繁茂(樹林化)は、河積の阻害による治水機能の低下や、河川性の植物、鳥類、昆虫類の生息適地(例えば、砂礫河原など)の減少にともなう環境機能の低下を引き起こすため、モニタリング技術を確認することは急務と言える。これまでの航空写真の情報に基づく、水域、裸地、草地、樹林地など、それぞれの景観要素の平面的な把握に留まるが、3次元点群データを用いることで、鉛直構造を持つ樹木を立体的に捉え、その体積を求めることが可能なモニタリング技術につながる可能性がある。そこで、令和2年度には、3次元点群データを活用することで樹木資源量を推定し、将来的には、伐採にともない拡大する河積や、その費用(運搬費)を概算するための一連の技術の体系化を図る基礎を構築した。

樹木資源量の推定技術の開発は、国土交通省中国地方整備局浜田河川国道事務所と連携して実施し、対象地は日本海に面する高津川水系高津川(直轄管理区間)とした。本研究では、航空レーザ測量、現地調査および試験伐採をほぼ同時期に実施し、設定された3区画

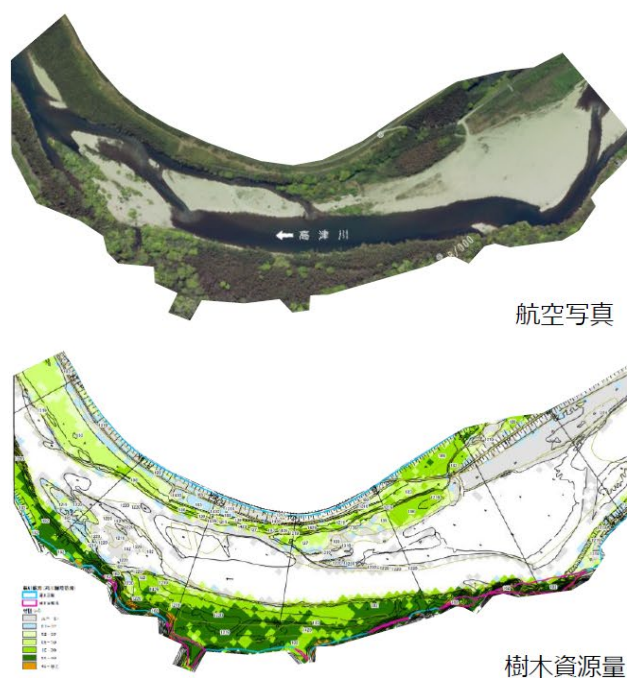


図-11 高津川における河道内樹木の資源量解析の例

においてそれらの関係性を分析した。具体的には、航空レーザ測量から計算される空間情報と、現地調査と試験伐採から求まる単位面積あたりの樹木資源量(樹木1本ごとの体積から積算)との整理に基づき、それらに良好な関係があることを確認した上で、空間情報から樹木の実体積を推定するための相関式の作成を試みた。また、それを高津川の直轄管理区間に拡張することで、図-11に例示するように実装性が認められた。当該技術は、適用例が限られるため、さらなる検証が必要であるものの、河道内樹木の資源量を推定するスキームとして有用であることを確認した。

## 7. おわりに

本研究では、河川の物理環境と植生遷移の因果関係の解明、これらの因果関係に基づく植生動態の将来予測を行う技術として、その中核となるPCC植生動態モデルを構築した。梯川や、手取川に適用することで、比高、水際からの距離、掃流力が植生遷移を左右する重要な支配要因であることを明確化した。また、その成果に基づき、植生の遷移確率の判別関数を構築し、PCC植生動態モデルへの導入による予測精度の向上を認め、PCC植生動態モデルの現地河川への実装性を高めることができた。

他方、河道内の植生管理においては、植物繁茂の現



状を捉えるためのモニタリング技術に対する高いニーズがある。昨今は、UAV 空撮技術、航空レーザ測量技術、AI 技術の進展が著しく、本研究では、それらの最先端の技術の導入による河道内植生管理の効率化を検討した。UAV 画像と航空レーザ測量成果を用いた植生および河川景観の判読技術を構築し、強化学習などによる判読性能の向上の必要性はあるものの、開放水面や自然裸地など景観要素のレベルであれば、比較的高い精度で景観判読を実現可能な技術を構築することができた。また、樹木伐採のコスト算出の根拠の一つとなる樹木体積を簡便に求める手法を構築した。判読技術と同様に、航空レーザ測量による 3 次元点群データを活用することで、引き続き、同手法の現地適用性の検証は必要であるものの、河道内に繁茂する樹木の資源量を概算することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 田屋祐樹・榎島みどり・赤松史一・中西哲・三輪準二・萱場祐一：河道内樹木の効率的な管理に向けた伐採後の萌芽再生抑制方法の検証、河川技術論文集、第19巻、pp. 459-464、2013.
- 2) 松田浩一・内堀寿美男・清水義彦・石原正義・藤堂正樹：固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究、河川技術論文集、第16巻、pp.235-240、2010.
- 3) 山口里実・渡邊康玄・武田淳史・住友慶三：流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討、河川技術論文集、第21巻、pp.217-222、2015.
- 4) 溝口裕太・中村圭吾・戸村健太郎・泉田温人・篠原光礎：ランダムフォレストを用いた景観判読AIの開発と九頭竜川における試行、応用生態工学会第24回研究発表会、2021.

## 11.2.2 魚類生息・産卵環境及び河道維持管理を考慮した低水路の河道掘削技術に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

研究担当者：巖倉啓子、村山雅昭、野上毅、谷瀬敦、  
布川雅典、鈴木朋子、川村里実

### 【要旨】

本研究は、河道掘削等の人為的改変に対する魚類の応答特性の把握を目的に実施している。2017年に豊平川において小規模掘削路造成に伴う alcove(たまり)の物理環境の変化とサケ産卵床数との関連について考察した。2018年にはサケ産卵床として重要な河床間隙の水質との関連分析を行い、本流や分流、alcove(閉塞時)など場による水質環境の違いを考察した。さらに2019年に産卵床における発眼期までの生残率(以下、生卵率という)と産卵環境について調査を行い、その関係について分析している。2021年には alcove(開口時)や低水路河道掘削後の掘削面などで水質等の追跡調査を実施した。さらに、サケ産卵床として重要な砂州微地形の形成過程を明らかにするために、数値実験による単列砂州地形の変化過程を把握確認し、実際の河道微地形との類似点やハビタットの特徴などについて、考察を行った。

キーワード：サケ、豊平川、alcove、分流、産卵床、環境改善、生卵率、間隙水、水質、水温

### 1. はじめに

近年、砂州の固定化やそれに伴うみお筋の固定化による河床低下の進行が問題視されている<sup>1)</sup>。これらは治水、河川維持管理上の問題だけではない。河床底質の変化や氾濫原の減少から、魚類の生息場や産卵場にも影響を及ぼしている。

これまで流下能力向上を目的として、全国的に河道掘削が行われてきた。最近では、固定砂州内に掘削路を設けることで、中小規模洪水でも洪水攪乱を促す取り組みもある<sup>2)</sup>。攪乱効果によって樹林化抑制や、掘削路内に魚類の生息場が創出できると言われている<sup>2)</sup>。また、河道拡幅により、砂礫の堆積を促して河床低下を解消する取り組みもある<sup>3,4)</sup>。しかし、掘削の方法によっては、土砂が再堆積することで、期待した結果が持続しない場合もある<sup>5)</sup>。このように、河道掘削の手法と期待する結果、その河道応答は様々である。しかし、これまで治水と魚類の生息環境および産卵環境が両立できる河道維持管理を考慮した掘削手法に関する知見は少ない。

この様な背景から本研究では、達成目標②「河道掘削等の人為的改変に対する魚類の応答予測技術の開発」について検討し、河床の地形・底質・水質と魚類の生息・産卵環境との関連性把握と、改変後の河道評価を実施した。

2017年度に、石狩川支川豊平川中流部における小規模掘削路によるサケ産卵環境改善の試験施工が産学官連携で行われ、産卵床数が前年の2倍以上に増加した

結果が得られた。その後、2018年7月に、出水により掘削路に土砂が堆積することで掘削路は閉塞した。堆積傾向の砂州に掘削路を造成し、産卵場環境を改善していく上で、このような現象は十分に想定されることだと考えられ、閉塞後のサケ産卵床の分布状況などについても調査を行い、閉塞の有無と物理環境や水質、水温の変化について把握し、小規模掘削路の効果を確認した。またこの調査箇所周辺で、産卵床における発眼期までの生残率(以下、生卵率という)と産卵環境について調査を行い、その関係について分析した。

さらに、サケ産卵床として重要な砂州微地形の形成過程を明らかにするために、数値実験による単列砂州地形の変化過程を把握確認し、alcoveや砂州前縁部などの形成過程や実際の河道微地形との類似点、ハビタットの特徴などについて、考察を行った。

## 2. 小規模掘削路の試験施工と産卵床環境の変化

### 2.1 概要

#### 2.1.1 小規模掘削試験施工

豊平川では、毎年中流部の流程約10kmの範囲でサケ(*Oncorhynchus keta*)の産卵が見られる<sup>6)</sup>。千歳川や豊平川のサケは、9月から10月をピークとする前期遡上群と、12月から1月をピークとする後期遡上群<sup>7,8)</sup>と大きく分けられており、前期群は産卵範囲の全域に、後期群は産卵範囲の下流側に集中している<sup>7)</sup>。上流側の産卵域では、河床低下により岩盤の露出が進むことでサケの産卵に適した礫の減少が懸念されてい

る<sup>7)</sup>。また後期群の産卵範囲の最下流部は、湧水に鉄分が含まれることでサケが忌避している可能性が指摘されている<sup>9)</sup>。このように、豊平川のサケを取り巻く河川環境は厳しい現状にある。このような中、前述の後期群の産卵床の分布が多い産卵範囲の内、産卵床数が減少しているところがある。寄り州の下流部にくぼ地となって形成された水裏部（以降 alcove と呼ぶ）において、礫の上に細粒分が堆積しており、産卵床の減少の原因は、この細粒分の堆積によるものである可能性があった。



図-1 石狩川支流豊平川中流部に位置する調査地（地理院地図（提供 国土院）に加筆）

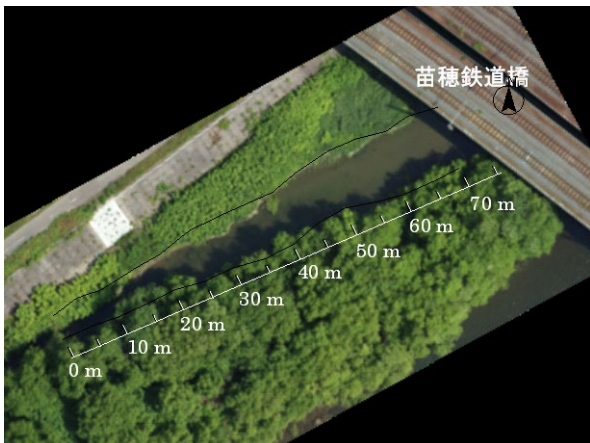


図-2 苗穂鉄道橋上流左岸の水裏部（alcove）

これまで、サケの生息環境に配慮するため、魚道整備をはじめとする遡上阻害の解消を行ってきた。しかし、産卵環境改善を目的とした取り組みはこれまで殆ど行われていない。これらを踏まえ、2017年9月に豊平川の alcove において、サケ産卵環境改善に向けた取り組みとして、主流路から導水するための掘削路を造成した。



写真-1 alcove 上流端へ続く掘削水路（2017/9/26 撮影）

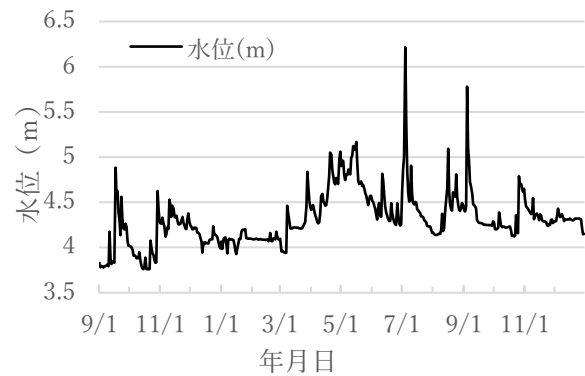


図-3 雁来水位観測所日平均水位（2017-2018）

### 2.1.2 調査地概要

調査地の JR 橋 alcove(分流)は、札幌市中心部を流れる豊平川の苗穂鉄道橋直上流に位置し（図-1、図-2）、石狩川合流点から上流 12.2 km 左岸側の alcove で、主流路からの背水と、砂州からの浸み出しが目視で確認でき、平水時は流れが停滞した状態の水域である。

Alcove の縦断延長は約 80 m である。上流端は、水面幅約 2.5 m あり、下流方向に沿って徐々に水面幅が広がりながら、上流端から約 25 m の地点で水面幅が大きく拡幅して約 9 m となる。上流端から下流 80 m 付近の右岸にみられる砂州の最下流端地点で豊平川の本川と接続する。

2017年9月25日から26日にかけて alcove 上流部を掘削し本川につなぐ水路を造成した。掘削水路は、延長 120 m、河床勾配 200 分の 1、水路下幅 1 m から 2 m 程度、床堀勾配は 1:1 程度とした（写真-1）。

### 2.1.3 2017 年度及び 2018 年度の流況

調査地近傍の雁来水位観測所（豊平川 KP. 11.1）の 2017年9月から2018年12月までの水位の状況を図-3に示す。

掘削水路を造成した 2017年9月26日以降、サケ遡上期の水位は過去 5 年の雁来水位観測所の平均平水

位の 4.13m を下回る日が多く、年平均水位も過去 5 年で最も低い年であった。

2018 年の融雪期以降は比較的高い水位が続き、その後の 7 月 5 日に大雨による増水で雁来水位観測所地点において過去 10 ヶ年で第 2 位の水位となる 7.63m を記録した<sup>11)</sup>。この出水により、2017 年に造成した水路が砂礫で堆積し閉塞した。

水路閉塞後の 2018 年度のサケ遡上期の水位は 2017 年度と比較して高く、水位が高い日には閉塞した水路上も冠水し alcove 内にも速い水流が生じていた。

## 2.2 調査方法

### 2.2.1 産卵床調査

調査区間におけるサケ産卵床数は札幌市さけ科学館が実施している産卵床調査の結果を利用した。調査は毎年 9 月からサケの遡上が終了するまでの期間行われており、複数人で徒歩により河床を確認する方法で産卵床数を計数している。ここでは 2013 年 9 月から 2019 年 3 月までのデータを使用した。これらのデータの位置情報をもとに alcove 内における産卵床の分布を明らかにした。また、9 月から 11 月までに確認された産卵床を前期群、12 月から 1 月までに確認された産卵床を後期群とした<sup>8)</sup>。

### 2.2.2 水深、流速、河床表面粒径および細粒分堆積厚の計測

水深、流速および河床表面粒径の計測は、閉塞前の 2017 年 10 月 27 日と、閉塞から 3 ヶ月経過した 2018 年 10 月 20 日に実施した。掘削路が alcove へ接続する部分を alcove の上流端 (0m 地点) とした (図-2)。

閉塞前の 2017 年 10 月の調査は、上流端から 10m の地点から 30m 地点までの区間と、75m 地点を計測対象区間および地点とした。計測は、この区間に 5m 間隔でトランセクトを設け、トランセクト上に等間隔に 4 点の計測点を設定して行った。30m 地点から 75m 地点までは細粒土砂が堆積しており、産卵床には適さないと調査前に判断し調査地点から除外した。

閉塞後の 2018 年の 10 月の調査は、0m 地点から 70 m 地点までの区間を計測対象とした。0m から 40m 地点までは 5m 間隔で、40m 地点以降は 10m 間隔でトランセクトを設定し、トランセクト上に 50cm 間隔に計測点をとり、各点における水深、流速、河床表面粒径を計測した。

2017 年の流速は水深の 60% の深さと河床付近で電磁流向流速計を用いて計測した。2018 年は 50% の深さの位置で電磁流向流速計を用いて計測した。

河床表面粒径の計測は Inoue & Nunokawa (2002)<sup>12)</sup>

の示す格子枠を使用した手法 (以下、INU グリッド法とする) により計測をした。INU グリッド法は 0.5 m 四方の格子の内部を 0.1 m 四方の計 25 の小格子枠に分割し、その各小格子内に優占する河床材料の表面粒径を、目視により段階別に分類する方法である。本研究では次の通り 1 から 6 の粒径階に分類した。1; 岩盤あるいはコンクリートブロック、2; 砂もしくはそれより細かいシルトなど (2mm 未満)、3; 小礫 (2mm 以上 16mm 未満)、4; 中礫 (16mm 以上 64 mm 未満)、5; 大礫 (64mm 以上 128mm 未満)、6; 巨礫 (128 mm 以上)。

細粒分堆積厚の計測は、掘削水路造成前の 2017 年 9 月 6 日 (1 m から 24 m まで) と 9 月 12 日 (26 m から 40m まで)、掘削水路造成後は 2017 年 10 月 20 日に、水路閉塞後は 2018 年 11 月 14 日、15 日、20 日および 12 月 6 日の 4 日間行った。細粒土砂の堆積厚は細粒土砂上面から水面までの距離と細粒土砂堆積底面から水面までの距離をそれぞれスタッフにより計測し、その差を細粒土砂の厚さとした。

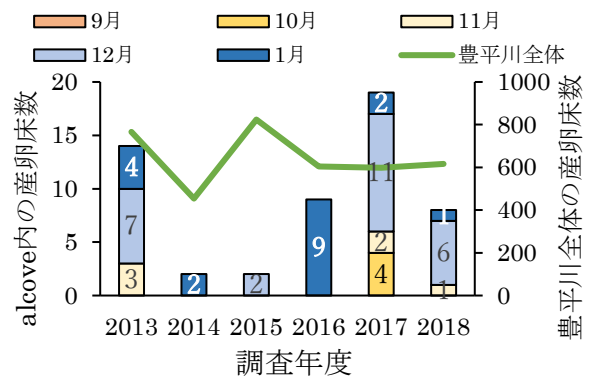


図-4 年度毎の産卵床確認数

## 2.3 結果

### 2.3.1 産卵床調査結果

図-4 に alcove 内と豊平川全体の産卵床数の調査結果を示す。掘削水路造成後の 2017 年度は造成前の 4 ヶ年と比較して最も多い 19 箇所産卵床が確認された。特に、掘削路造成前の過去 4 ヶ年では 2013 年に 3 箇所のみであった前期群の産卵床が 6 カ所確認された。掘削路閉塞後の 2018 年は 8 カ所の確認に留まり、掘削路造成前の水準に戻った。この間の豊平川全体の産卵床確認数は 500~800 箇所の間で変動していた。

図-5 に 2017 年度と 2018 年度の alcove 内の産卵床の位置を示す。両年の産卵床位置には特徴的な違いがあり、閉塞前の 2017 年度の産卵床は alcove 上流端の 0m から下流の 45m 地点の間に集中し、閉塞後の 2018 年度の産卵床は主に 45m~65m 地点の間に分布してい



た。

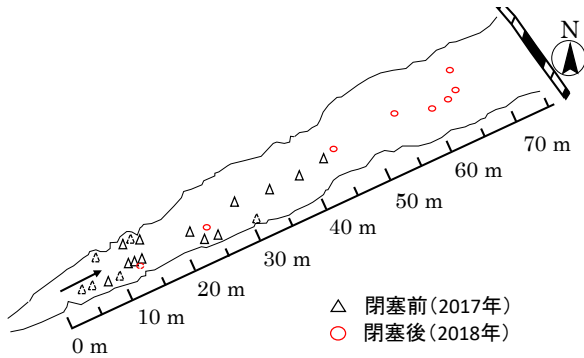


図-5 苗穂鉄道橋上流左岸の alcove 内の 2017 年度と 2018 年度の産卵床位置

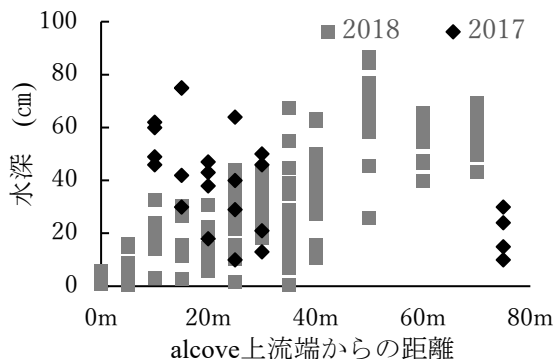


図-6 alcove 内の水深測定結果

### 2.3.2 水深、流速、河床表面粒径および細粒分堆積厚の計測結果

alcove 内の水深の測定結果を図-6 に、流速の測定結果を図-7 に示す。掘削水路造成後の 2017 年の各断面の最大水深は上流端から 35m 地点までは 50~80 cm 程度であり、下流部の 75m 地点では 30 cm 程度であったが、閉塞後の 2018 年の水深は 25m 地点より下流で 2017 年と比較して減少し、10~40 cm 程度であった。

2017 年の流速は上流 20m 地点までは各断面最大で 20cm/s を超え、25m 地点より下流では 10cm/s 程度であった。閉塞後の 2018 年の流速は上流部では 2017 年と比較して遅くなり、上流部では同程度であった。その値は上流から下流まではほぼ一定で、各断面の最大流速は 12~13cm/s 程度であった。掘削水路が閉塞後も一定以上の流速が認められた要因は、閉塞した部分に堆積した土砂の粒径が粗く、本川から常時河川水が浸透してきたためと思われる。

図-8 に 2017 年の掘削水路造成前後の細粒分堆積厚を、図-9 に 2017 年の掘削水路造成後と 2018 年の掘削路閉塞後の細粒土砂堆積範囲を示す。掘削水路造成前

の細粒分の堆積厚はほとんどの地点で 5cm 以上あり、下流に向けて堆積厚が増加する傾向を示し、26m 地点では最大の 32cm となっていた。この細粒分はシルト、粘土であったが、堆積土砂の下は礫が分布していた。掘削路造成後は、細粒分が流出したことにより、堆積厚が減少しどの地点においても 5cm 以下となった。細粒土砂の堆積範囲は、掘削水路造成前は河床底面全体に広がっていたが、2017 年の掘削路造成後は alcove の右岸側と左岸の一部に縮小し、2018 年の閉塞後の調査ではさらに縮小していた (図-9)。

図-10 に河床表面粒径の調査結果を INU グリッド法の階級値を用いて箱ひげ図により示す。alcove 内の河床表面粒径は一樣ではなく、トランセクトごとに異なっている。閉塞前の 2017 年の調査では 25m と 30m 地点で階級値 2 に集中し、ほとんどが粒径 2mm 未満であった。細粒分が一面に堆積していたため調査を行わなかった 30m 地点より下流部も、粒径が 2mm であったと推察される。

閉塞後の 2018 年の 10m 地点を除いて、上流から下流に向かって徐々に粒径階級値が小さくなっている傾向が伺える。一地点を除いて調査区間の最大の階級値は 5 であり、その粒径は 64 mm 以上 128 mm 未満であった。

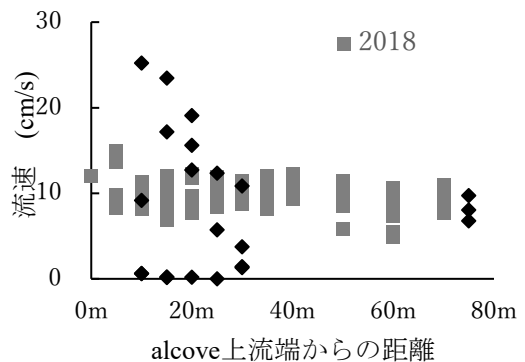


図-7 alcove 内の流速測定結果

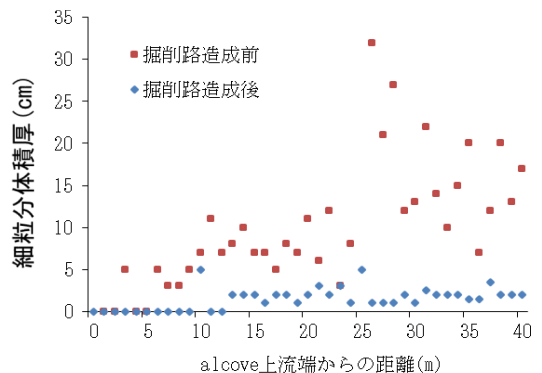


図-8 alcove 内の 2017 年の細粒土砂堆積厚

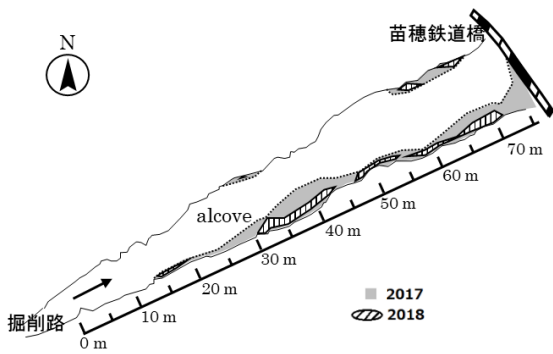


図-9 alcove内の細粒土砂堆積範囲

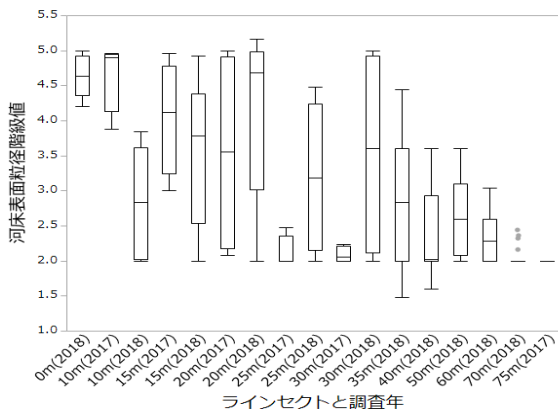


図-10 河床表面粒径の階級値計測結果

### 2.4 小規模掘削路の閉塞の有無と水質

図-11は2018年閉塞時および2021年開口時の河床間隙水および河川水のDOの比較結果である。閉塞時は河床間隙水(河床20cm)が2~4mg/l未満、河川水が5mg/l程度と低い値であるのに対し、開口時(再掘削後1年後)のDOは小規模掘削路部分の間隙水で9以上、下流側のalcove部で3mg/l未満であるが、河川水で15前後と良好な値に改善している。

なお詳細は、次章以降で、詳述する。



図-11 開口前後のDOの比較  
(縦断距離の内マイナスは小規模掘削路区間)

### 2.5 小規模掘削路の試験施工と産卵床環境の考察

本試験地は豊平川扇状地の先端部付近の浮州の河岸際にある alcove である。本試験地付近は豊平川扇状地の扇端部に位置しており、滞留時間の長い湧水が豊富な場所である。alcove 形成以前は上下流が本川とつながる分流構造であり、多数のサケ産卵床が見られた箇所である。その後、土砂の堆積により上流側が閉塞し alcove となり、サケ産卵床数も減少した。この箇所の産卵床数の回復を図るため、2017年9月に掘削水路を造成した。水流が生じたことにより alcove 内の細粒分が減少し、産卵に適した流れと河床材料に改善され、産卵床数が増加したと思われる。掘削水路造成前は主に後期群のサケの産卵箇所として利用されていたが、造成後には前期群の産卵床も多く確認された。前期群の産卵床が増加した理由については、既往の研究による<sup>6)</sup>と、前期群の産卵床内水温は河川水温とほぼ等しく変動したという調査結果を得たことにより、前期群の産卵床は河川水が伏流する場所に形成されること、および後期群は地下水が湧出する場所を選んで繁殖していることを示唆しているとされており、本試験地においても同様のことがあったとの想定がされる。

掘削水路閉塞後の2018年の産卵床数は、掘削前と同程度の数に減った。閉塞後も alcove 内に一定の流速があったが2017年と比較すると遅くなっている。河床表面粒径には大きな変化が見られなかった。上流部付近の水深は浅くなった。このことから、産卵床の減少は流速、水深の変化も要因の一つにあると想定される。

以上のように2017年の掘削水路造成により alcove 内の河床に堆積した細粒分が大幅に減少し産卵床が増加したものの、わずか1年後の2018年には増水により閉塞し、産卵床数は掘削前と同程度の数に減った。2019年8月には再掘削され、後述するように再び、産卵床数は回復している。

寒冷地の河川では融雪期の高い水位の時に河床が動き、流路変動なども生じやすいとされている。掘削水路造成後に、融雪期を一度経験したものの掘削水路の河床は安定し維持されていた。7月の増水が無ければ掘削水路の効果は持続していたと推察されるものの、洪水は自然現象により発生し、人為的に制御することには限りがあるため、再閉塞することも考慮した維持管理を考えていく必要がある。

本試験地での掘削は、国土交通省の札幌河川事務所が発注した河川工事の受注会社が社会貢献活動の一環



として行ったものである。この様な産卵環境改善の取り組みを継続していくためには、受注業者の協力を頼るばかりではなく、河川管理者が主体的に実施する工事として採用される様、掘削効果の検証や最適な維持管理サイクルを検討していく必要があると思われる。

本章では、alcove 上流の掘削路の有無による物理環境の変化とサケ産卵床との関連について考察した。



図-12 調査箇所図(地理院地図に加筆)

### 3. 主流路と副流路のサケ産卵適地としての物理環境の比較

#### 3.1 概要

豊平川のサケ (*Oncorhynchus keta*) は水質汚濁の影響などにより 1950 年代に一旦絶滅したと考えられるが、水質の改善や人工孵化放流活動などにより、今では毎年 1,000 尾を超えるサケが遡上するまでに回復した<sup>13)</sup>。遡上したサケの自然産卵も多く、遡上するサケの約 6 割から 7 割が野生魚と見られている<sup>7)</sup>。近年、種の遺伝的多様性の確保やサケ資源量増加のため野生サケの存在意義が見直されてきている<sup>7, 14)</sup>。そのため、野生個体群の維持増大のため、産卵環境に配慮した河川整備の必要性が指摘されている。また、豊平川においてはサケの自然産卵場所の保全・再生の取組を行う団体<sup>15)</sup>が出来るなど、保全活動が活発である。

札幌市豊平川さけ科学館で行っている豊平川のサケ産卵床箇所調査によると、産卵床は主流路だけではなく、中州の形成により河岸際に生じた副流路にも多数産卵していることが明らかになっている<sup>13)</sup>。一方、一旦形成された副流路は河床変動により閉塞して、サケの産卵がみられなくなったところもある。そのため、サケの産卵可能エリアの増大を図るため、閉塞した副流路の上流部に導水路を掘削するなど再生の取組も開始されている<sup>16)</sup>。

#### 3.2 調査方法(2018年)

##### 3.2.1 調査方法概要

図-12 に調査地点を示す。調査は、2018 年に豊平川中流部に架かる JR 橋上流 alcove (分流跡のたまり箇所) で水面は下流側のみ本川と接続) と水穂大橋下流の左岸の砂州によって分けられた分流路と主流路におい

て実施した。

調査地点の内、JR 橋上流 alcove (図-13、以降 alcove (閉塞)と呼ぶ。)は、サケ産卵箇所として回復させるため、2017 年にたまり箇所上流部の砂州を小規模水路掘削した箇所であり (2.1.2 参照)、小規模掘削により 2017 年度の産卵床数は増加したものの、2018 年 7 月秋の増水に伴う河床変動により、調査実施時点では水路は閉塞している。

もう一方の調査地点である水穂大橋下流左岸の分流箇所 (図-14、以降「分流箇所」と呼ぶ)は、2012 年度産卵期迄は明確に分流の流れがあり、サケの産卵床が多数確認されていたが、その後の河床変動により分流の入口と出口が塞がり、サケの産卵が確認できなくなっていた箇所である。そのため、産卵可能エリアの再生・拡大を図るため、2018 年に閉塞した分流の入口と出口を掘削し流れを回復する作業を行っている。この結果、2018 年度には多くのサケの産卵が見られた。

分流箇所との河川環境を比較評価するために、瑞穂大橋下流砂州の主流側の前縁部でも調査を行った (図-3 に示す A~F。以降「本流箇所」と呼ぶ。)。この箇所は 2017 年度まで毎年サケの産卵床が多数確認された箇所である。

調査は 2018 年のサケ産卵期の 10 月中旬と 12 月下旬及び稚魚の浮上が開始される 2019 年 2 月下旬の 3 回行った。計測項目は河床材料表面粒径、水深、流速、河床間隙水温、水質 (電気伝導率 (EC), pH, 溶存酸素量 (DO)) 及び動水勾配である。河床間隙水温については、10 月中旬から 3 月中旬まで、自記水温計による連続観測も行った。

##### 3.2.2 河床表面粒径計測

河床表面粒径計測は、前述の INU グリッド法<sup>12)</sup>により実施した。INU グリッド法は 10 cm×10 cm の小格子 25 個に分割された 50 cm×50 cm の格子枠を用いて河床底面を観察し、小格子毎に最大面積を占める粒径階を目視で判定する方法である。本調査では粒径階を 1 から 7 まで次の通り区分した。1 : 岩盤あるいはコンクリート、2 : 砂、シルト (2 mm 未満)、3 : 小礫 (2 mm 以上 16 mm 未満)、4 : 中礫 (16 mm 以上 64 mm 未満)、5 : 大礫 (64 mm 以上 128 mm 未満)、6 : 巨礫 (128 mm 以上 256 mm 未満)、7 : 大巨礫 (256 mm 以上)。

調査は alcove (閉塞)箇所では 5~10m 間隔で 12 列の各横断上の水面下の河床を連続して行った。本流箇所は A B C の各ブロックは砂州前縁から主流に向かって 3m×縦断方向 9m の範囲 (各 108 枠) を、D E F の各ブロックは 2m×6.5m の範囲 (各 52 枠) を計測した。

分流箇所は河川形態に応じて 13 ユニットに分け、各ユニット内で 3 横断×4 枠(各 12 枠)で計測した。但し、横断幅が 2m 未満の箇所は調査枠数を減じて計測した。

### 3.2.3 水深、流速、河床間隙水温計測

水深、流速、河床間隙水温は河床表面粒径を計測した箇所と同じ箇所計測した。流速は電磁流向流速計 (AME1-D) を使用し、60% 水深で計測した。河床間隙水温は河床から深さ 20 cm の地点をデジタル温度計 (TX10-02) を使用して計測した。

### 3.2.4 動水勾配計測

動水勾配は alcove(閉塞)箇所については、alcove 内の縦断方向に 10m 間隔で左右岸寄りに打ち込んだ単管内、計 16 地点で計測した。本流箇所では A~F の各ブロック内の砂州寄りの縦断方向に 1m 間隔で打ち込んだ 48 箇所の単管、分流箇所ではユニット 1~13 内の中央の各左右岸寄りに打ち込んだ 26 箇所の単管を使用して計測した。単管は図-15 に示す通り、単管下部側面から河床の浸透水が流入可能になるよう、下端から 5 cm 間隔で 2 カ所ずつ 6 段、計 12 箇所に直径 8 mm の穴を開け、河床から最上段の穴までの深さ (d1) がおよそ 20 cm になるよう打ち込んでいる。

動水勾配 (VGH) の算出は単管内の水面と河川水位との差  $dh$  を河床から単管下部の最上段の穴までの打ち込み深さ  $d1$  で除すことによって求めた。単管内の水位が河川水位より高い場合 (動水勾配の値が正の符号) には湧出、低い場合 (動水勾配の値が負の符号) には浸透する流れがあることを示す。

### 3.2.5 水質計測

電気伝導率 (EC)、pH、溶存酸素量 (DO) をそれぞれ、ポータブル電気伝導率・pH 計 (WM-32EP) とポータブル溶存酸素・pH 計 (DM-32P) を使用して計測した。alcove(閉塞)箇所については、動水勾配計測地点と同一箇所の 16 箇所の単管内、計 16 地点で水質を計測した。本流部箇所では、ブロック B とブロック E の砂州寄り中央部に打ち込んだ単管内の水質を、分流部ではユニット 7 の左右岸寄り 2 箇所の単管内の水質をそれぞれ計測した。

### 3.2.6 河床間隙水温連続観測

河床間隙水温は動水勾配の計測に使用した単管内の河床から深さ 20 cm の箇所に自記水温計 (HOB0 U20 若しくは HOB0 UA-001-08) を設置して連続観測した。2018 年 10 月 16、17 日に設置し、翌年 3 月 16 日に回収した。

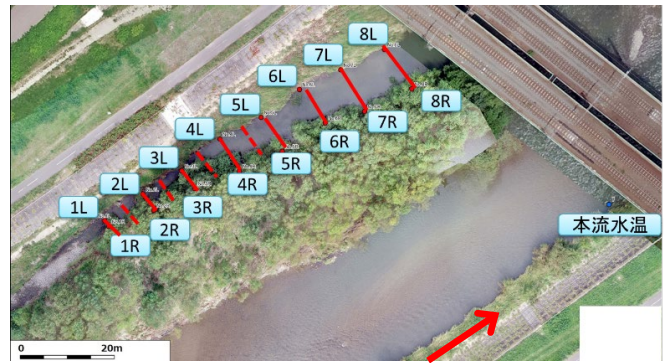


図-13 JR 橋 alcove(閉塞)調査地点

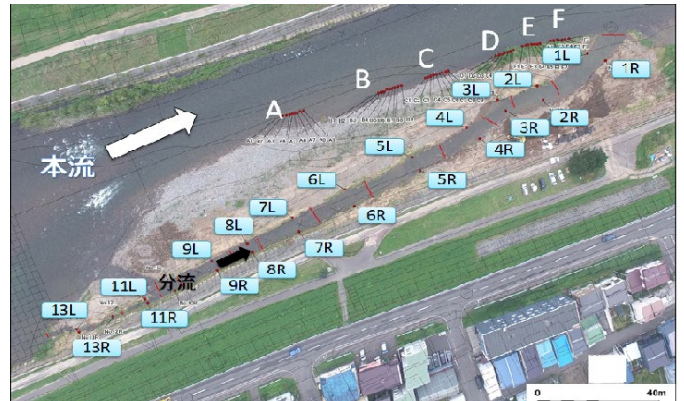


図-14 水穂大橋分流調査地点

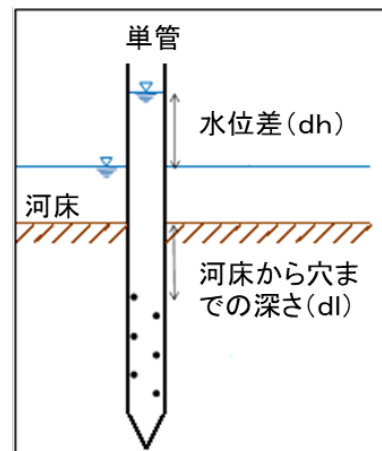


図-15 水質、動水勾配及び河床間隙水温連続観測用に打ち込んだ単管の設置模式図

## 3.3 結果と考察(2018年)

### 3.3.1 河床表面粒径

図-16 に分流箇所での河床表面粒径の計測結果を示す。河床は概ね小礫~大礫 (2~128 mm) を主体として構成されていたものの、下流のユニット 1 と 2 は 2 mm 以下の砂分が多く、中流 (ユニット 4~10) では 128 mm 以上の巨礫・大巨礫も見られた。サケの産卵可

能な粒径(50 %粒径)は体長の1/10程度(80 mm以下)までの研究報告<sup>16)</sup>から判断すると、サケの産卵が可能な上限程度の粒径であったと推察される。

図は示さないが、本流箇所の河床は中礫～巨礫(16～256 mm)で構成されていた。砂州の中央付近のABCブロックと比較して、下流側のDEFブロックに巨礫、大巨礫の分布が多く見られ、産卵が困難と思われるエリアがあった。

alcove(閉塞)箇所の河床は2 mm以下の砂・シルト分が広く分布していた。たまり内の下流側はほぼ砂・シルトで覆われていた。上流側では小礫や中礫の分布も見られた。砂泥は産卵床内の通水性を低下させ、その比率が大きくなるのと反比例して、卵の生残率は低下する<sup>7)</sup>ことから、たまり箇所の産卵床の質は懸念され、さらなる調査が必要と示唆された。

### 3.3.2 水深、流速、河床間隙水温

水深、流速及び河床間隙水温を計測した結果の一部を図-17に示す。豊平川における既往の調査報告<sup>17)</sup>ではサケの産卵床の水深は20～40 cm程度、流速は10～

40cm/s程度の箇所が多く見られており、このような場所をサケは選択していることが示唆されている。本流箇所と分流箇所の調査地点の水深・流速は産卵に適した範囲内であり、alcove(閉塞)箇所は流速が下限値程度、水深は深い箇所が一部見られたが、概ね産卵に適した環境であると言える。

### 3.3.3 水温及び動水勾配

図-18に河床間隙水温の連続観測結果を示す。図にはそれぞれの本流箇所の河川水温と気象庁札幌地点の気温も示す。本流箇所のABCブロックの河床間隙水温は河川水温とほぼ同じ値で推移し、1月から2月にかけては2℃以下の低い値を示した。DEFブロックの結果は紙幅の都合上示さないが、12月中旬迄は本流河川水温とほぼ同じ値で推移したものの、12月下旬から1月下旬にかけて河川水より3℃以上高い値を示した地点もあった。

