

8.5 河川地形改変に伴う氾濫原環境の再生手法に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：自然共生研究センター

研究担当者：萱場 祐一、大石 哲也、永山 滋也

【要旨】河道掘削を活用した氾濫原環境の再生を効率的に進めるために、氾濫原の指標生物であるイシガイ類の生息環境を評価軸として、氾濫原環境の評価手法、具体的な掘削手法を開発、提案するとともに、現地適用から課題の抽出と手法の改善を行った。まず、木曽川を事例として、直轄河川で整備されている既存データセットを活用して、現況の氾濫原環境を評価し、保全・再生の適地を抽出する簡易な手法を開発した。次に、氾濫原環境の再生に効果的な河道掘削手法として、濁水位～平水位の掘削高さ、自然堤防状の微地形の初期設定、水域形状（水深、水域幅、堆積泥厚）を提案した。最後に、氾濫原環境評価に用いるイシガイ類生息可能性モデルについて、現地適用による検証から、異なる特性を持つ木曽川以外の河川にも適用可能なモデルを構築した。また、掘削手法については、現地適用による検証から有効性が確認された。さらに、本研究全体に関わる課題として、河道内氾濫原の成立過程の一端を整理するとともに、原生的氾濫原と河道内氾濫原について洪水攪乱の観点からレビューを行い、高水敷掘削による氾濫原再生の意味と課題について整理した。

キーワード：河道内氾濫原、直轄河川、自然再生・保全、河道掘削、イシガイ科二枚貝類

1. はじめに

河川が形成する氾濫原は物質循環や生物多様性にとって重要な場である¹⁾。我が国の直轄河川区間は、主に河川中下流部に位置しており、かつて広大な氾濫原を有していた。しかし、現在、氾濫原は堤外地に制限され（以下、河道内氾濫原という）、流送土砂量や流量等の変化に伴い、著しく変質してきている²⁾。それゆえ、河道内氾濫原の保全や再生は希求の課題であり、治水対策と調和する現実的な対策や保全・再生手法の開発が求められている。

多くの直轄河川では、河床低下に伴う陸域の固定化とそれに伴う樹林化が進行しており、整備上の課題となっている。その対策として、多くの場合、河道掘削（高水敷の切下げや低水路の拡幅）が実施されている。河道掘削は、相対的に低い地盤面を創出し、増水時に冠水し易い領域を形成する行為であることから、氾濫原的な環境の創出と調和的であり、治水と環境の両立を図る手法として期待される。

本研究課題では、氾濫原を含む低地河川生態系の指標性が高いとされるイシガイ科二枚貝類（以下、イシガイ類）³⁾を指標生物として用い、①再生すべき氾濫原環境の抽出技術の開発、②氾濫原環境の再生に資する河道掘削手法の提案、それらの成果の③個別河川への適用と課題の抽出および氾濫原再生手

法の改善を行うことを目的とした。また、本研究全体に関わる内容として、河道内氾濫原の成立過程および高水敷掘削後の地形変化に関する洪水攪乱に関連した物理・水文過程について整理を行った。

2. 研究方法

2.1 再生すべき氾濫原環境の抽出技術の開発（①）

本節では、木曽川のセグメント2区間を事例として開発した氾濫原環境評価（再生・保全適性地の抽出技術）のプロトコルとその手法を示し、次章 3.1 において本評価手法の検証結果を示す。なお、これらの内容は、論文⁴⁾として発表したものを簡略したものであり、詳細および参考文献はそちらを参照いただきたい。

木曽川のセグメント2区間における既存研究から、氾濫原水域（ワンドやたまりを指す）の冠水頻度が、個別水域におけるイシガイ類の生息状況を最もよく説明する因子であることが報告されている²⁾。そのため、河道内の平面的な冠水頻度の分布を推定することができれば、イシガイ類の生息可能性を見積ることが可能となり、氾濫原環境の評価軸として用いることができると考えた。

開発した河道内氾濫原環境の評価手法のプロトコルを図1に示す。まず、①冠水頻度を用いてイシガ

イ類の生息可能性を予測する回帰モデルに基づく評価マップ（回帰モデル評価マップ）と、②氾濫原水域の有無を表すマップ（氾濫原水域マップ）を作成する。回帰モデル評価マップは、事前に作成した冠水頻度を面的に表すマップ（冠水頻度マップ）と、冠水頻度の関数として構築された回帰モデルを使って作成し、モデルの計算値に基づき3段階の評価を与える。氾濫原水域マップは、氾濫原水域の有無に基づく2段階評価で表す。次に、③回帰モデル評価マップと氾濫原水域マップの評価の組み合わせから6段階の評価区分を設定し、それを面的に展開することで、総合評価マップを作成する。これにより、対象区間内における河道内氾濫原環境の現状を評価し視覚化する。

汎用性および簡便性の観点から、使用するデータは直轄河川で一般的に利用可能なデータセットとした（図1）。なお、回帰モデルについては、ここ（木曾川のセグメント2区間）で構築したものを他の河川の評価に使用することも可能であるが、後述するように特性が異なる河川においては別に構築した回帰モデルを使用する必要がある（3.3参照）。

①回帰モデル評価マップの作成

1) 冠水頻度マップの作成

水位観測所における日水位データと横断測量データを用いて、冠水頻度マップを作成する。

まず、各水位観測所における10年分の日水位データを基に、水位観測所地点における水位変動特性を「標高」と「その標高を水位が超過して再度下回る回数」により表す水位超過回数曲線として整備する。この曲線のピークは平水位よりやや高位に出現し、ピークから右側は、任意の高さが増水によって冠水する回数を表すことから、氾濫原の冠水指標となる。次に、各水位観測所で得られた水位超過回数曲線を縦断的に内挿して、任意の河川断面における水位超過回数曲線を生成する。そして、生成された任意断面の水位超過曲線を、対応する定期横断測量線のLHデータと照合することにより、横断測量線上の任意地点の標高に対応する水位超過回数が求まる。これを冠水頻度とみなし、横断測量線上の各測点に与え、SHPデータとして整備する（図2a）。

続いて、このSHPデータからTINデータを生成して空間内挿を行い、空間的な統計処理を行うためにTINデータを10mメッシュのラスタデータに変換した。さらに、別途作成した50mメッシュのタイル

