

中小河川の中山間地から扇状地区間における河道平面形状による魚類生息場および種の特徴の比較

RELATIONSHIP AMONG RIVER PLANE SHAPES, FLOW ENVIRONMENT AND FISH ASSEMBLAGE A ON STEEP SMALL- MEDIUM-SIZED RIVERS

大槻 順朗¹・森 照貴²・林田 寿文²・中村 圭吾³・萱場 祐一⁴
Kazuaki OHTSUKI, Terutaka MORI, Kazufumi HAYASHIDA,
Keigo NAKAMURA and Yuichi KAYABA

¹正会員 博（工）（国研）土木研究所 自然共生研究センター
（〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地）

²正会員 博（環境科学）（国研）土木研究所 自然共生研究センター（同上）

³正会員 博（工）（国研）土木研究所 水環境研究グループ河川生態チーム（兼 自然共生研究センター）
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 博（工）（国研）土木研究所 水環境研究グループ（同上）

Recently, serious flood disasters have been occurred in small- medium-sized steep rivers from mountainous to fluvial fan segments, however, there are few guidelines for designing plane shapes of river channel for disaster recovery works due to lack of studies on relationship among the channel plane shape, topography and environment in such segments. In this study, we provided information on the relationship by comparing field data of river morphology, flow environment and fish assemblage in different types of channel shape, straight, bended and widening. As a result, it is found that formation of pools is likely to occur in the bended part but not in the widening part. In terms of greatly widened reach, stream shrinkage by sedimentation and plant invasion occurs, which also affects the formation of the riffle-pool flow environment. Comparing the obtained fish assemblage data with that in straight parts as a reference, the bended part has a role of providing a specific habitat not seen in the straight part and the widening part likely work to enhance habitat diversity where the environment already reasonably good.

Key Words: River Channel Morphology, Small- and Medium-Sized River, Mountainous to Fluvial Fan Segment, Habitat formation, Fish Assemblage

1. 序論

河道計画は、河道の平面計画、縦断計画、横断計画が基軸である。河川砂防技術基準（計画編）では、河道の平面計画や堤防法線については、治水・利水・環境について目指すべき方向性を踏まえ設定すること、計画高水流量や沿川の土地利用状況、自然環境、洪水時の流況、現況の河道、将来の河道の維持、経済性等を総合的に勘案し、必要な川幅の確保を基本として設定することとされている。実河川では土地利用上の様々な制約が存在することに鑑み、平面形状の設定に関する定量的な基準は設定されていないが、川幅は河道内の河川地形形成（中規模河床波）に関わる最も重要なパラメータの一つであり¹⁾、法線の湾曲や蛇行についても固定砂州の形

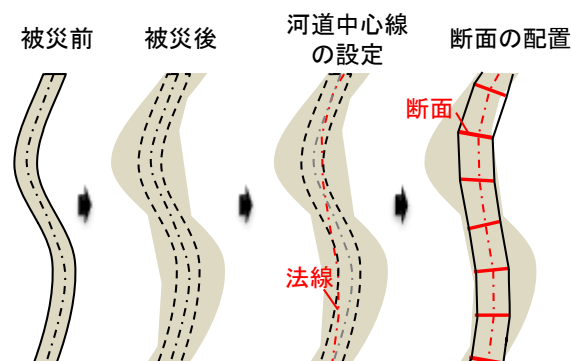


図-1 災害復旧における河道平面形設定の典型例
成²⁾、それによる多様な流水環境の形成を通じハビタットの基盤となるなど、河川環境を形成する上位の条件となる極めて重要なものである。なお、本稿では以下、堤