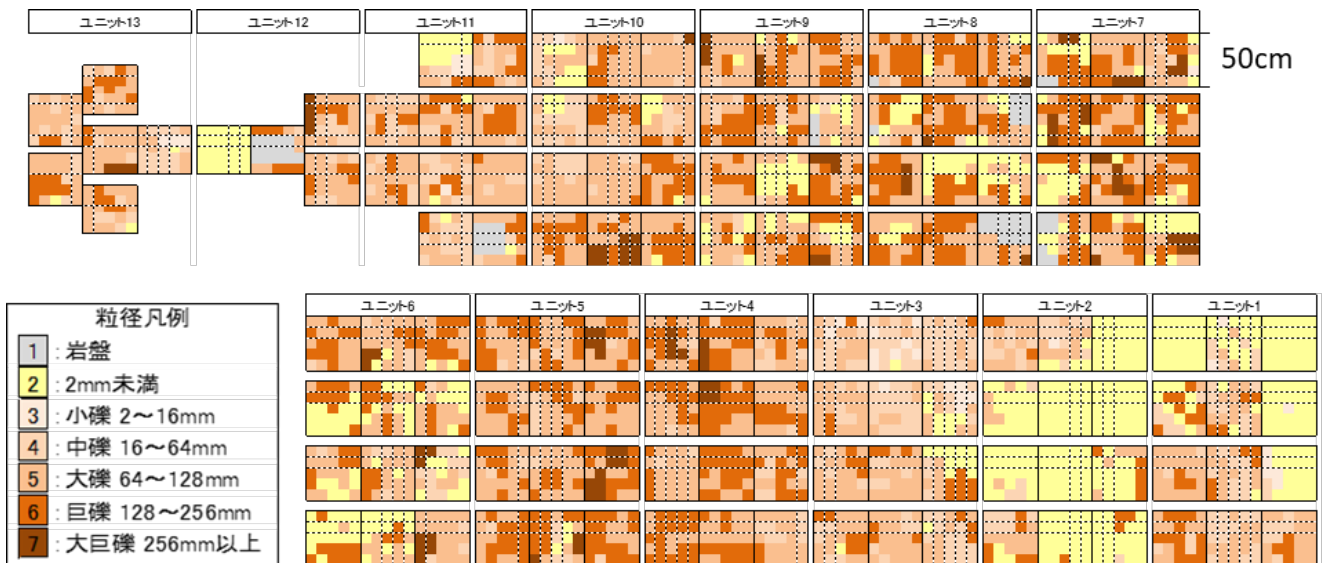


図-16 水穂大橋分流箇所の河床表面粒径計測結果



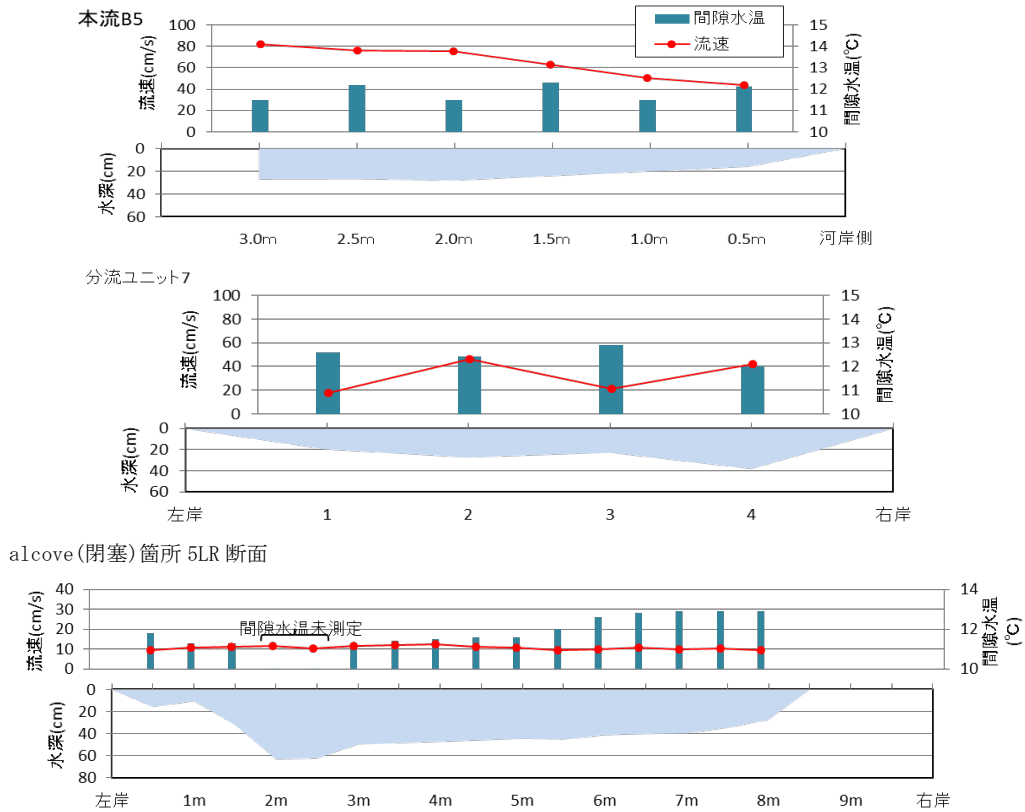


図-17 水深・流速・河床間隙水温(10月中旬調査)

分流箇所では河川水温より高い水温の地点が多く、期間を通して5℃以上を記録する地点もあった。左岸側より右岸側の水温が高く、河岸側から地下水が流入していると思われる。

たまり箇所は河川水温と比較して高温で、9℃以上も著しく高い地点もあった。右岸側と比較して高水敷側に近い左岸側の間隙水温が高い。このため、上流から河川水の流入がなく、たまり内での水の滞留と、地下水の流入により高温を維持していると推察される。

図-19 に動水勾配の計測結果を示す。動水勾配の符号により上向きの湧昇流があるのか、下向きの浸透流があるのかが推定できる。本流箇所では、下向きの浸透を示す地点が多く、分流箇所では顕著な湧出を示す箇所がみられた。

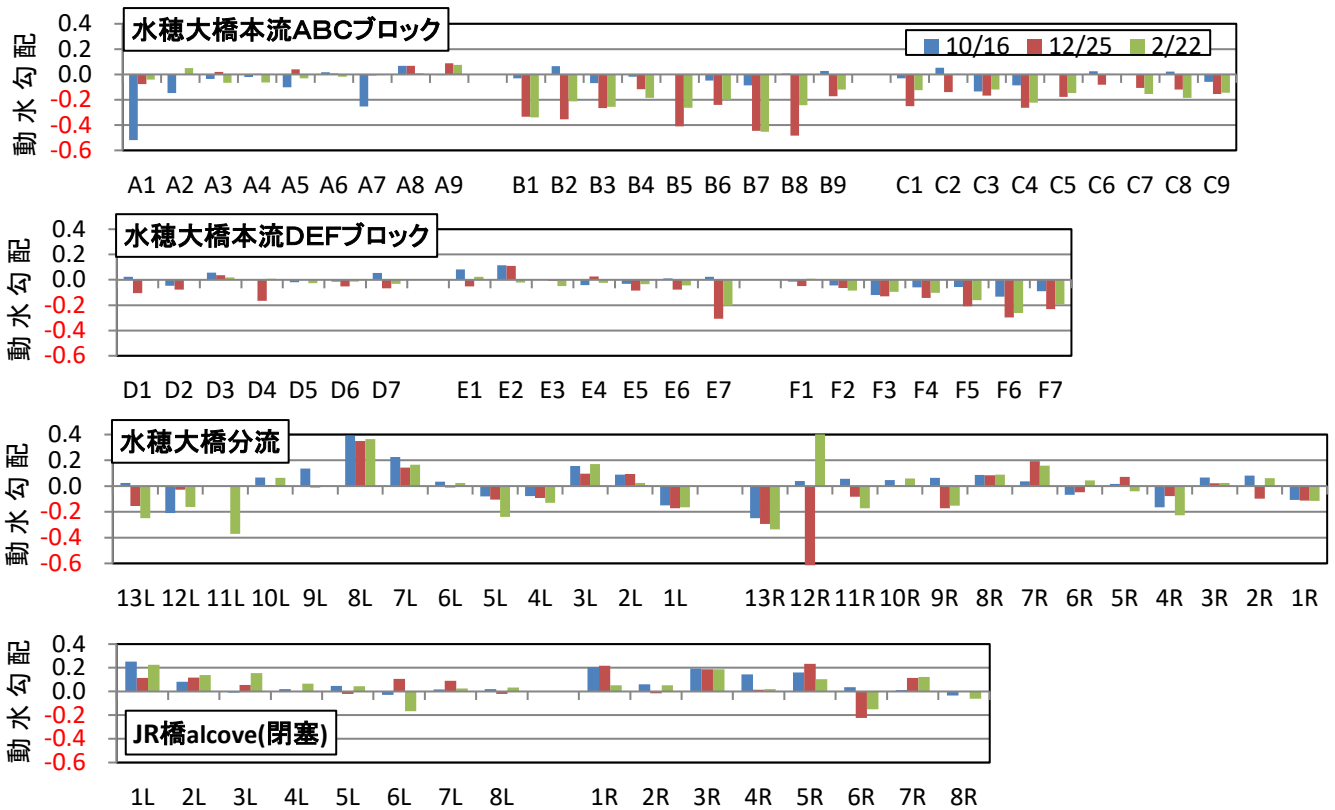
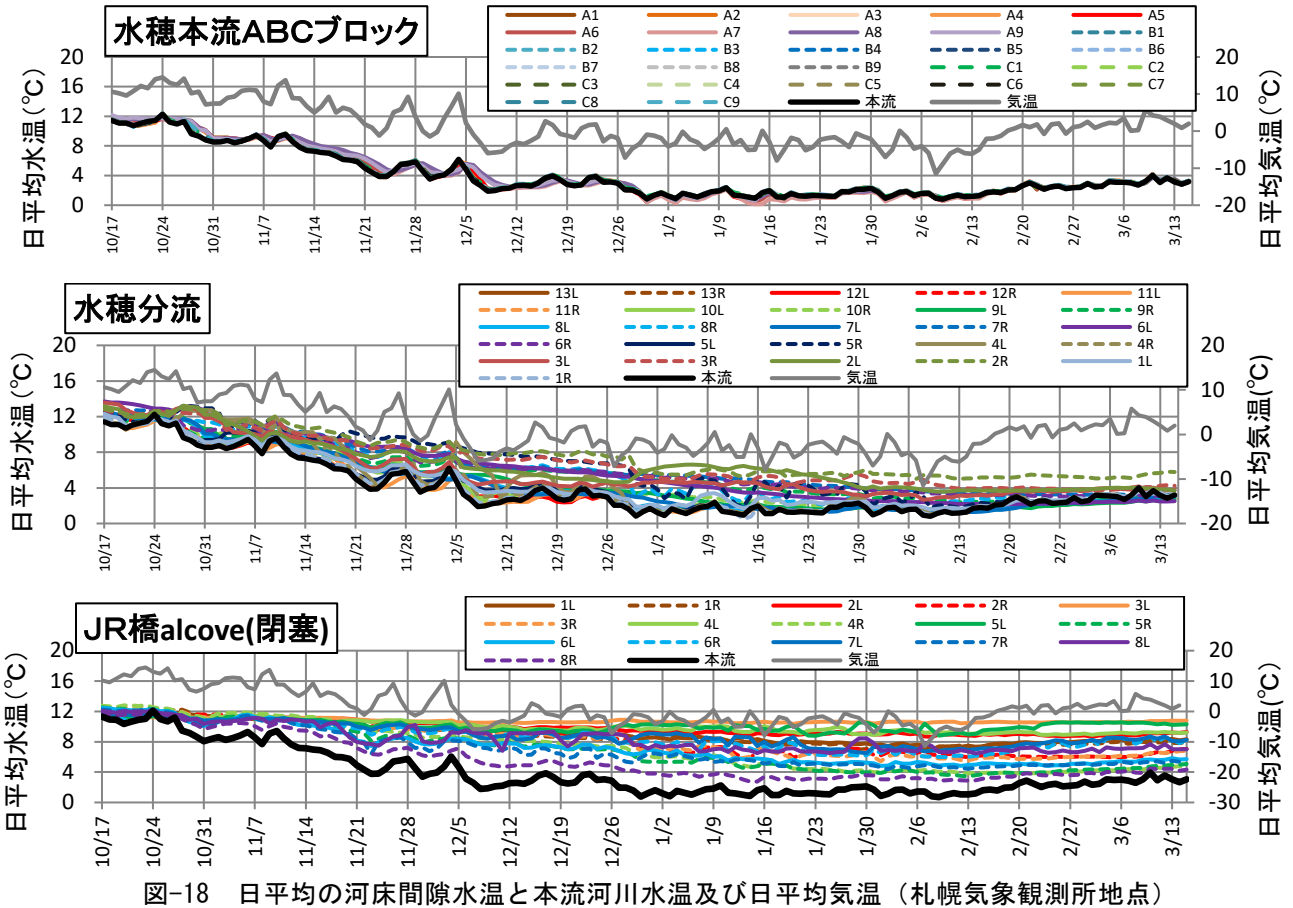
alcove(閉塞)箇所では、50m 左右岸を除き、概ね湧昇流であり、水温の結果と合わせると、高温の地下水が湧出していると考えられる結果となった。

水温と動水勾配の結果からサケの産卵床としての適性を評価すると、サケの産卵には河川水より高い水温

の地下水が湧出している箇所が選択される<sup>18)</sup>ことから、本流箇所より分流箇所や alcove(閉塞)箇所が適していると考えられる。

### 3.3.4 水質

図-20 に水質の測定結果を示す。電気伝導率は塩素やナトリウムなどの電解質が多く含まれるほど高い値を示し、汚濁している可能性が高いことを表す指標である。河川水と比較すると、本流箇所の河床間隙水は電気伝導率、pH、溶存酸素量の計測結果はほぼ同様の値を示し、分流箇所は電気伝導率が若干高く、溶存酸素量は低い値であった。alcove(閉塞)箇所は電気伝導率が高く、pH が低く、溶存酸素量が著しく低い値であった。たまり箇所の河床間隙水は河川水よりも電解質が多く含まれ、酸素の消費が進んでいる地下水の影響を強く受けていると推察される。特に溶存酸素量が1mg/l 以下とサケの卵の発育に支障があると考えられる酸素量<sup>19)</sup>を大きく下回っていた。





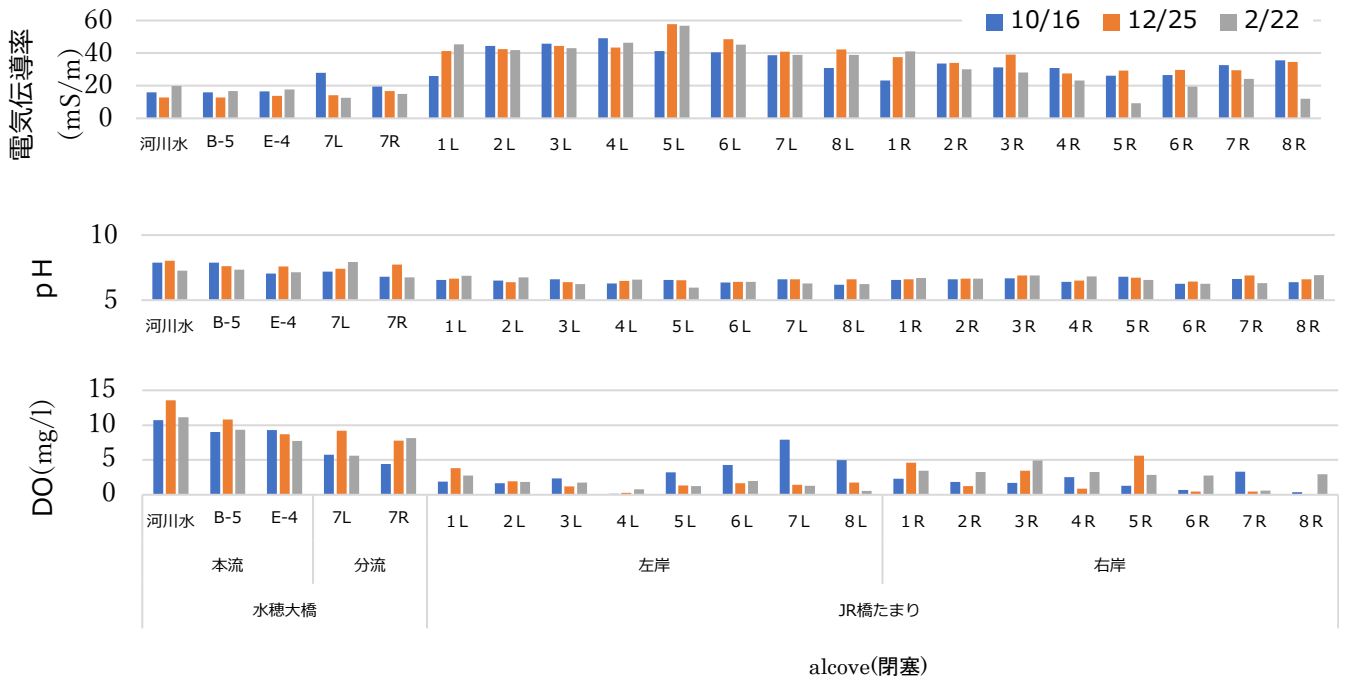


図-20 各調査地点の河床間隙水と水穂大橋本流の河川水の水質測定結果(2018)

### 3.4 砂州河岸部(水穂大橋下流)と分流部の間隙水温(2018年)

水穂大橋下流の本川河道の砂州河岸部と分流部の2018年12月～2019年1月の平均河床間隙水温分布を図-21に示す。72の水温計データを12月～1月の平均水温で表-1のように4グループに分けた。G1(N=37)が12～1月平均の河床間隙水温が2℃～2.5℃、G2(N=16)が水温2.5℃～3.0℃、G3(N=9)が水温3.0～4.0℃、G4(N=10)が水温4.0～7.0℃で分けている。図-22は河床間隙水温、河川水温および河川水位の変化

を示す。G1は河川表面水と連動しており10月中旬の11℃で1月、2月は1～2℃前後である。一方でG3は10月中旬の13℃から1月、2月は2～4℃前後と、G1と比較して高いことが分かる。このことから前述したように河床間隙水における浸透流の混合割合はG4>G3>G2>G1の順で高いことが推測できる。つまり表-1からは図-21のD、E、F地点で浸透流の混合割合が高いことが推測できる。

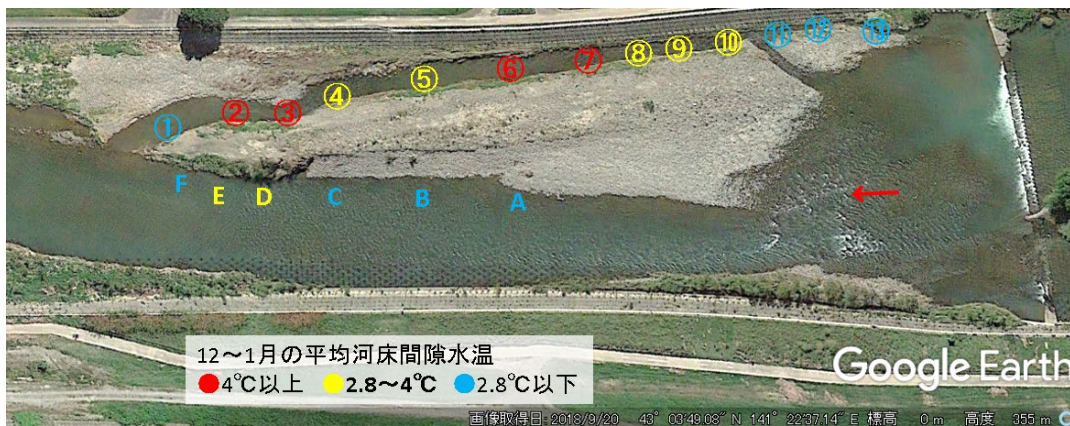


図-21 水穂大橋下流12月～1月の河床間隙水温(2018年)

表-1 水穂大橋下流砂州の間隙水温と水温計数

	水温※	本川河岸							分流				
		F	E	D	C	B	A	計	1~4	5~7	8~10	11~13	計
G1	2.0~2.5	2	1	1	9	8	9	30	1			6	7
G2	2.5~3.0	5	4	2				11	1	2	2		5
G3	3.0~4.0		1	4				5	2		2		4
G4	4.0~7.0								4	4	2		10

※12月~1月の平均間隙水温

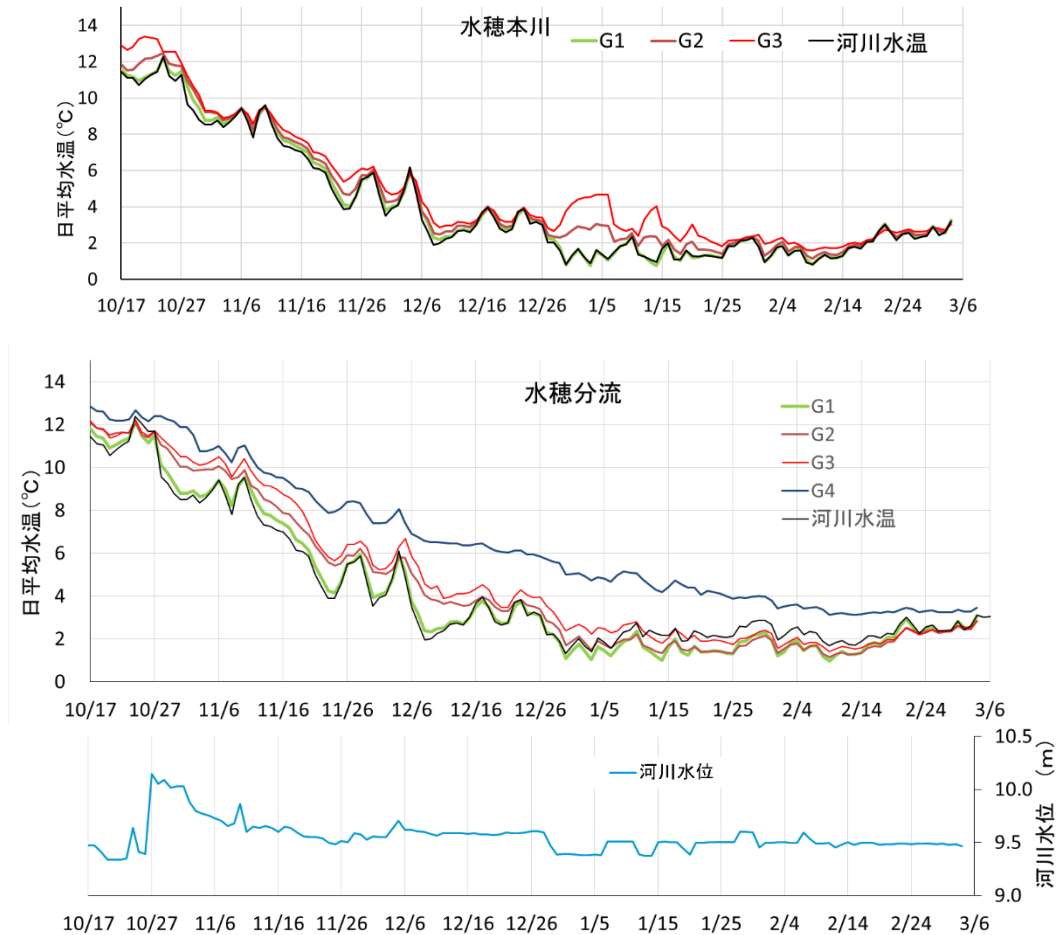


図-22 水穂大橋下流本川の河床間隙水温の変化 (2018)

### 3.5 2021年の追跡調査

#### 3.5.1 概要(2021年)

2021年に2018年と同様な方法(p7の図-15等参照)で水質調査を行った(図-23、24)。JR橋 alcoveは、2018年に、上流掘削路が閉塞していたが、その後、再開削され、2021年調査時には、通水していた。そのため2021は上流側の掘削水路箇所(水温計9~25)も単管設置による調査を行った。

水穂大橋分流では2018年と同様に分流路として通水していた。

#### 3.5.2 結果(2021年)

##### (1)河床間隙水質

JR橋 alcoveでは、単管1~6の調査地点では2018年度の調査結果同様に間隙水のDOが0.3~0.8(7月)、0.8~3.5(10月)と低い値であった。上流側の単管7~25(小規模掘削路区間)のDOの平均値は4.0(7月)、9.8(10月)と下流側 alcoveに比べて高い値だった。(図-25)

図-11(2.4章)で前述したように上流掘削路の通水時(2021年)には、平均的にも、また河川水のDOとしても水質環境が改善され、より魚類産卵生息に好適な環境へと改善されたことが推察される。

水穂大橋分流ではJR橋 alcove上流の掘削路部分と類似したDOが観測され、21地点中、7月が14地点、

10月が8地点で5未満とDOが低い地点が点在していた。  
 また平和大橋上流の河道掘削箇所では、掘削より約1年経過した掘削面においてサケの産卵床が多くみら

れ(図-26)、河床間隙水質(図-27)も比較的良好だった一方、調査地点②では産卵床は少なく、DOが低めの値であった。

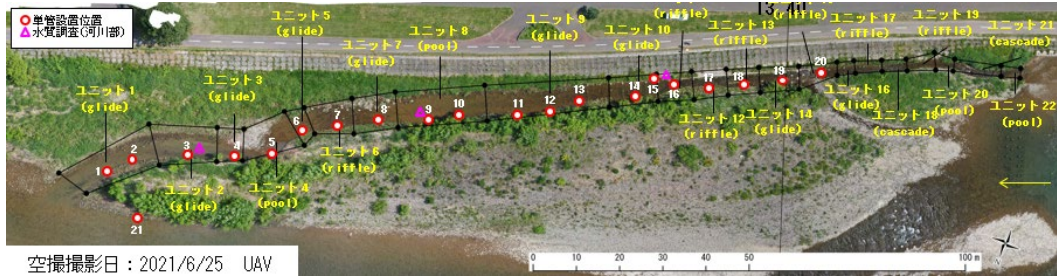


図-23 水穂大橋分流調査地点

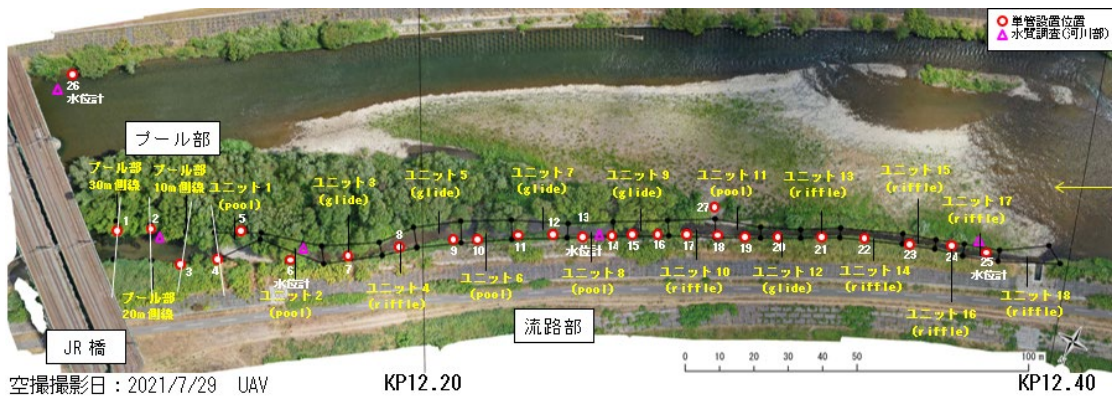


図-24 JR橋 alcove 調査地点 2021

(水温計 1~8 の区間は閉塞時 2018 年の調査箇所)

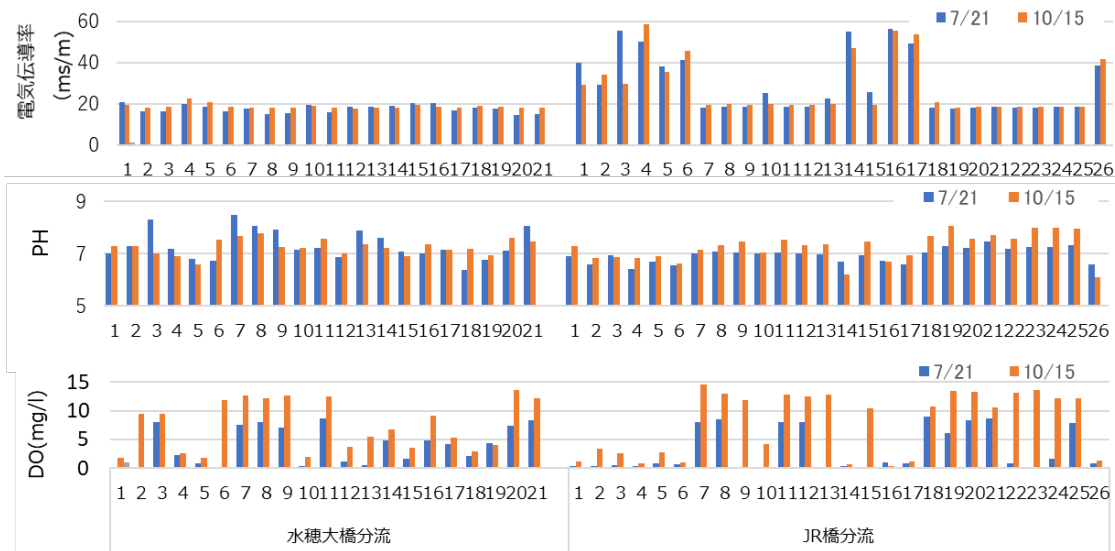


図-25 各調査地点の河床間隙水と水穂大橋本流の河川水の水質測定結果(2021)



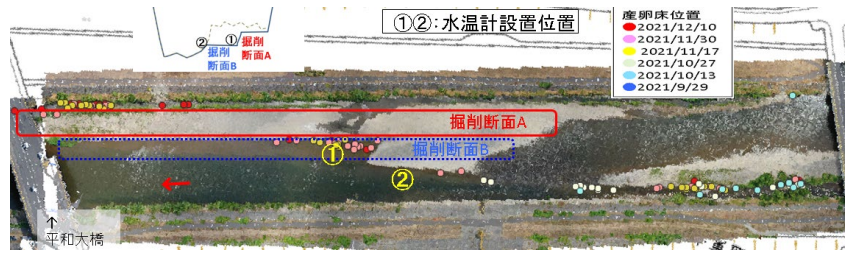


図-26 平和大橋上流の計測箇所 (KP12.6~13、産卵箇所はさけ科学館提供データ)

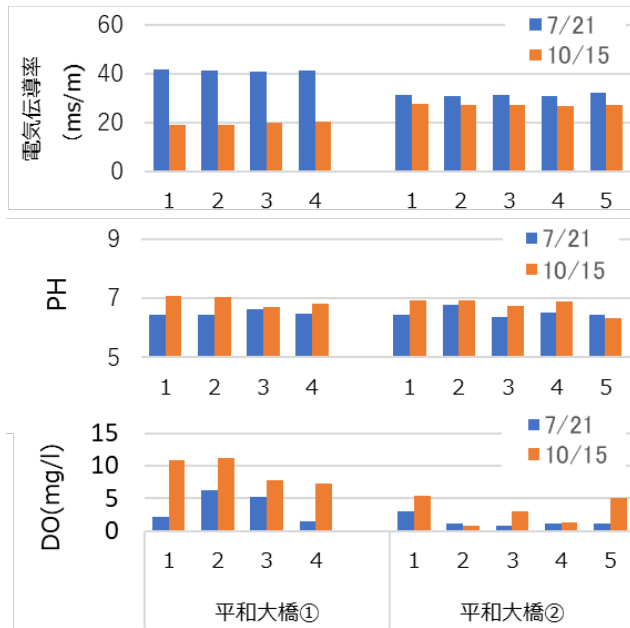


図-27 河床間隙水の河川水の水質測定結果(2021)

### 3.6 主流路と副流路のサケ産卵適地としての物理環境の比較の考察

豊平川でサケの産卵が多く見られる中流域の主流路と副流路の河川の水質環境などを計測し、産卵適地としての比較評価を行った。

河床間隙水温や河床表面粒径から、今回調査した水穂大橋下流の主流路と副流路とでは、副流路の方が産卵環境として適していた。一方で、JR 橋 alcove(閉塞2018)では間隙水温は高いものの、溶存酸素量が少なく、発眼までの生育や仔魚の生育に影響があり、底質の改善や間隙水の溶存酸素量を高めるため、2019年に再掘削され、通水時の2021年に調査した結果、水質的な改善が見られた。

野生サケの遡上数増加を図るためには、物理環境が異なる地点における産卵箇所の孵化率や稚魚が浮上するまでの生残率調査により、産卵・生育に適した環境を明らかにし、好適な河川環境の保全・創出を図っていく取り組みも必要であると考えられる。

## 4. 豊平川におけるサケ生卵率と水質指標の関連分析

### 4.1 概要

河床材料と浸透流、生残率の関係として、Yamada and Nakamura<sup>20)</sup>はサクラマスが発眼卵を用いた人工産卵床実験により、河床材料に細粒分が多いと浸透流が減少し、生残率が低下することを述べている。Greigら<sup>19)</sup>は産卵室内の溶存酸素量と浸透流量の積から算出される溶存酸素フラックスが卵の生存に重要であると述べている。有賀ら<sup>7)</sup>が豊平川における自然産卵による卵から稚魚までの生残率を7.5%~22.2%、平均12.6%と推定している。野生サケの再生産数を増加するためには、産卵可能域を造成するだけでなく、生残率が高い範囲の産卵を誘導したり、生残率が高い範囲の保全や再生を行うことも有効であると考えられる。そのための基礎的な情報として、産卵環境の違いによるサケ卵の生残率の違いとその要因を分析することは重要である。

本研究では産卵床における発眼期までの生残率(以下、生卵率という)と産卵環境との関係について明らかにした。

### 4.2 方法

調査河川は、札幌市内を流れる豊平川とした。調査区間は、豊平川の河道区間の中でもサケの産卵が多く見られる石狩川本川合流点から上流約10.6 kmから16.6 km地点の間の約6 kmの区間とした。調査区間下流端は豊平川扇状地の扇端付近に位置し、区間の平均河床勾配は1/420程度である。

現地調査はサケ遡上期に調査範囲内で確認されたサケ産卵床15箇所について、産卵床毎に生卵率と水深、流速、河床間隙水水質、水温及び浸透流調査による動水勾配と透水係数の計測を行った。生卵率の調査は2019年10月30日から11月11日までの調査により確認された産卵床の物理環境が異なる地点の産卵床15床を選定して実施した。産卵床から卵を掘り起こし、生卵と死卵の数を計数し全数に占める生卵数の割合から生卵



率を求めた。計数後の生卵は今後の浮上率調査のために元の河床に埋め戻しを行っている。水深、流速は産卵床を確認した11月上旬と11月下旬、及びサケ卵の生卵率を調査した12月中旬の3回計測した。水質は11月下旬、動水勾配の計測は11月下旬と12月中旬に計測した。

流速の計測は60 %水深で電磁流向流速計を使用して行った。河床の間隙水の水温計測と水質分析はサケの平均的な産室深さである<sup>9)</sup> 河床から約20 cmの水をくみ上げて行った。くみ上げはじめの間隙水は分析に用いず、一定時間くみ上げて濁りが収まった水を分析した。採水した水はデジタル温度計、ポータブル溶存酸素・pH計により、水温、溶存酸素（以下D0）、pHを直ちに現地で計測したほか、室内分析も行った。動水勾配はBaxterら<sup>21)</sup> が考案したピエゾメータを用いた浸透流調査方法により求めた。透水係数は落下透水試験を実施して求めた。ピエゾメータを用いた浸透流調査方法は図-28 左に示す装置により、河床面から約20cm深さと河床面との水頭差を計測して、鉛直方向の動水勾配を求めるものである。

透水係数は図-28 右に示す器具により水管内の水面の低下速度を計測して求める。動水勾配  $i$  は式(1)、透水係数  $k$  は式(2)により求める<sup>21)</sup>。

$$i = \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$k = \left[ \frac{(0.2501)(d_{\text{piezometer}})}{dt} \right] \left[ \log_e \frac{h_0}{h} \right] \quad (2)$$

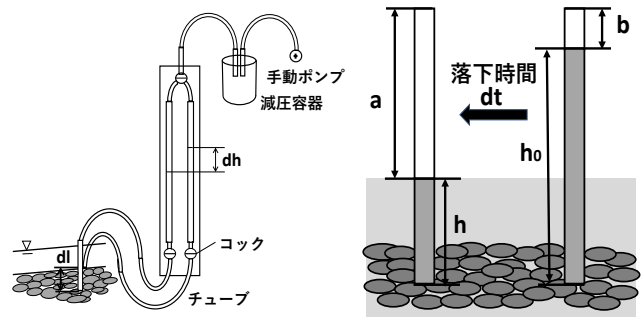
ここに、 $d_{\text{piezometer}}$  はピエゾメータの直径である。

サケ卵への溶存酸素の供給可能性を評価する指標として Greig ら<sup>19)</sup> が導入した溶存酸素フラックスは式(3)により算出した。

$$O_2(\text{flux}) = C_0 v a_{\text{egg}} \quad (3)$$

$$v = ki \quad (4)$$

ここに、 $O_2$ は溶存酸素フラックス(mg/h)、 $C_0$ は溶存酸素量(mg/l)、 $v$ は河床近傍の伏流または湧出の浸透流速、 $a_{\text{egg}}$ はサケ卵の平均断面積である。ここではサケ卵の半径を4 mm とした。



動水勾配計測用ピエゾメータ(左)と水頭落下試験(右)

図-28 計測模式図

表-2 サケ産卵床の生卵率調査結果(2019年)

産卵床 No.	合流点からの大凡の距離(km)	生卵率調査結果			
		生卵数	死卵数	総卵数	生卵率
No.1	11.81	282	217	499	56.5%
No.2	12.16	89	868	957	9.3%
No.3	12.18	321	231	552	58.2%
No.4	12.44	176	90	266	66.2%
No.5	12.76	399	351	750	53.2%
No.6	12.94	251	301	552	45.5%
No.7	12.98	11	103	114	9.6%
No.8	13.18	30	51	81	37.0%
No.9	13.30	734	268	1002	73.3%
No.10	14.28	201	72	273	73.6%
No.11	14.34	475	226	701	67.8%
No.12	14.36	410	316	726	56.5%
No.13	14.76	575	76	651	88.3%
No.14	14.78	660	267	927	71.2%
No.15	14.86	382	580	962	39.7%
平均		333	268	601	55.4%

## 4.3 結果

### 4.3.1 調査結果

2019年度はサケが実際に産卵した産卵床の産室内の水質、水温、浸透流及び発眼期の生卵率を調査した。

表-2に12月16日から20日にかけて、産卵床15箇所が生卵率を調査した結果を示す。全15箇所の産卵床の生卵率調査時には、生卵は発眼していたが、卵が白濁した死卵も確認された。生卵、死卵それぞれの全数を計数して生卵率を求めた。その結果、1産卵床当たりの総卵数は81個から1002個、平均で601個であった。これは、豊平川において小宮山ら<sup>22)</sup>が調査した結果の1産卵床当たり平均507個より約100個多く、佐野<sup>23)</sup>が北海道内の河川で調査した結果の平均942個より341個少ない結果であった。生卵率は最小で9.3%、最大で88.3%、平均では55.4%であり、同じく小宮山ら<sup>22)</sup>が調査した結果の平均98.3%、佐野<sup>23)</sup>が調査した結果の平均92.3%と比較すると40ポイント程度低い値であった。

表-3 サケ産卵床箇所の水深、流速及び産室内の水質、水温、水質等計測結果(2019年度)

産卵床 No.	水深(cm)		流速(m/s)		産卵室内の水質(11月下旬)					産室内の水温(°C)		動水勾配		透水係数		溶存酸素flux (mg/h)
	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	pH	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	電気伝導度 (mS/m)	DO (mg/l)	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	11月下旬	12月中旬	11月下旬
No.1	47	69	0.26	0.29	7.0	0.5	65	27.1	7.3	4.3	9.1	-0.017	0.005	0.036	0.041	0.013
No.2	66	77	0.16	0.32	6.7	0.7	65	42.6	3.5	7.2	8.6	0.018	0.071	0.123	0.064	0.013
No.3	55	62	0.45	0.40	7.0	0.8	11	24.4	10.6	4.7	2.9	0.037	-0.032	0.194	0.138	0.134
No.4	50	64	0.31	0.56	7.1	0.2	99	15.6	11.0	5.8	3.3	-0.031	0.053	0.158	0.016	0.099
No.5	52	55	0.07	0.16	6.8	3.7	21	24.3	8.6	7.8	6.0	-0.022	0.013	0.101	0.042	0.031
No.6	57	63	0.28	0.32	7.0	0.4	48	21.5	9.2	7.2	2.8	-0.010	-0.012	0.051	0.037	0.017
No.7	52	66	0.41	0.60	7.1	0.7	5	19.4	11.5	4.0	3.3	-0.052	0.038	0.259	0.158	0.291
No.8	38	44	0.14	0.28	6.8	0.1	5	19.0	5.2	9.1	9.0	0.007	0.031	0.169	0.029	0.009
No.9	44	55	0.54	0.47	7.0	1.5	19	16.5	9.0	4.9	3.5	0.030	0.010	0.209	0.022	0.098
No.10	48	51	0.08	0.13	7.1	0.3	11	15.6	10.8	4.6	3.6	-0.084	0.018	0.207	0.054	0.332
No.11	31	41	0.45	0.38	6.9	0.2	128	16.0	9.2	6.8	3.5	-0.042	0.029	0.070	0.262	0.050
No.12	41	41	0.26	0.34	6.7	1.0	30	15.8	9.3	7.7	3.3	-0.120	0.019	0.195	0.077	0.387
No.13	42	51	0.17	0.20	6.8	0.8	55	15.5	12.6	3.2	1.9	0.038	-0.046	0.053	0.035	0.046
No.14	44	55	0.36	0.40	6.9	0.7	80	16.5	11.4	4.5	1.5	0.025	-0.040	0.182	0.040	0.103
No.15	57	65	0.22	0.42	7.0	0.4	21	16.3	13.0	3.6	2.4	0.040	-0.018	0.016	0.111	0.024