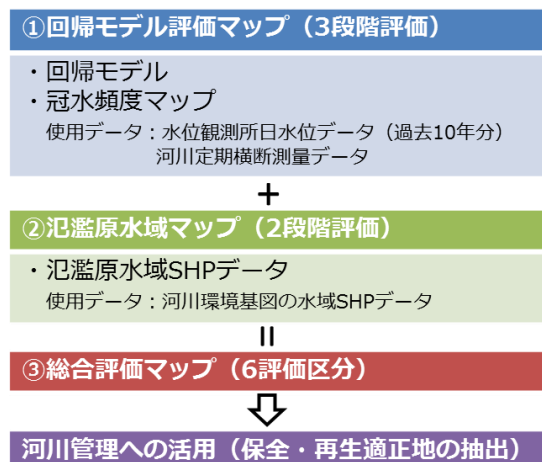


図1. 開発した河道内氾濫原環境の評価および保全・再生適正地抽出手法のプロトコル。

ポリゴンの各メッシュに含まれる10mメッシュラスタデータの最大値を抽出して、冠水頻度マップを作成した（図2b）。

2) 回帰モデルの構築

統計解析を用いてイシガイ類の生息有無を予測する回帰モデルの構築を行う。ここでは、木曾川セグメント2区間の対象区間内に存在する37箇所の氾濫原水域でイシガイ類の生息有無調査を実施した。また、Negishi et al. (2012)⁵⁾で使われた地形DEMと水位DEMの重ねあわせから各水域が本川と連結する水位標高を冠水する高さとし、この各水域の標高と最寄りの横断測線における水位超過回数曲線を用いて、各氾濫原水域の冠水頻度を算出した。

イシガイ類の生息有無を応答変数、冠水頻度を説明変数とした一般化線形モデルによるロジスティック回帰分析（確率分布：二項分布、リンク関数：ロジット）を行い、統計的有意性を確認し、イシガイ類の生息可能性を予測する回帰モデルを構築した。

3) 回帰モデル評価マップ

冠水頻度マップから得られる各メッシュの冠水頻度の値を、構築した回帰モデルに代入することにより、イシガイ類の生息可能性を示す0から1までの値（以下、モデル評価値）が各メッシュに与えられる。これを3段階評価に変換し、回帰モデル評価マップとした（図2c）。3段階評価は、モデルで描かれる回帰曲線と、各水域の生息有無を表すプロットとの関係から、0.75以上の値を「高」、0.15以上0.75未満の値を「中」、0.15未満の値を「低」と定義した。

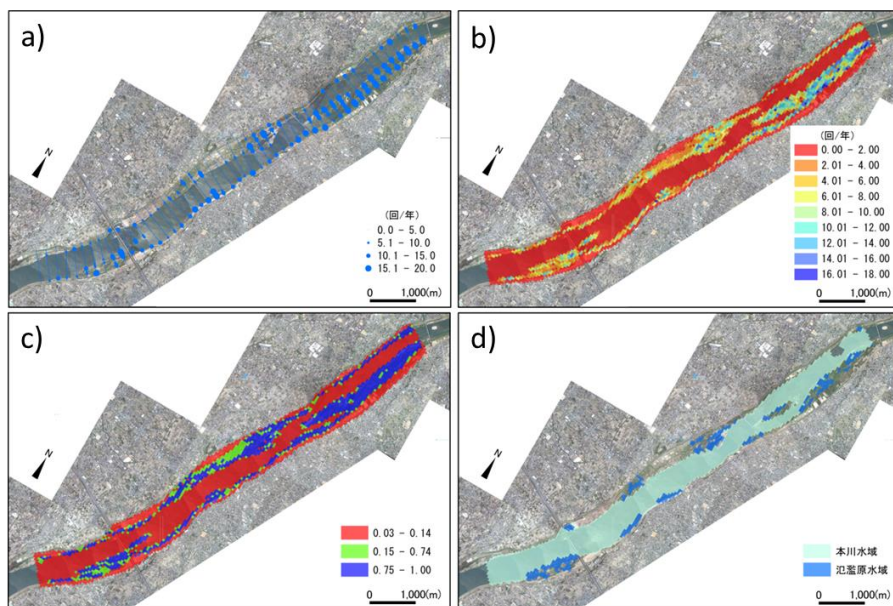


図2. a)横断測線上の各測点(ポイントデータ)に与えた冠水頻度、b)それを面的に展開して50mメッシュ(ポリゴンデータ)で整理した冠水頻度マップ、c)同メッシュ上に回帰モデルによる評価値を3段階で表した回帰モデル評価マップ、d)同メッシュ上に氾濫原水域の有無(2段階評価)を表した氾濫原水域マップ。永山ほか(2014)⁴⁾から引用

②氾濫原水域マップの作成

対象区間における河川環境基図の水域 SHP データを GIS 上で表示し、ワンドやたまりといった氾濫原水域を抽出した。抽出した氾濫原水域 SHP データと 50m メッシュを重ね、氾濫原水域を含むメッシュを機械的に抽出することにより、氾濫原水域の有無を表す氾濫原水域マップを得た(図2d)。

③総合評価マップの作成

モデル評価値に基づく3段階評価(①)と氾濫原水域の有無による2段階評価(②)の組み合わせにより6段階の評価区分を設定し、この評価を各メッシュで行うことにより、総合評価マップを得た(図3)。

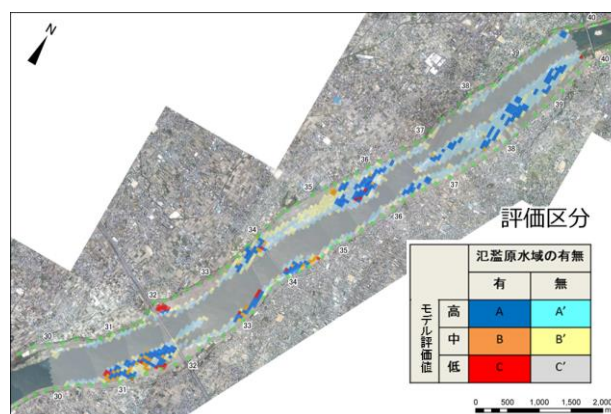


図3. 総合評価マップ。永山ほか(2014)⁴⁾を改変

2.2 氾濫原環境の再生に資する河道掘削手法の提案(②)

2.2.1 平均的な掘削高さに関する検討

1) 揖斐川の高水敷掘削地における検討

揖斐川のセグメント2に属する、河口から31.0~39.0kmの区間では、平成12~19年(2000~2007年)にかけて様々な高さで高水敷掘削が行われた。これにより、掘削高さや経過年数の異なる14工区が存在している(図4)。氾濫原的な環境の創出効果が高い掘削高さを明らかにするため、掘削後に自然形成された氾濫原水域におけるイシガイ類の生息量を

2011年12月に調べ、掘削高さ(渴~平水位、平~豊水位、>豊水位)および経過年数との関係を調べた。また、冠水頻度の低下に伴う水域環境の劣化指標となり得る累積土砂堆積厚と掘削高さおよび経過年数との関係も検討した。各掘削工区における累積土砂堆積厚は、掘削後に計測された定期横断測量成果と掘削高さの初期値を用いて求めた。

2) 実験河川における検討

陸生昆虫群集と掘削高さとの関係を調べるため、自然共生研究センターの実験河川において、河川水面からの比高と距離が異なる陸域上で、陸生昆虫の出現状況の違いについて調査した。調査地区は低地部に2か所(水際から0.5mと5m)、高地部に2か所(水際から0.5mと5m)、そこから1段上がったステップおよびさらに1段高い林縁の6地区とした

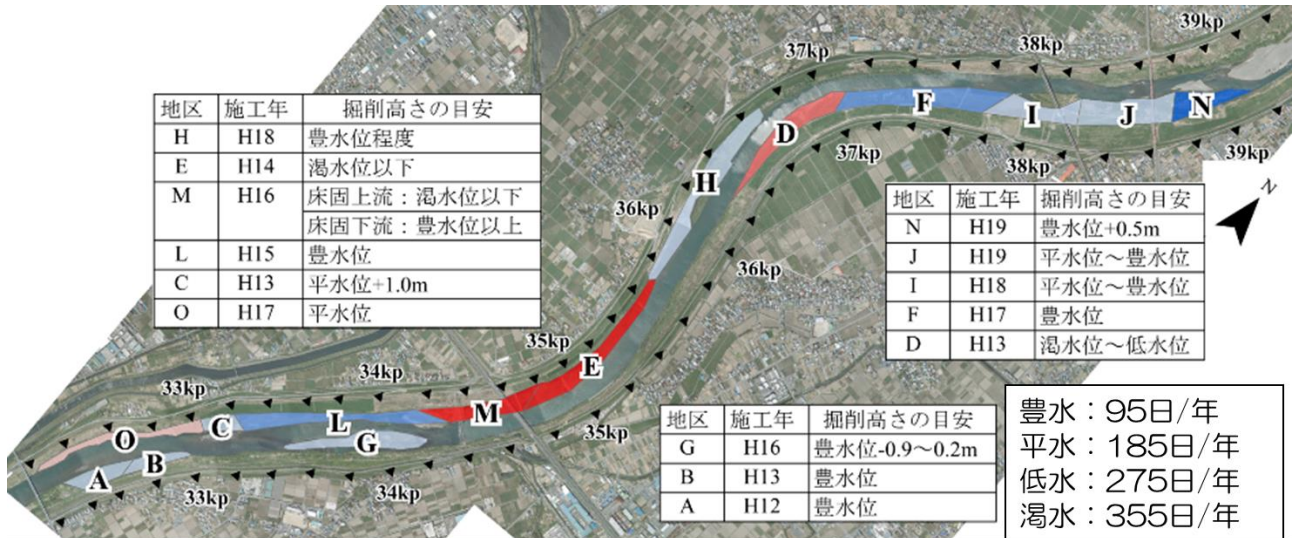


図4. 揖斐川における高水敷掘削の概要. 原田ほか (2015) ⁹⁾を改変

(図5)。夏季、各地区に約1週間ペイトラップを10個ずつ設置し、地表徘徊性の陸生昆虫類を採捕し、各地区に出現する昆虫群集の特徴を検討した。

2. 2. 2 平坦面上の微地形に関する検討

1) 掘削後の微地形形成プロセス

氾濫原的環境の創出を目的とした高水敷掘削の計画・設計のための知見を蓄積するため、前出の揖斐川における2つの掘削工区(D地区:平成13年に濁～平水位で掘削、O地区:平成17年に平水位で掘削)をケーススタディとして、掘削後に土砂が再堆積する過程で現れる微地形の形成プロセスを調べた。詳細は論文も参考いただきたい⁶⁾。

定期横断測量データと空中写真から、掘削後の堆積傾向を把握した。また、土砂堆積と密接に関連する植生の遷移を把握するため、水国データを活用した。さらに、掘削後に再堆積した堆積物の鉛直構造と粒度組成を把握するため、掘削地における層序を調べるとともに、各層のサンプリングを行い、土質粒度試験を行った。

2) 適性水域形状

氾濫原に依存する水生生物の生息場創出効果を高める知見を蓄積するため、イシガイ類生息の観点から、氾濫原水域(たまり)の適正形状を検討した。木曾川の自然堤防帯(セグメント2-2)に存在する3つのたまりで、各たまりにコドラート(2m×2m)を設定し、イシガイ類の採捕、物理環境(水深、泥厚、有機物量)の計測を行った。さらに、うち1つのたまりでは、水域の適性幅を検討するため、各横断測線において頭上を覆う樹冠の張出し幅と水底に

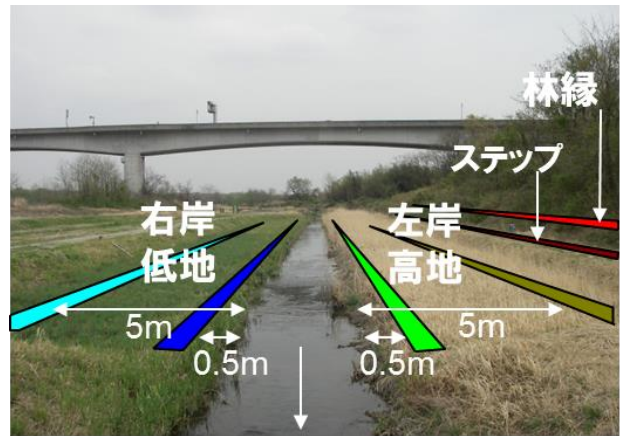


図5. 実験河川における陸生昆虫調査の調査地区。

堆積している有機物量を調べ、それらの関係とイシガイ類への影響を検討した。なお、論文⁷⁾も参考いただきたい。

2. 2. 3 氾濫原環境再生に資する掘削方法の提案

掘削高さおよび微地形の検討結果を基に、氾濫原環境再生に資する掘削方法を提案した(3.2.3参照)。

2. 3 個別河川への適用と課題の抽出および氾濫原再生手法の改善(③)

1) 木曾川モデルの検証とモデルの改善

目的①(2.1および3.1参照)において木曾川のセグメント2-2を対象に構築した回帰モデル(木曾川モデル)について、他の河川への適用性を検証するとともに、特性の異なる河川で使用可能なモデルへと改善した(新たなモデルを構築した)。木曾川モデルの対象地は、河床勾配が約4000分の1で、河床低

下が著しく進行し、かつての砂州が固定化して樹林に覆われ、複断面化（水域と陸域の二極化）が生じている区間であった（図 6a）。木曾川モデルの検証サイトは木津川とした。木津川の河床勾配は約 1100 分の 1 で、河床形態は単列から複列の砂州河道であり（図 6b）、木曾川のような顕著な複断面化は生じていない。

木津川の氾濫原水域におけるイシガイ類の生息調査結果を淀川上流河川事務所より提供いただいた。また、それらの水域の冠水頻度（水位超過回数）を、本研究で開発した氾濫原環境の評価プロトコルに則って整理した。また、出水時の外力指標として、空中写真から、各水域周辺の植物（樹木、草本）の有無を判読した。このとき、水域を取り囲むように植物が成立している場合を「植物有り」、水域の周囲の一部でも植物を欠いている場合は「植物なし」とした。目的変数をイシガイ類の有無、説明変数を冠水頻度および植物の有無として多重ロジスティック回帰を行い、冠水頻度のみを使用する木曾川モデルの検証と木津川に適した新たなモデルの構築を行った。