図-29 産卵床箇所生卵率調査箇所

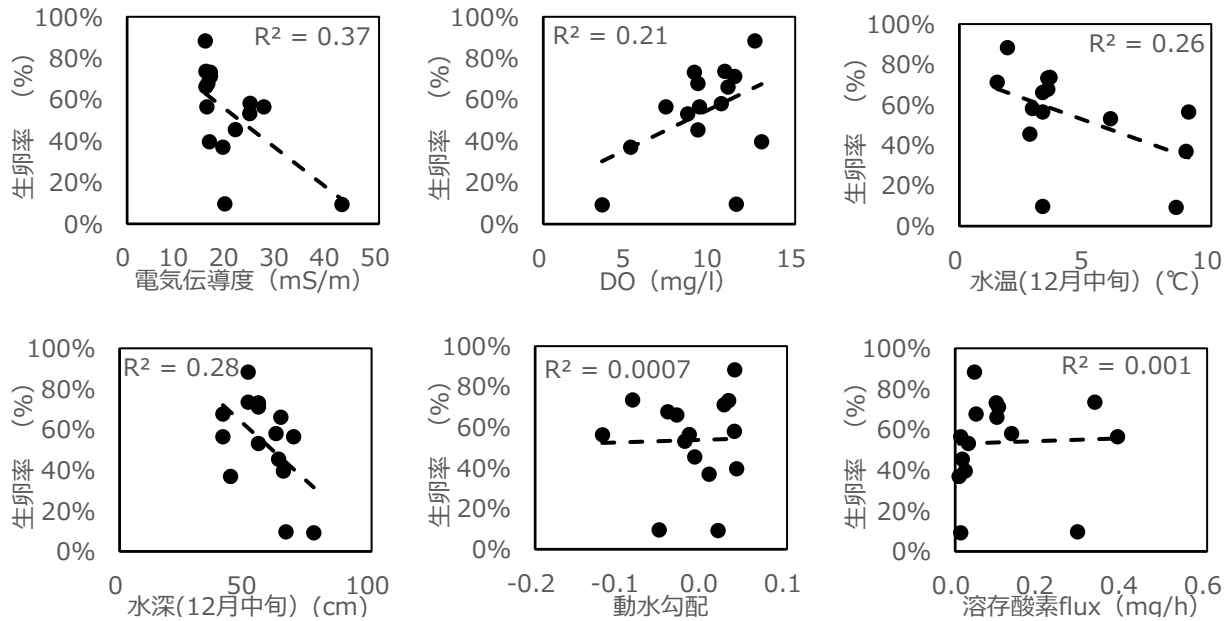


図-30 生卵率と水質、水温、水深等との散布図

表-3 に産卵床地点の水深、流速と産室内の水温、水質、浸透流速の測定結果の一覧を示す。またそれぞれの調査地点位置を図-29 に示した。水質は室内分析した結果について示す。11 月下旬の調査時の水深は最少が 31 cm で最大が 66 cm であった。12 月中旬の水深は水位の上昇などにより、11 月下旬の調査時と比較して 10 cm 程度深くなっていた。流速は 11 月下旬の調査時は最低が 0.07 m/s 最大で 0.54 m/s であり、調査地点による流速差が 0.4 m/s 以上あった。12 月中旬の調査時の流速は 11 月下旬時と比較して速かった。

産卵室内の pH の値は 6.7 から 7.1 の範囲の中性を示し、地点間には大きな差が見られなかった。BOD は No.5 地点が 3.7 mg/l、No.9 地点が 1.5 mg/l と比較的高い値を示した以外は 1.0 mg/l 以下と低い値であった。電気伝導度は 15.5 mS/m から 42.6 mS/m と調査地点間の差が大きかった。

DO は調査地点間での差が大きく、最低では 3.5 mg/l と生活環境の保全に関する環境基準（河川）の水産 2 級（サケ科魚類及びアユ等貧腐水性水域の水産生物用）基準値である 5 mg/l を下回っていた。

SS は 5 mg/l から 128 mg/l の値であり、比較的高い地点も見られた。今回採用した採水方法では、ある程度、底質からの SS 成分が混ざってしまうことから、BOD などの水質分析結果に影響を与えることが想定されたが、SS とほかの水質項目との相関は低く影響はほとんど見られなかったと言える。産室内の水温も調査

地点間での差が大きく、11 月下旬の調査では最低と最高で 6 °C 近い差があった。12 月中旬の水温は 11 月下旬と比べ、殆どの地点で低かったが、一部の地点では 11 月下旬より高い値を示した。動水勾配と透水係数は調査時期の違いにより異なる傾向を示した地点が多くあった。動水勾配の符号が正の時は河床下から河床面への上向きの湧昇流が卓越していることを示し、負の時は下向きの浸透流が卓越していることを示すが、時期によって流れの向きが逆転するなど、浸透流の状況が変化する結果が得られた。動水勾配や透水係数などから求めた各地点の溶存酸素フラックスは表-3 に示すとおりである。

表-4 生卵率との決定係数が比較的高かった項目間の相関係数

	電気伝導度	DO	水温(12月)	水深(12月)
電気伝導度	1	-0.72	0.66	0.66
DO	-0.72	1	-0.87	-0.13
水温(12月)	0.66	-0.87	1	0.23
水深(12月)	0.66	-0.13	0.23	1

#### 4.3.2 生卵率と環境変量との関係

2019 年度に調査した生卵率が最小で 9.3%、最大で 88.3% と調査地点間で差が生じた要因を明らかにするため、水質分析結果などとの関連を調べた。図-30 に電気伝導度 (EC)、溶存酸素量 (DO)、水温、水深、動水勾配及び溶存酸素フラックスと生卵率の関係を示す。



本調査で確認した死卵は、受精後に水質等の環境の影響により死卵に至ったものばかりではなく、産卵時に受精しなかった無精卵も含まれている可能性もある。また、サケの卵は発眼するまでは衝撃に弱く、一度できた産卵床を外のサケが産卵のために乱すことにより、死卵となる可能性もある。このような要因で生卵率が一定の割合で低下することもある。本研究においては無精卵と衝撃による減耗については考慮しない。

DOの値が大きいほど生卵率は高い(図-30)。河床間隙水の水温とは負の相関があり、河床間隙水が高いほど生卵率は低い。水深との間には負の相関があり、水深が深いほど生卵率は低い。動水勾配及び溶存酸素フラックスとの間には相関が認められなかった。Greigら<sup>19)</sup>は産卵室内の溶存酸素量と浸透流量の積から算出される溶存酸素フラックスが卵の生存に重要であると述べているが、本研究の調査では生卵率と溶存酸素フラックスとの間に関連性は確認できなかった。

ECは、水中に含まれる電解質の濃度が高くなれば値

は大きくなり、一般に、河川水と比較して地下水の方が大きい値を示す。DOおよび水温の値も河川水と地下水では差が生じ、一般に冬季の水温は河川水より地下水が高く、DOは地下水が低くなる。ECとDOと水温及び水深のそれぞれの間の相関係数を示す(表-4)。ECとDOと水温はそれぞれの間の相関係数が高い。特にECが高くなるとDOは低くなり、水温は高くなっていった。これらのことから、ECが高い産卵床は地下水により涵養されている可能性が高いと考えられた。Greigら<sup>19)</sup>が明らかにした溶存酸素 flux の重要性や、小林<sup>18)</sup>により紹介されたロシアの研究によると、DOが6 mg/l以下では孵化には望ましくなく、正常な発育のためには7~9 mg/lの範囲が適していることや、鈴木<sup>24)</sup>による河床材料の通水性が低いほどサケ稚魚の浮上率が低下するとの既往研究成果などから、一定濃度以上のDOが必要であると考えられる。本研究でも生卵率とDOにも正の相関関係が見られた。

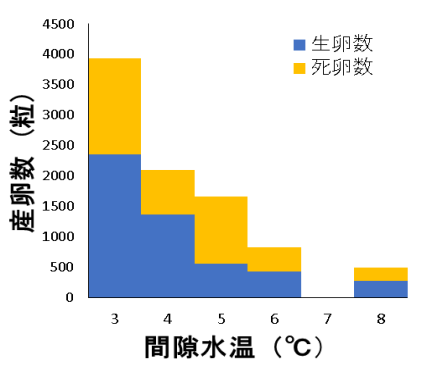


図-31 間隙水温とサケの生卵率  
河川表流水の水温 2.7°C (12月平均)

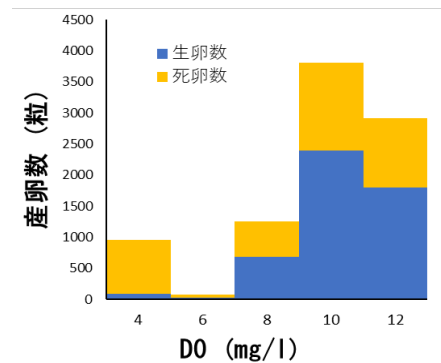


図-32 溶存酸素量(DO)とサケの生卵率  
河川表流水のDO 12.3 mg/l (12月平均)

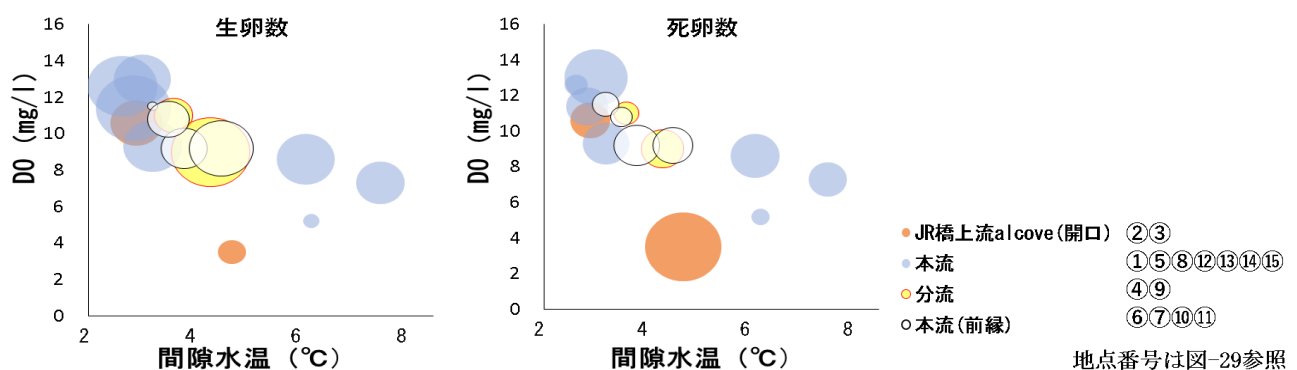


図-33 溶存酸素量(DO)とサケの生卵率  
河川表流水の水温 2.7°C (12月平均)



### 4.3.3 生卵率と環境条件

生卵率と環境変量との関係については、産室のD0が低い産卵床の生卵率は低く、D0が生卵率の低下に影響を与えた可能性が高いことを2019年度に報告している。また浸透流の質と産卵床数との関連については、石狩川上流を対象に前中長期の研究課題で2015年度に報告されている<sup>25)</sup>。

2020年度は、それらの考察を踏まえた上で、代表的な環境変量およびハビタット毎の条件別の特徴を補足するものである。

前述した表-2、3のデータを用いて間隙水温とサケの生卵数、死卵数の頻度分布について図-31に示した。水温については産室近傍に設置したログで計測した連続データの内12月の平均値を用いた。表流水の平均水温は2.7℃であった。表流水の水温より0～2度高い地点での調査標本が標本全体の8割だった。間隙水温で、5℃つまり表流水より2℃程度高い地点で生卵数が若干低めであったものの明確な傾向はみられないことがわかる。

溶存酸素量(D0)とサケの生卵数、死卵数について図-32に示した。D0が7 mg/l以上の調査標本が標本全体の9割だった。残り1割はD0が6 mg/l未満で生卵率が12%と低かった。生活環境の保全に関する環境基準(河川)の水産2級(サケ科魚類及びアユ等貧腐水性水域の水産生物用)基準値が5 mg/lとその値に近いことと整合する。

浸透路長が長く、滞留時間の長い浸透流ほど、河床間隙の代謝活動による消費で溶存酸素は少なくなり、また水温は地温に近くなる<sup>25,26)</sup>。それゆえ、各調査地点の表流水、浸透流(伏流水、地下水)が混ざりあった割合によって水質成分は異なり、水文条件の変動にも左右されるなど、複雑な条件下の環境条件によって生卵率が左右されると考えられる。特に豊平川の本調査地は扇状地の扇端部であるため、様々な浸透路長の浸透流が混在している可能性がある。

次にハビタット区分毎に間隙水温、溶存酸素量(D0)とサケの生卵率について図-33に示した。元データは図-31、32と同一である。横軸に間隙水温、縦軸にD0を示し、また円の大きさは卵数(生卵数(左)、死卵数(右))を、円の色は、ハビタット区分別としている。区分として、JR橋上流のalcove(調査4か月前に再通水)、分流は水穂大橋下流および平和大橋下流右岸の分流である。また、本流(前縁)は、砂州前縁線に沿う前縁部であり、例えば図-34、35で示すように平水時に対岸へと向かう流れがぶつかる淵頭を指している(以下、同様)。

ハビタット別の生卵率を比較すると、分流部>前縁部>本川>JR橋上流 alcove(開口)の順で生卵率が高かった。また、JR橋上流 alcove(開口)の2地点の内D0の低い1地点で発眼期の生卵率が低い地点がみられた。なおJR橋上流分流は、2019年度8月に、小規模掘削路が再開削され、通水して、再開削から調査までの期間が約4か月でその間の雁来観測所の最大水位は4.5m程度と限定的だったものの河床材料調査からは細粒土砂の堆積もみられず、浸透流の水質(D0)の影響と推測される。

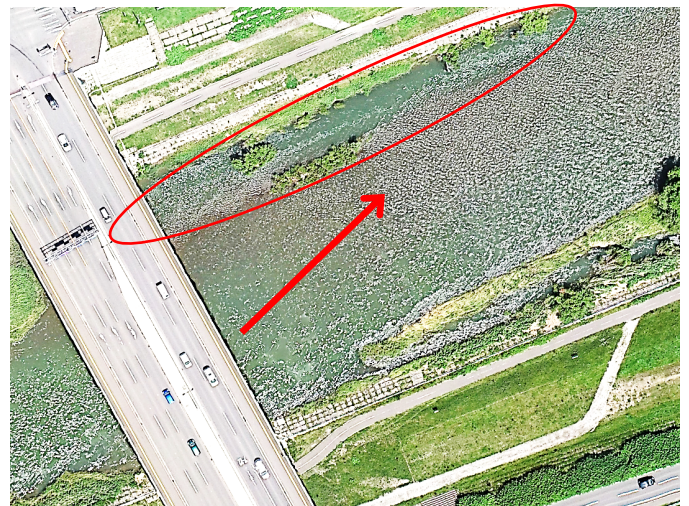


図-34 砂州前縁部(豊平川東橋下流、2018年)

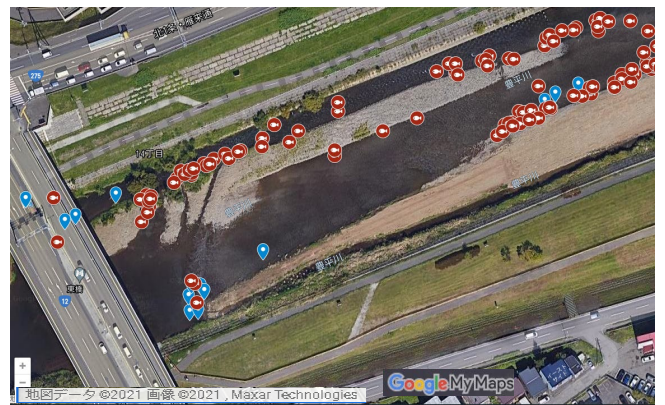


図-35 2020年度産卵床箇所(サケ科学館HP) 東橋  
(赤はサケ産卵床、青はサクラマス産卵床)

## 4.4 豊平川におけるサケ生卵率と水質指標の関連分析の考察

4章では豊平川のサケ産卵床における生卵率と水質等の関連を調べた。得られた結果を以下に示す。

・豊平川でサケが多数産卵する区間内でも、主流路や副流路など、大きく区分したエリア毎に地下水の影響などで河床間隙水の水質・水温の特徴が異なることが明らかになった。

・産室の DO が低い産卵床の生卵率は低く、DO が生卵率の低下に影響を与えた可能性が高い。

## 5 数値計算による河道微地形形成過程とハビタット

### 5.1 概要

河川中流部の砂州地形は、湾曲など複雑性が増せば河岸侵食など洪水管理上の支障となるが、平常時には瀬や淵、中州や分流路など多様で複雑な微地形が、環境、景観などの多様性を高めている。

分流路や浮州の形成やその安定性については不明な点が多く、維持管理が容易な、つまり自然形成される分流路、浮州の特徴を十分に把握し、その形状等に習う形で維持管理メンテナンスを行っていくことが肝要と考える。

また河道形成条件として、積雪地域の流量条件を考えた時、融雪出水による河道形成への影響が大きいと言われており、平均年最大流量と融雪出水の流量とで数倍の違いがある反面、洪水継続時間は、前者に比べて後者は1オーダー長い。それゆえ融雪出水の微地形への影響は無視できないとも言える。代表粒径の限界掃流力以上の大流量のみ流すことで地形変化の概略は予測できるゆえに、計算時間短縮のため、中小流量のハイドロは無視することも多い。その場合、微地形については再現できない場合も想定される。それゆえ目的に応じた条件設定が求められる。

サケ産卵床として重要な砂州微地形の特徴的な場として、alcove 状地形や砂州前縁部（以下、早瀬から淵頭への落ち込み箇所周辺を示す、図-34 参照）など、河床の高低差が見られ、伏流水の多い場所などがあげられる<sup>25)</sup>。河道微地形の形成過程を明らかにするために数値実験による変化過程を把握確認し、実際の河道微地形との類似点などについて、対比考察を行った。

表-5 計算条件一覧表

項目	設定内容
解析モデル	iRIC Ver3.0
計算区間	75m×5000m 直線水路
勾配	1/200
計算格子	5m×5m
粗度係数	0.030
樹木	樹木なし
起算水位	等流水位
河床材料	均一粒径(50mm)
上流端境界	動的平衡
初期流量	568m <sup>3</sup> /s
初期形成形状	平坦河床

### 5.2 計算条件

数値実験の初期条件は、矢野ら<sup>27)</sup>による計算と同じ計算条件(表-5)を用い、200h まで流量ハイドロも同一

である。

本実験では、単列砂州を形成させ、その後、小流量へと減水したときの河床の変化を確認した。

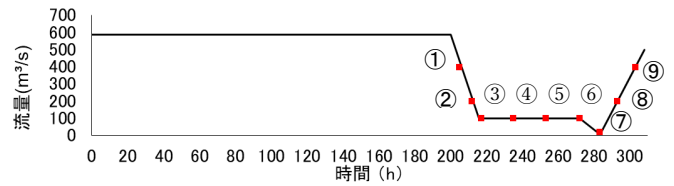


図-36 計算流量（実験その1）

### 5.3 数値実験

流量ハイドロは図-36 に示すが、まず単列砂州形状を形成させ、減水、小流量による河床の変化過程の確認を行った。

図-37 は、図-36 の①～⑨に対応する流速分布を示す。また図-38 は、その時の河床高の変化過程である。

586m<sup>3</sup>/s の流量を 200h 流すことで形成された単列砂州の河床から、減水する過程で 200m<sup>3</sup>/s 時(①→②)には流速の大きい主流部が蛇行した流れとなっている。100m<sup>3</sup>/s 時の初期(③)に砂州前縁部に向かい扇状の流れだったものが徐々に 2 列の谷に挟まれる斜め方向の尾根が水面下に形成され 2 つに分流される(図-36、図-37 の③→⑥)。20m<sup>3</sup>/s 時(⑦)には主流部だった流れの部分が蛇行した滞筋となり、水面下に形成された斜め方向の尾根の起伏が、水面上の浮州となる。また 100 m<sup>3</sup>/s 時に見られた側壁に沿う形の分流とそれに伴う浮州は見られなくなる。

次に流量を 20m<sup>3</sup>/s から 500m<sup>3</sup>/s へと増加させる過程では、300m<sup>3</sup>/s 前後(⑧→⑨)から下流方向への交互砂州の移動が始まり 400m<sup>3</sup>/s 時(⑨)には浮州部分が縮小し、初期(①)の単列砂州の形状に戻ることが確認できた。

以上の数値実験詳細については、文献 28)において計算条件を変えたケース等についても詳述している。



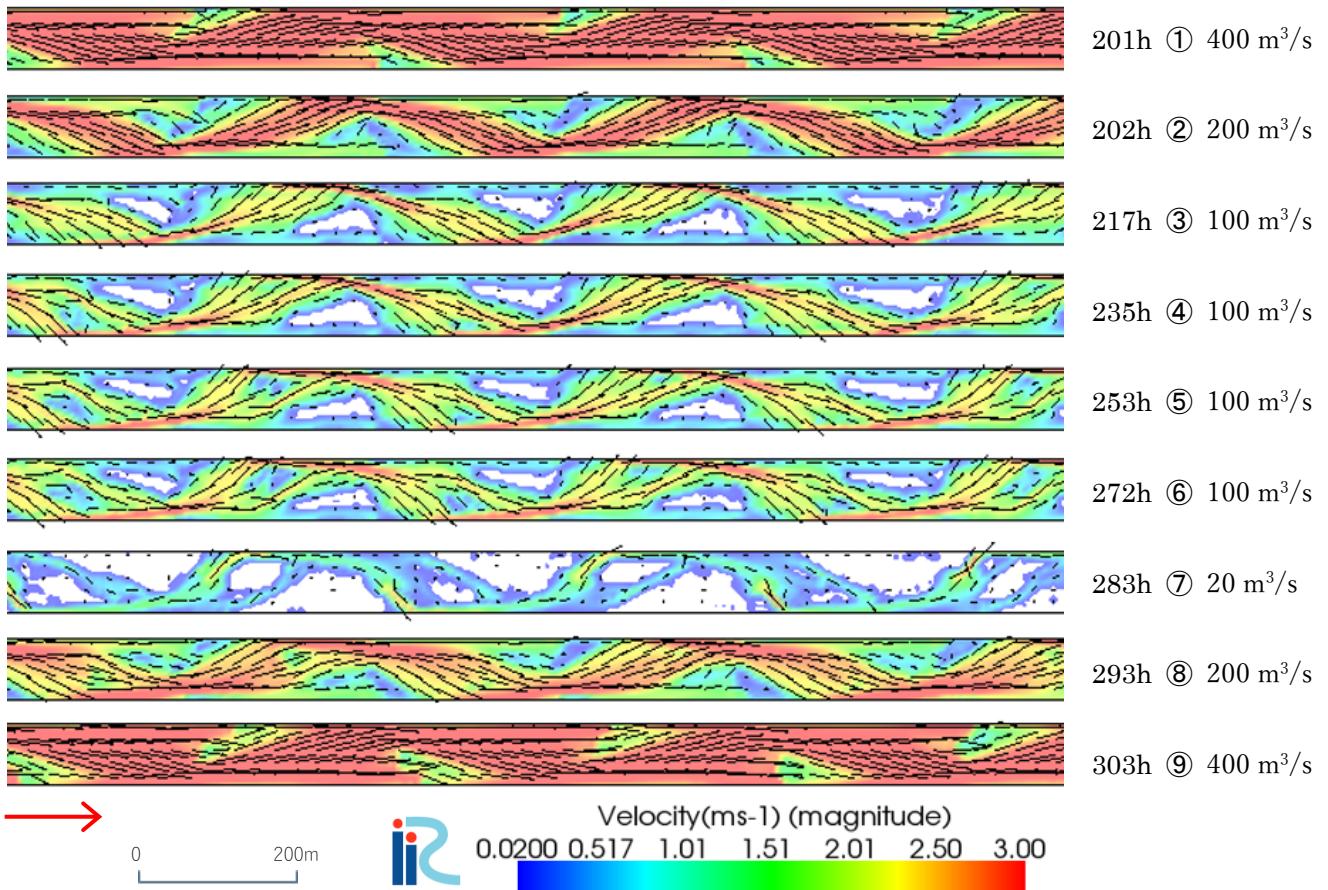


図-37 計算結果(流速、流速ベクトル)

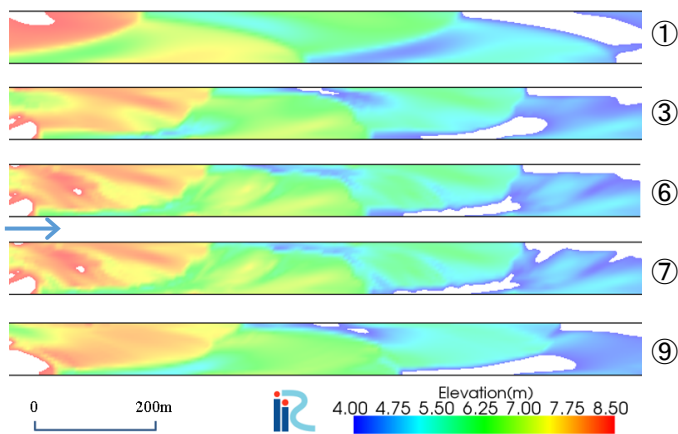


図-38 計算結果(河床高)

#### 5.4 交互砂州とハビタットおよび alcove 形成過程

ここでは、豊平川の扇端付近(KP12 前後)における河道微地形の特徴について例示する。

かつては複列砂州形状を呈していた豊平川は、現在、典型的な単列砂州形状が卓越する急流河川である。前述したように砂州の前縁線に沿う深掘部(淵)の上流側に、サケ産卵床が多く見られる。図-39 は2011年の豊平川の砂州前縁部の地形とサケ産卵床の位置を示す

図(矢野ら<sup>29)</sup>より引用)であるが、直上流側の砂州頂部(瀬)などで伏流し、相対的低部の前縁部などで湧出するため、サケ産卵環境として好適な生息場の1つである。図-40 は、283h 時の流速分布図であるが、図-39 右図と対比した時、砂州前縁部の浮州などの特徴が類似していることがわかる。

写真-2 の JR 橋下流側における砂州前縁部に筋状の滞筋となっている浮州が観察された。一方、図-40 の薄青で囲んだ箇所に注目すると同様に砂州前縁部の筋状の微地形が確認できる。

また、写真-2 の砂州前縁部の上流側(写真で右奥)には、もともと浮州だったものが陸化し河畔林植生の島となったことが推測される。さらに、JR 橋の上流側左岸には、alcove 状地形が形成されている。なお矢野ら<sup>27)</sup>は、数値実験により確認された alcove 状地形の形成機構について、「蛇行部の下流への移動に伴う、内岸の砂州下流部の堆積により、河岸の深掘れ部が取り残された部分」と説明しており、片岡ら<sup>30)</sup>は、実験水路幅の部分拡幅条件と alcove 状地形の形成について示している。

写真-3~7 も、砂州前縁部に形成された浮州が確認



できる。



写真-2 JR橋下流の砂州前縁部 (R3年6月)



写真-3 平和大橋下流の砂州前縁部 (R3年6月)

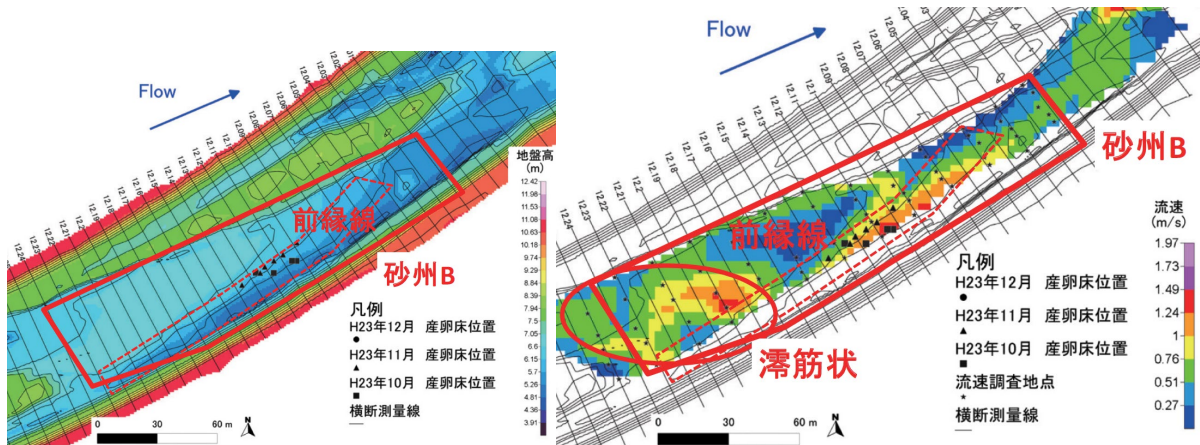


図-39 砂州前縁部における地形、流速分布と産卵床 (矢野ら<sup>30)</sup>より引用) 平和大橋下流

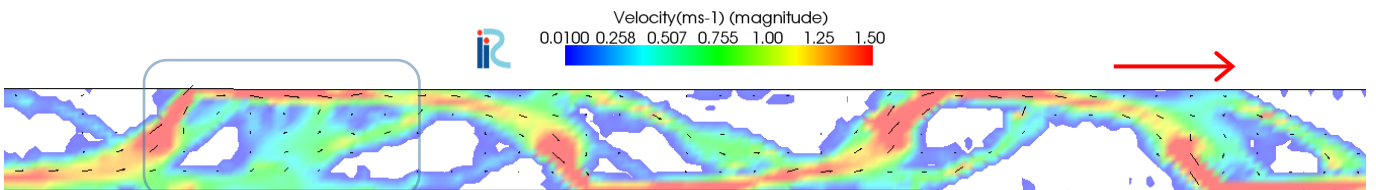


図-40 直線水路内単列砂州における減水後の流速分布 (前節の数値実験 283h 時)



写真-4 東橋下流の砂州前縁部 (R3年4月下旬) 融雪出水時



写真-5 東橋上流の砂州前縁部 (R3年6月)





写真-6 南大橋上流の中島合流部 (R3年6月)



写真-7 南大橋上流の中島合流部 (R3年5月)  
融雪出水時

## 6. 掘削箇所と分流部のモニタリング調査

### 6.1 2021年の産卵床分布とその特徴

図-41~45は、2021年に7/29にUAVで撮影した写真に9/29~12/10にさけ科学館による産卵床位置の調査結果を示した図である。4箇所で開催された低水路河道掘削後、約1年後の調査であり、写真撮影時の流量は10m<sup>3</sup>/s前後で、2021年は平年と比較して小さい傾向があり、11月上旬まで、流量が少ない傾向が継続した。表-6は各区分毎の微地形区分毎の産卵床数を示す。その集計結果を図-46に示す。ここでは前期を9/29~10/27、後期を11/17~12/10として集計している。一般に前期群と比べると、サケの後期群は、卵の孵化に重要な積算水温との関連から、冬も比較的暖かい伏流水の存在する場や、より下流側に産卵床が多く見られると言われている。後期が3割~4割の主流部、砂州前縁部に比べて、掘削断面B(図-41内

の断面図参照)と分流部では8割以上を後期が占める。KP11.4~12、12.6~13では、掘削断面Bに分流部が形成されていることが写真からもわかる。このことから掘削断面Bでは、分流部と類似した産卵環境が創出され、後期の産卵床が多かったことが推察される。

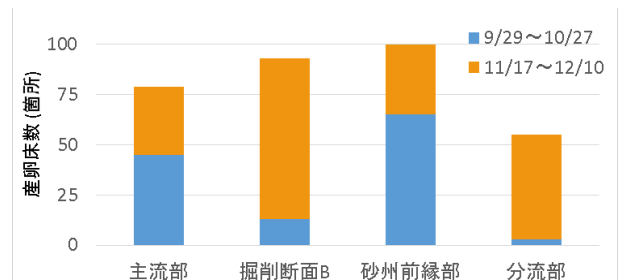


図-46 河道微地形区分別の産卵床数 (2021)

表-6 河道微地形区分別の産卵床数 (2021)

区分	主流部		掘削断面B		砂州前縁部		分流部		
	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	
縦断距離									
KP									
11.4~12	25	5	0	53	24	5	-	-	JR 鉄道橋下流, 掘削箇所①
12.0~12.6	3	26	-	-	3	1	2	17	JR 鉄道橋上流
12.6~13.0	3	2	0	23	26	26	0	35	平和大橋上流, 掘削箇所②
13.0~13.5	6	0	1	2	4	0	1	0	水穂大橋下流, 掘削箇所③
13.5~14.1	8	1	12	2	8	3	-	-	一条大橋下流, 掘削箇所④
計	45	34	13	80	65	35	3	52	

※さけ科学館の産卵床位置情報から読み取り作成





図-41 2021年度産卵床箇所 (KP11.4~12、掘削箇所①、7/29撮影時流量 $Q \approx 10\text{m}^3/\text{s}$ 、位置情報はさけ科学館より)

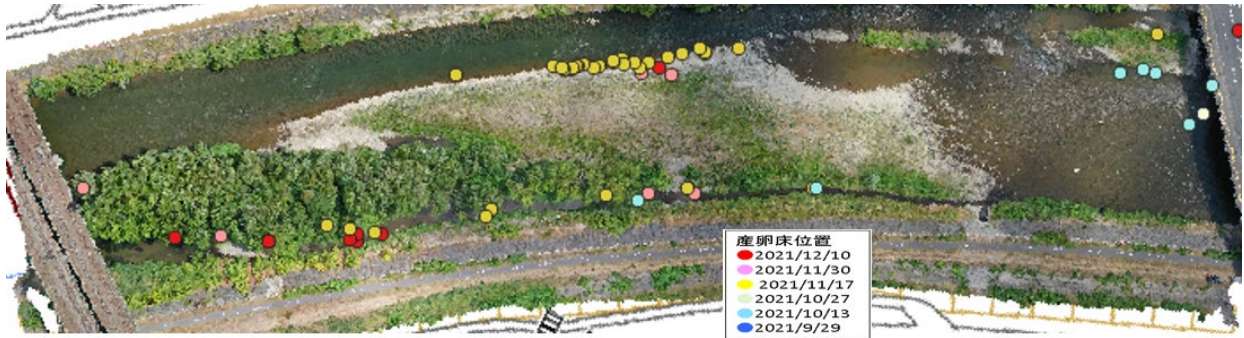


図-42 2021年度産卵床箇所 (KP12~12.6、JR橋分流、位置情報はさけ科学館より)



図-43 2021年度産卵床箇所 (KP12.6~13、掘削箇所②、位置情報はさけ科学館より)

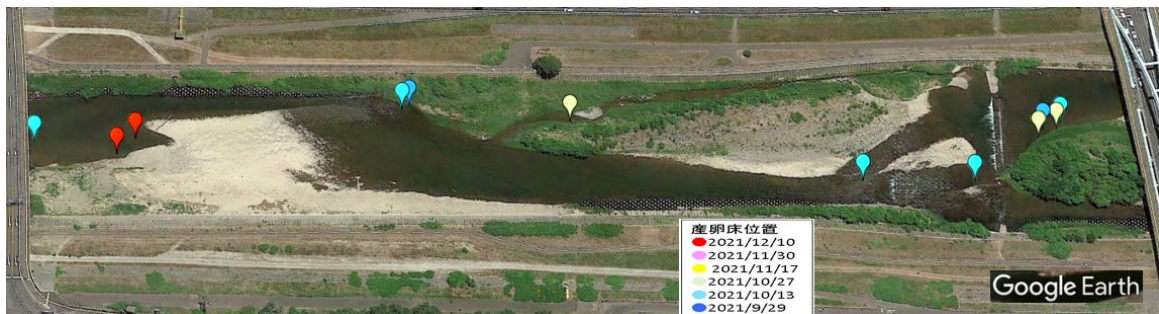


図-44 2021年度産卵床箇所 (KP13~13.5、水穂大橋分流および掘削箇所③、位置情報はさけ科学館より)



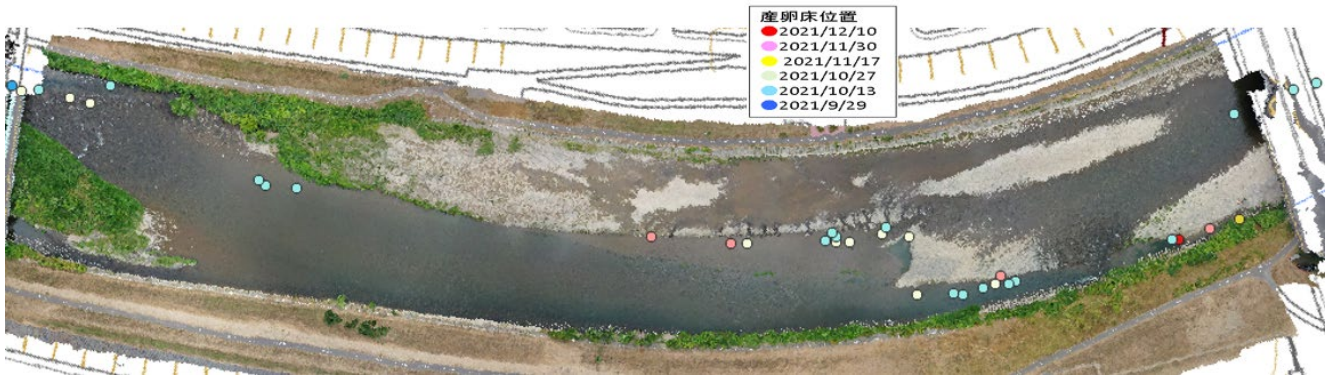


図-45 2021年度産卵床箇所 (KP13.5~14.1、掘削箇所④、位置情報はさけ科学館より)

## 6.2 低水路掘削箇所モニタリング

### 6.2.1 掘削箇所の間隙水温

河道掘削による産卵環境への影響を把握するため、札幌河川事務所で2020年に実施した河道掘削箇所4箇所の内、平和大橋上流の1箇所およびSWSP(市民団体)で実施した2つの分流掘削部でモニタリング調査を2021年度に実施した。

図-47は産卵床位置図上に水温計設置箇所を示した図である。

掘削により創出された掘削断面B上に調査地点①、元の低水路河床と掘削後上流側の砂州が変形して左岸方向に張り出す形態となった砂州の側岸部に調査地点

②を設け、自記水温計で観測を実施した。

図-48は調査地点①、②において自記水温計で計測した河床間隙水温および河川水温、河川水位の推移である。地点①の間隙水温は河川水温とほぼ連動していることがわかる。一方②では河川水温よりも変動が少ないことがわかる。また8月は河川水温よりも低い傾向があり、10月以降は河川水温よりも高い傾向がみられる。またD0の測定からも①の4地点平均で、6.5に対して②の5地点平均で2.3であった。このことから3章で考察したように、調査地点①と比較して、調査地点②でより浸透流の影響が大きいことが推測できる。

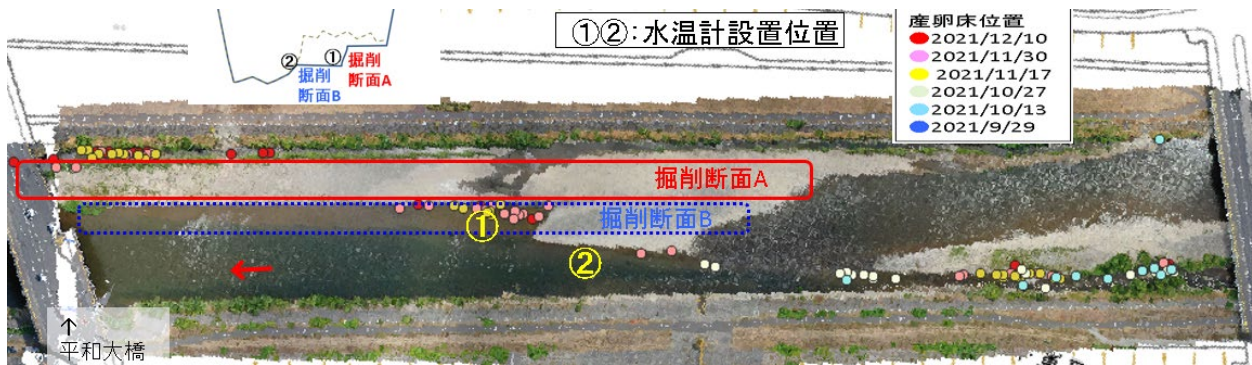


図-47 平和大橋上流の計測箇所 (KP12.6~13、産卵箇所はさけ科学館提供データ)

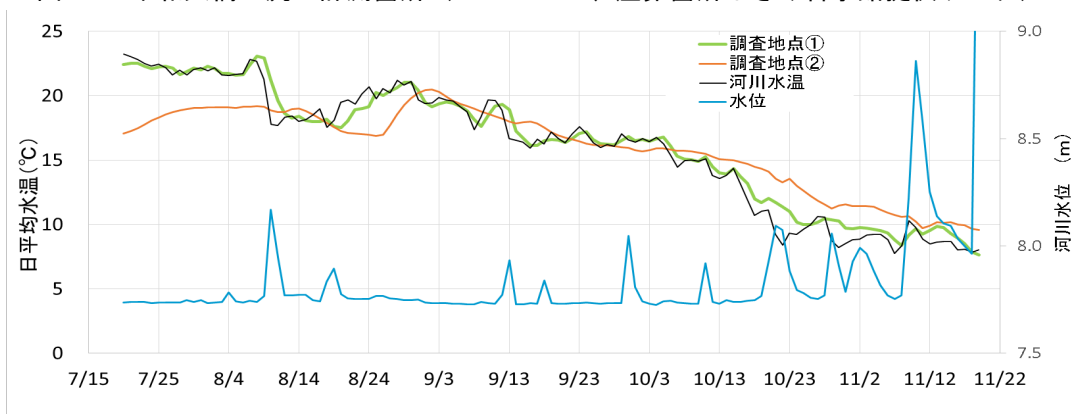


図-48 平和大橋上流の河床間隙水温の変化 (河道掘削後約1年)

### 6.2.2 分流部の間隙水温

図-49 は 2 つの分流の流量と本川の流量を示す。本川の流量（雁来観測所）に対して、水穂下流分流は 1/10 程度に分流量、また JR 橋 alcove（開口）分流は 1/20 程度に分流量であることが確認できた。

図-50 は JR 橋 alcove（開口）分流における河床間隙水温、河川水温および河川水位の変化を示す。G1~G3 の 3 グループは、G1 (N=11) が 8 月平均の河床間隙水温と河川水温との差 0.2℃未満、G3 (N=5) が水温差 5℃~8℃、G2 (N=9) が水温差 0.8℃~4℃で分けている。G1 は河川表面水と連動しており 7 月下旬の 24℃から 11 月上旬の 8℃と 16℃下がっている。一方で G3 は 7 月下旬の 14℃から 11 月上旬の 10℃と水温変化は 4℃と小さい。このことから前述したように河床間隙水における浸透流の混合割合は G3>G2>G1 の順で高いことが推測できる。

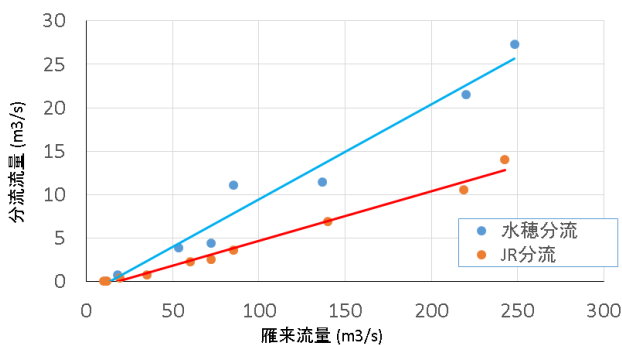


図-49 本川流量と分流量

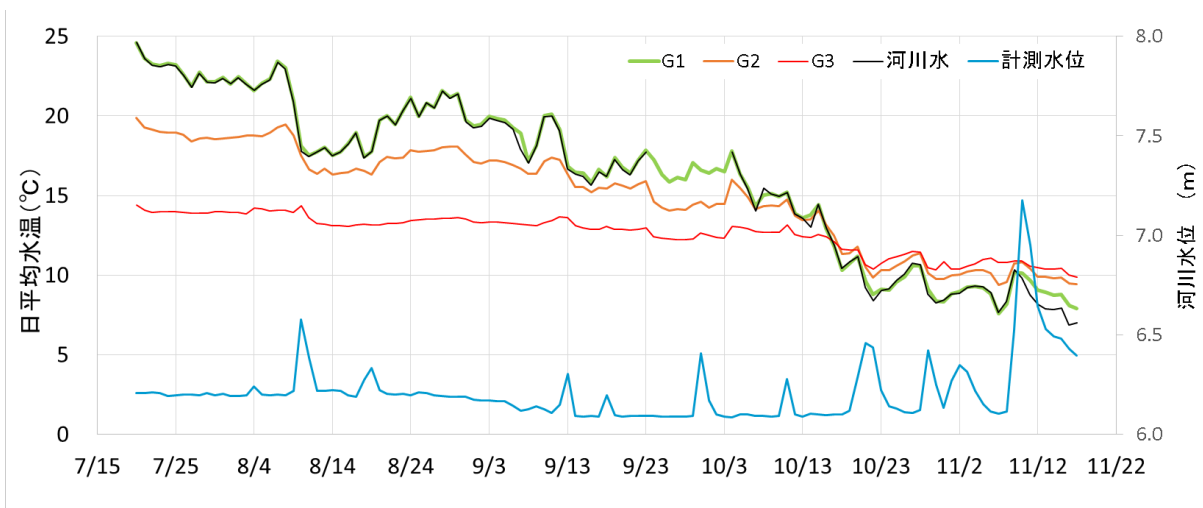


図-50 JR 橋上流 alcove（開口）地点の河床間隙水温の変化

図-51 は JR 橋 alcove（開口）地点における 8 月の日平均水位と河床間隙水温（日平均）の関係を示す。縦軸は河川水温-間隙水温であり、G1~G3 の 3 グループ毎の平均である。G1 (N=11) は期間平均の水温差が 0.2℃未満、G2 (N=9) は水温差が 0.8℃~4℃、G3 (N=5) は水温差が 5℃~8℃である。

8/10 に出水があり、水位が約 6.6m まで上昇しており、8/10 前後で 2 つの時系列グラフに分けている。浸透流とみられる水温の低いグループの G3 や G2 は、出水により希釈され、間隙水温差が小さくなったと推測される。一方で G1 は、期間を通じて河川表流水温とほぼ同じ間隙水温であり、浸透流がほとんどない箇所と推測される。

図-52 は、6 章および 3 章の調査データから、2018 年と 2021 年の D0 の各地点の平均値を比較した。2 章で述べた JR 橋 alcove では 2018 年の閉塞時と比較して、小規模掘削路の効果により、2021 年の開口時に改善された。他地点では半閉塞した停滞水域は無いため、いずれの箇所も河川水の D0 は 10mg/l よりも大きな値であった。



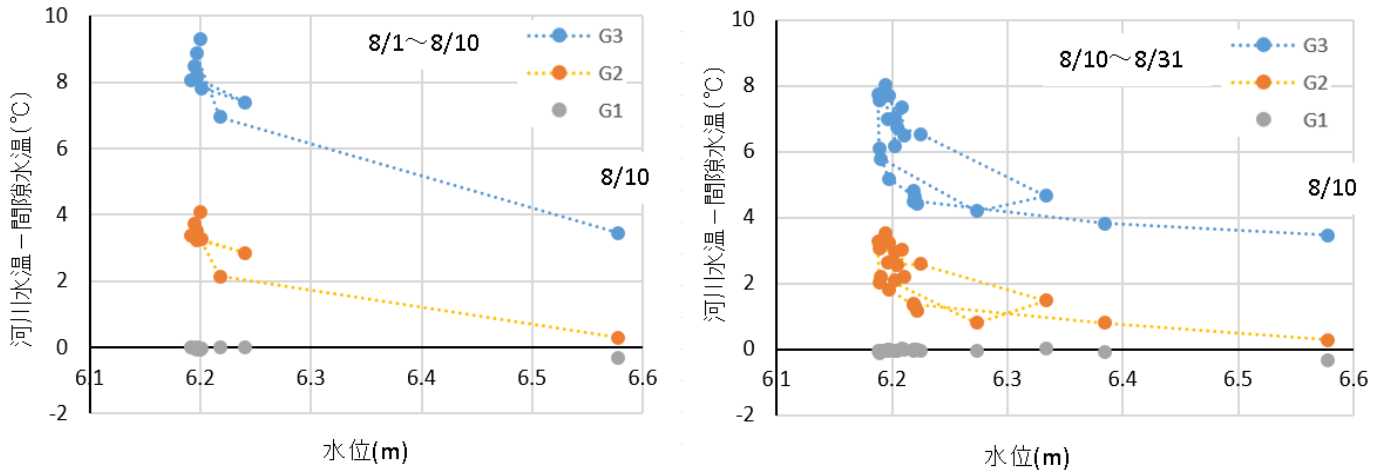


図-51 JR橋上流分流における水位と河床間隙水温

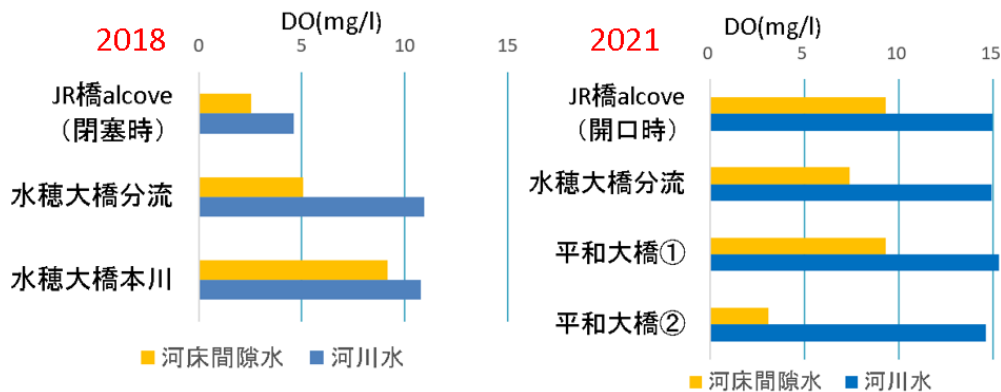


図-52 2018年とのDOの比較

## 7. 総合考察

2章で alcove の掘削路開削による環境改善、掘削路の有無と底質との関連、3章で分流部の河床間隙水質等の比較調査結果、4章でサケの生卵率と水質との関連、5章でサケ産卵床として重要な河道微地形とその成因に関する考察、6章で河道掘削箇所および分流部のモニタリングとを示した。特に分流部において、分流量は、間隙水質や底質などへの影響が推察される。それゆえ分流量を左右する分流部呑口形状は、生物環境の基礎的条件となり、増水時の土砂堆積による閉塞などにも影響することから、定期的なメンテナンス（微調整）が1つの課題と考える。

本調査で具体的に維持管理上有利な分流部呑口形状について言及するには、十分とは言えないものの、モニタリングを継続し、順応的に管理していくことが重要と考える。

また本研究(11.2.2)は、11.3.2の研究と一体的に実施されたものである。

## 参考文献

- 1)北海道開発局、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：北海道の急流河川における河川整備に関する研究(その2)、第59回北海道開発技術研究発表会、治水、2015。
- 2)松田浩一、須藤達美、内堀寿美男、大島秀則、清水義彦、藤堂正樹：固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究(その2)、河川技術論文集、vol.17、pp.233-238、2011。
- 3)原田守啓、高岡広樹、大石哲也、萱場祐一：扇状地の中小河川における部分拡幅工法の有効性、河川技術論文集、Vol.21、pp.253-258、2015。
- 4)山口昌志、柿沼孝治、井上卓也、清家拓哉、加藤一夫：軟岩洗堀を考慮した大型模型実験を用いた河床低下対策手法の評価について、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73、No.4、pp.I\_853-I\_858、2017。
- 5)永山滋也、原田守啓、佐川志朗、萱場祐一：揖斐川の高水敷掘削地におけるイシガイ類生息環境－掘削高さおよび経過年数との関係－、応用生態工学、vol. 19、no. 2、pp. 131-142、2017。

- 6)鈴木俊哉：自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み、SALMON 情報、no.2、pp.3-5、2008.
- 7)有賀望、森田健太郎、鈴木敏哉、佐藤信洋、岡本康寿、大熊一正：大都市を流れる豊平川におけるサケ(*Oncorhynchus keta*)野生個体群の存続可能性の評価、日本水産学会誌、vol.80、no.6、pp.946-955、2014.
- 8)卜部浩一：北海道の野生サケについて、北水試だより、92、2016
- 9)岡本康寿、小原聡、佐藤信洋、高山肇：豊平川におけるシロザケ産卵床の分布と湧水の関係(1996年度)、札幌市豊平川さけ科学館館報、第9号(1995年度)、1997.
- 10)柳井清治、長坂有、佐藤弘和、安藤大成：都市近郊溪流における木製構造物による流路とサクラマス生息環境の改善、応用生態工学、vol.7、no.1、pp.13-24、2004.
- 11)国土交通省：水文水質データベース、<http://www1.river.go.jp/>(令和元年9月13日確認)
- 12)Inoue,M. and Nunokawa,M. : Effects of longitudinal variations in stream habitat structure on fish abundance: an analysis based on subunit-scale habitat classification、*Freshwater Biology*. No. 47、pp. 1594-1607、2002.
- 13)札幌市豊平川さけ科学館 HP : <https://salmon-museum.jp/>
- 14)帰山雅秀、眞山紘：野生産サケの復活をめざして、魚と卵 Tech.Rep.Hokkaido salmon Hatchery(165)、pp.41-52、1996.
- 15)札幌ワイルドサーモンプロジェクト HP : <https://www.sapporo-wild-salmon-project.com/>
- 16)Kondolf,G.M. and Wolman,M.G. : The sizes of salmonid spawning gravels、*Water Resources Research*、Vol 29、NO.7、1993.
- 17)有賀望、鈴木俊哉：豊平川のサケ産卵床における環境条件と浮上までの生存率、SALMON 情報 2009 ; 3、pp.3-5、2009.
- 18)小林哲夫：サケとカラフトマスの産卵環境、北海道さけ・ます孵化場研究報告 第22号、pp.7-13、1968
- 19)Greig,ST、Sear,DA、Carling,PA. : A field-based assessment of oxygen supply to incubating Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryos、*Hydrological Processes*、Vol.21、pp.3087-3100、2007.
- 20)Yamada,H. and Nakamura,F. : Effects of fine sediment accumulation on the red environment and the survival rate of masu salmon(*Oncorhynchus masou*) embryos、*Landscape and Ecological Engineering*、5、2009.7
- 21)Baxter,C.、Hauer,R.F. and Woessner,W.W. : Measuring groundwater-stream water exchange : new techniques for installing minipiezometers and estimating hydraulic conductivity、*Transactions of the American Fisheries Society*、Vol.132、pp.493-502、2003.
- 22)小宮山英重、堀本宏、小原聡：豊平川におけるシロザケの河川回帰率とその自然環境、北海道の自然と生物、2、pp.1-6、1990.
- 23)佐野誠三：北日本産サケ属の生態と蕃殖について、北海道さけ・ます孵化場研究報告 第14号、pp.21-90、1959.
- 24)鈴木俊哉：自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み、SALMON 情報 2008 ; 2、pp.3-5、2008.
- 25)寒地土木研究所水環境保全チーム：冷水性魚類の産卵床を考慮した自律的河道整備に関する研究、平成27年度プロジェクト研究、土木研究所 HP、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/pro-8-3.pdf>
- 26)Brunke,M. and Gonser,T. : The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater、*Freshwater Biology*、Vol.37、pp.1-33、1997
- 27)矢野雅昭、布川雅典、谷瀬敦：中規模河床波発生領域による alcove 形成条件に関する数値計算、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.73、pp.B-38\_1-4、2017.
- 28)野上毅：数値計算による魚類生息場の維持に関連する河道微地形変化について、寒地土木研究所月報、No.815、pp.51-56、2021.
- 29)矢野雅昭、矢部浩規、林田寿文：砂州地形とシロサケの産卵環境について、寒地土木研究所月報、No710、p.23-27、2012.
- 30)片岡朋子、布川雅典、矢野雅昭、井上卓也、山口里実、渡邊康玄：水路幅の部分拡幅に伴う砂州形状の変化、土木学会論文集B1(水工学)、74(5)、pp.I\_1261-I\_1266、2018.
- 31)寒地土木研究所水環境保全チーム：冷水性魚類の自然再生産のための良好な河道設計技術の開発、平成22年度プロジェクト研究、土木研究所 HP、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2010/pdf/pro-15-2.pdf>
- 32)Koski,K.V. : The survival and fitness of two stocks of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) from egg deposition to emergence in a controlled-stream environment at Big Beef Creek. Ph. D. thesis. University of Washington、Seattle、WA. p.212、1975.

### 11.2.3 中小河川における環境の保全に資する河道計画・設計手法に関する研究

担当チーム：流域水環境研究グループ（自然共生研究センター）  
研究担当者：中村圭吾、林田寿文、河野誉仁

#### 【要旨】

本研究は、河川計画から河道設計までを一体的に行うツールとして、「三次元の多自然川づくり支援ツール」を開発することを目的とする。平成 28 年度は、河道の三次元地形を迅速に処理可能な河道地形編集特化型ツールのプロトタイプを開発した。同時に、河川環境評価ツール（EvaTRiP）の開発を行い、植物流出評価や魚類生息場評価の機能を整備した。平成 29 年度は、河道地形編集特化型ツールのプロトタイプの改良を行った。平成 30 年度は、三次元地形編集ができるプロトタイプをベースとして、iRIC ソフトウェアを基本ソフトウェアとする河川横断面図での設計が可能な河道地形編集ツール（RiTER Xsec）の開発を行った。令和元年度は、河道地形編集ツール（RiTER Xsec）の機能を強化し、i-construction に対応できる開発を進めた。令和 2 年度は、EvaTRiP をベースに専門家から河川管理者まで様々なレベルのユーザーのニーズを満たす高度な河川環境評価を可能にする河川環境評価ツール（EvaTRiP Pro）の開発を行った。令和 3 年度は、開発した一連のツールについて広報活動を充実させ、普及に努めた。

キーワード：河道計画、環境評価、中小河川、シミュレーション、iRIC、EvaTRiP、RiTER、EvaTRiP Pro

#### 1. 多自然川づくり支援ツールの全体像と開発の経緯

中小河川において河道の形を大幅に変更する機会は限られている。例えば災害復旧はその一つであるが、非常に短い期間で河道計画を立案する必要があることから、治水検討優先で環境への配慮が後手に回りがちである。そのため、治水上の評価とともに、自然環境保全に対する評価を迅速かつ負担なく行うことができる支援ツールが求められている。自然環境や水辺利用などを念頭に置いた川づくりを行う上では、操作性の良い地形編集機能と自然環境評価機能が重要である。また現在、3次元測量技術の高度化やその成果をそのまま用いる CIM、さらに無料で使える水理シミュレーションソフトウェアなども浸透しつつあり<sup>1)</sup>、これらの持つ利点を川づくりの場面で活かせる河道計画のプロセスの確立が必要である。

こうしたことから、土木研究所自然共生研究センターでは、災害復旧事業での活用と 3次元測量や CIM、VR (Virtual Reality) の適用を念頭とした新しい河道計画プロセスと、これに対応できる「多自然川づくり支援ツール」の研究開発を行っている。図-1 は、多自然川づくり支援ツールの全体像である。川づくりを行う上で重要なものは、大きく分けて治水評価機能、地形編集機能、河川環境評価機能である。これらの機能構成として中心となるのは、洪水時の安全性を評価するツールとなる無料の水理シミュレーションソフトウェア、iRIC ソフトウェア（以下、iRIC）<sup>2)</sup>である。

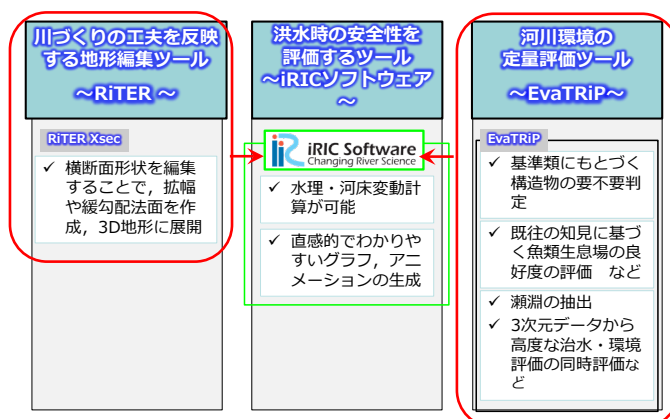


図-1 多自然川づくり支援ツールを構成するツール群  
(赤枠：土木研究所で開発し iRIC に追加した機能)

これに 3次元地形モデルを編集する機能 RiTER Xsec (River Terrain EditoR X(Cross)-section、ライタークロスセクション) および河川環境の定量評価ツール EvaTRiP (Evaluation Tools for River environmental Planning、エヴァトリップ) と呼ぶ 2つのツールを開発し、iRIC との連携が取れるようにした。

#### 2. 地形編集ツール RiTER Xsec の機能

RiTER Xsec は、河道地形を柔軟に編集するためのツールである（図-1 左）。RiTER Xsec の最大の特徴は、横断面ベースでの地形編集でありながら、3次元地形モデルの編集に反映させられる点である。横断面をベースに考えることは従来の河川計画に馴染んだ方法であり、技術者が高い障壁を感じることなく、河川

表-1 RiTER Xsec のねらいと具体的な機能

ねらい	機能
① 横断面図と平面図の連動した旗揚げ機能	✓ 平面図に官民境界や道路などの線情報を記入し、横断面図上でその位置に旗揚げされる機能
② 横断面図編集機能の強化	✓ 横断面図上で法勾配を確認しながら法面編集する機能 ✓ 横断面の編集機能強化として背景格子・スケール、参照用断面の表示機能 (図-5)
③ 平面図と航空写真の活用	✓ 平面図や航空写真の重ね合わせ機能 ✓ 数値標高モデル (DEM) データから河道に沿って一連の横断面図を抽出する機能 (図-6)
④ 3次元川づくりと i-Construction との連携	✓ 編集した地形を i-Construction の標準である LandXML 形式で出力する機能

の3次元設計へ移行できることを狙っている。主な機能は表-1 のとおりである。

RiTER Xsec の基本構造は、iRIC の平面 2 次元の計算格子を構築する機能である。図-2 にその概念図を示す。基本となるデータは、河川横断データである。同図①のように、横断面の位置データとともに読み込むと、これをもとに②のように計算格子 (青) が半自動的に設定できる。ここで、赤色で示すように格子点に横断データから標高値を抽出して与えると (これをマッピングと呼ぶ)、格子点の接続性から3次元の河道地形モデルを生成することができる。横断面を変更した場合は、③の計算格子の再設定と再マッピングを行えば、変更が反映された3次元モデルを再生成できるという仕組みである。

RiTER Xsec には、現実の整備に則して検討を行いやすくするための工夫が施されている。その一つが、表-1 の①横断面図と平面図の連動した旗揚げ機能であ

る。実際の川づくりの現場では、必要な流下能力 (河積) だけでなく用地の制約を踏まえつつ、自然環境や水辺利用に配慮した法面や空間づくりを行うことが多い。本来は、被災状況や官民境界を踏まえて十分にスペースを活用した設計が望ましいのであるが、図-3 のように河積ベースの流下能力を重視した直線的な形状に陥りがちである。スペースを最大限活用した設計のためには、平面上で捉えられる用地上の境界と、河道設計で検討する横断面上の境界について、平面的な位置関係を法勾配等も含めて確認しながら、工夫を入れていくことが求められる。RiTER Xsec では、図-4 のように、平面図ビュー上で官民境界などの目安となるラインを入力すると、横断面図にも反映されるようになっている。イメージとしては、同図右のように、周囲の土地も活用して使いやすく心地よい空間の設計に役立てて欲しいという思いである。その他に、使い勝手を考え、横断面図で法勾配を確認しながら法面を編

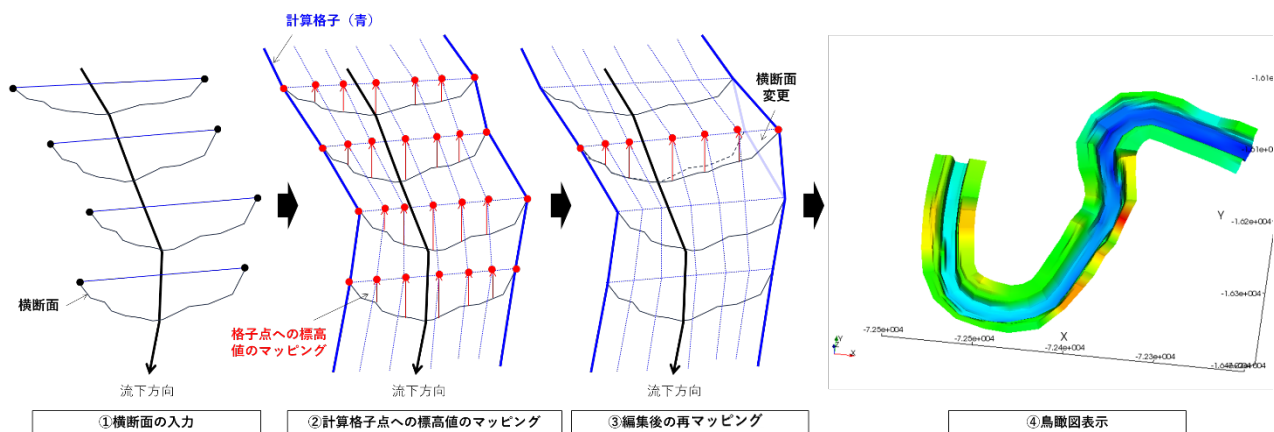


図-2 RiTER Xsec による3次元地形編集の考え方



集する機能、背景格子とスケール、さらには参照用の断面を表示する機能 (図-5)、平面図や航空写真の重ね合わせ (ジオレファレンス) 機能を追加している。

また、3次元川づくりと i-Construction との連携も考慮しており、表-1 の④に示す 2 つの機能を開発した。1つ目は、数値標高モデル (DEM) のデータから河道に沿って一連の横断面を抽出する機能である (図-6)。従来は、横断の位置からなるデータ (riv ファイルと呼ぶ) を別途作成して読み込ませる必要があったが、この機能によって、UAV や航空 LP、ALB などの面的な測量成果を利用しやすくなった。さらに、編集した地形 (計算格子を三角形に分割した TIN) を i-Construction の標準である LandXML 形式で出力する機能も追加している。

### 3. 河川環境評価ツール (EvaTRiP、EvaTRiP Pro) の機能

#### 3. 1 EvaTRiP の機能

自然共生研究センターでは、河川環境評価を行うためのツールとして EvaTRiP の開発を行ってきた<sup>3)</sup>。EvaTRiP は、iRIC 上で動作するソルバーと呼ばれる個別機能として動作する。コンセプトは図-7 に示すように、iRIC で Nays2DH 等を用いて平面 2 次元水理・河床変動計算を実施した水深や流速の計算結果を入力値として、半自動的に河川環境の評価をするものである。従来の EvaTRiP では現場での利用を見込み、①護岸要否の評価 (流速から護岸の要否箇所を評価)、②移動限界粒径の評価 (砂礫が移動を開始する限界の単一粒径を評価)、③陸生植物の生育可否の評価 (河道内での陸生植物の生育有無について評価)、④魚類生息場の評価 (PHABSIM 法) といった自然環境に関わる評価値を算出する機能が備わっている<sup>4)</sup>。

図-8 は、EvaTRiP の機能④を利用して、瀬・淵・早瀬の環境条件を事前に定義 (ここでは、Pool 淵: 流速 30 cm/s 以下、水深 30 cm 以上、Riffle 瀬: 流速 30~60 cm/s、水深 30 cm 以下、Rapid 早瀬: 流速 60 cm/s 以上、水深 30 cm 以下とした) し、計算結果からその分布を表した例である。図-8 上図は水制工なし、図-8 下図は水制工ありの場合の出水後の流況に対する瀬淵分布である。結果を比較することで、水制工の有無の効果を明らかにすることができ、現場での工夫や判断に役立てることができる。

#### 3. 2 EvaTRiP Pro の機能

EvaTRiP Pro は、EvaTRiP をより広い目的で活用でき

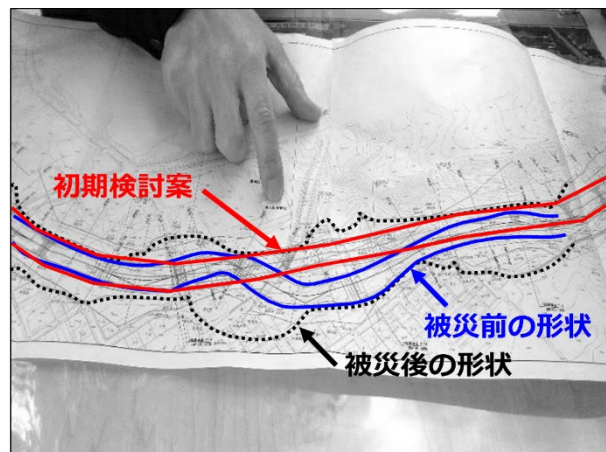


図-3 直線的な河川設計になってしまう場合

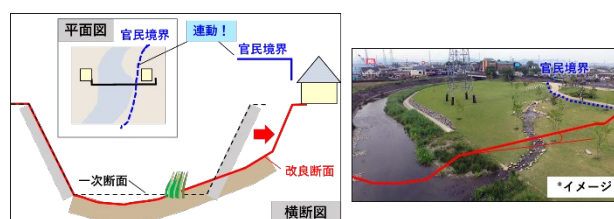


図-4 川づくりにおける横断面の検討方法

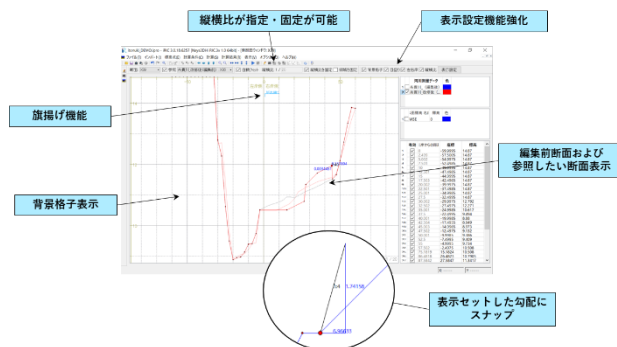


図-5 RiTER Xsecによる横断面編集機能の強化

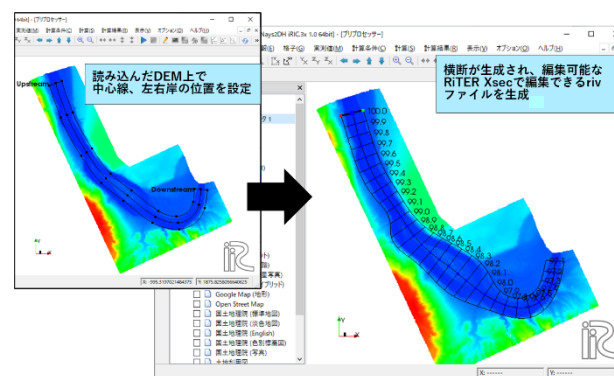


図-6 DEM データからの河道断面 (riv ファイル) の抽出・作成機能

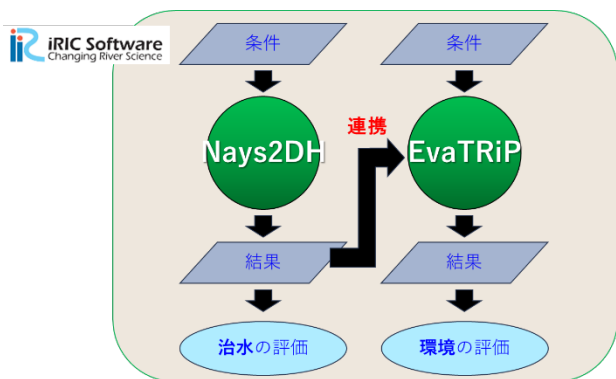


図-7 環境評価ソルバーEvaTRiP のコンセプト

るよう、機能を拡張したソルバーである。EvaTRiP と同様に、Nays2DH をはじめ任意の河川流況計算ソルバーの計算結果の分析に使用することが可能である。EvaTRiP ではあらかじめ評価法を限定していたが、EvaTRiP Pro は柔軟に評価方法を設定できるようにし、専門家から管理者まで様々なユーザーのニーズに合わせた形で、環境評価を充実させている。以下に主な機能の例を紹介する。

**瀬淵評価機能：**

河川管理者の河川環境評価としてニーズの高かった瀬淵評価機能(図-10)を充実させた。フルード数を用いた簡易的な分類方法の他、河川のサイズや状況に応じて水深・流速の閾値を手入力で設定することも可能である。

**Python によるオープンソースソルバー：**

EvaTRiP Pro は Python で動作する初めての iRIC ソルバーである。ソースコードは公開されており、ソルバーの導入に際しては iRIC 上での Python 動作環境を合わせて整備した。これにより、EvaTRiP Pro を改良するなどして、様々な iRIC の Python ソルバーを独自に開発できるようになっている。AI や深層学習といった新しい解析技術の多くは Python を言語としている。環境のみならず水理計算と深層学習を組み合わせた新しい河川評価技術のプラットフォームとして幅広い活用が期待される。

**4. 河川環境整備のタイミングとアプローチ (一案)**

2. で述べたように、河川環境のための地形改変の機会は、予算上の問題もあり非常に限られている。一方で、治水対策に重きを置いた河川整備を施された河川は津々浦々まで浸透しており、少しずつでもこれを転遷していく機会を増やすことが必要である。すでに、

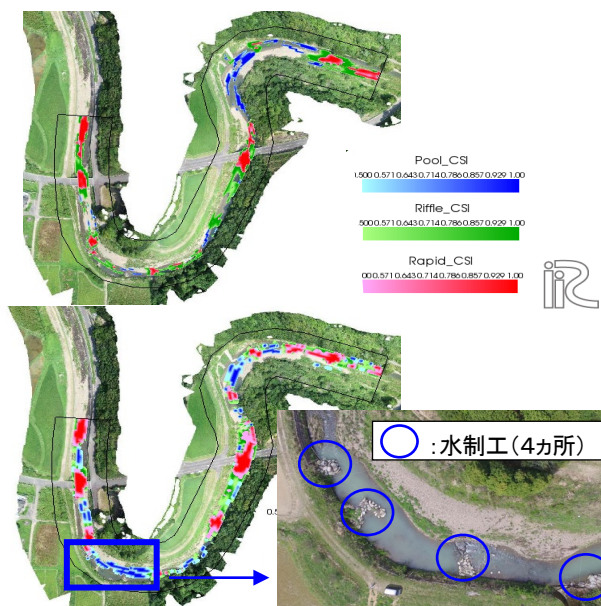


図-8 水制工なし(上図)と水制工あり(下図)

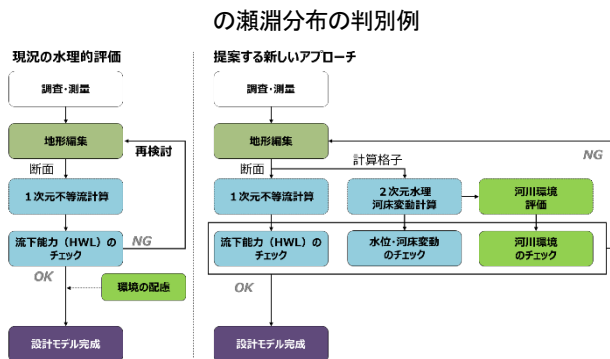


図-9 今までの河道設計プロセスと新たに提案したい河道設計プロセス

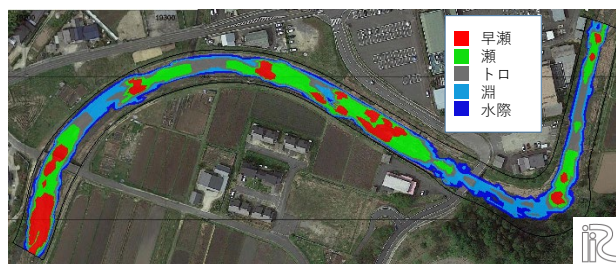


図-10 EvaTRiP Pro による河川瀬淵環境の判別

河川計画のプロセスにも課題があるという指摘<sup>1), 4), 5)</sup>もある。技術の進展によって克服される課題は解決していかなければならない。ここでは、多自然川づくり支援ツールを念頭とした新しい河川環境整備のコンセプトについて、一案を述べたい。

まず、いつ整備を実施するかという問題がある。災害復旧は確かに極めて貴重な機会と言えるが、災害はいつでも起こるかわからない。そこで注目したいのが、維持管理行為である(表-2)。維持管理による土工



は、どの河川でも毎年どこかで実施されるものである。

また、災害と異なりいつでもどこで実施するかが、ある程度分かっており時間的余裕もある。事業範囲の延長は概ね1~2kmにおさまっており、平面2次元の水利計算を実施するには適当である。

また、災害復旧のような抜本的かつ広範囲の河道改変行為についても、1次元計算にとどまることが多い。そのため、面的な瀬淵などが評価されていない、設定断面の流下能力を確認した後に環境の配慮が行いづらい、複雑な地形の検討が困難である、といった課題が存在する。図-9に示すような、2次元河床変動計算の導入、環境評価の実装といった3次元空間として河川を捉えるためのプロセスの見直しが必要である。技術の進歩はまさに日進月歩であり、こうした変化を現行のフローから逸脱させずに軟着陸させられるかが今後大きな課題になるだろう。

## 5. 多自然川づくり支援ツールの普及

自然共生研究センターでは、iRICを活用した多自然川づくり支援ツールの開発を通じ、河川空間を3次元のまま設計で取り扱う「3次元川づくり」を推進している<sup>1)</sup>。河道地形編集ツール RiTER 及び河川環境評価ツール EvaTRiP については、講習会の開催等により技術の普及を図っている(写真-1)。講習会は、都道府県



写真-1 講習会の様子

職員などを対象に定期的で開催しており、PCにiRICをインストールするところから始めて、これらのツールを体験し、5時間で一連の流れを体験できる内容となっている。また、独学でも進められるよう、講習会で用いた資料やデータは共生センターのホームページ<sup>6)</sup>で令和2年5月から公開した。本資料を使用することでRiTER Xsecによる河道地形の編集やiRICによる2次元流れ・河床変動計算を実施することができる。さらに、河床変動計算で得られた水利計算結果を用い、環境評価を行うといった一連の流れを体験することができる。公開している資料の概要については表-3に示す。

表-2 事業ごとの河川への働きかけに係る予算、頻度、範囲、時間的余裕および自由度

	災害復旧(改良)	災害復旧(単災)	(通常の)改修	維持管理
予算	大	中	中	小
頻度, 件数	少	中	少	多
範囲	広い(~数キロ)	せまい	広い(~数キロ)	せまい(~1,2k)
時間的余裕	切迫	切迫	余裕あり	比較的余裕あり
自由度	大	ほとんどなし	大	ある程度あり

表-3 講習会資料の概要

① iRICの概要	✓	iRIC使用のメリットである河川(事業)の実態、予測、効果をより分かりやすく見せることができる点なども理解する。
② Nays2DHの概要と演習	✓	Nays2DHは、iRICのソルバーの1つであり、平面二次元計算により、河川における流れ、河床変動、河岸侵食などの計算が出来る。 RiTER Xsecを使用した地形編集を行い、地盤高や粗度係数、流量や水位、計算方法などを与え、計算格子を作成し、流れの計算を行う水理解析と流砂の計算を行う河床変動解析を行うところまでを扱う。
③ EvaTRiPの概要と演習	✓	上述のNays2DHの水理計算結果から、「護岸の必要性」、「植物の生育可能性」、「瀬・淵の抽出」の評価を行う。 EvaTRiPに水理計算結果をインポートし、計算パラメータを設定し、計算実行、計算結果を表示させ、環境評価がNGの場合は、再度RiTER Xsecにより地形の見直しを行う。

事務連絡  
令和4年3月18日

## 6. 普及活動の深化

令和3年度からは本ツールの普及に力を入れ、河川管理者、建設コンサルタント、大学の研究者などを対象に操作方法を習得するオンラインセミナーを3回開催した他、解説動画を公開した（YouTubeにおいて関連動画8本（合計視聴回数 約5,000回））。

令和3年度、国土交通省より発出された事務連絡（「多自然川づくりの高度化を目指した河道の三次元設計の実施について」）（図-11）において、本ツールが河川環境評価を行う上での主たるツールとして取り上げられた。また、事務連絡とともに発出された「多自然川づくりの高度化を目指した河道の3次元設計ツール導入手引きの骨子案」の作成にも、土木研究所は大きく貢献した。国土交通省では令和5年度までに小規模を除く全ての公共工事において、BIM/CIM原則適用の方針が示されているところであり、令和3年度から、4つの直轄河川でEvaTRiP Proを用いた「3次元の多自然川づくり」の試行が進められることとなった。今後も本ツールの機能を拡充するとともに、講習会や解説動画を充実させることで幅広く普及させていきたいと考えている。

## 7. まとめ

本研究では、「3次元の多自然川づくり支援ツール」の開発を行った。本ツールの構成としては、河道地形の編集を行えるツール、河川環境を評価できるツールが主なものである。本ツールの使用が広く実現することにより、デジタルデータ使用の推進を進める河川CIMの普及と相まって、我が国の河川管理に格段の進歩をもたらすものと考えている。

北海道開発局 建設部 河川計画課 課長補佐 殿  
河川工事課 河川技術対策官 殿  
東北・関東・中部・近畿・中国・九州地方整備局  
河川部 河川環境課長 殿  
北陸・四国地方整備局 河川部 河川計画課長 殿  
各地方整備局 河川部 河川工事課長 殿

国土交通省 水管理・国土保全局

河川環境課 課長補佐  
治水課 課長補佐

多自然川づくりの高度化を目指した河道の三次元設計の実施について（試行）

国土交通省では令和5年度までに小規模を除く全ての公共工事において、BIM/CIM原則適用の方針が示され、建設現場の生産性向上や働き方改革を促進するとともに、CIMを活用した多自然川づくりの高度化が求められています。

また、昨年、国立開発研究法人大木研究所においては、DXに資する三次元河川環境評価を可能とするツール「EvaTRiP Pro」が開発され、治水評価（平面二次元河床変動解析など）と組み合わせることで、3次元データを活用した治水と環境の評価を同時に行うことも可能となっています。

そこで、業務効率化・高度化を図るため「多自然川づくりの高度化を目指した河道の三次元設計（以下「河道の三次元設計」）」を別紙のとおり試行的に実施するので、ご対応をお願いします。

図-11 多自然川づくりの高度化を目指した  
河道の三次元設計の実施  
について（試行）の事務連絡

## 参考文献

- 1) 中村圭吾、林田寿文、大槻順朗、小林一郎：河川CIM（3次元川づくり）の考え方と標準化に向けた取り組み・課題、河川、76巻、第3号、No.884、2020。
- 2) iRIC ホームページ：http://i-ric.org/ja/
- 3) 大石哲也、原田守啓、高岡広樹、萱場祐一：中小河川における河川環境に配慮した河道設計支援ツールの開発、河川技術論文集、第21巻、2015。
- 4) 大槻順朗、林田寿文、中村圭吾、萱場祐一：中小河川研究と多自然川づくりの深化、土木技術資料、第60巻、第11号、pp.8～13、2018。
- 5) 河川CIM標準化検討小委員会：河川CIM標準化検討小委員会成果報告書、2021.3
- 6) 自然共生研究センターホームページ：https://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/index.htm。