2) 汎用モデルの構築

氾濫原環境を詳細かつ厳密に評価するためには、木曾川モデルのように、個別河川で構築され、個別河川に特化したモデルを用いることが最良であるが、そのためには、イシガイ類の生息実態調査が綿密に実施されている必要がある。ここでは、個別河川のイシガイ類データを使用せずに、一定の精度で評価を行なうスクリーニングに供するための汎用モデルの構築を行った。

直轄 9 河川（石狩川、雄物川、利根川、信濃川、木曾川、木津川、斐伊川、吉野川、筑後川）のセグメント 2 区間を対象に、各河川 25～80 個の氾濫原水域においてイシガイ類の生息調査を実施した。氾濫原水域の環境変数として、GIS 上で水域面積、河川からの距離、周辺の水域数、周辺の樹林面積割合、平水位からの比高を各水域に与えた。これらの環境変数を説明変数、イシガイ類の生息有無を目的変数とし一般化線形混合モデル（GLMM）を組んだ。なお、平水位比高は、水域の周縁線が重なる 10m メッシュ DEM の最小値を使用し、平水位との差分をとることで決定した。

3) 掘削高さの適用と検証

前出の揖斐川における高水敷掘削地において、工区内における水域数およびイシガイ類生息水域割合、ならびにそれらの時間変化の観点から、平水位以下



図 6. a)木曾川と b)木津川の対象区間の航空写真。

の掘削高さの有効性について検証を行った。11 工区を対象とし、各工区におけるイシガイ類生息水域割合を調べ、掘削高さ（渴～低水位、平水位、平～豊水位、豊水位、>豊水位）および経過年数との関係を検討した。また、空中写真から氾濫原水域の数を判読し、掘削高さと経過年数との関係を検討した。

4) 水域形状・微生息環境の適用と検証

本研究の目的①で開発した氾濫原評価手法によって再生適性地と判断された木曾川の高水敷において、目的②で提案した掘削手法を適用し、検証を行った。1 つのサイトは、小さなクリークを掘削により拡幅して造成した新たな水域（たまり）であり、造成 1 年後のイシガイ類生息状況を調べた。もう一つのサイトは、底泥および堆積有機物を浚渫したワンドであり、浚渫 1 年後のタナゴ科魚類の生息状況を調べ、浚渫前と比較した。

2. 4 河道内氾濫原の成立過程および高水敷掘削後の地形変化に関係する物理・水文過程（全体）

原生的な氾濫原は、現在のように堤防の間に挟まれた狭い領域ではなく、より広範に及んでいた。それゆえ、原生的氾濫原と現在の河道内氾濫原における洪水攪乱の特性は大きく異なるものと考えられる。この違いを認識することは、河道内氾濫原において氾濫原依存の生物や環境を整備していく上で重要である。そこで、まず、明治期における氾濫原水域と現況水域との比較から、河道内氾濫原の成立過程を整理する。続いて、洪水攪乱の重要な項目として、冠水頻度、作用外力、土砂堆積速度に焦点をあて、河道内氾濫原（高水敷掘削地）におけるこれらの特徴を、原生的氾濫原のそれらと比較する。なお、この内容は、総説論文⁸⁾として発表したものを簡略したものであり、参考文献等はそちらを参照いただきたい。

3. 研究結果

3.1 再生すべき氾濫原環境の抽出技術の開発(①)

評価手法の精度を検証するため、木曾川においてイシガイ類の生息有無を調査した 37 箇所(の氾濫原水域が重なるメッシュの評価区分を整理した(表 1)。各評価区分に含まれるイシガイ類の生息水域と非生息水域の数を基に、精度の検証を行った。

実際にイシガイ類の生息が確認された水域は 37 箇所中 17 箇所であり、そのうち 15 箇所(88.2%)は最もイシガイ類の生息環境に適していると判断される評価 A(モデル評価値「高」かつ水域「有」)に該当し、生息に適さないと判断される評価 C および評価 C'には該当しなかった(表 1)。ただし、評価 A には、イシガイ類の非生息水域 20 箇所のうち 7 箇所(35.0%)も含まれていた。これらの結果は、本評価手法がイシガイ類の生息水域をほぼ見落とさない一方で、やや過大評価の傾向にあることを示している。しかし、残りの非生息水域 13 箇所(65.0%)は、氾濫原水域がないと判断される評価区分(評価 A'に 9 箇所、評価 B'に 2 箇所)と、水域はあるが回帰モデル(冠水頻度の観点)からは生息可能性がやや劣るとみなされる評価 B(2 箇所)に該当していた。このことから、イシガイ類の生息に適さない場所の評価についても、一定の予測精度が示された。

実際には水域が存在するが、氾濫原水域マップでは水域「無」と判定された水域が 37 箇所中 12 箇所(32.4%)存在した(表 1)。これは、氾濫原水域マップの作成にあたって基礎データとして使用した河川環境基図に、これらの調査水域が水域として記録されてないことに由来する。河川環境基図の水域データは、空中写真判読によって作成されていることから、小さな水域は樹冠に覆われている等の理由から判別できなかった可能性が考えられる。しかし、これらの 12 箇所のうち、実際にイシガイ類が生息していたのは 1 箇所のみであった(表 1)。また、この 1 箇所の総合評価は A'であったことから、たとえ水域「無」と評価されても、冠水頻度の観点から高い評価が与えられていた。このことから、河川環境基図に記録されないような小さな水域の見落としは、本評価手法では大きな問題にはならないと考えられる。

表 1. イシガイ類の生息調査が行われた 37 水域が位置するメッシュの評価区分の内訳。生息水域は括弧外、非生息水域は括弧内の数字で表される。永山ほか(2014)⁹⁾から引用

モデル評価区分	氾濫原水域		合計
	有	無	
高(≥75%)	15(7)	1(9)	16(16)
中(15-75%)	1(2)	0(2)	1(4)
低(<15%)	0(0)	0(0)	0(0)
合計	16(9)	1(11)	17(20)

3.2 氾濫原環境の再生に資する河道掘削手法の提案(②)

3.2.1 平均的な掘削高さに関する検討

1) 揖斐川の高水敷掘削地における検討

イシガイ類の生息量は掘削高さが低い工区ほど多く(図 7a)、掘削後 5 年目をピークとして、その後減少する傾向が示された(図 7b)。また、掘削工区における累積土砂堆積厚は経過年数が増すほどに大きくなり、さらに、その増加率(すなわち堆積速度)は掘削高さが高い工区ほど大きかった(図 8)。これらの結果は、低い掘削工区ほど冠水頻度の高い状態が相対的に長く維持され、イシガイ類にとって好適であったことを示唆する。ただし、継続的な土砂堆積を背景として、次第に冠水頻度の減少による生息環境の劣化が生じ、経過 5 年目あたりをピークとして、イシガイ類生息量が減少に転じたと考えられる。ただし、濁水位より低い掘削工区では、土砂の堆積は生じず、水面下に没したままであった。

掘削高さの高い工区ほど土砂堆積が大きいのという本研究の結果は、低い高水敷ほど土砂堆積が大きくなるという一般的な傾向と相反する。この一般的な傾向を示した既存研究⁹⁾では、平均的な低水路高と高水敷との比高がおおよそ 1~6m の値をとる 4 河川のデータを基に、その傾向を示した。一方、本研究では、平均低水路高と掘削工区との比高は最大でも 1m 未満(平均±標準偏差: 0.23±0.30m)であった(2002 年測定の平均低水路高と各掘削工区の初期高さを用いて試算)。このことから、本調査地の結果は、比高が小さく冠水頻度が高い条件下における詳細な傾向を示すものであり、その原因としては、掘削高さが高い工区では早期に植物が定着し、ウオッシュロードの捕捉、堆積が促進される¹⁰⁾からと考えられる。

2) 実験河川における検討

ベイトトラップにより、188 分類群 15,420 個体の陸生昆虫類が採捕された。高地、ステップ、林縁で

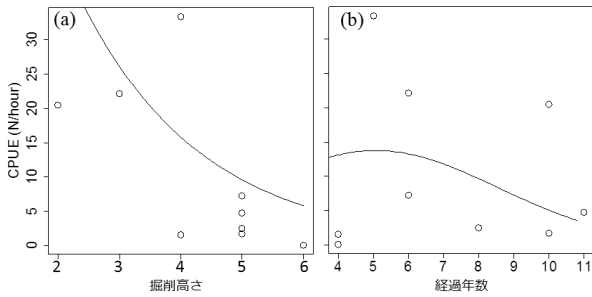


図7. イシガイ類生息量 (CPUE) と掘削高さおよび経過年数との関係。

は、草地や森林を好む種が群集を特徴づけ、低地ではそれらの草地・森林性種に加えて、湿地性種 (コモリグモ、ユスリカ類、ミズギワゴミムシ類など) が存在し、独特の群集構造を形成していた。

3. 2. 2 平坦面上の微地形に関する検討

1) 掘削後の微地形形成プロセス

現地観測、横断面図、空中写真から、高水敷掘削後に再堆積する過程で形成された微地形として、①自然堤防状の微高地、②後背地の微高地、微高地に囲まれた③ワンド・④たまりが確認された。自然堤防と後背地では、堆積物の粒度組成が異なっており、平面位置による違いが認められた (図9)。また、自然堤防と後背地の微高地にはヤナギ類などの植物の定着が認められた。以上の結果から、微地形形成プロセスとして、以下のことが想定された。①掘削後、先に自然堤防状の高まりができワンドが形成され、②後背地に徐々に細粒分が堆積して微高地が形成され、③後背地の微高地がワンドを切り離してたまりができ、④微高地の形成と同時に植物が侵入して堆積が促進されていると考えられた。

2) 適性水域形状

イシガイ類の生息数は水深 50cm、泥厚 10cm ほどのコドラートで最大となり、堆積有機物量が増えると急激に少なくなる関係を示した (図 10a,b,c)。また、堆積有機物量は頭上に樹木の張り出し (樹木カバー) のあるコドラートで有意に多かった (図 10d)。このことから、イシガイ類は水深や泥厚が小さいまたは大きすぎる場所、水面上に樹木があって枝葉の供給が多い場所を避けて、水域内に分布していることが明らかになった。つまり、水深 50cm 程度で泥厚 10cm 程度の上空が開けているエリアが、イシガイ類の生息に適していた。樹木の張り出し幅は最大で

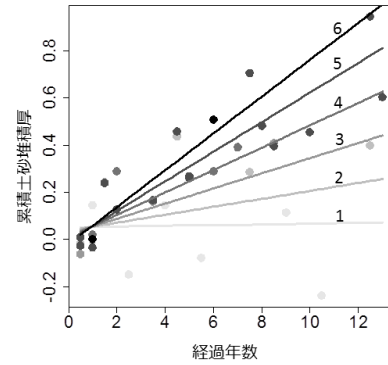


図8. 累積土砂堆積厚と経過年数および掘削高さとの関係。
1: < 渴水位、2: 低~平水位、3: 平水位、4: 平~豊水位、5: 豊水位、6: > 豊水位

約 10m であったことから、水域幅もそれ以上確保されることがイシガイ類生息の観点から有効であると考えられた。

3. 2. 3 氾濫原環境再生に資する掘削方法の提案

揖斐川の高水敷掘削地における結果から、イシガイ類の生息水域を含む氾濫原環境の再生に有効な掘削高さは低いほど良いことが示唆された (ただし、渴水位以上の高さ)。また、そうした低い河畔域では、草酸性や森林性に加えて湿地性の昆虫も多く、種が多様であり、昆虫群集の観点からも平水位以下の掘削高さは支持された。

掘削後に形成された平坦面では、その後の土砂堆積により自然堤防状の高まりが形成され、次いで後背地側への土砂堆積が不均一に進み、ワンドやたまりが形成されると考えられた。そのため、掘削時において、先に自然堤防状の高まりを造成しておく、水域の形成が早まり、早期にイシガイ類等の氾濫原水域依存の生物の生息場を創出できることが期待される。

水域形状としては、泥がほどよく堆積した水深 50cm 程度の領域が広く存在し、繁茂した河畔樹木に上空が覆い尽くされてしまわないよう、10m 以上の水域幅を確保することが必要であると考えられた。掘削時において、予めこうした水域を造成または水域形成を誘導できれば、イシガイ類等の水生生物の早期の定着が期待される。

揖斐川の検討例では、掘削工区におけるイシガイ類生息環境は、掘削後 5 年目を境として劣化傾向となることが示された。この結果は、掘削面への継続的な土砂の堆積により、冠水頻度が徐々に低下しているためであると考えられた。掘削面では再樹林化も進行しており、管理者は再度の樹木伐開や掘削を