## 11.3 治水と環境の両立を図る河道掘削技術・維持管理技術の開発

### 11.3.1 陸域における河道掘削を念頭においた河道内植生の管理技術に関する研究

担当チーム：流域水環境研究グループ（流域生態）

研究担当者：中村圭吾、傳田正利、溝口裕太

#### 【要旨】

令和2年度までに、河川中流域（扇状地河川、セグメント1）の砂礫河原を対象に、洪水営力の活用による砂礫地から草地等への植生遷移の緩和が期待できる河道掘削法を検討し、また、河川中下流域（セグメント2）については、掘削方法ごとの土砂堆積と植物繁茂の特徴を施工事例等から明確化するとともに、掘削断面の持続性が期待できる河道掘削の実現に向けた断面設計フローを整理した。さらには、治水機能を低下させる主因である河道内樹木に焦点をあて、治水・環境面での機能を満足しつつ、樹木の伐採・運搬コストの縮減への貢献を目指し、河道内植生の維持管理の進め方を検討した。令和3年度は、植生管理の効率化を目指し、河川の水位や流下能力を左右する一因であり、水理解析に用いるパラメータの一つである粗度係数を、航空レーザ測量成果と本プロジェクトで開発した河川景観判読AIを活用して出力するプログラムを開発した。現地河川への適用性の検討は必要であるが、長大な河川を対象とした水理解析において、多大な労力をかけて設定する粗度係数を機械的に求めることができ、作業性の向上に貢献することが期待される。

キーワード：河道掘削、土砂堆積、植物遷移、河川中下流域、植生管理フロー、航空レーザ測量

#### 1. はじめに

近年、河川では草本や樹木群といった「安定植生域」が増加してきている。安定植生域の増加は、外来種の侵入・拡大、生物多様性の劣化、流下能力の低下、維持管理費の増大等、様々な問題を招いている。土木研究所の既往研究において、安定植生域増加の要因となる樹種の行き過ぎた生育を抑制する工法を開発したが、樹林化後の対応法を提案した側面が強い。戦略的な河道管理を行うためには、安定植生域が生じない河道管理が必要となる。

河道管理の研究・実務において、「河道掘削」は、洪水攪乱を促し、氾濫原的環境の創出を通し環境復元すること、安定植生域への遷移<sup>2)3)</sup>を遅らせることが報告されている。今後は、これらの知見を活用し、「河道掘削」が持つ環境復元、安定植生域抑制の機能に着目し、治水・環境の二つの目的を適切なコストで両立させる河川管理技術が求められる。上記の目的達成には、河川の物理環境と植生遷移の因果関係の解明、これらの因果関係に基づく植生動態の将来予測を行う技術が必要となる。

平成28年度は、研究全体の流れを俯瞰する目的で、実際の河道掘削の事業計画・評価に参加し、平成29年度は、国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所

（以下、「千曲川河川事務所」と記述する。）と共に検討した信濃川水系千曲川冠着地区における旧流路部を活用した水路掘削と平面掘削の併用による砂礫河原再生事業による砂礫河原再生効果の検証と効果発生機構の報告、土木研究所と民間4社（国際航業（株）、（株）建設技術研究所、パシフィックコンサルタンツ（株）、（株）国土開発センター）との共同研究において実施した植生動態の監視技術として、近年、技術革新と普及が著しい無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle；以下、「UAV」と記述する。）、人工知能（Artificial Intelligence；以下、「AI」と記述する。）を植生の初期侵入に大きな影響を与える表層土壌材料把握等に適用した事例を報告した。

平成28年度から取り組んだ水路掘削と平面掘削の併用による砂礫河原再生事業（河道掘削手法）では、出水という自然攪乱を活用し、砂礫地から草地・1年生草本等に遷移した河道掘削区域を砂礫河原に戻す作用が確認され、河川中流域（扇状地河川、セグメント1）における治水と環境の両立を目指す河道掘削手法として提案することができることを確認し、河道掘削手法については一定の成果を得たと判断した。このような状況から、千曲川河川事務所と維持管理に関する研究の方向性も合わせて議論し、植物群落遷移をひと

つのネットワーク問題として捉え、群落遷移が不可逆的な樹林化に入る前に、植物群落遷移を予測し、河道の再掘削等の維持管理行為を行う必要があると考えた。上記の考えが実現可能かを検討するフィージビリティスタディを、国土交通省北陸地方整備局と共同で行った。フィージビリティスタディは、まず、植物群落遷移をネットワークとして扱うことが可能か、また、ネットワークの中心的な役割を果たす植物群落の抽出が可能か等を検討した（図-1）（①）。

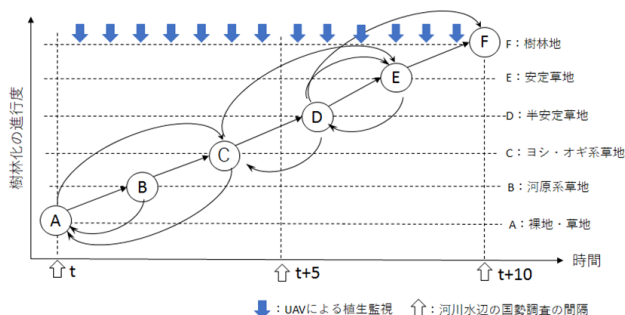


図-1 植物群落遷移をネットワークとして考えた場合の管理手法の基礎概念

次に、植物群落を予測する際の基礎的な考え方の整理を行った（②）。①については、約25年間、蓄積された河川水辺の国勢調査（以下、「水国」と記述する。）データをネットワーク分析し、植物群落遷移の中心となる植物群落・河川景観の抽出を行う試行的な研究を、北陸地方に位置する梯川において実施した（3章）。②については、気象分野で行われる集団予測（アンサンブル予測）の方法を河道内植生動態予測に適用する場合の技術的な流れを、試行的解析を通して整理した（4章）。

このように、河川中流域（扇状地河川、セグメント1）の砂礫河原において、洪水営力を活用することで砂礫地から草地等への植生遷移の緩和が期待できる河道掘削法を提案した。これに加えて、河川中下流域（自然堤防帯河川、セグメント2）の高水敷における樹林化についても同様に、治水、環境上の大きな課題であり、植生遷移の緩和に資する河道掘削法が求められている。令和2年度は、河川中下流域（セグメント2）を対象に、先行研究と施工事例に基づき、掘削方法ごとの土砂堆積と植物繁茂の特徴を明確化するとともに、掘削断面の持続性が期待できる河道掘削の実現に向けた断面設計フローを整理した（5章）。

これらの検討に基づき、治水と環境の両立を図る河

道掘削技術・維持管理技術の一般化に取り組んだ。ここでは、河道内樹木の伐採に焦点をあて、それを合理的に計画するための治水、環境に関する指標の設定を行った。さらに、治水・環境面での機能を満足しつつ、樹木の伐採・運搬コストの削減を目的とした樹林帯を抽出するための検討方法を提案した。その上で、令和3年度は、植生管理の効率化を目指し、河川の水位や流下能力を左右する一因であり、水理解析に用いるパラメータの一つである粗度係数を、航空レーザ測量成果と本プロジェクトで開発した河川景観判読AIを活用して出力するプログラムを開発した（6章）。

この他、CIM技術の有効性を検証するため、千曲川河川改修百周年記念事業におけるVR技術を用いた一般市民へのアウトリーチ活動等を報告した（7章）。

## 2. 梯川の概要

梯川は、その源を石川県小松市の鈴ヶ岳（標高1,175m）に発し、山間部を北流して手取川と梯川とによって形成された扇状地を西に蛇行し、小松市街地を貫流し、前川を合流した後、日本海へ注ぐ、幹川流路延長42km、流域面積271km<sup>2</sup>の一級河川である（図-2）。

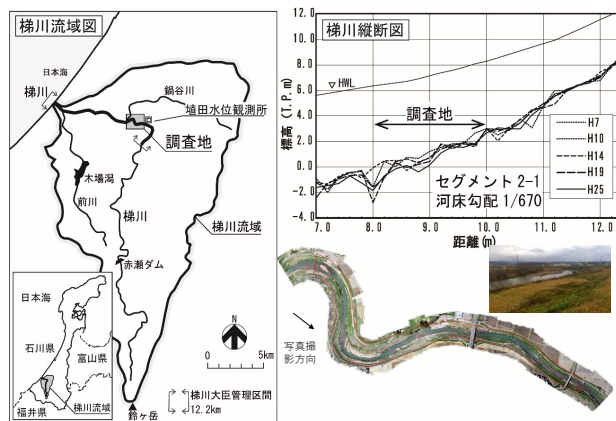


図-2 梯川の概要

梯川は、明治期までは小松市や能美市付近を蛇行して流れ水害が頻発していたため、明治期以降、捷水路の開削などの事業が行われ、現在では、引き堤による流下能力の改善が行われている。引き堤事業後には、堤外地に現在の高水敷よりも広い高水敷の形成が予測される。流量特性は、秋期に台風起因する出水があり、既往最大流量が約667m<sup>3</sup>/sである。

しかし、平水流量は約15m<sup>3</sup>/sであるため、広がる

高水敷上には定期的な攪乱が期待できず、樹林化の進展が懸念される河川である。引き堤という全国でも珍しい事業により流下能力を改善し、植生管理にも取り組む点で、PCC 動態モデル、UAV 画像・AI を用いた植生図の作成等の新たな試みを行うのに適していると考え、2019 年（H31 年）に研究を実施した。

本研究では、梯川の中流部、佐々木・荒木田地区（以下、「調査地」と記述する。）を対象とした。調査地は、梯川中流部（直轄区間 8.1 km～10.5km）の縦断勾配変化地点に位置する蛇行区間である。捷水路の開削等による単調な河道が続く下流区間と比較して、低水路の水域には明瞭な瀬・淵が、低水路の河岸域には砂礫帯が形成される。河岸域は主にツルヨシ群集が生育する。高水敷には、広大なススキ群落形成される等、生物生息空間が良好な区間である。近年、ススキ群落内に樹林の侵入・形成が進み、河川管理上の問題となっている。梯川流域で進む引き堤事業後は、現在よりも広い高水敷が形成され、ススキ群落の定着が期待される反面、樹林化の進展が懸念されている区間である。調査地を含む梯川においては、1993 年（H5 年）、1998 年（H10）、2002 年（H14）、2008 年（H20）、2013 年（H25）（以下、前述の期間を、「水国作成期間」と記述する。）に植生調査が行われ、景観・植物群落遷移の時系列的な把握が可能な区間となっている。

### 3. ネットワーク中心性分析を用いた景観・植物群落の遷移とその遷移に関する研究

#### 3.1 はじめに

本課題を通して指摘しているが、全国の河道管理においては、河道が樹林化した後に、河道掘削や伐採等の樹林化対策をする場合が多い。効果的かつ効率的な樹林化対策を行うには、不可逆的な樹林化に向かう前の河川景観を特定し、その景観の変化の監視を行い、樹林化が著しく進行する前に、掘削・伐採などを始める必要がある。

この有効な手法としては、水国の活用が挙げられる。水国は、景観・植物群落の遷移を 5 年ごと、合計 25 年間記録している貴重なデータである。本章は、梯川における水国を対象にネットワーク解析を行い、樹林化前景観の抽出とその有効性を検証した。

#### 3.2 研究の方法

##### 3.2.1 対象データと方法

水国作成期間の景観・植物群落変化、河川の物理環境特性（河道特性、流況及び河床変動傾向）を分析す

るため、iRIC 3.0、Nays2DH を用いて、河床変動計算を行った。初期河床は、1993 年（H5）の横断測量結果を与えた。植物群落に影響を与える粒径は植物により異なるため、55 mm、110 mm、220 mm、440 mm、880 mm の 5 ケースを行った。上流端流量条件は、水国作成期間前の 1989 年（H1）から 2017 年（H29）までの年最大時間流量を与え、計算を行った。河床変動計算の精度検証は、横断測量結果との比較により行った。本報告書では、河床変動計算の結果が植生動態に与える影響には触れないが、興味のある方は引用文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

水国作成期間の景観・植物群落の遷移データを格納するため、iRIC の計算格子（横断方向：約 2m、縦断方向：約 5m、格子数：20451、以下、「計算格子」と記述する。）を出力した。GIS（ESRI 社：ArcGIS pro Ver2.4）を用いて、計算格子をインポートし、計算格子の格子点内に、水国作成期間の景観・植物群落の遷移データを格納した。その後、各格子点に格納される景観・植物群落の時系列変化をエクスポートした。

##### 3.2.2 ネットワーク図の作成と景観・植物群落遷移経路の概観

景観・植物群落ネットワーク分析には、R（ver3.4.4、統計パッケージ i-graph）を用いた。ネットワーク分析においては、ネットワークのリンク構造を点（Node：ノード）と線（Edge：エッジ）によって抽象化されるグラフ（graph）として捉える。エッジは、接続の有無に留まらず、方向、重みを付けて表現される。エッジに方向性がない場合を「無向グラフ」、エッジに方向性がある場合を「有向グラフ」とし、景観・植物群落ネットワークは、時間軸方向の有向グラフとみることができる。これにより、ネットワーク分析を行うことで経験的に知られている景観・植物群落のネットワーク遷移を定量化できる。前項においてエクスポートした景観・植物群落遷移経路のデータを整理し、i-graph の機能で水国の調査時期の景観・植物群落遷移の有向グラフ図（以下、「ネットワーク図」と記述する。）を作成した。その後、ネットワーク図と流量時系列データを対比し、出水履歴と景観・植物群落遷移の傾向を分析した。同時に、水国の 5 時期における各景観・植物群落の面積割合の時系列変化を整理し、調査区域の景観・植物群落遷移の過程における中で各景観・植物群落の位置づけを把握した。

#### 3.3 結果と考察

図-3 に景観・植物群落遷移のネットワーク図と流量



時系列の関係を示す。600m<sup>3</sup>/s 以上の出水が生じた1993年(H5)から1998年(H10)の遷移においては、線(Edge)が交錯する複雑なネットワーク構造であるが、一定期間大きな出水が生じない2002年(H14)から2008年(H20)の遷移においては、コンクリート構造物等への植物群落の拡大、多年生草本から樹林群落への遷移を明示している。既往研究の多くは、特定区間の景観・植物面積の時系列変化から樹林化の程度を定量化しており、そこに生育する植物群落レベルでの詳細な検討が十分に行われてきたとは言い難い。本研究で適用したネットワーク分析は、流量時系列の違いに応じた景観・植物群落と樹林群落の対応関係を示している点に有効性がある。また、ネットワーク中心性分析は、樹林化前景観の抽出を可能とし、樹林化前景観は、樹林群落への指標として十分な機能を持つと考えられる。詳しくは、引用文献<sup>4)</sup>に譲るが梯川においては、樹林化前景観として、ススキ群落、開放水面、ツルヨシ群集の順に選定された。ススキ群落、ツルヨシ群集は、5 時期ともに確認されるが、調査地の景観・植物群落における面積比は著しく大きくはなく、面積が大きだけでなく景観・植物群落の遷移機構において中心となりうる特殊性を持つと考えられる。樹林化前景観は、樹林化の予兆を把握するうえで良好な指標になると考えられる。これらの結果は、ネットワーク分析は、既往研究よりも、景観・植物群落遷移から樹林化への遷移経路を定量化する、有効性があると考えられる。

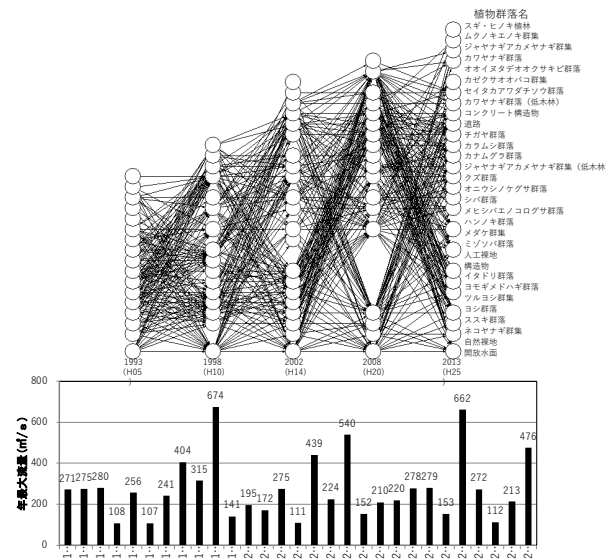


図-3 河川景観・植物群落遷移のネットワーク図と流量時系列の関係

表-1 設定した計算ケース

Case	地形 (横断)	流量
1	設計河道	H25年洪水 (662m <sup>3</sup> /s)
2		H26年洪水 (272m <sup>3</sup> /s)
3		H27年洪水 (112m <sup>3</sup> /s)
4		H28年洪水 (213m <sup>3</sup> /s)
5		H29年洪水 (476m <sup>3</sup> /s)
6		平水流量 (15m <sup>3</sup> /s)

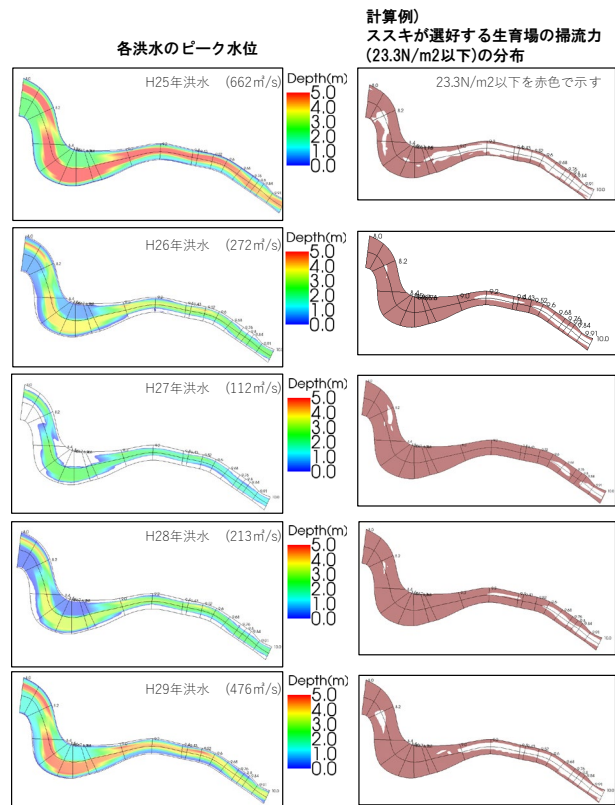


図-4 植物群落動態モデルに与える水理計算結果と植物群落予測結果 (ススキ群落の例)

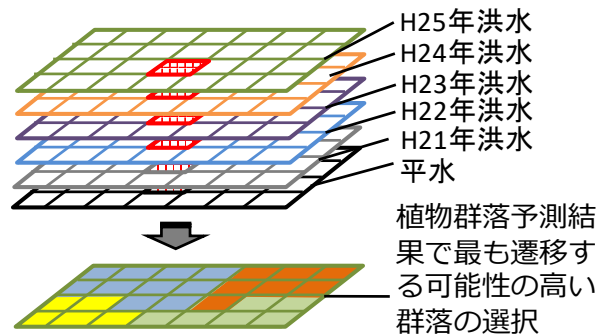


図-5 アンサンブル予測結果の空間統計例

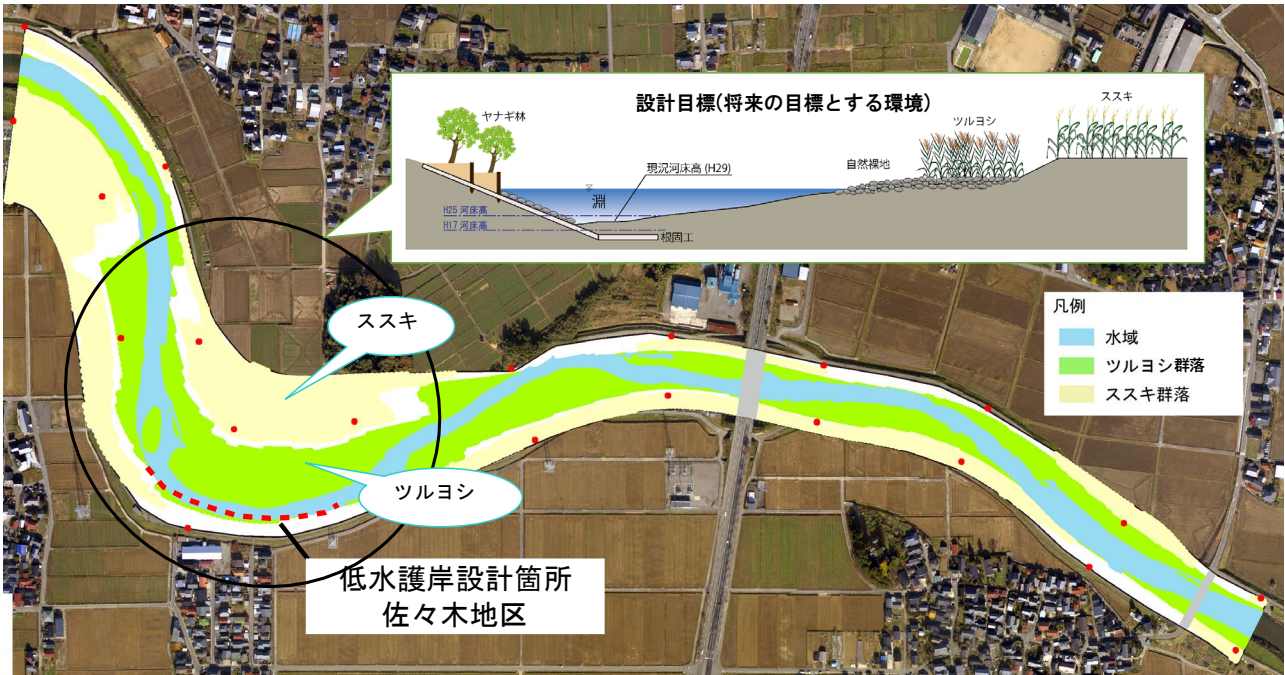


図-6 設計河道における比高、掃流力、水際からの距離から見たツルヨシ群落、ススキ群落の分布可能範囲

#### 4. 植物群落を予測する際の基礎的な考え方の整理

##### 4.1 植物群落を予測する際の基礎的な考え方の整理

河川生態系の特徴の一つに、出水による攪乱の不確実性が挙げられる。季節的な周期性はあるものの、発生が予測できない出水による攪乱は、植物群落遷移に影響を与える大きな現象であるが、予測へは技術的な検討が必要となる。

不確実性への対応として最も有効と考えられるのは、気象学、水文学等で用いられるアンサンブル予測技術（集団予測技術）である。アンサンブル予測技術とは、「わずかに異なる複数の数値予報を行ってその結果を統計的に処理することで、不確実性を考慮した確率的な予測を可能にするもの」である。天気予報に代表される数値予報は、解析初期条件をわずかに変化させた複数ケースの計算を行った後、空間統計処理を行い、雲量等を予測する。アンサンブル予測技術を植生動態モデルに適用する際に考慮しなければならないのは、まず、出水流量である。本試行においては、植生動態モデルに与える流量を平水流量と出水流量を過去5年分とした6ケースを植生動態モデルに与える計算を行った（表-1、図-4）。その後、植生動態予測結果に空間統計を適用し、最も遷移する確率の高い植物群落に遷移する形で将来の植物群落を予測した（図-6）。予測計算後、梯川の河川管理者である金沢河川国道事務所に示し、河道内植生管理に有用であるかを議論する

形で試行を進めた。

##### 4.2 植物群落予測の出力結果と河道内植生管理への展望

図-6 に植物群落予測の出力結果を示す。梯川河道改修計画に植物群落予測モデルを適用した結果、大部分は梯川において減少傾向にあるススキ群落やツルヨシ群落等の群落に遷移する結果となった。

#### 5. 河道掘削後の土砂堆積・植物繁茂に関する特性

##### 5.1 河道掘削プロセスの概略

令和元年度までに、河川中流域（扇状地河川、セグメント 1）の砂礫河原において、洪水営力を活用することで砂礫地から草地等への植生遷移の緩和が期待できる河道掘削法を提案した。これに加えて、河川中下流域（自然堤防帯河川、セグメント 2-1）の高水敷における樹林化の抑制に資する河道掘削法が求められている。ここでは、セグメント 2-1（低平な自然堤防帯区間を流れる河川であり、一般に勾配は 1/400～1/5000、河床材料の代表粒径は 3 cm～1cm）を対象に、河道掘削後の地盤高と土砂堆積や植物繁茂との関係を整理した<sup>5)</sup>。

河道掘削は、河道地形を改変し、河道内に生育・生息する動植物の一時的な消失を引き起こすため、重要な植物などは保全することが求められる。また、治水

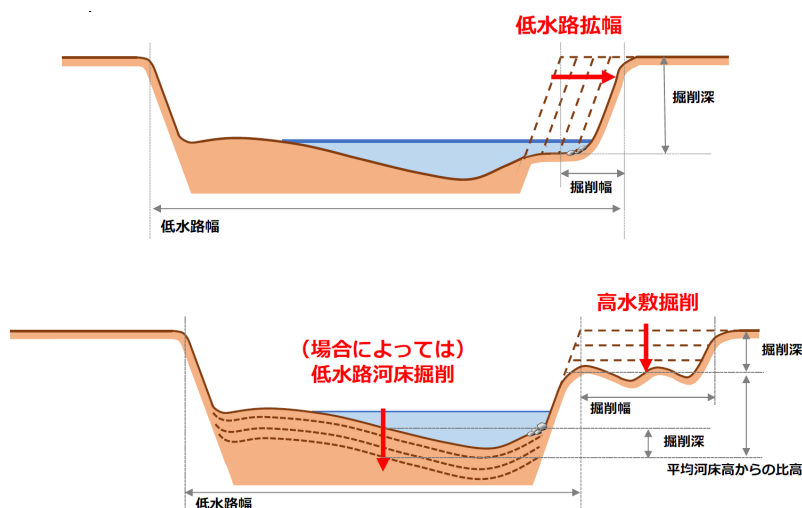


図-7 河道掘削法のうち水中掘削（低水路拡幅）と陸上（高水敷）掘削の例

上の問題となる樹木であっても、生態的な観点から存置することが好ましい場合もある。他方、河道掘削後には裸地面が整正されるが、そこにはヤナギ類や外来植物が侵入しやすく、また、生育環境の変化もともなって、掘削前とは異なる植生が形成される可能性が高いことに留意する必要がある。

## 5. 2 掘削断面と土砂堆積および植物繁茂との関係

### 5.2.1 土砂堆積と植物繁茂の特徴

現地河川には、さまざまな制約条件があるものの、掘削断面を計画、設計する上での選択肢は多い。ここでは、掘削地盤高の設定に際しての参考となるように、セグメント 2-1 での土砂堆積と植物繁茂に関する基本的な特徴をまとめ、次項以降には、それらと掘削地盤高との関係を整理する。

セグメント 2-1 は、一般的に、河道断面に占める高水敷の割合が大きく、そこでの樹林化の要因はヤナギ類、タケ・ササ類であることが多い<sup>6) 7)</sup>。これらの植物は生育範囲を急激に拡大させる特徴を持つため、河道内植生を管理する上で、特に注意を要する植物である。また、高水敷に堆積する土砂は、低水路の河床材料よりも 1 オーダー程度小さい粘土から微細砂であり、これらは洪水時にウォッシュロードもしくは、それに近い物理的な振り舞いをするため、山間地の供給源から堆積域まで一気に輸送されると考えられている<sup>8) 9)</sup>。したがって、河道掘削によって地形が改変され、土砂が堆積しやすい環境が整うと、その輸送量の多さも相まって急激な地形変化が起こり、掘削された断面が短い期間で縮小する可能性がある<sup>8)</sup>。また、粒径成分が

1 オーダー程度の差がある低水路と高水敷での土砂堆積プロセスは、わけて考えることができる。そのため、次項では、図-7 に示すように、平水位より掘削地盤高が低い場合（水中掘削）と、それよりも高い場合（陸上掘削）において説明する。この他、堆積域に供給される土砂量や、その質は、流域の地形および地質によって大きく異なる。土砂堆積に関する一般的な知見の他に、それぞれの流域の特徴を理解することが不可欠である。

### 5.2.2 掘削高さと土砂堆積との関係

水中掘削では、低水路部の掘削面が水面以下となるため、高水敷の表層にみられる粒径成分は堆積しにくい<sup>8) 9)</sup>。一方、それよりも 1 オーダー程度大きい、主に低水路の河床を構成する粒径成分が洪水時に掃流状態で移動し、地形変化が起こる<sup>8)</sup>。掘削面が深い（標高が低い）ほど堆積速度が小さい傾向<sup>9)</sup>がみられ、濁水位相当に切り下げることの有用性が示唆されている。ただし、低水路幅を広げすぎると、急激な低水路断面の縮小が起きる可能性があるため留意が必要である<sup>8)</sup>。

陸上掘削後の堆積速度については、比高が 1~6m の範囲では、それが大きいほど堆積速度は小さくなる傾向<sup>10)</sup>を示した。また、高水敷の冠水深が大きいほど土砂が厚く堆積する傾向が報告<sup>11)</sup>されており、陸上掘削後の土砂堆積速度は、洪水にともなう冠水頻度が高く、冠水深が大きいと想定される掘削高さが低い場合に、高まると考えられる。

### 5.2.3 掘削高さと植物繁茂との関係

水中掘削により掘削面を濁水位程度に設定すると掘



削面が年間を通じて水没するため植物は繁茂しにくい。一方、陸上掘削の場合は、掘削高さを低くすると平水位（掘削域での地下水位に相当する）との比高が小さくなり、掘削地盤面での湿潤状態は高まることから、これを好む植物が繁茂しやすくなる<sup>12)</sup>。

河川管理の対象となりやすいヤナギ類やタケ・ササ類に注目すると、セグメント 2-1 では、比高（平水位と高水敷の差）が 4m 以下でヤナギ林（ヤナギ類が主体の樹林）の出現率が高く、比高が 6m 以上では竹林の出現率が高いことが示されている<sup>13)</sup>。そのため、陸上掘削により比高が低下することを考えると、掘削後により注意すべきはヤナギ類ということになる。揖斐川を対象に掘削高さの異なる裸地面での植生動態のモニタリング<sup>14)</sup>では、掘削高さが濁水位相当であれば、5 年程度が経過しても大部分が開放水面として維持されるが、より標高の高い掘削面ではヤナギ類の繁茂が確認されている。とりわけ、平水位相当の掘削高さにおいて、ヤナギ類の繁茂が顕著であることが示された。なお、5.1 節、5.2 節の詳細は、引用文献<sup>5)</sup>を参照されたい。

### 5. 3 掘削後の持続性が期待できる掘削断面

前節では、典型的な掘削断面である水中掘削と陸上掘削にわけ、それぞれの土砂堆積、植物繁茂の特徴をまとめた。本節では、それらを踏まえた上で、どのような掘削断面を設計することが、とりわけ、土砂堆積の側面から掘削断面の経年変化が少なく、その持続性を高めることができるのかを考察する。セグメント 2-1 では、洪水により高水敷（陸域）が冠水するたびに、その大小に差はあるが確実に土砂は堆積することにな

る。また、冠水頻度が高く、冠水深が大きいほど、掘削地盤面の土砂堆積速度は大きくなると考えられ、陸上掘削による掘削深が大きいほど、土砂の堆積ポテンシャルは高まると想定できる。その一方で、拡幅する量には細心の注意は必要だが、その量を間違えなければ、水中掘削を実施した地盤面には、河道断面を大きく変化させる粘土から微細砂は堆積しにくいいため、陸域掘削に比べると掘削断面の経年変化は少なくなる可能性が高い。したがって、この両者を比較すると、水中掘削を設計の基本とした方が、掘削断面の持続性を確保できる河川が多いものと期待できる。しかし、先に述べたように、拡幅する量には注意が必要であること、また、平水時の水面幅が広がることから魚類に代表される河川の生き物に影響が及ぶことが懸念される。他方、水中掘削を断面設計の基本とした場合には、著しい土砂堆積が生じない低水路幅が、最大の拡幅量であるため、それだけでは治水上、求められる河積（流下能力）を確保できないケースが考えられる。したがって、必要な河積を満足するように、水中掘削に加えて、陸上掘削を適切に組み合わせることで、河積を確保することが賢明である。そうすることで、陸上掘削における掘削地盤面の比高を、陸上掘削だけの断面設計と比べて高く設定でき、高水敷における土砂堆積速度の抑制に貢献するものと考えられる。

## 6. 河道内植生の維持管理

### 6. 1 治水・環境の両立を実現するための河道内植生の維持管理法の検討

個別の事例を積み上げることで検討してきた治水と

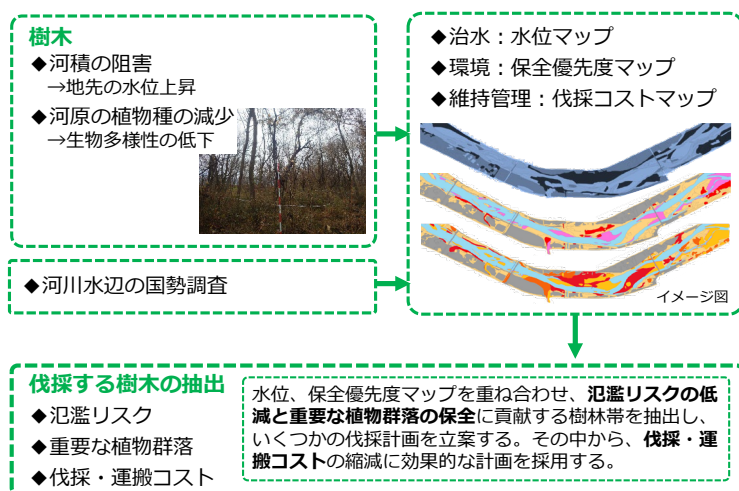


図-8 治水・環境の両立を実現するための河道内植生の維持管理の例

環境の両立を図る河道掘削技術・維持管理技術の一般化に取り組んだ。ここでは、河道内の樹木伐採を対象とした、維持管理手法に関する検討内容をまとめる。そもそも、河道内樹木は、治水面においては河積阻害による地先の水位上昇、また、環境面においては、砂礫河原に生息する河川特有の植物の生息適地を減少させる一因である。そこで、治水と環境の両立には、それらを管理するための具体的な指標を設定することが必要である。本研究での検討の結果、治水は水位マップ、環境は保全優先度マップを、それぞれを把握するための指標とし、それらのマップを重ね合わせることで、氾濫リスクの低減と、重要な植物群落の保全に貢献する樹林帯を抽出することとした(図-8)。また、重要な植物群落を抽出し、その優先度を判断するための保全優先度マップは、保全優先度の最も高い群落(保全優先度 A)、保全優先度の高い群落(保全優先度 B)および、保全対象外の3つに類型化するものである。これは、水国データを基に植物群落の経年変化を明らかにした上で、その希少性、典型性、特殊性、外来性の4つの視点から保全上の価値付けをする手法である。詳しくは、引用文献<sup>10)</sup>を参照されたい。

治水および環境上の要件を満足することは必須だが、樹木伐採とその運搬コストの縮減を図ることが維持管理上の重要なポイントである。そのために、治水・環境面での機能を満足するいくつかの樹林帯の伐採計画を立案し、それぞれの計画案の伐採・運搬コストを推定することで、維持管理コストの縮減に効果的な樹林帯の伐採を採用することになる。

## 6.2 航空レーザ測量成果を活用した効率的な植生管理の検討

令和元年度には、原則として点群測量により河川定期縦横断測量を実施することが、事務連絡(国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室)として通達された。したがって、今後一層、航空レーザ測量等によって取得される3次元点群データなどが、全国各地の河川において蓄積されるものと期待される。航空レーザ測量は、計測される陸域-水域を含む地面の標高(DEM: Digital Elevation Model)、すなわち、地形の把握が本質的な目的とされる。これは洪水時の河川の水位や、流下能力を求めるための水理解析の入力データの一つである。また、河川の水位の上昇を引き起こす一因である植生の繁茂状況は、水理解析にとって重要なパラメータである粗度係数として扱うことができる。

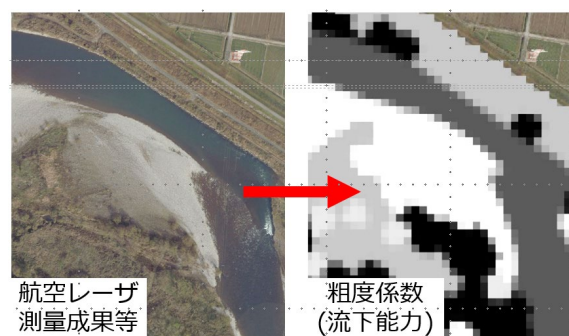


図-9 粗度係数出力プログラムによる試行結果

そこで、令和3年度には、本プログラムで開発した河川景観判読AIに、航空レーザ測量成果を入力することで得られる自然裸地、草地などの景観要素と、水理解析のパラメータである粗度係数を関係づける粗度係数出力プログラムを構築した。粗度係数出力プログラムによる試行結果を図-9に示す。このように、水理解析の入力データである河川地形と粗度係数は、長大な河川を対象とした場合、それら入力データの設定に多大な労力を要する。したがって、航空レーザ測量の成果である河川地形と、それをを用いて求まる粗度係数を水理解析の入力データとして活用することは、治水機能の評価において作業性の向上に貢献すると期待できる。しかしながら、本研究で採用した粗度係数の換算は、河川の景観要素との一般的な対応関係に基づくため、それが水理解析の出力結果である水位や、流下能力の予測精度に及ぼす影響について検証を行い、現地河川における実装性を高める必要がある。

## 7. 千曲川河川改修百周年記念事業におけるVR技術を用いた一般市民へのアウトリーチ活動の試み

### 7.1 VR技術を用いた一般市民へのアウトリーチ活動の必要性和試行の概要

平成29年度においては、CIM技術の可能性に言及した。CIM技術の適用範囲としては、インフラマネジメント、一般市民へのアウトリーチ活動の分野が考えられる。平成29年度は、一般市民へのアウトリーチ活動の試行として、「千曲川・犀川直轄改修事業100周年記念シンポジウム」において、VR(Virtual Reality:仮想現実)を用いた樹林化した河川高水敷の疑似体験、明治期から現在までの河川の出水状況の疑似体験を試行した。なお、シンポジウム会場という人の入出が頻繁な会場であったため、アンケート調査等の調査は行わなかった。

## 7. 2 VR 技術を用いた一般市民へのアウトリーチ活動の結果

VR を用いた樹林化した河川高水敷の疑似体験、明治期から現在までの河川の出水状況の疑似体験への反応は、概ね良好であった。特に、若年層（主に、小学生）は、出水時の河川面上のフライスルーや水中への視点の移動（出水の水中体験）は、好意的に受け止められた。一方、高齢者は、VR 機器への対応（立体表示の体験等）が難しい面もあった。アウトリーチ活動を行う場合、若年層～中年層には VR 機器、高齢者層には模型等の従来方法が適切であるという仮説が得られた。

## 8. おわりに

本研究では、河川中流域（扇状地河川、セグメント 1）の砂礫河原を対象に、洪水営力の活用による砂礫地から草地等への植生遷移の緩和が期待できる河道掘削法を検討した。ビックデータを用いたネットワーク分析から、樹林化に至る河川景観の特徴を抽出する技術を構築した。また、アンサンブル予測技術を植生動態モデルに適用することで、洪水による植生遷移の不確実性について多面的に検討し、その成果は、梯川における河川整備の参考として活用された。

また、河川中下流域（セグメント 2）については、掘削方法ごとの土砂堆積と植物繁茂の特徴を施工事例等から明確化するとともに、掘削断面の持続性が期待できる河道掘削の実現に向けた断面設計フローを整理した。高水敷の掘削面に堆積する土砂の堆積速度を抑制するために、陸上掘削だけでなく、水中掘削を組み合わせた河道掘削を検討することの重要性を示した。

さらには、治水機能を低下させる主因である河道内樹木に焦点をあて、治水・環境面での機能を満足しつつ、樹木の伐採・運搬コストの縮減への貢献を目指し、河道内植生の維持管理の進め方を検討した。その中で、植生管理の効率化を目指し、河川の水位や流下能力を左右する一因であり、水理解析に用いるパラメータの一つである粗度係数を、航空レーザ測量成果と本プロジェクトで開発した河川景観判読 AI を活用して出力するプログラムを開発した。

最後に、一般市民向けのアウトリーチ活動への CIM 技術の活用を検討した。合意形成において一般的に用いられる模型等の従前の方法だけでなく、CIM や VR 技術の有用性を明らかにすることができた。

## 参考文献

- 1) 田屋祐樹・榎島みどり・赤松史一・中西哲・三輪準二・萱場祐一：河道内樹林の効率的な管理に向けた伐採後の萌芽再生抑制方法の検証、河川技術論文集、第19巻、pp. 459-464、2013.
- 2) 松田浩一・内堀寿美男・清水義彦・石原正義・藤堂正樹：固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究、河川技術論文集、第16巻、pp.235-240、2010.
- 3) 山口里実・渡邊康玄・武田淳史・住友慶三：流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討、河川技術論文集、第21巻、pp.217-222、2015.
- 4) 傳田正利・田屋祐樹・田頭直樹・中村圭吾：梯川におけるネットワーク中心性分析を用いた景観・植物群落の遷移とその遷移に影響を与える物理環境特性に関する研究、河川技術論文集、第21巻、pp.217-222、2019.
- 5) 溝口裕太・森 照貴・中村圭吾・萱場祐一：河道掘削後の土砂堆積・植物繁茂に関する特性と樹林化抑制に資する草地化工法の提案、土木技術資料、62、8、pp.24-29、2020.
- 6) 内藤太輔・金縄健一・福永和久・今村史子・萱場祐一：全国の河川を対象とした河道内植生の分布特性と成立要因および河道掘削後の変化、河川技術論文集、22、pp.469-474、2016.
- 7) 佐貫方城・大石哲也・三輪準二：全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察、河川技術論文集、16、pp.241-246、2010.
- 8) 藤田光一・MOODY, J. A.・宇多高明・藤井政人：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集、551、pp.47-62、1996.
- 9) 原田守啓・永山滋也・大石哲也・萱場祐一：揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程、土木学会論文集B1(水工学)、71、pp.I\_1171-I\_1176、2015.
- 10) 武内慶了・服部敦・藤田光一・佐藤慶太：細粒土砂堆積による高水敷形成現象を1次元河床変動計算に組み込んだ河積変化予測手法、河川技術論文集、17、pp.161-166、2011.
- 11) 末次忠司・服部敦・瀬崎智之：洪水攪乱に伴う植生の変化、水利科学、pp.33-47、2001.
- 12) 応用生態工学会：河道内氾濫原の保全と再生、技報堂出版、198p、2019.
- 13) 内藤太輔・金縄健一・福永和久・今村史子・萱場祐一：全国の河川を対象とした河道内植生の分布特性と成立要因および河道掘削後の変化、河川技術論文集、22、pp.469-474、2016.
- 14) 大石哲也・萱場祐一：河川敷切り下げに伴う初期条件の



## 11 治水と環境が両立した持続可能な河道管理技術の開発

違いが植生変化に及ぼす影響に関する一考察、環境システム研究論文発表会講演集、41、pp.351-356、2013.