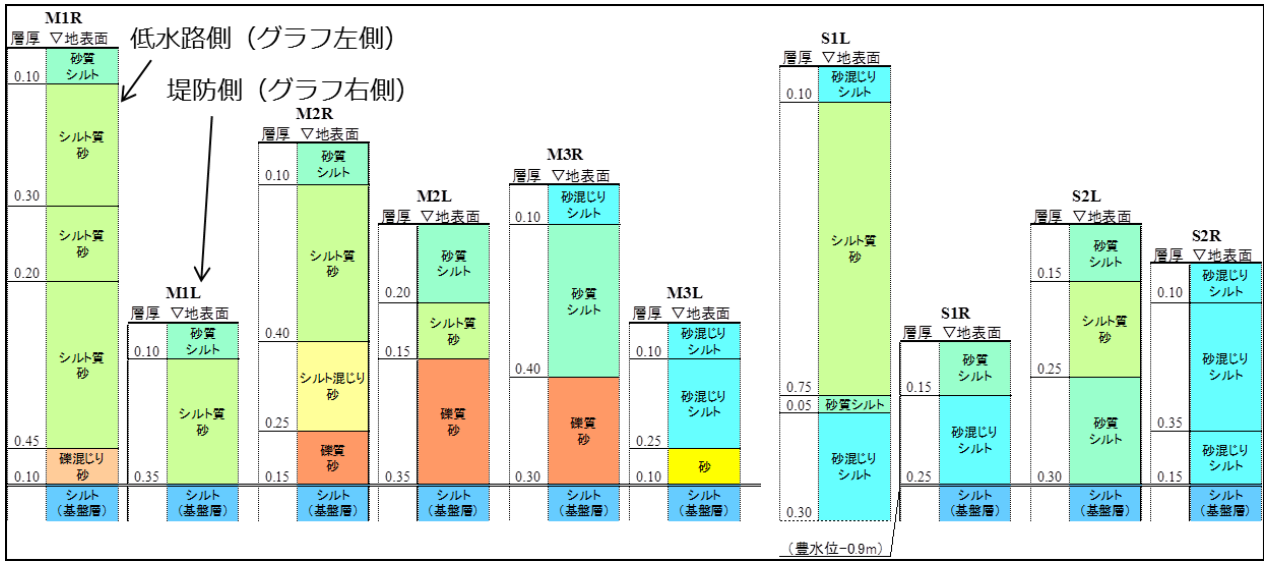


図9. D地区における3測線(M1~3)とO地区における2測線(S1~2)上の低水路側と堤防側の2測点における層序と層厚. 掘削面(基盤層)上の堆積層を表し、バーの高さは掘削後の累積土砂堆積厚(m)を示す. 原田ほか(2015)⁶⁾を改変

計画または実施している。堤間幅や流送土砂量・流量といった河道特性の支配要因を現況のまま維持する限り、掘削面での土砂の再堆積、再樹林化を避けることは困難である(3.4も参照)。それゆえ、掘削を定期的に行い、経過年数の異なる掘削地や、高いイシガイ類生息量が見込める経過年数を持った掘削地を、それぞれ一定の割合で常に維持できるように、ゾーニングの視点を取り入れた循環的管理が一つの管理手法として提案される。

ただし、掘削手法に関する提案は、主に揖斐川で得られた成果に基づくことから、今後、異なる特性を持つ河川における知見の集積が必要である。

3.3 個別河川への適用と課題の抽出および氾濫原再生手法の改善(③)

1) 木曾川モデルの検証とモデルの改善

木津川の氾濫原水域におけるイシガイ類の生息有無を説明するモデルとして、冠水頻度のみのモデルは選択されず、冠水頻度と植物の有無を持つモデルが選択された(表2)。両変数ともにイシガイ類の生息と正の関係にあり、冠水頻度が大きく、かつ、水域周辺に植物が繁茂する水域で生息確率が高まることが示された。この結果は、木津川においては、冠水頻度のみではイシガイ類生息を予測できない、つまり木曾川モデルを適用できないことを示している。

木津川のモデルは、冠水頻度が高い、つまり水面からの比高が小さい地盤面に存在するが、周辺に植物が定着できる程度に出水時でも物理的に安定した

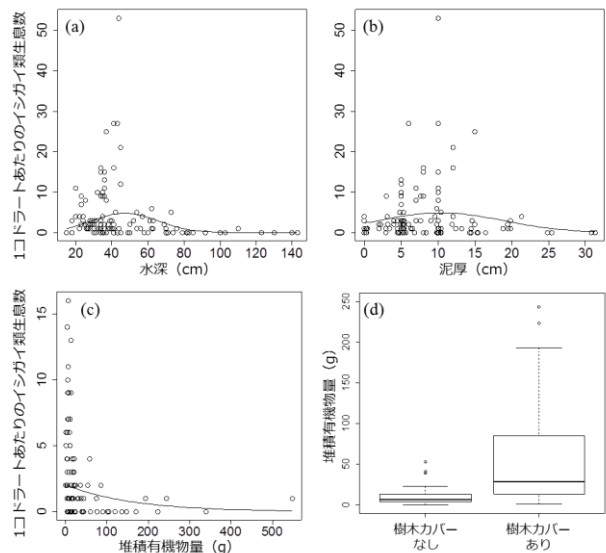


図10. コドラートにおけるイシガイ類の生息個体数と a)水深、b)泥厚、c)堆積有機物量との関係、ならびに d)堆積有機物量と樹木カバーとの関係. Nagayama et al. (in press)⁷⁾を改変

表2. 木津川におけるイシガイ類生息可能性を示すロジスティック回帰モデルの構築.

目的変数	モデルのパラメタ			尤度比 検定	AIC
	冠水頻度	植物有無	切片		
イシガイ類 有無	0.0193	19.53	-24.06	P<0.001	109.0
イシガイ類 有無	0.0026		-2.67	P=0.72	142.3

水域にイシガイ類が生息するというを示している。これは、木津川の対象区間（勾配約 1/1100）では、木曾川の対象区間（勾配約 1/4000）に比べて勾配が急であり、冠水時の流水による攪乱力を無視できないことを反映していると考えられ、木津川では、木曾川よりも限定された平面位置に生息が限られることを示している。

本研究で開発した氾濫原環境評価を実行する時、少なくとも対象河川の河道特性が木曾川と木津川のどちらに類似するかを判断し、適用するモデルを選択しなければならない。どちらにも類似しないのであれば、その河川において新たなモデルを構築する必要がある。ただし、それは対照区間の氾濫原環境を詳細かつ精度よく評価しようとする場合であり、全体のどこに重要な場所があるかなどを大まかに探索するスクリーニングにおいては、次に示す汎用モデルの適用を考慮することができる。

2) 汎用モデルの構築

木曾川や木津川を含む 9 河川のセグメント 2 区間に存在する 378 箇所の氾濫原水域に基づく解析から、水域におけるイシガイ類の生息有無は比高と水域面積を持つモデルで AIC が最小となり、最もよく予測されることが示された（表 3）。比高はイシガイ類の生息有無と山型の関係（単項の係数が正、二乗項の係数が負）を示し、水域面積は正の関係を示した。この結果は、個々の河川の特性に依らないセグメント 2 における全体傾向を示すものであり、水域面積が大きく、また、高過ぎもせず低過ぎもしない中程度の比高帯に存在する水域で、イシガイ類の生息確率が高くなることを示している。

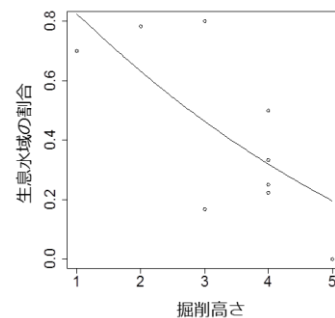
3) 掘削高さの適用と検証

揖斐川における検証の結果、イシガイ類の生息水域割合は掘削高さが低い工区ほど大きかった（図 11）。これにより、3.2.1 の結果とあわせると、低い掘削工区は、個々の水域におけるイシガイ類生息量が多いだけでなく、工区内における生息可能水域も多いことが示され、低い掘削高さの有効性が確認された。

また、掘削工区において自然に形成された氾濫原水域の数は、掘削高さや掘削工区面積によらず、経過年数と有意な関係を持っており、概ね掘削後 6~7 年経過した時点で最大となる山型の時系列変化を示した（図 12）。この結果から、水域数の変化に対して掘削高さはあまり関係していないことが示唆され、水域数は単に時間とともに変化する傾向にあった。

表 3. ロジスティック回帰分析に基づくイシガイ類生息可能性を示す汎用モデルの構築。

目的変数	モデルのパラメータ						AIC	
	周辺の水域数	河川からの距離	比高	(比高) ²	水域面積	周辺の樹林面積割合		切片
イシガイ類有無	0.12		0.89	-0.81	0.31		-1.732	351.0
イシガイ類有無			0.87	-0.81	0.33		-1.731	352.2
イシガイ類有無			0.91	-0.82	0.28	-0.13	-1.749	352.4
イシガイ類有無					0.29		-1.673	352.9



(1: 濁~低水位、2: 平水位、3: 平~豊水位、4: 豊水位、5: >豊水位)

図 11. 掘削高さとイシガイ類の生息水域割合との関係。

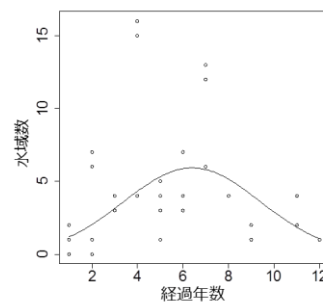


図 12. 掘削後の経過年数と形成された水域数との関係。

4) 水域形状・微生息環境の適用と検証

樹木伐開および水路の拡幅によって水深 50cm 以下のエリアを広く創出した水域において、施工後 1 年目で稚貝の生息が確認された（図 13）。これは、施工後に他の場所で生産された貝の幼生が宿主魚類によって運ばれ、この水域に定着したことを示唆する。

また、厚く堆積した底泥と有機物を浚渫し、水深 50cm 以下のエリアを広く確保した水域において、浚渫前には確認できなかった希少な在来タナゴ科魚類が、浚渫 1 年後に確認された。タナゴ科魚類は、イシガイ類の体内に産卵し孵化する生活史を持ってい

ることから、対象水域はイシガイ類を含む水生生物の良好な生息場となったことが示唆される。

これらの事例における確実な効果の検証にはより長期のモニタリングが必要ではあるが、冠水機会が多い場所であれば、本研究で提案した水深や水域幅、底泥の厚みといった条件を持つ氾濫原水域を整備することで、イシガイ類をはじめとした水生生物の良好な生息環境を創出できることが示唆された。

3. 4 河道内氾濫原の成立過程および高水敷掘削後の地形変化に関係する物理・水文過程（全体）

明治期の地図に当時の水域（赤線）と現在の水域（青線）を重ねた図を示す（図 14）。木曽川は明治の時点で連続堤の築堤がかなり進んでおり、氾濫原の開発が行われ、農地が広く分布していた。本川河道では、かつて砂礫河原であった範囲に、現在のワンド・たまりが分布していることが確認される。淀川下流部に着目すると、木曽川とは対照的に、明治時点では連続堤の築堤が途上であり、未開発の広大な氾濫原が確認され、後背湿地には本川河道と連結する水路も多数確認される。このように、現在は堤外地に限られている氾濫原的な環境は、かつては本川河道と連絡する氾濫原水域との関係で成立していたものであり、木曽川については明治時代において既に、淀川については明治以降現在までに、その連絡が失われたと考えられる。

次に、掘削後の地形・環境変化を強く支配する洪水攪乱について、冠水頻度、作用外力、土砂堆積速度に焦点をあて、その特性を整理する。

海外における自然河道の研究事例から、河岸満杯となる状況は、概ね1~2年に1度生起していた。後背湿地への氾濫は、河岸満杯を超えて発生すると仮定すれば、原生的氾濫原における後背湿地の冠水頻度は、河岸満杯の発生頻度よりやや低いと考えられる。一方、国内では、昭和40年代のデータに基づくと、低水路の河岸満杯の発生頻度は、概ね2~3年に1度よりやや高い程度と考えられた。以上から、原生的氾濫原と昭和40年代の河道内氾濫原の冠水頻度に大きな違いはなかったと考えられる。ただし、多くの河川で河床低下が進んだ現在の河道内氾濫原の冠水頻度は、以前よりも低くなっていると考えられる。

原生的氾濫原では、氾濫した流れは広く拡散する。一方、河道内氾濫原では、洪水流は堤外地に集中するため、流量の増加に伴う水深の増大が相対的に大



図 13. 適性水域形状を適用し、水路拡幅によって造成された氾濫原水域と造成後1年目に確認された稚貝。

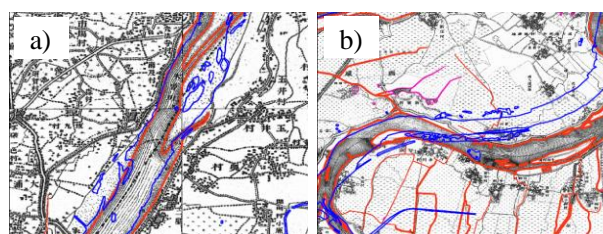


図 14. a)木曽川玉ノ井地区と b)淀川下流部の明治期の水域（赤）と現在の水域（青）

きくなる。また、河道を直線的に改修しているため、河床勾配が急になっている。それゆえ、河道内氾濫原における洪水時の作用外力（例えば、河床面せん断力）は、原生的氾濫原に比べて大きいと考えられる。

原生的氾濫原における土砂の堆積速度は1~10mm/year程度であり、海外でも国内でも大差はない。しかし、高水敷掘削を行った場所では、5~10cm/year程度の堆積速度が観測され、原生的氾濫原に比べて1オーダー大きい。

以上の議論を高水敷掘削による河道内氾濫原の再生という観点から整理する（図 15）。高水敷の掘削は、河床低下によって拡大した河道内氾濫原の比高を是正し、原生的氾濫原に類似した昭和40年代の冠水頻度、またはそれ以上の冠水頻度の場を創出する操作である。しかし、これらの掘削面では、洪水外力は大きく、土砂の堆積速度も速い。この傾向は、より低く掘削された（中水敷掘削された）場所より強いことが予想される。このように、高水敷の掘削は、冠水頻度の面では原生的氾濫原と同程度かそれ以上の状態に戻す操作であるが、そこに生じる作用外力と土砂の堆積速度は、原生的氾濫原のそれら

よりはるかに大きく、物理的に不安定な場を創り出す。氾濫原的な環境は、高水敷掘削後、一時的にこそ形成されるものの、それを長期間維持することは困難であることを、我々は基本的な認識として持たなければならない。こうした河道内氾濫原の条件下において氾濫原環境を持続させるためには、ゾーニングと回帰年をベースとした掘削による循環的な管理が必要と考えられる。