15) 萱場祐一・片桐浩司・傳田正利・田頭直樹・中西哲：河

道掘削における環境配慮プロセスの提案、河川技術論文集、第20巻、pp.157-162、2014.

### 11.3.2 魚類生息・産卵環境及び河道維持管理を考慮した低水路の河道掘削技術に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

研究担当者：巖倉啓子、村山雅昭、新目竜一、野上毅、谷瀬敦、  
布川雅典、鈴木朋子、川村里実

#### 【要旨】

本研究は、治水と環境の両立を図る低水路河道掘削、維持管理技術の開発を目的に実施している。2017年に河道部分拡幅による砂州形状変化についての移動床実験を行い、拡幅延長によって、拡幅部に形成される河床地形の違いや alcove 形状の形成について確認した。2019年から、豊平川において、河畔林の樹林化抑制とサケ産卵域保全を図ることのできる掘削断面の設定について研究を行った。まず、掘削後の川幅が長期的に維持できるように掘削幅を設定した上で、河畔林の樹林化抑制やサケの産卵環境の維持改善を図れるように掘削敷高を設定した。次に、設定した断面で掘削した場合の河道変化、流況変化およびサケの産卵環境の変化について予測計算を実施したところ、掘削なしの場合と比較して、掘削した場合は水域が拡大し産卵可能面積の改善につながることを確認した。その結果を踏まえて、掘削断面が設定され、掘削工事が実施された。また掘削後のモニタリング調査により、掘削面における産卵床の確認、および予測計算により、掘削による陸域と水域の高低差の拡大抑制などの効果について確認し、維持管理、ライフサイクルの課題を検討した。

キーワード：交互砂州、alcove、河道掘削、サケ産卵床、河床変動計算、物理生息場モデル、河道維持管理

#### 1. はじめに

近年、河道内の樹林化などに伴い、流下能力の維持・向上のための対策が待ったなしの課題となっている<sup>1)</sup>。また、砂州上の樹林化の進行や砂州の固定化などから、陸域と水域の高低差が拡大するといった現象（2極化）が顕著になると、浅瀬の消失により、例えばサケの産卵環境の悪化など、魚類生息環境への影響も懸念される<sup>2),3)</sup>。

流下能力向上のための対策として、樹木伐採や河道掘削の実施が挙げられる。しかしながら、掘削により河道を拡幅する場合は、その後の出水による河道変化において川幅が維持できなければ、長期的な対策の効果は期待できない。礫床河川における安定な断面形状は、流量、河床勾配や河床材料などによって規定されることが知られており<sup>4)</sup>、効率的な維持管理の観点からも、長期的に維持可能で適切な掘削断面の設定が求められる。また、同時に再樹林化の抑制も維持管理上の重要な観点となる。

この様な背景から本研究では、達成目標③「治水と環境の両立を図る河道掘削・維持管理技術の開発」について検討し、魚類の生息産卵環境に配慮し、河道維持管理に有利となる河道掘削手法の提案を最終目的としている。

本研究では、水生生物の生息場や産卵場として重要な機能を有している alcove 地形に着目した上で、河

道の部分拡幅による河床変動の応答について確認を行った。次に北海道札幌市を流れる豊平川において、サケ産卵環境に配慮した河道掘削（砂州切り下げ）の検討と、物理生息場モデル（PHABSIM）による環境評価について示した。さらに、河道掘削後、約1年間のモニタリング調査結果と掘削の有無による河床変動予測の比較などから、砂州の固定化、2極化および河床微地形の特徴などを明らかにして、河道維持管理について考察を行った。

#### 2. 部分拡幅による河道の応答

##### 2.1 砂州地形とたまり、alcove

河川の氾濫原には Off-channel habitat<sup>5)</sup>といわれる主流路以外の河床地形が多く存在していて、それらは河川生態系保全の観点で重要である。しかし、貯水池をとともなうダム建設<sup>6)</sup>や河川整備とともにこれらの河床地形を含む氾濫原は減少してきた<sup>7)</sup>。アメリカコロラド州を流れるコロラド川では、河道内の主流路以外の水表面積がダム建設前に比べて25-30%も減少した<sup>6)</sup>。

Off-channel habitat には side channel の他に backwater や alcove<sup>5),8)</sup>（写真-1）、我が国ではたまりやワンド<sup>11)</sup>と呼ばれる河床地形が含まれる。これらの河床地形は、砂州や河川の構造物等により隔てられ、一般に流速がないか、わずかに間隙水により涵養され

た流水が認められるような場所<sup>5)</sup>であり、水生生物の生息場あるいは産卵場として重要な場所である。Off-channel habitat の中でも alcove と呼ばれる主流路と砂州により隔てられているたまり状の地形<sup>5,8)</sup>は、魚類の生息場や産卵場として重要な機能を有していることが知られており、例えば、アメリカオレゴン州では、冬季の潜在的なギンザケ稚魚(*Oncorhynchus kisutch*)の生息場となっていること<sup>8)</sup>や札幌市豊平川ではサケ(*Oncorhynchus keta*)後期個体群の産卵場となっていること<sup>12)</sup>が報告されている。このようなことから、氾濫原が貧弱となった河川において健全な河川生態系の保全を考える上では、このような河床地形を創出することが重要である。

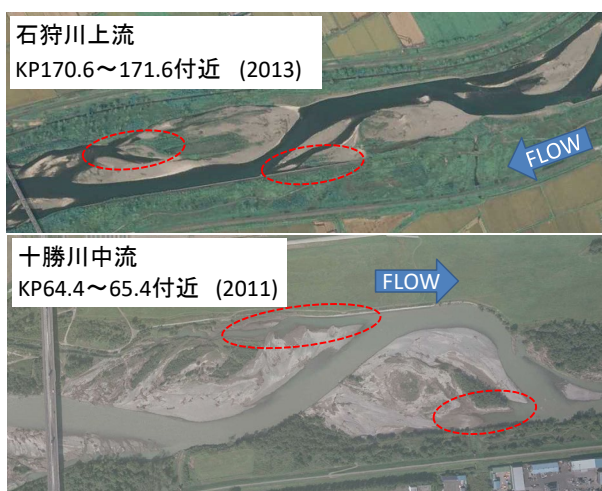


写真-1 alcove 地形の例 (国土地理院<sup>9) 10)</sup>)

このような河床地形は河道内に成立した砂州と河岸との間に形成されることから、中規模河床形態<sup>13)</sup>の領域区分で複列砂州領域に該当する河道に多く存在することが知られている<sup>11)</sup>。この河床地形を創出させるためには河道内に砂州を発生させることが必要であると考えられる。中規模河床形態の発生メカニズム<sup>11)</sup>から考えると、砂州の発生は川幅水深比によって決定されることから、複列砂州領域ではない河道でこのような河床地形を創出するには、河道を部分的に拡幅する方法が簡便だと考えられる。原田ら<sup>14)</sup>は扇状地の中小河川において、砂州非発生領域にあたる河道での部分拡幅が、固定砂州を形成させる手段として有効であることを数値実験によって示している。

河道の部分拡幅は、河川の流下能力向上目的や、洗掘により河床低下した河川の対策として実施されているが、河道掘削により多様な河床地形を創出でき、治水を主軸としつつ生態系に配慮した河川管理の潜在的展開の可能性を有している。しかし、部分拡幅でもた

らされる河道内の砂州の変化について詳しく取り上げた知見は少ない。

## 2.2 実験方法

単列砂州発生領域における河道を部分拡幅した際に生じる砂州形状の変動状況を調べるため、移動床実験を平成 29 (2017) 年度に実施し、拡幅が河道内の砂州形状に与える影響について検討を行った。

具体的には、拡幅延長の違いによって形成される河床形状を把握するために、平坦床を初期河床とした移動床実験を実施した。実験の流量は出水時を想定しており、砂礫の洗掘および堆積によって創出される河床地形を把握した。次に、実験によって形成された河床地形に低流量を与えた際に alcove 形状が形成されているか確認するため、低流量時の水深および流速の空間的分布の把握を試みた。ただし、水深と流速を水路実験により面的に計測することは困難であるため、水路実験によって形成された河床を固定床とし、平面二次元流況計算により低流量時の水深と流速を把握することとした。

### 2.2.1 実験水路

模型実験は、寒地土木研究所が所有する全長 50 m、流路幅 0.9 m、水面勾配 1/150 の直線水路を用いた。水路内の右岸側に流路幅 0.5 m となるように側壁を設置した。この側壁の一部を取り外すことで拡幅部とした。拡幅部は、下流端から 15 m を拡幅中心点とし、拡幅延長をそれぞれ拡幅無し (Case1)、河道幅の 5 倍の 2.5 m (Case2)、10 倍の 5.0 m (Case3)、15 倍の 7.5 m (Case4)、30 倍の 15 m (Case5) とした。実験ケースの一覧を表-1 に示す。初期河床には珪砂 4 号 (平均粒径 0.765 mm) を 0.1 m の厚さで平坦に敷き詰めた。

### 2.2.2 実験条件

実験は、すべてのケースで通水中に上流端部の河床高が変動しないように珪砂 4 号を人力により給砂した。すべてのケースで流量は 0.003 m<sup>3</sup>/s とし、通水時間は 8 時間とした。流量設定は、石狩川水系豊平川の藻岩水位流量観測所における 2015 年および 2016 年の年最大流量<sup>16)</sup>の 2 カ年平均と同規模とした。黒木・岸の中規模河床形態の領域区分<sup>13)</sup>によると、初期条件において幅 0.5 m の区間 (拡幅無し) が単列砂州領域、幅 0.9 m の区間 (拡幅部) が複列砂州領域に位置する。

### 2.2.3 通水中および通水後の計測

水路下流端から 10 m から 20 m までの範囲の水路上方に計 5 ヶ所設置したデジタルビデオカメラにより、拡幅部およびその上下流の砂州形状の変化を記録した。

通水中の河床形状には、光切断法を計測原理とする



河床の高解像度な計測法 (Stream Tomography、以下 ST 法)<sup>17)</sup>を用いて計測し、連続的な動画から縦断間隔 0.01 m で河床地形を 2 次元に数値化した。測定範囲は下流から 9.2 m から 19.3 m まで (Case5 については、6.8 m から 22.6 m まで) とし、通水後 4 時間、8 時間経過時の河床形状を計測した。

ST 法による計測は以下の手順で実施した。レーザー発生装置とデジタルビデオカメラを走行架台に載せ、レーザー光を横断的に水面とその下の河床面に照射する。ビデオカメラはレーザーを照射した横断面を斜め上から撮影するように設置する。走行架台の上でレーザーとビデオカメラの相対的な位置は変わらないように固定する。走行架台を水路の上流から下流へ縦断方向に移動させる。走行架台の縦断的な位置は、走行架台にもう 1 台設置したカメラで水路側面に貼り付けたメモリを撮影することで把握した。撮影した動画を静止画に分解し、レーザー光が照射した水面と河床面の位置を抽出し、水位と河床位の算定をした。

また、砂州の移動速度を把握するために、砂州が形成され始める 1 時間後から 30 分ごとに、砂州の前縁部の縦断位置を記録した。

表-1 水理実験条件

Case	勾配	拡幅延長(m)	流量(m <sup>3</sup> /s)	通水時間(h)
Case1	1/150	0.0	0.0030	8.0
Case2	1/150	2.5	0.0030	8.0
Case3	1/150	5.0	0.0030	8.0
Case4	1/150	7.5	0.0030	8.0
Case5	1/150	15.0	0.0030	8.0

## 2.2.4 流量低下時の流況計算

流量低下時の水深および流速を把握するために、iRIC Nays2DH を用いて平面二次元流況計算を行った。河床形状は移動床実験で計測した 8 時間後のデータを用いた。流量は水路実験時の 1/6 である 0.0005 m<sup>3</sup>/s とした。マンニングの粗度係数は 0.025 とし、計算格子サイズは縦断方向に 5 cm、横断方向に 2.5 cm とした。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 砂州形状の変化

各ケースの ST 法による通水中の河床地形測定結果を、初期河床高からの変動量を算出し、コンターで表現したものを図-1 に示す。

拡幅部を設けない Case 1 では、単列砂州が明瞭に形成されていた。Case 1-4h (通水 4 時間経過時) と Case 1-8h (通水 8 時間経過時) を比較すると、Case 1-8h の方が初期河床からの変動量が若干大きいものの、砂州の波長はどちらも 4.2 m から 4.4 m 程度であった。

拡幅した全てのケースでは、共通して拡幅直後の両岸に砂の堆積が観測された。また、拡幅部の下流端では壁に沿って河床が洗掘され、拡幅部から直下流の右岸側に砂が堆積した。

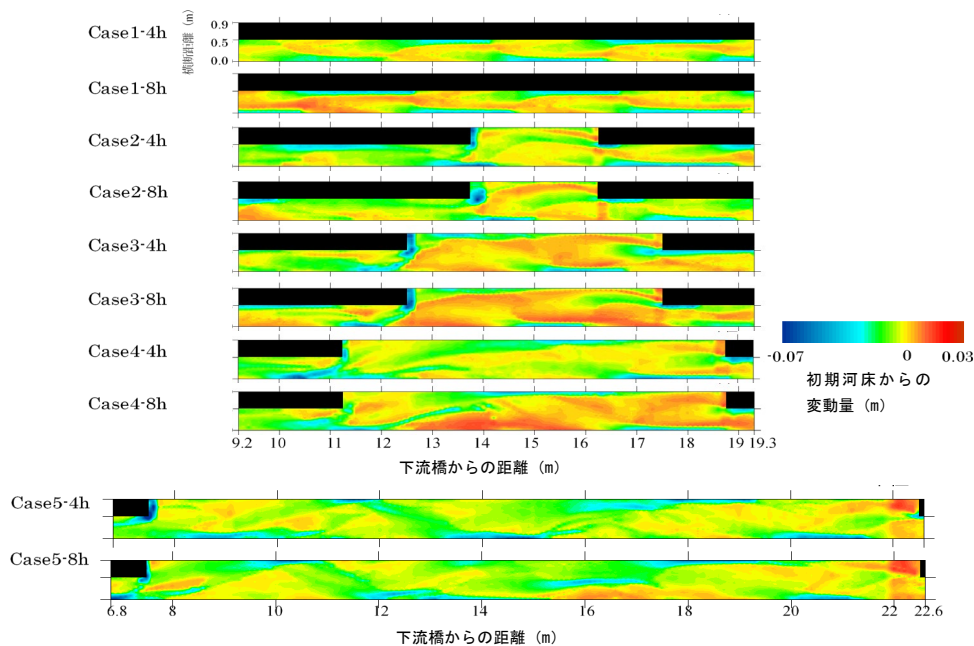


図-1 通水中の砂州地形の変化

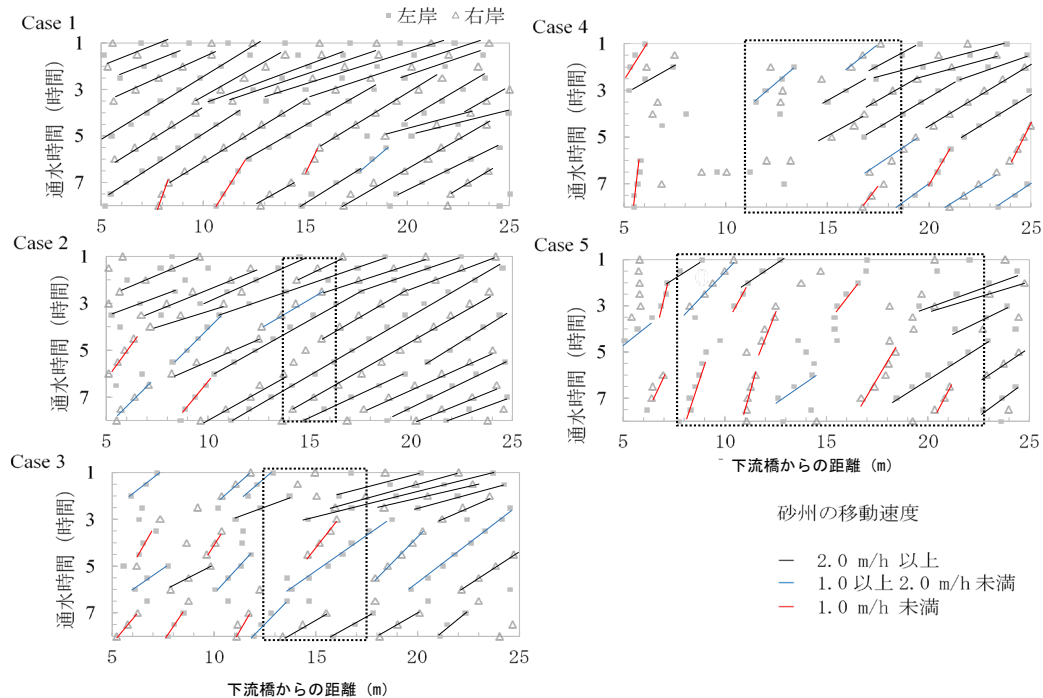


図-2 砂州の移動速度

拡幅延長が河道幅の5倍のCase 2では、4時間目に拡幅部対岸の左岸側14.0 mから拡幅部に入る16.25 mの位置に砂州河床地形が見られた。実験の観察によると、この砂州はCase 1の交互砂州と同様に下流へ移動しており、8時間目にはその前縁部が15 mの位置にあった。拡幅部の右岸側には円弧状の河床地形が形成されており、その先端は8時間目に14.0 mくらいまで伸びていた。14.0 mから15.0 mの左岸付近には、円弧状の砂の堆積地形の先端と側壁に挟まれるように長さ1.0 m程度の筋状の深掘れが形成された。

拡幅延長が河道幅の10倍のCase 3を見ると、拡幅部右岸側の15.0 mから17.5 mにCase 2と同様の円弧状の河床地形が見られた。拡幅部の左岸側には、下流へ移動する砂州地形が形成された。また、alcoveになりうる筋状の深掘れは、Case 3-4hでは左岸側の15.0 mから17.0 mの範囲に、Case 3-8hでは14.5 mから16.0 mの範囲に見られた。

拡幅延長が河道幅の15倍のCase 4を見ると、Case 2およびCase 3と異なり、拡幅部右岸側の円弧状の地形は明瞭には形成されなかった。8時間目には、拡幅直後の16.0 mから18.5 mまで河道全体に河床が上昇し、その上昇部と左岸側の側壁の間にはalcoveになりうる2.5 m程度の長さの筋状の深掘れが見られた。

拡幅延長が河道幅の30倍のCase 5を見ると、拡幅部全体で見ても砂州形状は不明瞭であり、変動量の大き

いものは見られなかった。Case 4と同様に、拡幅部右岸側の円弧状の地形は形成されなかった。また、左右岸交互に砂の堆積部と側壁の間に発生する筋状の深掘れは複数箇所現れた。

### 2.3.2 砂州の移動変化

通水中に計測した砂州先端部の縦断位置を、通水時間ごとに縦に並列させたグラフを図-2に示す。砂州の移動速度を2.0 m/h以上、1.0 m/hから2.0 m/h未満まで、1.0 m/h未満の3つに区分し、3色の実線で示した。左岸もしくは右岸それぞれに1.5時間分以上の記録(3個以上のプロット)が1つの傾きを持った直線で結ぶことができるもののみ砂州の移動速度(波速)を当てはめている。移動速度の算出は縦断方向の移動距離から算出しており、横断方向の移動は考慮していない。傾きが縦に近いもの、もしくは砂州が上流へ後退しているものには波速を当てはめていない。黒い破線で囲んだのは水路拡幅部に該当する部分である。

拡幅なしのCase 1では水路全体を通して砂州の移動速度が2.0 m/h以上であった。Case 2では、拡幅部より下流側に移動速度の低下が見られたものの、Case 1と同様に水路全体で2.0 m/hであった。Case 3では、水路全体で結んだ直線が短くなり、砂州の移動速度の変化もしくは砂州の後退、消失が考えられた。また、Case 2とは明らかに異なり拡幅部と拡幅部より下流部での移動速度の低下が見られた。一方、拡幅部の上流側では通

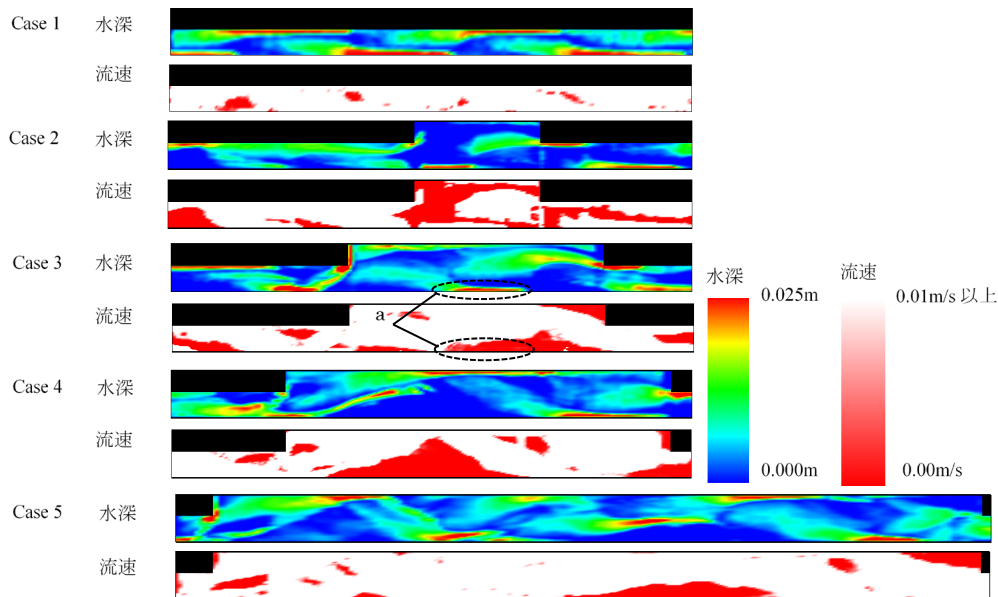


図-3 8時間通水後河床の流量低下時の水深および流速

水時間が3時間くらいまでほとんど2.0 m/hで移動していた。3時間から6時間までは速度が落ちたが、7時間からはCase1と非常によく似た移動速度となった。Case4では、Case3と同様に結べる直線が短くなり、移動速度の変化もしくは砂州の消失が考えられた。拡幅部より上流から15.0 m程度までは2.0 m/hであったが、5時間を境に2.0 m/h未満に移動速度が低下していた。Case5では、移動速度は拡幅部では1.0 m/h未満、拡幅部より上流は2.0 m/h以上で、傾きが縦に近いもの、もしくは砂州が上流へ後退しているものが多く見られた。

### 2.3.3 流況計算結果

平面二次元流況計算により低流量時の水深と流速の面的な分布を示した結果を図-3に示す。各ケースにおいて流量低下時の水深と流速を同じ位置で対応させると、各ケースで水深が0.025 m以上の範囲（水深が赤色で示される部分）と、流速が0.01 m/s以上の速い範囲（流速が白色で示される部分）、もしくは水深が無く（水深が青色で示される部分）流速も無い（流速が赤色で示される部分）という組み合わせが見られた。(1)で前述したCase2、Case4、Case5で筋状の深掘れが見られた部分は、水深の赤色で表現されている。これらに対応する流速は、白色で表現される0.01 m/s以上となっている。alcove地形のような水深が深く（水深が赤色で示される部分）流速が遅い（流速が赤色で示される部分）条件は、Case3の図中aで示した拡幅部の中央部分のみであった。この深掘れ部分を囲む砂州は、図-2で示す砂州の移動速度でみると2.0 m/hであることから、

これは自由砂州であると考えられる。

### 2.4 実験結果の考察

拡幅しない場合に単列砂州が形成される（図-1のCase1-4hおよびCase1-8h）河道条件に対し、延長の異なる部分拡幅を行った。拡幅延長が河道幅の5倍のCase2と10倍のCase3では、拡幅部の中に形成された河床地形が、Case1の単列砂州と似た形状となった。また、拡幅側の右岸には同様の円弧状の河床地形が見られ、形やその位置は大きくは変わらなかった。このことから、拡幅による平面形状の変化によって右岸側に強制砂州が生じ、自由砂州（単列砂州）が進入したことが考えられる。河道幅の15倍であるCase4まで拡幅すると、前述のような明確な特徴は見られなかった。河道幅の30倍まで拡幅したCase5では河床地形が不明瞭となり、側壁と堆積した河床地形に挟まれた筋状の洗掘部分が複数現れ、流路が複雑になり、複列砂州に近い状態であったと考えられる。平面的な特徴でとらえると、Case4はCase5と、Case2およびCase3との中間の特徴であったと考えられる。

一方、図-2で示したような砂州の移動速度からはCase2がCase1とほとんど変わらない2.0 m/h以上となっていることがわかる。Case1で発生した自由砂州の移動速度が2.0 m/h以上であることから、河道幅の5倍程度の拡幅では、強制砂州が生じていても自由砂州はそれ自体の移動速度を保って流下していることが考えられる。また、Case5の結果から、全幅を拡幅した場合は1.0 m/h未満の砂州移動速度であると考えられる。Case3は、砂州の移動速度から見るとCase2に近いが、



通水時間が3時間から6時間まで移動速度が落ちたのは、強制砂州に自由砂州が進入した影響である可能性があった。

原田ら<sup>14)</sup>は、砂州非発生領域での固定砂州形成を検討した結果、今回の実験ケース Case2-4h に最も近い条件の1/200勾配、川幅の4倍の拡幅によって中州が形成される結果を示している。本研究と異なる点は、自由砂州が発生せず、強制砂州の影響のみに限られるということであり、彼らの示した中州は拡幅部対岸の強制砂州であったと言える。Case2-4h では、拡幅部の両岸に堆積した河床地形が認められた。彼らの結果と本実験では、中規模河床形態発生領域が異なるために単純には比較できないが、拡幅部対岸(左岸)には自由砂州、拡幅部側(右岸)には強制砂州が形成され、強制砂州の形成された位置が異なっていた。

また、alcove地形が形成されたのは、河道幅に対する拡幅延長が10倍程度で、側壁と自由砂州に挟まれた部分に深掘れが生じ、流量低下したのちにはalcoveと見られる形状が確認された。なお、深掘れは拡幅したいずれのケースでも確認されたことから、今回の実験とは異なる流量条件や通水時間では、拡幅延長が10倍程度以外でもalcove形状の形成について可能性があり、今後検討の必要があると考える。

## 2.5 部分拡幅による河道の応答のまとめ

河道部分拡幅による河床変動応答を把握することを目的に移動床実験を実施し、拡幅延長によって拡幅部に形成される河床地形に違いがあることを確認した。また、今回の実験条件では河道幅に対する拡幅延長が10倍程度で、側壁と自由砂州に挟まれた部分に深掘れが生じ、流量低下したのちにはalcoveが形成された。拡幅延長が異なるケースでもalcove形状が形成される可能性が示唆された。

## 3. 魚類産卵生息環境に配慮した河道掘削技術

### 3.1 概要

豊平川を対象に、サケ産卵環境に配慮した河道掘削(砂州切り下げ)の検討と、物理生息場モデル(PHABSIM)による環境評価について検討を行った。さら

に、河道掘削後、約1年間のモニタリング調査結果と掘削の有無による河床変動予測の比較などから、砂州の固定化、2極化および河床微地形の特徴などを明らかにして、河道維持管理について考察を行った。

### 3.2 対象河川の特徴

豊平川は、流域面積902km<sup>2</sup>、流路長72.5kmの人口190万都市・札幌の中心部を流れる河川であり、普段は市民の貴重な憩いの場であるとともに、鳥や魚の生息場所として重要な連続性を持つ空間である。一方、大都市を流れる急勾配な河川であり、昭和25年から昭和48年にかけては、河道の安定のために床止工の設置、昭和40年代から50年代にかけて、堤防の保護などを目的に、高水敷の造成、低水護岸工が行われた。

図-4は扇状地を流れる豊平川の河床高(太線)と河床勾配(細線)を示す。市内中心部のKP10~11付近(合流点より10km地点)に河床勾配の変化点を持ち、その前後に伏流水が豊富なサケ産卵床がみられる。勾配変化点の上流側は、急流河川としての特徴を持ち、下流側は緩流河川としての特徴を持っている。

本検討で対象とした区間KP12.0~KP13.6の航空写真を写真-2に示す。当該区間の平均河床勾配は1/500前後である。また扇状地上の急勾配河道区間の最下流に位置し、下流側の緩流部(河床勾配1/1,000~1/10,000)と接する区間でもある。そのため、既往の予測結果<sup>18)</sup>からも、中長期的な土砂堆積傾向のある区間である。また写真-2より低水路内の砂州上において樹林の繁茂が読み取れる。

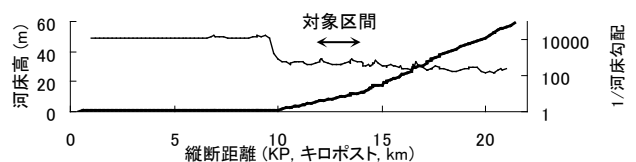


図-4 豊平川の河床縦断面図

### 3.3 掘削断面の設定および河道変化の予測

#### 3.3.1 河道掘削断面の設定

写真-2に示した4個所の掘削箇所において図-5に示



写真-2 解析対象区間(豊平川 KP11.8~KP14.1、2018年撮影)

0 500m

す断面で2020年に河道掘削を行った。まず、掘削による低水路内の拡幅にあたり、拡幅後の再堆積ができる限り抑制されるような安定な川幅<sup>4)</sup>を検討した。ここでは、1/2年確率の出水規模370m<sup>3</sup>/sで堆積が生じない川幅を河床変動計算で検討し、その結果として、掘削後の川幅を50mと設定した。この範囲を図-5中に【設定①】として示す。この【設定①】における掘削敷高の設定にあたっては、サケの遡上・産卵を妨げない高さを検討した。ここでは、サケ遡上期間中(9月~12月)の平均流量時にサケの産卵床となり、かつ最低水位時に現況水深が確保されるべく、2011年~2018年のサケ遡上期(9月~12月)の最低水位を掘削敷高に採用した。

次に、図-5中の【設定②】は、河畔林伐採と併せて、平均年最大流量(Q=480m<sup>3</sup>/s)流下時に樹林化抑制可能な摩擦速度の値<sup>3)</sup>が確保できる敷高まで砂州の切り下げを行った。

このように【設定①】と【設定②】に分けてそれぞれ設定することによって、拡幅した低水路幅を維持し、かつ、サケ産卵床の保全と再樹林化抑制を図ることが可能になるものと期待される。

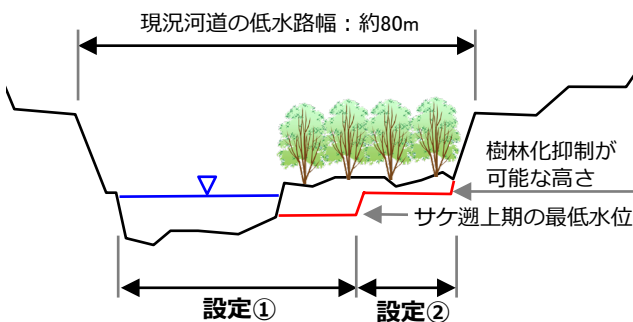


図-5 河道掘削断面模式図

### 3.3.2 河道変化の予測計算

現況河道(Case0)と図-5の断面で掘削した河道(Case1)の2つのケースについて平面二次元河床変動計算<sup>19)</sup>を実施し、流況および河道変化の予測を行った。計算条件を表-2に示す。計算には、ピーク流量が平均年最大流量規模だった2012年5月4日出水(ピーク469m<sup>3</sup>/s)の流量ハイドロを適用し、6回繰り返して6年間の計算とした。なお、平均粒径(50mm)が移動しない流量(ここでは320m<sup>3</sup>/s)以下は計算時間短縮のため除外している(図-6)。ただし、後述するようなサケ産卵に関する環境評価を実施するために、1つの出水ハイドロ前後にサケ遡上期の平均流量17.6m<sup>3</sup>/sを一定時間設定している。

表-2 計算条件一覧表

項目	設定内容
解析モデル	iRIC Ver2.3
計算区間	豊平川 KP11.0~KP15.4
計算ケース	Case0: 現況河道(掘削なし) Case1: 掘削河道(設定①を50m)
計算格子	縦横断方向の格子サイズ: 5~10 m 格子数: 縦断方向441, 横断方向33
粗度係数	低水路粗度係数: 0.034~0.035 高水敷粗度係数: 0.040
樹木	現況樹木(掘削箇所 樹木なし)
流量	H24/5/4の実績流量 × 6回
起算水位	等流水位
河床材料	混合粒径(H28 河床材料調査)
上流端境界	動的平衡
固定点	1号床止め(KP13.5), 3号床止め(KP14.5), 高水敷

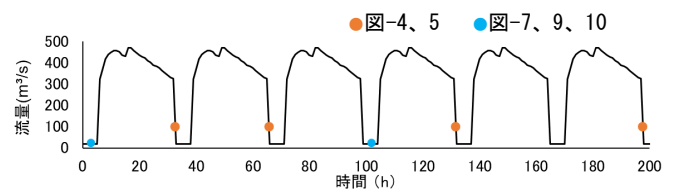


図-6 計算流量(6年分)

初期河床を現況河道(掘削なし)としたCase0、および初期河床を掘削河道としたCase1について、それぞれの1、2、4、6年後(Q=350m<sup>3</sup>/s時、減水時)の計算結果(水深分布)を図-7と図-8に示す。

図-7の薄青で囲んだエリア(掘削箇所2)に着目すると現況河道では、砂州の移動がみられず、固定砂州(Point Bars)と化している。一方でCase1(図-8)では掘削箇所2から掘削箇所3の範囲で湾曲が緩やかな河道における交互砂州(Alternate Bars)の特徴の一つ、下流への移動が見られる。特に図-8の矢印で示した掘削箇所2の上流側にできた深掘部(淵)が下流側に移動することで、掘削箇所2の多くが水域へと変化すると予測が確認できる。

一方で河道湾曲部に位置している掘削箇所1および掘削箇所4は、Case0、Case1とも、固定砂州から大きな変化が見られなかったものの、掘削箇所4で、増水時には、内岸側に副流路が形成され、Case0よりもCase1の方がより水面幅の広い副流路が形成されており、掘削の影響と考える。

このようにCase0では、砂州の固定化が進み、一層の2極化(陸域と水域の比高の増加)につながり、河道管理上、および魚類等の生息環境や産卵環境として、Case1と比べて劣化傾向(微地形環境の単調化)を予測できる。

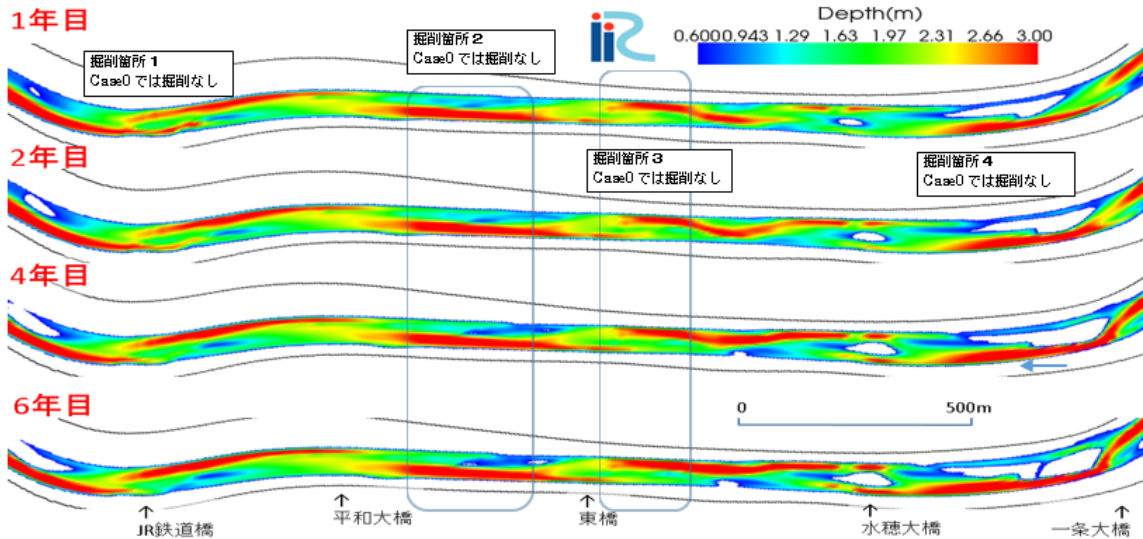


図-7 数値計算結果 (Case0、掘削なし)

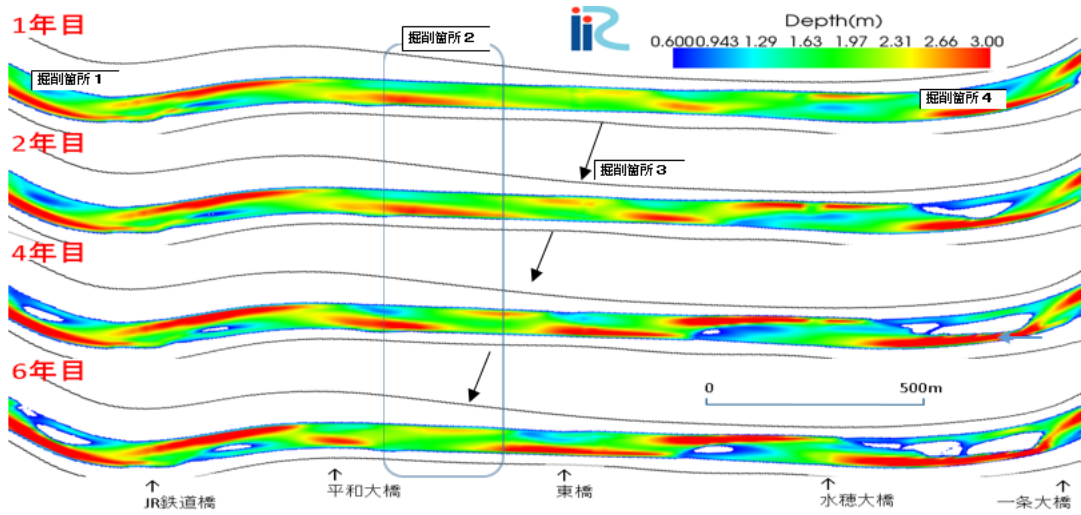


図-8 数値計算結果 (Case1、掘削河道)

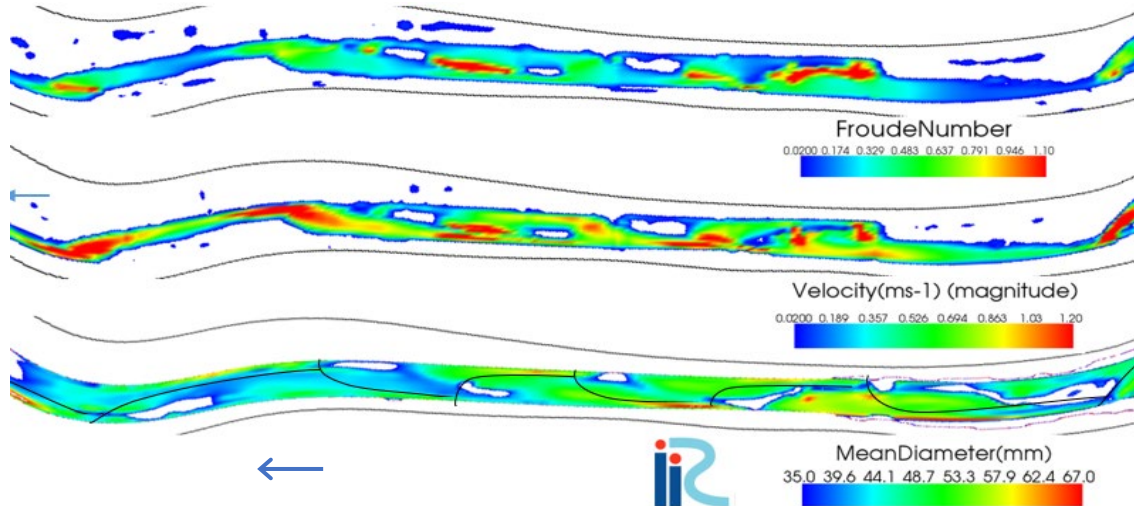


図-9 数値計算結果 (Case1、掘削河道、3年目、 $Q=17\text{m}^3/\text{s}$ )

図-9 に、掘削河道 Case1 の3年後( $Q = 17.6\text{m}^3/\text{s}$ )の計算結果 (フルード数、流速分布、平均粒径) をそれ

ぞれ示す。フルード数などからハビタットの区分を試みている調査事例<sup>20)</sup>同様に、図-9 上図でも例えばフ



ルード数の大きな値である赤～黄の部分が早瀬と推定でき平水時の生息場の水理環境そして瀬や淵、副流路などハビタット毎の水理的特徴が読み取れる。図-9 下図からは、計算により分級が進んだ平均粒径分布からは砂州前縁線に沿う深掘部(淵)の粒径が大きいことがわかる。この内上流側の淵頭は河床高の比高差ゆえに伏流水が多く、産卵床として好適な生息場でもある。