4. まとめ

直轄河川において治水目的で広く実施されている河道掘削は、高水敷の地盤を低くし、相対的に高い頻度で冠水するエリアを創出することから、氾濫原的な環境の再生と親和的である。そこで、本研究では、①再生すべき氾濫原環境の抽出技術の開発を行い、②氾濫原環境の再生に資する掘削方法を提案し、それらの③個別河川への適用から課題を抽出するとともに手法を改善することを目的に据え、氾濫原環境の指標生物として主にイシガイ類を対象とし、その生息場の観点から検討を行った。また、本研究全体に関わる課題として、原生的氾濫原と河道内氾濫原について近代以降の変化と成立過程の一端を整理し、さらに洪水攪乱の観点からレビューを行い、高水敷掘削による氾濫原再生の意味と課題について整理した。成果を以下に要約する。

- 1) 木曾川を例として、直轄河川で整備されている既存のデータセットを活用し、イシガイ類の生息可能性を指標とした簡易な氾濫原環境の評価を行ない、保全や再生の適地を抽出する手法を開発した。
- 2) 氾濫原環境の創出効果の高い掘削高さ、早期に氾濫原環境の回復が期待される掘削面上の微地形の設定、イシガイ類等に適したワンドやたまりといった氾濫原水域の形状や微環境特性を明らかにし、具体的な掘削手法を提案するとともに、掘削地における土砂の再堆積を前提とした、掘削による循環的な管理手法を提案した。
- 3) 木曾川を例として開発した氾濫原環境評価に使用するイシガイ類生息可能性モデルを他の河川で検証・改良し、裸地状の砂州を持つ木津川に適用可能なモデルを構築するとともに、すべての河川への適用を目的としたスクリーニング用の汎用モデルを構築した。また、提案した掘削手法の現地適用から、濁水位～平水位レベルの掘削高さ、水深・幅・堆積泥厚といった微地形を考慮した水域

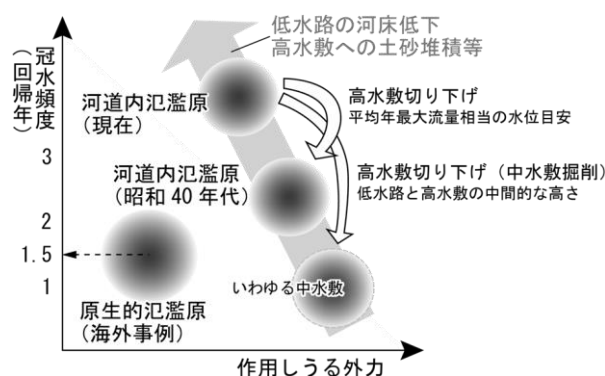


図 15. 冠水頻度 (回帰年) と作用しうる外力から見た、河道内氾濫原における高水敷掘削の位置付け。Y 軸の値が大きいほど、1 年あたりの冠水回数は少ない。永山ほか⁸⁾を一部改変

掘削手法の有効性を確認した。

- 4) 明治期と現在の地図から、かつて広大な後背湿地や水田地帯に本川と連結して存在していた氾濫原水域は、連続堤の整備に伴って狭い堤外地に限定されるようになった。また、低水路内の砂州が固定され、現在見られるワンドやたまりといった水域が河道内氾濫原に出現した様子が確認された。

河道内氾濫原における高水敷掘削は、冠水頻度の面では原生的氾濫原と同程度かそれ以上の状態に戻す操作であるが、横断的に狭められた堤外地であるため作用外力と土砂堆積速度は原生的氾濫原のそれらよりはるかに大きく、時間的、物理的に不安定な場を創り出すと考えられた。それゆえ、氾濫原的な環境は、高水敷掘削後、一時的にこそ形成されるものの、それを長期間維持することは困難であり、ゾーニングと回帰年をベースとした掘削による循環的な管理が必要と考えられた。

参考文献

- 1) Tockner K, Stanford JA (2002) Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation* 29: 308–330.
- 2) 根岸淳二郎・萱場祐一・佐川志朗 (2008) 氾濫原の冠水パターンの変化とその生態的な影響～淡水性二枚貝の生息状況の観点から～. *土木技術資料* 50(11): 38–41.
- 3) Negishi JN, Nagayama S, Kume M, Sagawa S, Kayaba Y, Yamanaka Y (2013) Unionoid mussels as an indicator of fish communities: A conceptual framework and empirical evidence. *Ecol Indic* 24: 127–137.
- 4) 永山滋也・原田守啓・萱場祐一・根岸淳二郎 (2014) イ

8.5 河川地形変化に伴う氾濫原環境の再生手法に関する研究

- シガイ類を指標生物としたセグメント2における氾濫原環境の評価手法の開発：木曽川を事例として. 応用生態工学 17: 29-40.
- 5) Negishi JN, Sagawa S, Sanada S, Kume M, Ohmori T, Miyashita T, Kayaba Y (2012) Using airborne scanning laser altimetry (LiDAR) to estimate surface connectivity of floodplain water bodies. *River Research and Applications* 28: 258-267.
- 6) 原田守啓・永山滋也・大石哲也・萱場祐一 (2015) 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(4): I_1171-I_1176.
- 7) Nagayama S, Harada M, Kayaba Y (in press) Distribution and microhabitats of freshwater mussels in waterbodies in the terrestrialized floodplains of a lowland river. *Limnology*. DOI: 10.1007/s10201-016-0480-0
- 8) 永山滋也・原田守啓・萱場祐一 (2015) 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 17: 67-77.
- 9) 武内慶了・服部敦・藤田光一・佐藤慶太 (2011) 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: 161-166.
- 10) 藤田光一・John A. Moody・宇多高明・藤井政人 (1996) 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 No.551/II-37: 47- 62.

DEVELOPMENT OF METHOD FOR FLOODPLAIN RESTORATION BY MANIPULATING GEOMORPHOLOGY OF RIVER

Budget: Grants for operating expenses, General account

Research Period: FY2011-2015

Research Team: Aqua Restoration Research Center

Author: Yuichi Kayaba, Tetsuya Oishi, Shigeya Nagayama

Abstract: For efficient restoration and management of river floodplain environments using flood-channel excavation, methods for evaluating floodplain environments and excavating flood-channels were developed using freshwater mussel, an indicator of floodplain environments, as an evaluation axis. First, a simple method for evaluating floodplain environments and finding area suitable for floodplain restoration using existing data sets of main Japanese rivers was developed in the Kiso River. Second, effective excavation methods on restoration of floodplain environments were proposed: height of excavation area from drought to ordinal water levels, initial setting of ground form similar to natural levee, and dimension (>10 m width, 0.5 m depth) of floodplain waterbody including depth of mud accumulated in the bottom. Finally, the probability model of mussels that is used in the evaluation method of floodplain developed in the Kiso River was improved to new models applicable to other rivers. In addition, the excavation methods were justified based on the monitoring survey in other rivers where the methods were applied. Moreover, we reviewed the formation process of inter-levee floodplain and the features of flood disturbance in natural and artificial (inter-levee) floodplains to provide future perspectives on floodplain management using flood-channel excavation.

Key words: inter-levee floodplain, Japanese large rivers, restoration and conservation, flood-channel excavation, freshwater mussel