また図-9 下図で、平均粒径が 35mm 以下と細かい粒径の分布箇所を見ると、主に砂州の下流側に分布していることがわかる。

以上、河床変動計算結果から確認できた掘削箇所2と掘削箇所3における河道掘削の影響としては、Case0で固定砂州のままで2極化が進む一方で、掘削したCase1で、交互砂州として下流への移動が起き、平水時に陸域だった個所の一部が、水域に変化することなどについて確認できた。

### 3.4 サケ産卵環境の評価手法

#### 3.4.1 物理生息場モデルによる評価

物理生息場モデルであるPHABSIM (Physical HABitat SIMulation system)は、多項目の物理環境要素から環境を評価する手法であり、SI値(適性基準値)は、魚類が産卵床として選好し利用する度合を示す値である<sup>21)</sup>。

図-10に産卵床位置における物理量(水深、流速)の頻度分布を示す。ここで物理量は、現況河道におけるサケ遡上期の平均流量17.6m<sup>3</sup>/s時の計算結果(前章)を利用している。これを基に、既往知見<sup>22,23)</sup>を踏まえた上で補正し、選好曲線を作成した(図-8)。なおここで用いた産卵床位置情報は、豊平川さけ科学館<sup>24)</sup>のH30産卵床位置データを用いた。

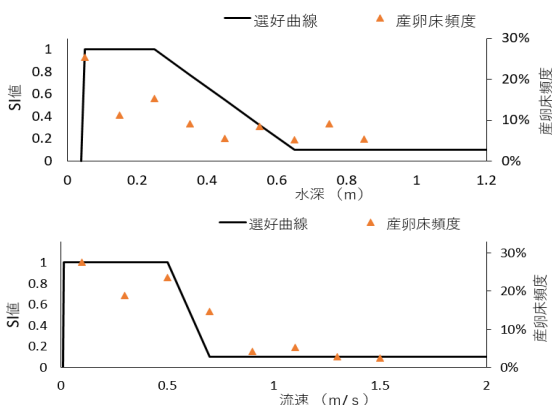


図-10 平面二次元河床変動計算に基づく適正基準SI値

#### 3.4.2 CSI(合成適性値)の予測結果とサケ産卵環境の評価

JR鉄道橋から水穂大橋までの現況河道および3年後の予測河道における $Q = 17.6\text{m}^3/\text{s}$ 時(サケ遡上時平均)

の計算水理量から図-10の選好曲線に対応する水深と流速のSI値を掛け合わせて求めたCSI(合成適性値)の平面分布を図-11および図-12に示す。

分布予測結果の内、図-11中央の掘削箇所2(薄青で囲んだエリア)に着目すると、掘削なしの河道では3年後も陸域のままであり、産卵床としての利用は出来ない。一方、掘削河道におけるサケ遡上時期の産卵環境は、陸域化しつつあった河畔林部分の砂州を切り下げることにより前章で示した河床変動を促し、水域が拡大したことが読み取れる。

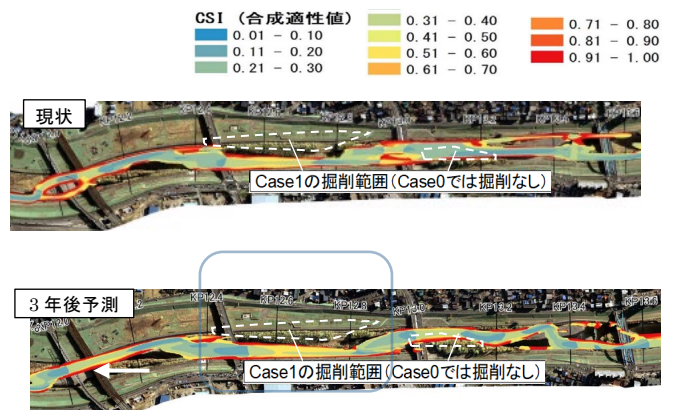


図-11 現況河道のCSI分布 (Case0)

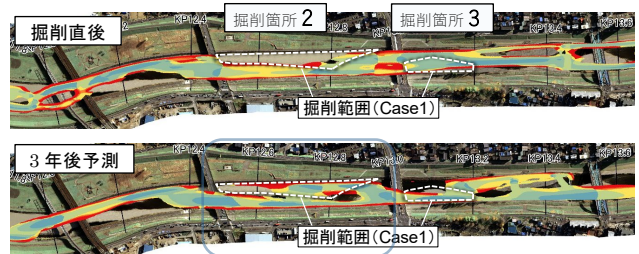


図-12 掘削河道のCSI分布 (Case1)

CSIの合計値がWUA(利用可能生息場面積)であるので、CSIの断面合計値つまり単位流路長あたりのWUAから掘削箇所における産卵環境としての評価を行った結果を、図-13に示す。掘削箇所2と掘削箇所3では、Case0よりも掘削したCase1で産卵環境としての評価が高い結果となった。掘削箇所3では、Case0の掘削なしの場合、固定砂州が拡大し、2極化が顕著となる結果、流路長あたりWUAが減少したと推測される。

以上から掘削箇所2と掘削箇所3において、掘削による産卵適地が広がり、数年後まで維持されることが物理生息場モデル(PHABSIM)による評価から確認できた。

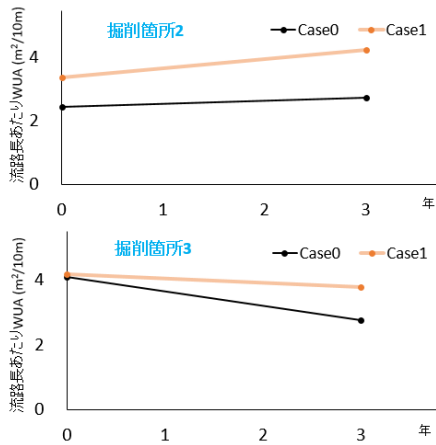


図-13 流路長あたりWUAの経年変化予測

### 3.5 魚類産卵生息環境に配慮した河道掘削技術の考察

3章について国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌河川事務所と共同で検討した。まず、流下能力の維持向上を目的とした河道掘削において、掘削後の川幅が維持されるように掘削幅を設定した上で、河畔林

の樹林化抑制やサケ産卵環境の保全が図れるように掘削敷高を設定した。

河床変動計算結果からは、計4個所の掘削箇所の内、2つの砂州掘削箇所において、掘削の効果により、固定化していた砂州が、交互砂州として下流へと移動することが予測できた。予測計算からは、砂州の移動に伴い、掘削砂州の一部は、平水時に水面へと変化することが確認できた。



写真-3 掘削直後の河道  
(東橋から下流側を望む、R2年11月)

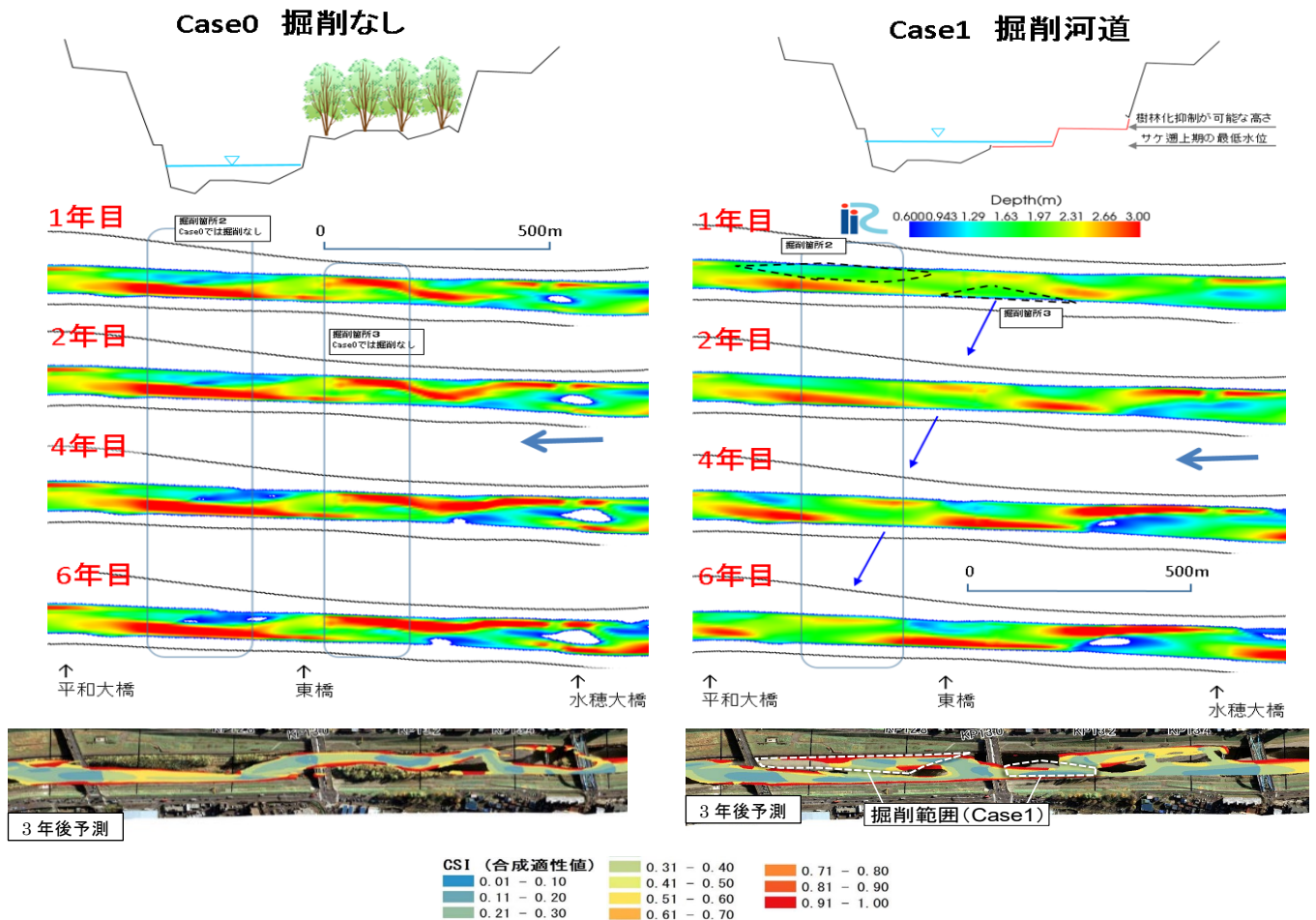


図-14 掘削の有無による河道変化予測と物理環境評価 (まとめ)



その結果をもとに物理生息場モデル (PHABSIM) を用いて物理環境評価を行った結果、産卵可能面積 (WUA) の改善、つまりサケの産卵環境として好適な環境が創出されることが予測でき、その効果は少なくとも数年後までは維持されることが確認された (図-14)。

一方で掘削しない場合、砂州の移動はみられず、固定したままで、数年後に、より2極化が進み、産卵環境として劣化傾向であることが物理環境評価から予測できた (図-14)。

本章で対象とした区間では、札幌開発建設部札幌河川事務所により、上述のような掘削断面が設定され、掘削工事が実施された (写真-3) に。河道掘削が必要とされる多くの河川では、同様の課題を抱えており、掘削断面を設定する有効な手段が求められている。

#### 4. 低水路河道掘削後の砂州および産卵床の変化

##### 4.1 掘削後の砂州の変化と流況

##### 4.1.1 砂州の変化

4章の対象区間 KP11.6~KP14.1 の航空写真を写真-4 に示す。当該区間の平均河床勾配は 1/500 前後である。また扇状地上の急勾配河道区間の最下流に位置し、下流側の緩流部 (河床勾配 1/1,000~1/10,000) と接す

る区間でもある。そのため、既往の河床変動の予測結果<sup>18)</sup>からも、中長期的に土砂堆積傾向のある区間である。また写真-4 上の点線で囲った4箇所が2020年9月に樹林化抑制が可能な敷高まで砂州を切り下げられた掘削箇所である。

写真-5、6は、掘削直後および掘削1年後の河道の状況である。掘削から1年間では、250~450 m<sup>3</sup>/sec 規模の出水が4回および約2か月程度の融雪出水 (50~150 m<sup>3</sup>/sec 規模) が生起している。

JR橋下流、平和大橋上流、東橋上流、一条大橋下流の4地点の掘削箇所 (写真-4) における砂州の変形の特徴は、砂州上流側が対岸に突き出す形での変形が見られた (写真-6)。また掘削箇所①、②、④ (写真-4) では、砂州前縁部 (本論では、以下、平水時の瀬~淵頭の微地形を指す) に浮州の形成が見られた。また掘削箇所④においては、冠水頻度が多くなり、平水時も砂州上流側が冠水するようになった。

また掘削箇所①では、直上流の早瀬が200m程度、下流へ移動していた (写真-7、8参照)。一方、掘削箇所②~④では、ほとんど早瀬の移動は見られなかった。以上について表-3にまとめた。



写真-4 解析対象区間 (豊平川 KP11.6~KP14.1、2018年撮影) 0 500m



写真-5 掘削直後の状況 (2020年)



写真-6 掘削1年後の状況 (2021年)



表-3 箇所別の掘削1年間の河道変化

	河道の特徴	早瀬位置の前進	砂州への冠水頻度	前縁部への浮州形成	
箇所①	湾曲	有約200m	少	1→3	JR鉄道橋下流
箇所②	直線	無	少	1→1~2	平和大橋上流
箇所③	直線	無	微少	1→1	東橋上流
箇所④	湾曲	無	多	0→2	一条大橋下流



写真-7 1次掘削後の河道状況 (JR橋下流、R2年4月)



写真-8 2次掘削1年後の河道状況 (JR橋下流、R3年7月)

#### 4.1.2 微地形と砂州の冠水

図-15は、2極化の進行の有無での流量別の砂州への冠水頻度について示した模式図である。ここで掘削により砂州を切り下げた箇所は、掘削直後は、河道Bに該当する。

写真-9、10は、掘削箇所④の河道状況で、融雪出水時に右側の切り下げられた砂州上が冠水し、その後、砂州上の副流路が形成されている。これは砂州の上流側の瀬にあたる箇所の微地形変化により、砂州上の冠水が促されたケースである。今回の4つの掘削地点間で冠水状況などには差異がある(表-3参照)ことなどから、交互砂州の卓越する豊平川中流部の場合、必ずしも掘削敷高のみで冠水頻度が決まるわけでないと考えられる。

#### 4.1.3 河道掘削後の産卵床分布について

河道掘削後、約1年後の産卵床分布について、表-4に

示す(11.2.2章の図表より)。掘削箇所①では前期(9/29~10/27)に主流部側の河岸に産卵床が多くみられた。



写真-9 一条大橋下流の砂州の冠水状況 (R2年9月砂州切下げ、撮影R3年5月(上))



写真-10 一条大橋下流の砂州の冠水状況 (撮影R3年6月(下))

砂州切り下げにより砂州上の冠水が多くなり副流路が自然形成されている。

また掘削断面B上に後期(11/17~12/10)の産卵床が多く見られた(図-16)。掘削箇所②では掘削断面B上に後期の産卵床が多く見られた。掘削箇所③では掘削断面B上に後期の産卵床が3つ程度と少なかった。掘削箇所④では主流部側の河岸および掘削断面B上に前期の産卵床が多く見られた。

図-17は掘削断面①のKP11.7付近(図-16薄青で囲んだエリア)における4/16( $Q \approx 60\text{m}^3/\text{s}$ )と7/29( $Q \approx 10\text{m}^3/\text{s}$ )の流速分布を示す。流速はUAVによるSTIV法<sup>25)</sup>で流速を動画解析したものである。図中の「く」で表示した0.1m/s未満の流速箇所については、実測(電磁流速計)との比較からは誤差があるものの、面的な流速分布の概略的な把握が可能なのことがわかる。STIV法は一横断面に対する流速観測などに使用される手法として、近年注目されているが、風による影響除去などの各種課題が解決できれば、平水時の平面的な物理環境調査などにも応用可能なことが推察できる。

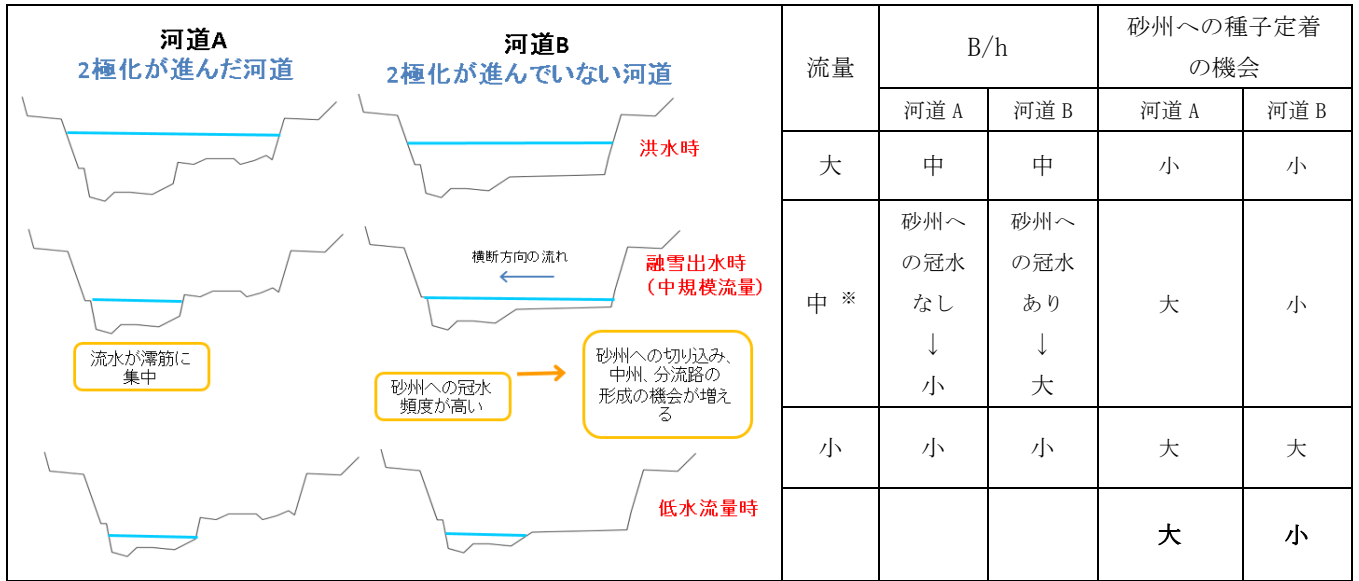


図-15 砂礫河川における河道地形の違いと流況変化

2極化が進んでいない方が中規模出水時の砂州上の冠水による微地形変化が起きやすい

※豊平川(本稿対象区間)の場合、40~80m<sup>3</sup>/s程度



図-16 2021年度産卵床箇所 (KP11.4~12、掘削箇所①、7/29撮影時流量  $Q \approx 10\text{m}^3/\text{s}$ 、位置情報はさけ科学館より)

平水時(7/29)に上流側の砂州の突き出し部が、増水時(4/16)には、水面下となり、水深が浅く流速の遅い流れが生じていた。同様な砂州の突き出し部は、各掘削箇所でも見られ、興味深い微地形や分流の形成に繋がったことが推察できる。

表-4 掘削箇所の産卵床の分布

	主流部		掘削断面B		
	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	9/29 ~ 10/27	11/17 ~ 12/10	
箇所①	25	5	0	53	JR 鉄道橋下流
箇所②	2	2	0	23	平和大橋上流
箇所③	2	0	1	2	東橋上流
箇所④	7	1	12	2	一条大橋下流
計	36	8	13	80	



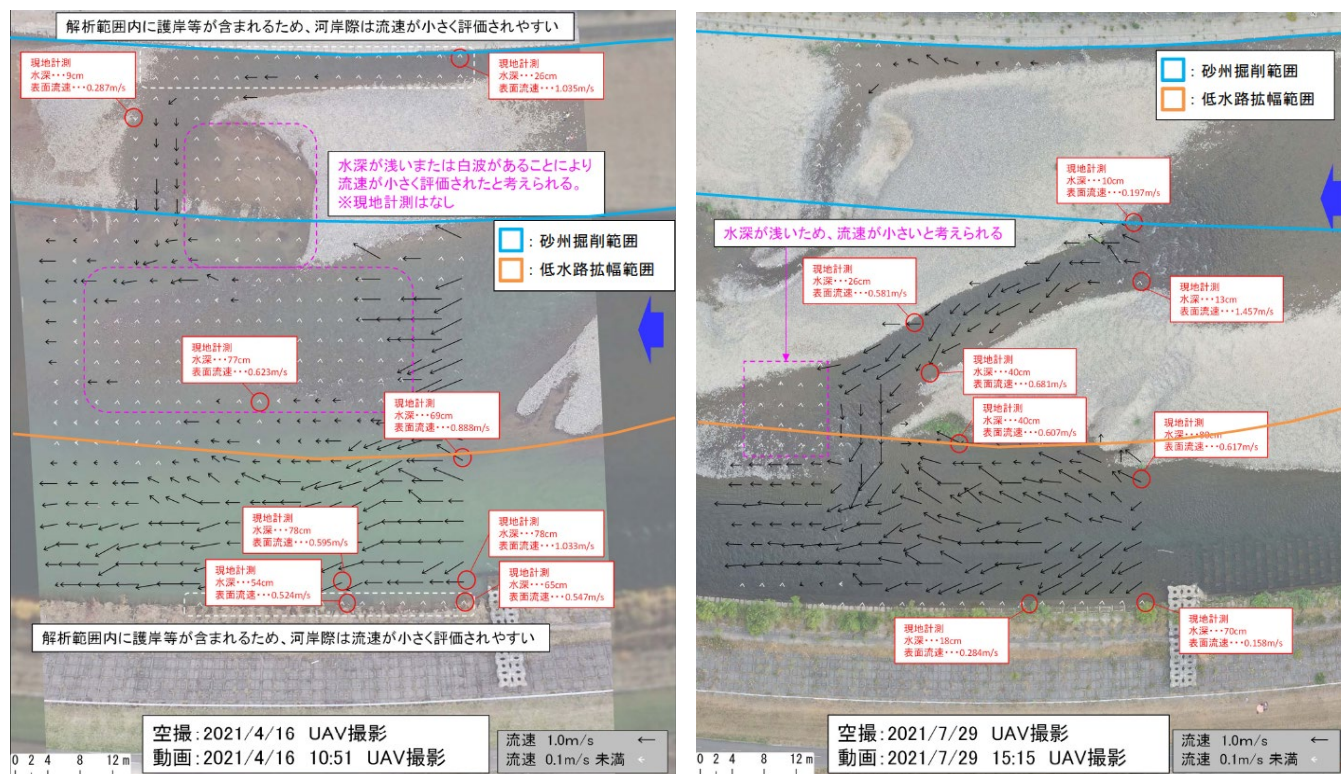


図-17 STIV法で解析した平面流速分布（左4/16と右7/29、UAV、KP11.7付近）

## 4.2 河道の変化予測と河道掘削による維持管理技術

### 4.2.1 計算条件

河道断面設定時に用いた予測計算と同一の条件を用いて、計算ハイドロの修正および対象期間を延長し、低水路河道掘削による河道維持管理技術の検証を目的に数値実験を行った。

現況河道(Case0、掘削なし)と掘削河道(Case1)の2つのケースについて平面二次元河床変動計算を実施し、流況および河道変化の予測を行った。計算条件を表-2に示す。計算には、2005年～2019年の間の年最大流量の平均ハイドロを200m<sup>3</sup>/sec以上のハイドロ(図-18, 19)とした。200m<sup>3</sup>/sec以下は流量規模に応じた流況確認のため階段状とした。この流量ハイドロを適用し、40回繰り返して40年間の計算とした。また初期流量として200m<sup>3</sup>/secを1.4hr与えることにより、分級させ、平面的に均一な粒径初期条件を緩和させた。なお対象区間における平均粒径50mmが移動しない流量は320m<sup>3</sup>/s前後である。

また河床変動加速係数(流れと河床変動のタイムステップ比<sup>19)</sup>)を10としている。ここで10の場合は継

続時間が2hrであれば、10倍の20時間相当(参考値)である。予備計算で河床変動加速係数の適用および初期流量200m<sup>3</sup>/secの継続時間による分級の程度を確認した上で計算流量を設定した。

表-5 計算条件一覧表

解析モデル	iRIC Ver3.0
計算区間	豊平川 KP11.0～KP15.4
勾配	1/400
計算格子	縦横断方向の格子サイズ: 5～10 m 格子数: 縦断方向 441, 横断方向 33
粗度係数	低水路粗度係数: 0.034～0.035 高水敷粗度係数: 0.040
樹木	樹木なし
流量	15年間の年最大流量の平均から作成×40年
起算水位	等流水位
河床材料	混合粒径(H2S河床材料調査)
上流端境界	動的平衡
固定点	1号床止め(KP13.5), 3号床止め(KP14.5), 高水敷
河床変動加速係数	10



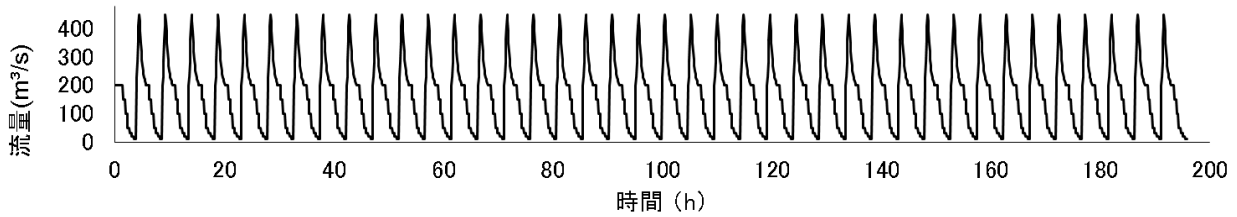


図-18 計算流量

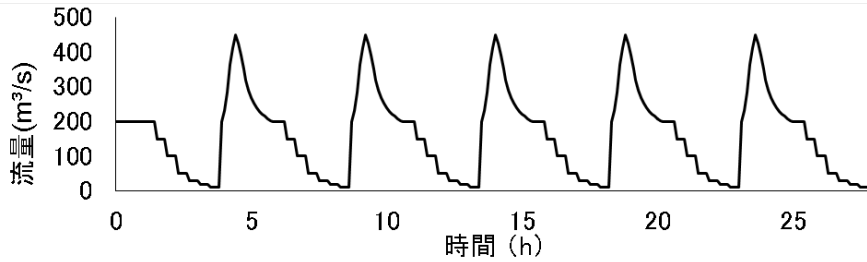


図-19 計算流量(図-18の拡大図)

#### 4.2.2 河道変化の予測計算

初期河床を現況河道(掘削なし)としたCase0、および初期河床を掘削河道としたCase1について、それぞれの0~40年後の水深分布( $Q=350\text{m}^3/\text{s}$ 時、減水時)と流速分布( $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ 時)を図-20と図-21に示す。

図-20の薄青で囲んだエリア(掘削箇所②)に着目す

ると現況河道では、砂州の移動がみられず、固定砂州(Point Bars)と化している。一方でCase1(図-20)では掘削箇所②から掘削箇所③の範囲で湾曲が緩やかな河道における交互砂州(Alternate Bars)の特徴の一つ、下流への移動が20年目までは見られる。

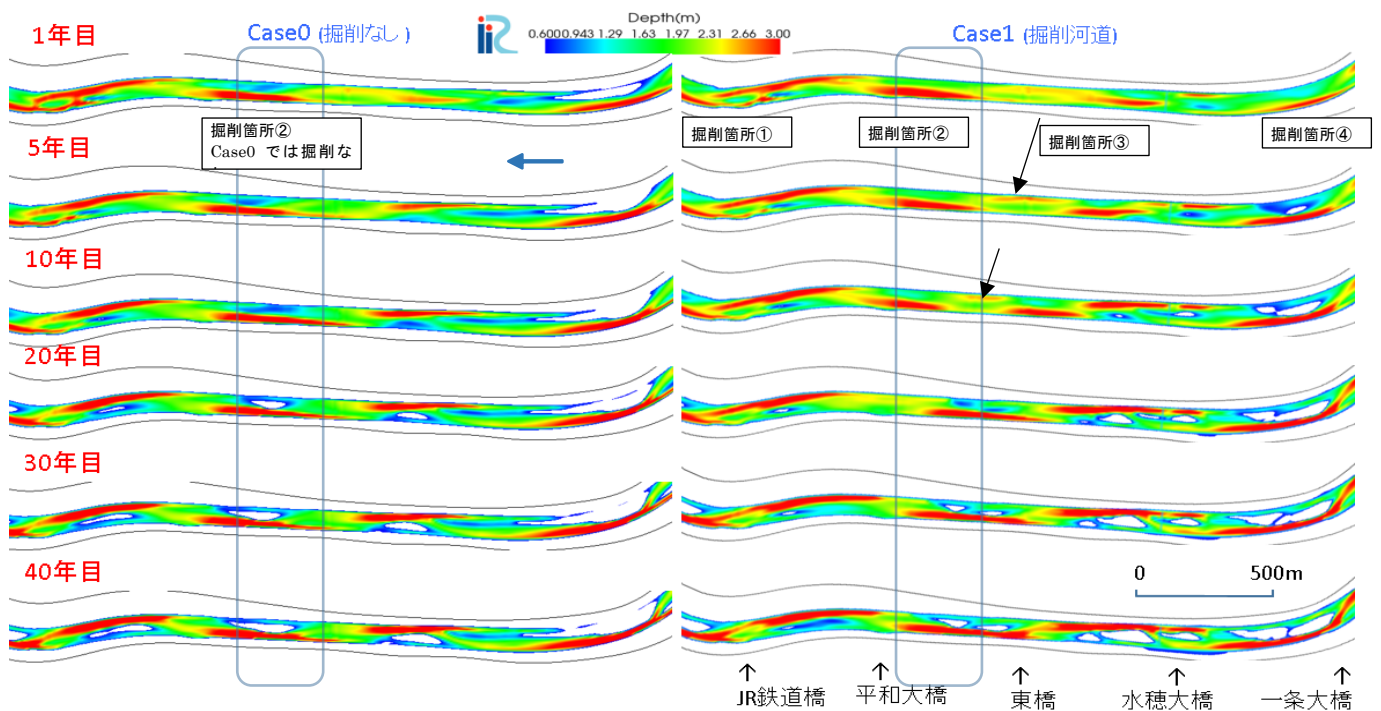


図-20 数値計算結果(水深分布)

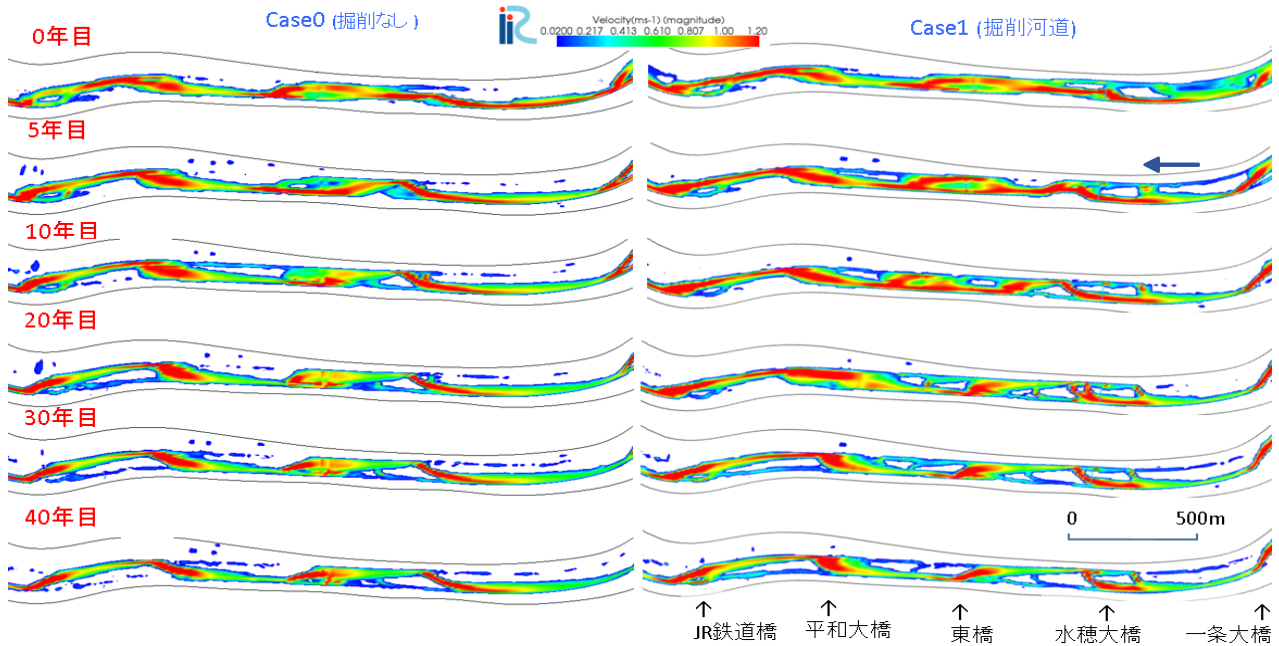


図-21 数値計算結果（流速分布）

特に図-20 の矢印で示した掘削箇所②の上流側にできた深掘部（淵）が下流側に移動することで、掘削箇所2の多くが水域へと変化すると予測が確認できる。20年目～40年目にかけては砂州の移動が緩慢となり、また時間の経過とともに350m<sup>3</sup>/s時の水深の浅い箇所面積が増加傾向にあることなどからも浮州固定化と2極化が進むことが予測される。しかしながら低水時の流速分布を見ると、20年目～40年目にかけても分流が維持されることなど掘削箇所②から掘削箇所③の範囲での掘削による水域を広げる効果の持続が見られる。

一方で河道湾曲部に位置している掘削箇所①および掘削箇所④は、Case0、Case1とも、固定砂州から大きな変化が見られなかったものの、掘削箇所④で、増水時には、内岸側に副流路が形成され、Case0よりもCase1の方がより水面幅の広い副流路が形成されており、掘削の影響と考える。

また掘削箇所①（KP11.8）と掘削箇所④（KP13.8）の間の砂州は、17年後までCase1では、掘削前と同じ5個（ $L=2\lambda=2 \times 2000 / (5+1)=667\text{m}$ ）である一方で、Case0の4年目以降では、薄青の掘削箇所③付近で3個の砂州が1つに変化することで調査区間内の平均砂州波長が $L=2 \times 2000 / (3+1)=1000\text{m}$ と伸張する傾向が確認できる。このようにCase0では、砂州の固定化および砂州波長の伸張がCase1より早く進み、一層の2極化（陸域と水域の比高の増加）につながり、河道管理上、および魚類等の生息環境や産卵環境として、Case1と比べて

劣化傾向（微地形環境の単調化）を予測できる。

流路内に形成される単列交互砂州の波長を示す理論式（交互砂州の線形不安定性理論<sup>26)</sup>）

$$L_c = 5v \sqrt{\frac{B}{gi}} = \frac{5Q}{h\sqrt{Bgi}} = \frac{5B^{1/10}}{n^{3/5}\sqrt{g}} \left(\frac{Q^2}{i}\right)^{1/5} \quad (1)$$

を用いて、 $B=80\text{m}$ で一定とした場合の砂州波長 $L=2\lambda$ と形成流量との関係を図-22に示す。計算に用いたハイドロのピーク流量450m<sup>3</sup>/sの時、式(1)で求めた波長は738mとなる。

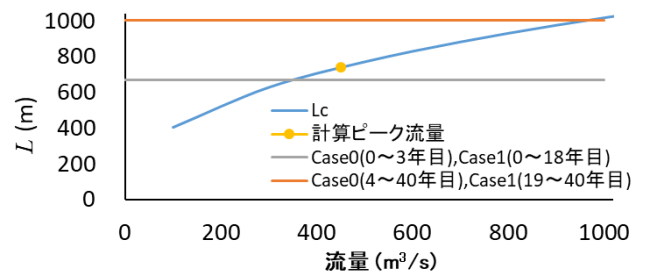


図-22 形成流量と砂州波長理論値(式1)

図-23は掘削箇所②の横断変化である。掘削なし(Case0)の場合、年数の経過と共に深掘れが進展し、砂州高との比高が大きくなることが予測される。一方で掘削河道(Case1)の場合、20年目までは深掘れの進展もなく、掘削の効果を持続することがわかる。

図-24は交互砂州の地形と平水時の平面、縦断模式図である。平水時は、砂州前縁線に沿う形で滞筋が形成されると考えられる。この中規模河床形態の波長や

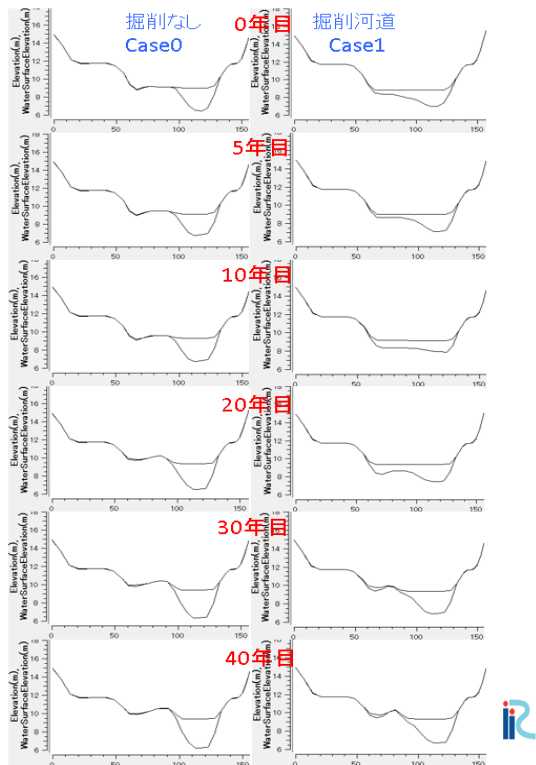


図-23 掘削箇所②の横断形状の変化予測(100m<sup>3</sup>/s時)

波高などの基本的な特徴を踏まえた上で、砂州の変化予測について、図化して検討する。

図-25 は計算河床高(比高)の経年変化を示す。ここで示した河床高は低水路の中心から右岸側および左岸側それぞれの平均河床高についてCase0の0年時の平均河床高を基準とした比高の縦断分布である。平面分布図(図-20)とこの図から、砂州地形の予測変化の

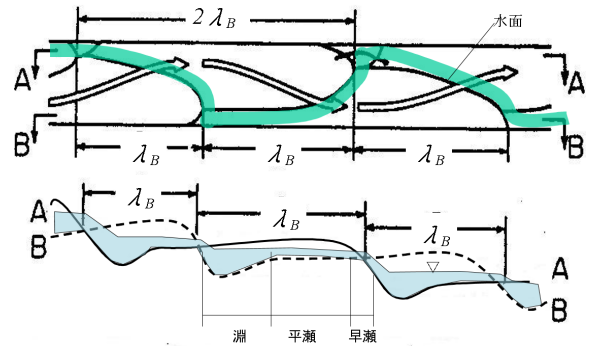


図-24 交互砂州と平水時の滞筋の平面、縦断(文献20)より引用

特徴を把握できる。

図-26 は掘削区間(掘削箇所1の始点~掘削箇所4の終点、約3.0km)の左右岸それぞれの平均河床高の差の経年変化を示す。ここで縦軸は、図-25の左右岸それぞれの河床高の差についての全区間の平均値を示す。同様に図-27は4箇所掘削区間(延べ約1.8km)の左右岸それぞれの平均河床高の差の経年変化を示す。

図-28 は、図-26同様であるが掘削区間毎の左右岸の比高差の経年変化を示す。2極化は、陸域と水域の高低差の拡大を意味して用いられるが、ここでは低水路左右それぞれの平均河床高の差を用いることで、2極化の進行の目安としての簡便な指標として試算したものである。

掘削箇所③については掘削区間の延長が短いことなどが影響して掘削の有無による差は大きくなかったが、他の掘削箇所では、掘削により、2極化の抑制が図られるという予測結果が得られた。

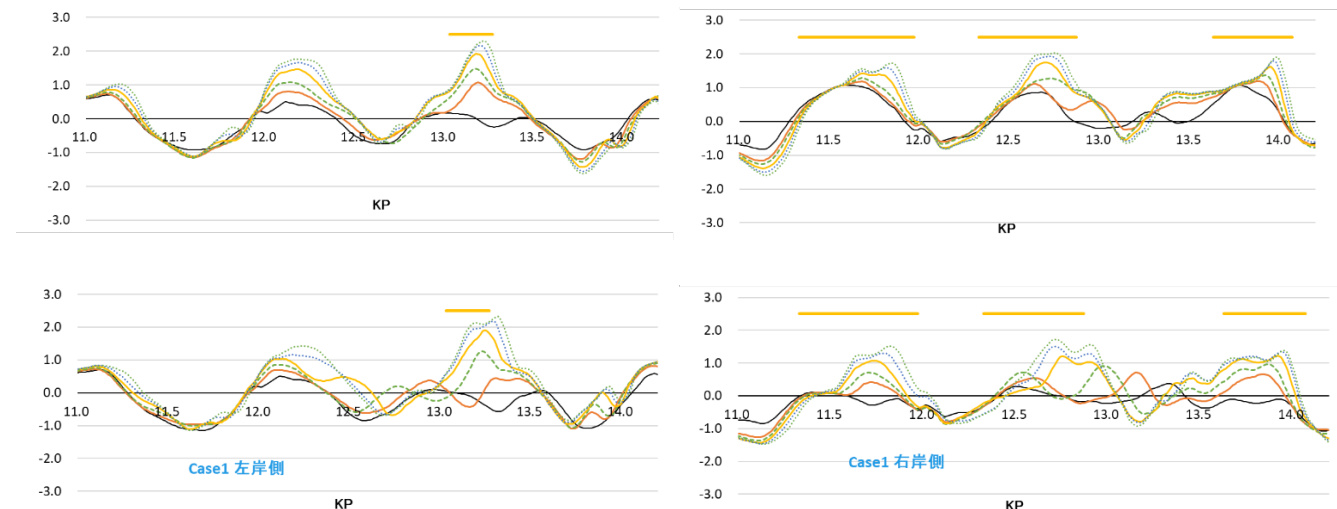


図-25 掘削の有無による河床高の経年変化  
Case0 0年時の平均河床高を基準とする比高、黄横線は掘削区間



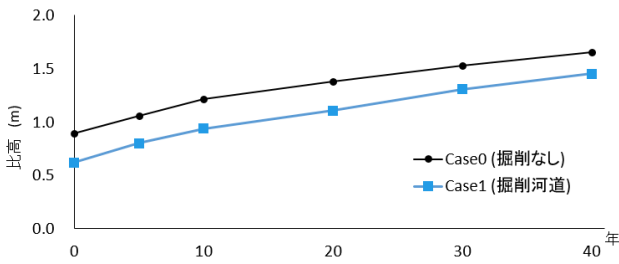


図-26 掘削の有無による左右岸の比高(平均河床高)の経年変化(区間全体)

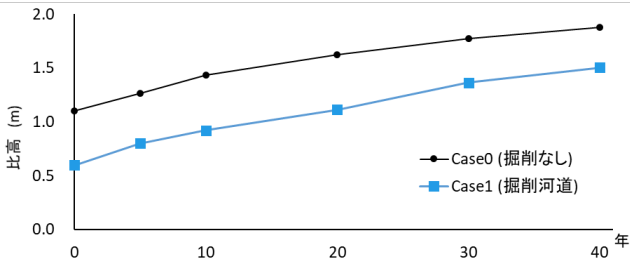


図-27 掘削の有無による左右岸の比高(平均河床高)の経年変化(4箇所掘削区間)

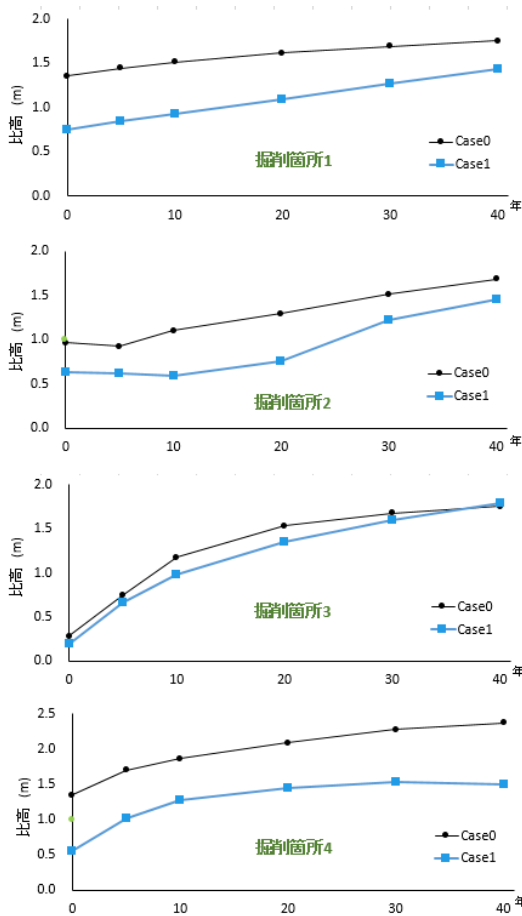


図-28 各掘削箇所の左右岸の比高(平均河床高)の経年変化

#### 4.2.3 予測計算補足(掘削断面について)

本報告では詳細について割愛するが、掘削土量を同じにして、掘削箇所を低水護岸側にしたケース(図-29右)も数値実験上、比較確認している。結果としては中長期的な河道変化や傾向としては、Case1 とほぼ同様であった。それゆえ数値計算上は、ほぼ同様な掘削効果が期待できること、また前述した図-15の模式図のように砂州面の冠水頻度が高まり、植生の侵入が遅れる効果<sup>16)</sup>、サケの産卵床として有利な分流環境<sup>27)</sup>、<sup>28)</sup>などを考え併せれば、そのような選択肢も含めて掘削断面、掘削敷高を微調整していくことが肝要と考える。

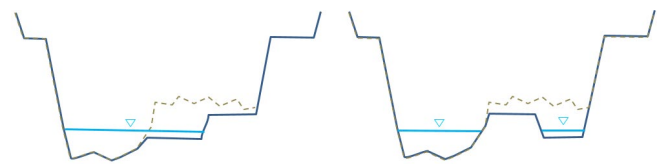


図-29 低水路掘削のパターン  
左 実際の掘削断面(Case1) 右 参考断面

#### 4.3 豊平川の河床微地形の特徴と河道の維持管理

図-30は、河道の長寿命化対策について、図-31を参考に作成した模式図である。堆積傾向のある扇端部(扇状地端部)河道において、陸域と水域の高低差が拡大するといった現象(2極化)および礫河原の樹林化が進み、流下能力が低下することを抑えていくために、定期的な河道掘削等が必要な区間についてのライフサイクルを示す模式図である。例えば裸地から数年経過し、定着したヤナギ林は、冠水時に流下土砂の堆積を促し、2極化の進行を速めるとともに成長に伴い除根などに必要なコストも増加する。このことから適切な管理水準を設定し、メンテナンスサイクルを改善していくことが求められている。同時に掘削と産卵床の保全を両立できるよう、評価とモニタリングを継続しながら、河道の維持管理<sup>29)</sup>、<sup>30)</sup>、<sup>31)</sup>をしていくことが重要と考える。対象区間においては、特に砂州上流側の敷高などは、砂州の冠水頻度や分流の自然形成などに影響し、生物環境の基礎的条件となることから、定期的なメンテナンス(微調整)が1つの課題と考える。維持管理という視点から一般化するためには、侵食堆積傾向、縦断形など場所の条件によって掘削断面設定、掘削ボリューム、掘削頻度など、多岐な絞り込みが求められるが、本論では、場所的にも限定された区間での事例であることを付言する。

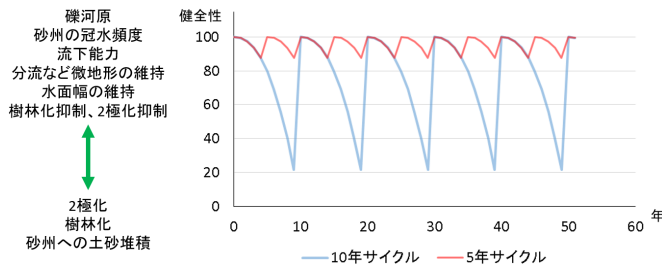


図-30 扇端部河道におけるライフサイクル模式図

【事後保全と予防保全のサイクル(イメージ)】

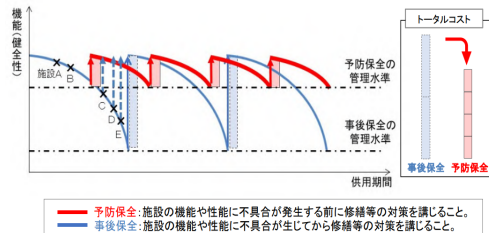


図-31 長寿化対策によるライフサイクルコストの縮減イメージ(H22 国土交通白書から抜粋)

## 5. 総合考察

本研究では、水生生物の生息場や産卵場として重要な機能を有している alcove 地形、砂州前縁部等の交互砂州により形成される微地形に着目した上で、魚類産卵環境を考慮した低水路河道掘削技術について研究を行った。

2章で河道の部分拡幅による河床変動の応答について、水路実験により確認を行った。3章では北海道札幌市を流れる豊平川において、サケ産卵環境に配慮した河道掘削(砂州切り下げ)の検討と、物理生息場モデル(PHABSIM)による環境評価について示した。さらに、4章では河道掘削後、約1年間のモニタリング調査結果と掘削の有無による河床変動予測の比較などから、中長期的な掘削の効果や影響、砂州の固定化、2極化および河床微地形の特徴などを把握した。その結果、堆積傾向のある扇端部(扇状地端部)河道において、交互砂州の特徴を踏まえた適切な河道掘削は、陸域と水域の高低差の拡大を抑制し、サケ産卵環境も含めた河道維持管理に有効であり、河道モニタリングを継続しながら敷高や掘削頻度などの微調整、メンテナンスが肝要である点を示した。

## 参考文献

1) 北海道開発局、(国研)土木研究所寒地土木研究所：北海道の急流河川における河川整備に関する研究、平成27年度北海道開発技術研究発表会、2016。

- 2) 寒地土木研究所水環境保全チーム：冷水性魚類の産卵床を考慮した自律的河道整備に関する研究、平成27年度プロジェクト研究、土木研究所HP、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/pro-8-3.pdf>
- 3) 国土交通省北海道開発局・(国研)土木研究所寒地土木研究所：樹林化抑制を考慮した河岸形状設定のガイドライン(案)、p.51、2011。
- 4) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き、山海堂、p.64、2002。
- 5) Landers, D., Fernald, A. and Andrus, C.: Off-channel habitats In The Pacific Northwest Ecosystem Research Consortium (David Hulse, D. Gregory, S. and Baker, J. Edit), pp.26-27, Oregon State University Libraries and Press, 2002.
- 6) Van Steeter, M.M. and Pitlick, J.: Geomorphology and endangered fish habitats of the upper Colorado River 1. Historic changes in streamflow, sediment load, and channel morphology, Water Resources Research, Vol. 34, No. 2, 1998.
- 7) 永山滋也、原田守啓、萱場祐一：高水敷掘削による氾濫原の再生は可能か？自然堤防帯を例として、応用生態工学、Vol.17, No.2, pp.67-77、2015。
- 8) Nickelson, T. E., Rodgers, J.D., Johnson, S. L. and Solazzi, M.F.: Seasonal Changes in Habitat Use by Juvenile Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*) in Oregon Coastal Streams, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol.49, pp.783-789, 1992.
- 9) 国土地理院、地図・空中写真閲覧サービス、<http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>、2016。
- 10) 矢野雅昭、布川雅典、谷瀬敦：中規模河床波発生領域による alcove 形成条件に関する数値計算、土木学会北海道支部論文、Vol.73、2017。
- 11) 萱場祐一、傳田正利、島谷幸広：千曲川におけるワンドの実態とその特徴に関する基礎的研究、環境システム研究、Vol. 25、pp.611-616、1997。
- 12) 片岡朋子、布川雅典、谷瀬敦：豊平川中流部における小規模掘削によるサケ産卵環境の創出、国土交通省北海道開発局第61回(平成29年度)北海道開発技術研究発表会論文
- 13) 黒木幹男、岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集、第342号、pp.87-98、1984。
- 14) 原田守啓、高岡広樹、大石哲也、萱場祐一：扇状地の中小河川における部分拡幅工法の有効性、河川技術論文集、

- Vol.21, pp.253-258, 2015.
- 15) 山口昌志、柿沼考治、井上卓也、清家拓哉、加藤一夫：軟岩洗堀を考慮した大型模型実験を用いた河床低下対策手法の評価について、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73、No.4, pp.I\_853-I\_858, 2017.
- 16) 国土交通省：水文水質データベース、<http://www1.river.go.jp/>
- 17) 五十嵐拓実、安田浩保：流路変動の発達機序の解明に向けた水表面と水底面の曲面形状の対応関係の把握、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4, pp.I\_1123-I\_1128, 2018.
- 18) 白戸暢彦、田代隆志、奥山昌幸：豊平川の河道変化に対する対策工の検討について、平成 27 年度北海道開発技術研究発表会、2016.
- 19) (一社)iRIC-UC：Nays2DH Solver Manual、<https://i-ric.org/ja/>
- 20) 野上毅、渡邊康玄：急流河川におけるハビタットの定量的区分、第 46 回北海道開発技術研究発表会、2003.
- 21) 玉井信行、奥田重俊、中村俊六：河川生態環境評価法、東大出版会、2000.
- 22) 矢野雅昭、平井康幸、谷瀬敦：物理環境要素の計算値を用いた PHABSIM によるシロザケ産卵適地の推定、寒地土木研究所月報、No746, pp17-24, 2015.
- 23) 鈴木俊哉：遊楽部川におけるサケの自然産卵環境調査、さけ・ます資源管理センターニュース、No.4, 1999.9
- 24) 豊平川さけ科学館：<https://salmon-museum.jp/>
- 25) 土木研究所水文チーム：流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver.1.2, 2016.
- 26) 池田駿介、Gary Parker、澤井健二：河川の蛇行に関する統一見解、土木学会、水理講演会論文集、第 24 巻、pp.339-349, 1980.
- 27) 片岡朋子、布川雅典、有賀望：豊平川におけるサケ自然産卵場再生試験、平成 30 年度北海道開発技術研究発表会、環 17, 2019.
- 28) 有賀望、森田健太郎、片岡朋子、植田和俊、向井徹、藤井和也、布川雅典、有賀誠、丸山緑、渡辺恵三、佐藤信洋、中村慎吾、西谷航平、岡本康寿、大熊一正：豊平川における 2018 年サケ産卵環境改善工事、湧水産卵場の復元、札幌市豊平川サケ科学館研究報告、2019.
- 29) (財)河川財団：河川研究セミナー講演録、河川維持管理、2015.
- 30) 内田有吏子、岩崎理樹、山口里実、鈴木英一、清水康行：急流都市河川豊平川における河道内構造物の維持管理および植生管理に関する検討、平成 23 年 9 月出水を受けて、土木学会、河川技術論文集、第 18 巻、pp.203-208、2012.
- 31) 国土交通省河川環境課：大河川における多自然川づくり、Q&A 形式で理解を深める、2019.



### 11.3.3 中小河川における環境の保全に資する河道計画・設計手法に関する研究

担当チーム：流域水環境研究グループ（自然共生研究センター）  
 研究担当者：中村圭吾、林田寿文、河野誉仁

#### 【要旨】

本研究は、効果的・効率的な河道計画・設計プロセスの提案、および、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの開発を行うことを目的とする。この課題に対し、令和元年度は、「3次元の多自然川づくり支援ツール」を含めた、事業規模に応じた効果的・効率的な河道計画・設計プロセスについて整理した。令和2年度、令和3年度は、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの開発として、バーチャルツアーと仮想現実を用いた環境予測・評価システムとして河川景観評価ツールを完成させた。本稿ではそれらの概略について説明する。

キーワード：多自然川づくり支援ツール、環境評価、中小河川、シミュレーション、iRIC、EvaTRiP

#### 1. はじめに

中小河川での抜本的な川づくりは災害復旧時にも行われ、この場面でどれだけ充実した計画を立案できるかが重要である。しかし、災害復旧事業は厳しい時間的制約の中で行われるため、環境や人の利用にまで配慮を行き届かせることは難しい。そのため、きめ細やかな配慮とその評価を迅速に行うことができるような、多自然川づくり支援ツールが求められている。特に、多自然川づくりでは、操作性の良い地形編集機能や環境評価機能が重要であるが、現在使用されている様々な水理計算ソフトウェアにはこのような機能を有するものがない。また現在では、3次元測量技術の高度化やその成果をそのまま用いる CIM（Construction Information Modeling / Management）も浸透しつつあるものの、これらの持つ利点を川づくりの場面で活かせるような河道計画のプロセスが確立できていない。

このような課題に対し、土木研究所自然共生研究センターでは、災害復旧事業での活用も念頭に置き、今後の3次元測量や CIM、VR（仮想現実）空間への活用も踏まえた効果的・効率的な河道計画・設計プロセスの提案、および、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの提案を行った。本報告ではそれらの概略について説明する。

#### 2. 新しい河道設計のプロセス

図-1 は河道設計プロセスの概念図であり、左側が現行、右側が現在検討中の新しいプロセスを示している<sup>1)</sup>。大まかな流れは、1)河道の取得（測量）・計画流量の算定→2)一次検討断面の設定→3)水理計算による検討→4)HWLによる安全性評価→5)設計断面という流れである。

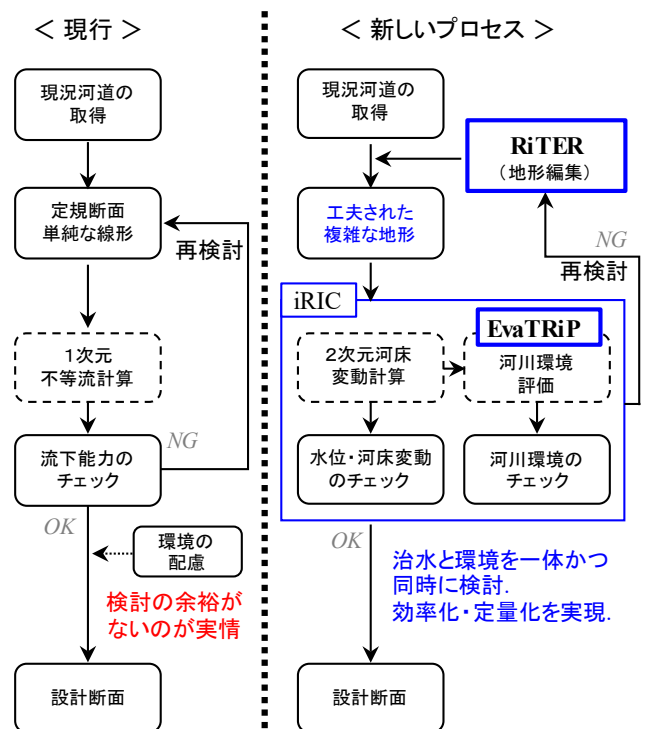


図-1 川づくりにおける横断面の検討方法

現況では、

- ・1次元計算の検討に留まり瀬淵などは評価できない。
- ・流下能力を決めた後に環境の配慮を行うため、川の基本構造に大きくは反映できない（複雑な地形の検討が困難）。
- ・時間がないという理由で、2)で設定する単純な断面がそのまま設計断面になってしまうことがある。

といった多自然川づくりを進める上での課題が存在する。また、前述のような3次元測量の成果を活かせるようにはなっていない。これを乗り越えるためには、プロセスの見直しが必要となる。具体的には、①2次元河床

変動計算を導入すること、②①の計算と同時に環境評価を実装すること、③計画地形の見直しやきめ細やかな配慮を実装するための地形編集を行えることが重要である。ただし、現行のフローから逸脱するのは混乱を招くことが想定されることから、現行制度に則しながらも上記の新たな内容が自然と織り込まれる形が望ましいと考えている。

### 3. 3次元の多自然川づくり支援ツール

#### 3.1 iRIC ソフトウェアをベースとしたツール開発

技術は日進月歩で進化している。かつては限られた研究者・技術者のみを取り扱うことのできた河床変動計算は、特に本邦においてはiRICソフトウェア<sup>2)</sup>の登場により広く普及し、業務でも数多く利用されている。iRICは無料であるだけでなく、非常に扱い易い設計となっていることも大きな特徴である。そこで、このソフトウェアをベースとし、前述の①～③のプロセスを追加することで、3次元の多自然川づくり支援ツールとして機能の高度化を進めている。本支援ツールを構成するツールのうち、地形編集ツールの詳細な機能、(RiTER Xsec)、河川環境評価ツール (EvaTRiP、EvaTRiP Pro) の機能については、11.2.3を参照されたい。

### 4. 効果的・効率的な河道計画・設計プロセスの提案

国土交通省が進めている河川CIMは、建設事業の各段階において3次元モデルの活用を促しており、航空レーザ測深(以下、ALB)による地形調査から、3次元設計、ICT建設機械を使った3次元施工、そして3次元モデルを活用した河川維持管理とつながることにより大幅な生産性向上が期待されている。しかしながら、現行では3次元データを2次元図面に落とし、2次元ベースで設計した後、再度3次元モデルを構築するなど、特に設計部分で非効率な方法が行われている。そのため、一連での3次元モデルを用いた河川設計法の確立が喫緊の課題である<sup>3)</sup>。

そこで、自然共生研究センターでは、河川CIMにおけるデータ運用を、データをアーカイブし管理する部分と、実際の施工現場での運用である部分とに分け、相互のやり取りを想定した図-2のプロセス全体の運用を提案している。

#### 4.1 河川CIMの流れ

データ管理については、グリーンレーザ等による広域的な点群測量と各々の現場単位で行われている測量成果について、データの範囲や解像度、種別に応じて国

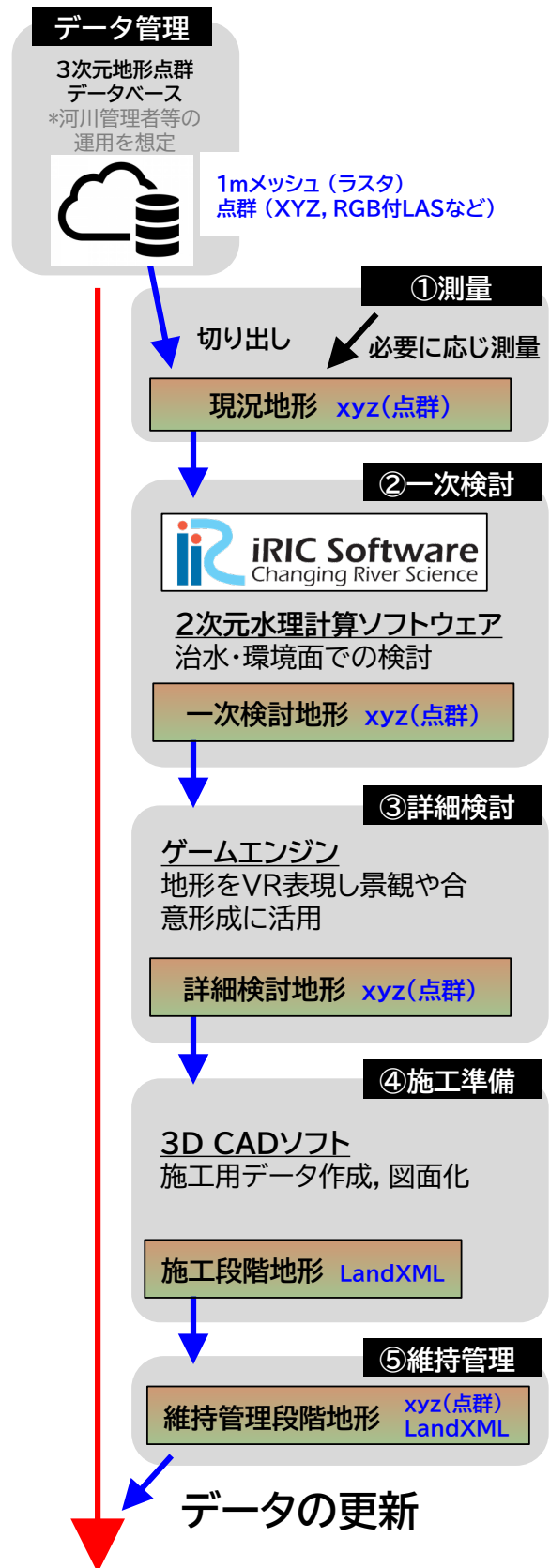


図-2 効果的・効率的な河道計画・設計プロセス

土地地理院と河川管理者等が分担・管理し、網羅的にデータベース化されている状況となることを想定する。こ

こでの課題は次章で述べるが、すでに独自に点群データをアーカイブ化し、公開している自治体もある<sup>4)</sup>。

施工現場での運用の第一段階となる①測量については、基本的には前述のデータベースから参照できることを想定するが、不足がある場合は必要に応じて測量を実施する。②一次検討では、2次元水力計算ソフトウェア (iRIC ソフトウェア<sup>2)</sup> など) を用いた治水・環境の検討を行う。③詳細検討では、ワンドや細流などの設計や、景観設計などを行う。ここではゲームエンジンを活用し地形を仮想現実上に投影することで、人間の視点や感じ方を加味した設計ができるようになる。得られた詳細検討地形を3D CAD ソフトウェアを用いて LandXML など ICT 施工に必要なデータ形式に変換し、ICT 建機によって施工する (④施工段階)。完成した新たな地形を⑤維持管理段階でデータベースの更新を行い、3次元管内図などにより活用する。一次検討段階の計算ソフトや景観設計、詳細設計に用いるソフトについては、ここに挙げている他にも無料や非常に安価に利用できるものが増えている。一般的に使用できる形でデータをやり取りすることにより、多様なソフトウェアの活用など、汎用性の高いものとなるよう検討を進めている。

## 4.2 河川 CIM の各段階の現状と課題

### 4.2.1 現況地形

現況地形の測量は、直轄河川においてはグリーンレーザによる測量<sup>3), 5)</sup>が一般的となっており、透明度が高く全川にわたってグリーンレーザで測深できる場合はあまり問題がない。濁りや水深の問題などでグリーンレーザが使用できない、あるいは部分的にしか使用できない場合は、音響測深や実測による補測が必要であり、コストの上昇やデータの統合の最適化などの問題を検討する必要がある。実測の場合はそもそもデータが3次元的でない、という問題がある。運用するデータとしては、目的によって異なってくるが、1m グリッドの DEM (数値標高モデル) で整備すれば利用目的のかなりの部分をカバーできると考えており、国土交通省のマニュアル (p.3-17)<sup>5)</sup> も 1m を標準としている。活用するデータとしては XYZ の点群データが中心となる。DEM の元となるグラウンドデータやオリジナルデータでは RGB (色の情報) や反射強度を記録することも可能な LAS 形式で保存しておく、景観の検討や河床材料の分析 (開発段階<sup>6)</sup>) などにも活用できる可能性がある。

### 4.2.2 一次検討地形

一次検討は、治水事業で言えば、計画流量から一次計

画断面を設定する段階となる。3次元設計の考え方としては大きく2つあり、ひとつは「従来の図面を用いた2次元設計の手法を活かし、結果として3次元設計となる手法」、もうひとつは「3次元のまま設計する手法」である。前者は、これまでの設計技術の経験が生かせる方法で、後者は新しいタイプの設計技術や経験が必要と考えられる。土研では前者として RiTER Xsec<sup>7)</sup>、後者として、九州地方整備局九州技術事務所と連携しながら RiTER VR の開発を行っている。iRIC ソフトウェアをベースとした RiTER Xsec、河川環境への影響を一次検討段階でチェックするツール EvaTRiP<sup>7)</sup> や EvaTRiP Pro については、11.2.3 を参照されたい。を iRIC ソフトウェアのソルバ (解析機能) として開発した。

### 4.2.3 詳細検討地形

一次検討で治水と環境の両面からチェックした河道に、さらにワンドや細流、あるいは水際などのディテールや周辺も含めた景観設計を行うのが詳細検討の段階である。詳細検討はすべての河川設計に行うものとは考えていない。河川の重要度などによっては実施せずに、一次検討から施工段階に行く場合もあるであろう。ただし、その場合にこれまで“現場合わせ”として、実施してきたワンドや瀬淵の創出、寄せ石などの工夫を3次元の図面にどう反映させるか、完成検査はどうするかなど、実務的には制度設計上の工夫がさらに必要である。

詳細検討については、九州技術事務所を中心に土研とも連携しながら RiTER VR の開発を行っている。これはゲームのソフトウェアに用いられるゲームエンジンである Unreal engine を河川の設計に用いようとするもので、前節で作成された3次元データを読み込み、その表面に様々な素材のテクスチャなどを張り込むことにより、比較的簡易にリアリティの有る仮想現実 (VR: Virtual Reality) 空間を作成できるものである。VR 空間を作成することのメリットは、単に施工後の地形や景観が分かりやすくなるということだけではない。VR ヘッドセットを用いれば、その場に立ったときの奥行きや高さ、景色の移り変わりといった、図面だけでは困難だった部分までも認識を共有でき、地域住民などの利害関係者や有識者等との合意形成の場面では強力なツールになりうる。このソフトウェアには、粘土模型のような直感的な操作で、盛土・掘削を行う機能も備わっており (具体イメージは参考資料<sup>8)</sup> の動画参照)、VR ヘッドセットをつけた複数人が同時に確認しながら地形を変え、合意形成を進めるといったことも可能



である。既存データを読み込み背後の地形や画像を活用することで、さらに広域の景観設計に活用することも出来る。この詳細段階では、川づくりの設計者のニーズを満たし、施工に直接データ移行ができる VR ソフトの早急な開発が望まれる。

上述した様に事業規模に応じた効果的・効率的な河道計画・設計プロセスを構築しつつある。その結果、周辺環境に配慮したきめ細やかな地形編集に基づいた河川工事、工事前後での影響評価を行った上での深化した多自然川づくり、VR 技術による景観評価などが可能となり、質の高い社会資本整備の創出へ大きく貢献することが期待できる。

#### 4.2.4 施工段階地形

一次検討あるいは詳細検討で得られた地形（座標）データは、そのままでは ICT 建機にインプットできない。また、3次元設計を行っているとしても、既往の各種図面は施工から検査までの各段階で必要となるため、3D CAD ソフトウェアを利用した施工用のデータ処理・作成、図面化が現状では必要である。ICT 建機で利用できるのは主に LandXML 形式の TIN（不整三角網）データであり、単純には詳細検討段階の地形データを LandXML 形式で出力すれば良いように思われる。しかし、例えば ICT 建機が受け取れるデータ量に制限があることやバケット幅よりも小さい TIN が認識されると施工速度の低下や動作エラーを生じるなど、建機の特性によって細かな課題が存在し、現状では、3D CAD を使って施工段階のファイルを微調整したものを利用するのが現実的であると考えられる。これらの課題は今後、i-Construction に携わる関係者間で課題やノウハウを共有し、解決することが必要である。

#### 4.2.5 維持管理段階地形

3次元川づくりの恩恵を最も受けるのは維持管理である。3次元管内図<sup>9)</sup>と呼ばれる河川マネジメントツールがその中心となっていく。これまで管理のベースマップである2次元の管内図が3次元で表現されるものである。実際にどこまでのデータをここに統合していくか、ビューワはどのソフトを使用するのか、全国的に統一のものが作れるかなど、今後、議論すべき課題は多い。河川事業における本格的な維持管理をにらんだデータ運用の在り方は検討すべき課題である。

### 6. バーチャルツアーと仮想現実を活用した河川景観評価手法の提案

公共事業を実施した後の景観を住民などに伝えるために、これまでスケッチパース、フォトモンタージュ、

模型などが用いられてきた。しかし、これらのツールでは、固定された視点からしか確認できない、実際のサイズ・規模感・周辺との関係が分かりづらい、といった課題があった。これらの課題に対して、近年、注目を集めているのが「バーチャルな空間」の利用である。「現実」にある世界を「バーチャルな空間」に表現することで、その場を訪れなくても、景観を確認することができる。さらに、「現実」をベースに将来の変化を「仮想現実」として表現すれば、景観がどのように変化するのも確認することができる。そこで、本章では「現実」と「仮想現実」の両者を「バーチャルな空間」に作り出すことで、景観を確認できるツールの提案をする。

#### 6.1 ゲームエンジンを使った「仮想現実」

近年ではゲームエンジンを使った「仮想現実」の作成が活発化している。ゲームエンジンとは、文字通りゲーム業界で利用されてきた仮想現実を作成するためのソフトウェアである。この仮想現実で表現される世界の景観が、現実の世界にかなり近づいたことで映画といったメディアに始まり、今や建築や製造業、都市計画など様々な分野で活用されるようになってきた。ゲームエンジンには、無償利用できるものがあり、ソフトにコストをかけることなく仮想空間（仮想現実）の構築が可能となっている。

#### 6.2 移動できる「バーチャルツアー」

バーチャルツアーとは、パソコンやスマートフォン上で指定した地点において周囲の景観を見渡せるとともに、地点から地点へと移動し、移動先でも周囲の景観を確認できるものである。最近では、家にいながら観光地を旅することができるツールとしても利用されている。河川改修を予定している地域で360度写真を撮影して整備前の「現実」を確認するバーチャルツアーと、ゲームエンジンを用いて整備後の「仮想現実」を確認するバーチャルツアーを作成することで、同じ地点（視点場）からの景観を整備前後で比較することができる。

#### 6.3 整備前後の景観評価

整備前後の景観を比較する場所として、河川改修を予定している梅田川（愛知県を流れる二級河川）を選定した。検討を行う区間は、梅田川で今後改修が予定されている KP3.6～KP4.6（浜田川との合流点付近含む）である（図-3）。梅田川では、河道掘削や引提などの改修や公園や桜並木の整備なども予定されている。

##### 6.3.1 整備前後のバーチャルツアー作成

整備前の景観として、360度写真の撮影を図-1で示す赤点の全84か所で行った。そして、撮影した360度写真を使ってバーチャルツアーを作成した（図-4、6）。

整備後の景観は、現在の地形データをベースに、3D CAD ソフトで河川改修後の形状を作成し、ベースとなる地形を構築した。リアリティのある「仮想現実」を作成するためには、現在の地形を正確に再現する必要がある。そこで、近景（数メートル）や中景（数十メートル）の地形は河川管理者が所有する ALB（航空レーザ測深）と河川 LP（レーザプロファイラ）データ、遠景（数百メートル以上）の地形は3D 地図プラットフォーム（Cesium ion）で配信されている地形タイルデータを利用した。

そして、整備予定の桜並木や公園などを配置し、より整備後に近い状況を作成した。完成した「仮想現実」の中で、整備前の景観を表示するバーチャルツアーと同じ地点から 360 度画像を出力し、同じ視点場から比較できるバーチャルツアーを作成した（図-5、6）。

6.3.1 バーチャルツアーによる整備前後の景観比較

作成した 2 つのバーチャルツアーには、同じ場所に赤丸が表示されており（図-4、5）、クリックすることでその場所へ移動し、好きな場所から改修前後の風景を見渡すことができる。さらに、河川内空間だけではなく背後地にも移動することができ、「河川がある空間」としての評価や比較も可能となっている（図-7）。

6.4 バーチャルツアーや仮想空間の適用について

本ツールの提案を行うにあたり、近年活用が進んでいる 3 次元データを景観の予測・評価方法に活用するための手法について課題認識を筆者らは持っていた。測量段階と設計、施工段階では 3 次元データの活用が進んでいるが、計画段階では従前の模型やパース、イラストが活用されている。設計意図を伝えるためのデータの連続性にやや劣るため、パースやイラストをもとに設計を進めた場合に、デザイン意図が伝わらず出来上がった空間が異なっているということがあるからである。しかしながら、上述した効果的・効率的な河道計画・設計プロセスを加味した上で、バーチャルツアーや仮想現実を活用した河川景観評価手法の提案をしたことにより、これらの課題は解消できると考えている。また、図-8 に示す水辺空間のデザインにも貢献することが出来る。特に、見方の評価や動線の評価を行う際には、有効なツールとなりうる。

今後、河川整備に BIM/CIM やゲームエンジンなどの可視化手法が用いられることが一般的になると考えており、その際、本研究の知見は先行事例として参照されることで質の高い改修事業へとつながると考えている。



図-3 本ツールを適用する対象区間（堤内地含む）



図-4 バーチャルツアー+360度写真による改修前の状況



図-5 バーチャルツアー+仮想現実による改修後の状況  
(位置図：左上)

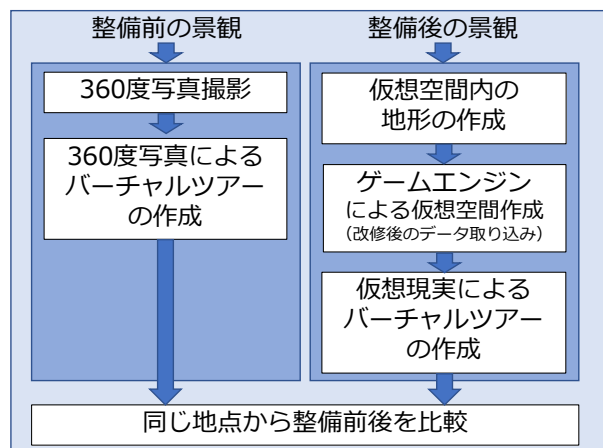


図-6 バーチャルツアーによる整備前後の景観比較



### 6.5 景観評価システムの今後の展開

バーチャルツアーを用いることにより、河川の視点場から見える全周囲の景色を再現することが可能となる。そのため、背後地との関係性がシームレス（思考を途切れさせず）に理解できるようになる利点がある。また、バーチャルツアーをWEBで公開することで、臨場感のある空間を、住民を含めた関係者も利用でき、理解の増進によるコミュニケーションの円滑化につながると考えている。なお、バーチャルツアーや仮想現実を作成する段階では、BIM/CIMなどの3Dモデルを活用しながら事業者、設計者での円滑な共通認識の共有が可能になる。よりよい空間を計画・検討する際に3次元技術の活用が進んできており、その3次元空間の評価手法の一つとしてバーチャルツアーが活用できると考えている。

これまでの河川事業は河川区域である堤外地と堤防までが主な対象地となっており、堤内地を含んだ景観検討はほとんど実施してこなかった。しかしながら、本ツールは対象範囲を制限せずにあらゆる場所で実施することができる。

### 7. まとめ

本研究では、効果的・効率的な河道計画・設計プロセスの提案、および、背後地も視野に入れた環境予測・評価システムの開発を行った。本プロセス、システムが、幅広い技術者に活用されることで、河川整備をはじめ道路や農業などの他分野での活用にも貢献し、更なる社会資本整備の質の向上が図られることが期待できる。

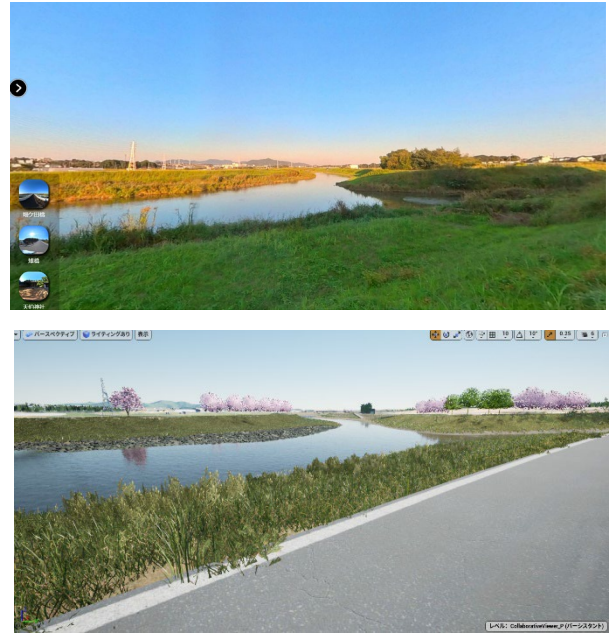


図-7 整備前後の景観比較（上図：整備前、下図：整備後）

### 参考文献

- 1) 林田寿文、大槻順朗、中村圭吾、萱場祐一：新しい河道計画プロセスを念頭に置いた多自然川づくり支援ツールの開発、第74回年次学術講演会講演概要集、(公社)土木学会、2019.9
- 2) iRIC ホームページ：http://i-ric.org/ja/
- 3) 中村圭吾：河川 CIM で進化する多自然川づくり、RIVER FRONT vol.88, 2019.
- 4) 静岡県ポイントクラウドデータベース、https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-point-cloud-db
- 5) 河川管理用三次元データ活用マニュアル（暫定版）、国土交通省水管理・国土保全局、2019.6

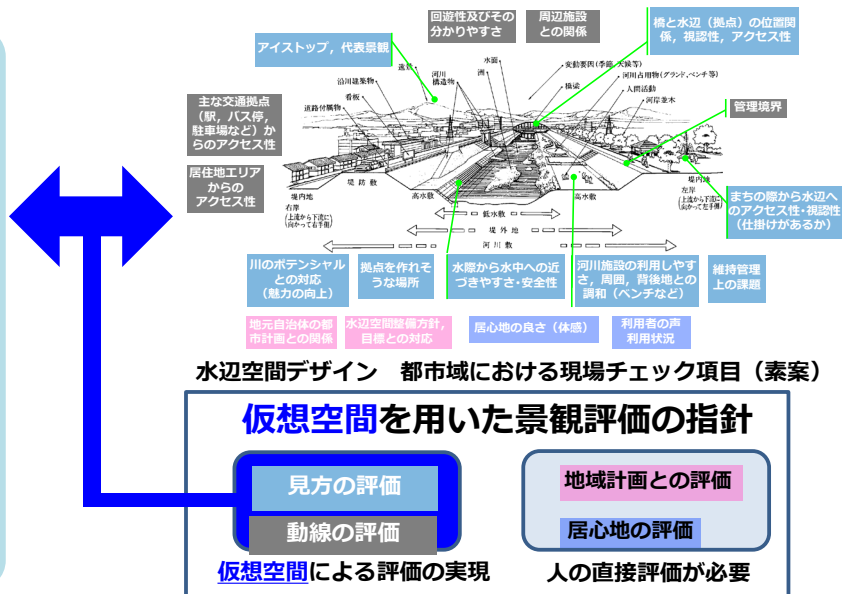
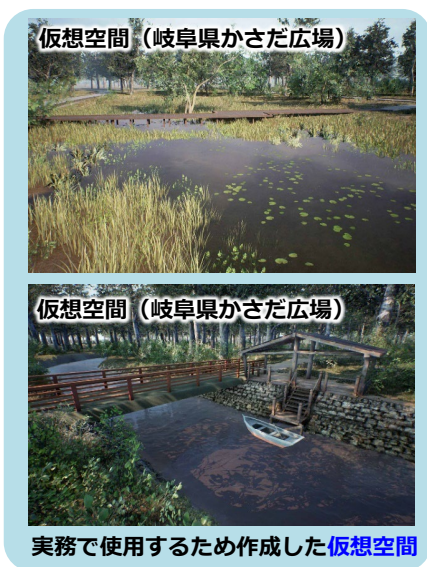


図-8 VR技術（仮想現実）を用いた水辺空間デザインへの活用（背後地も含めた景観評価）の実用化



## 11 治水と環境が両立した持続可能な河道管理技術の開発

- 6) Eren, F., Pe'eri, S., Rzhano, Y., Ward, L. : Bottom characterization by using airborne lidar bathymetry (ALB) waveform features obtained from bottom return residual analysis, Remote Sensing of Environment 206, pp260-274, 2018.
- 7) 自然共生研究センター：簡易河川環境評価ツール EvaTRiP を用いた治水と環境を両立させる川づくり、土木研究所 WEB マガジン, Vol.53
- 8) YouTube : <https://youtu.be/mjr7sXTRAcw>
- 9) 国土交通省河川管理課河川保全企画室：河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）, 2020., [https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kasen/pdf/3jigen\\_manual.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/3jigen_manual.pdf)