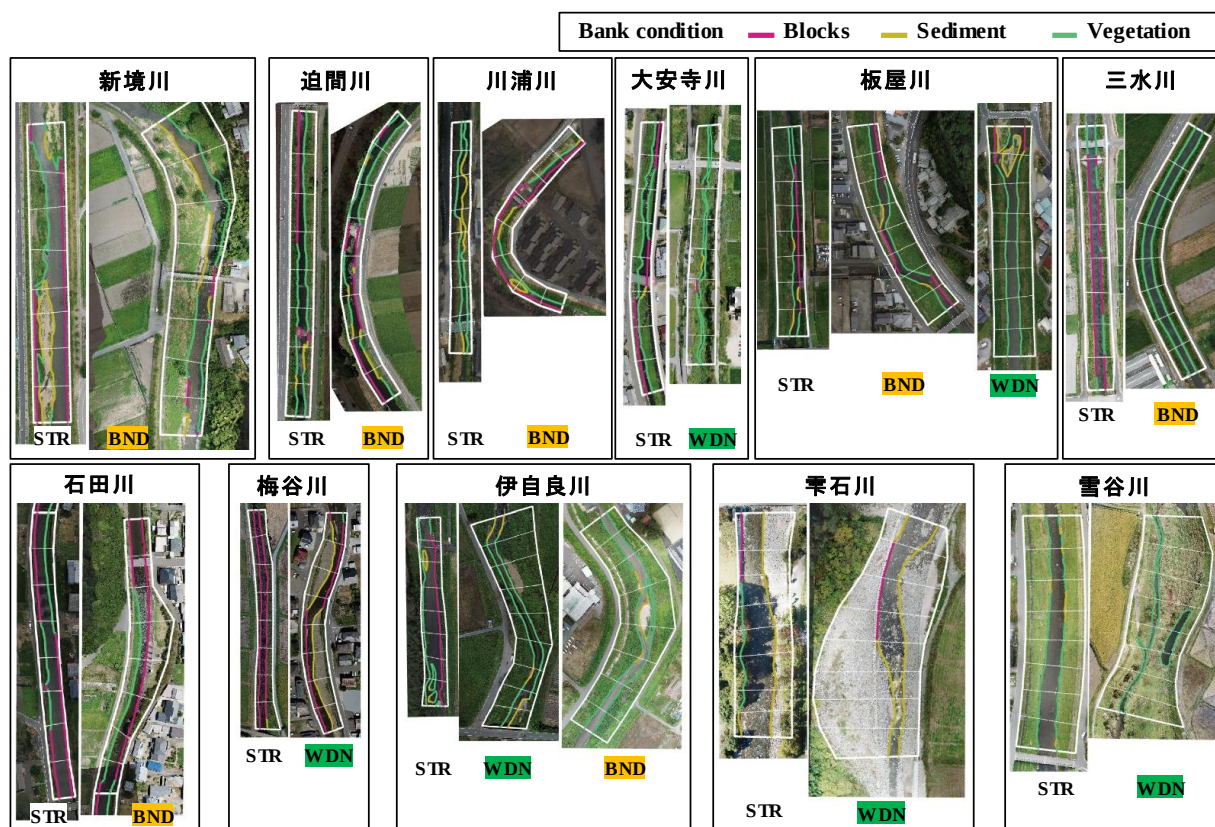


図-2 調査区の河川平面形（UAVによる空撮画像から得たオルソ画像，白太枠は対象範囲，白線は計測断面を示し河岸を護岸，土砂，植生カバーの3種類で示す）

防（掘込河道を含む）法肩を連ねた堤防法線間の距離を川幅，その中心線を連ねた線を法線とし，それらをまとめて河道平面形と呼ぶことにする。

我が国の中小河川では，治水優先の河川改修による環境の単調化が大きな課題である。中小河川の多数を占める中山間から扇状地区間の急勾配河川では，河床を下げ狭く深い断面に置き換えたことで河床低下による被災も多発している。近年は平成29年九州北部豪雨等，甚大な豪雨による大量の土砂・流木を伴う災害も頻発しており社会的課題となっている。被災河川では災害復旧（改良復旧）事業による河川整備がなされるが，中小河川では財政的理由により平時には整備が進みにくいのが現状であるため，災害復旧事業があるべき河川環境を創出する数少ない機会にもなっている。

図-1は中小河川における改良復旧事業における河道平面形設定のプロセスを概念的に示したものである。中小河川は元々整備水準が相対的に低く，被災流量を安全に流しうる川幅は被災前の数倍になることもある。用地の状況等を踏まえ，その川幅を取ることができるよう河道中心線を設定し断面を配置するが，改修後河道の基本的骨格がこの段階で決定されていることになる。典型的には同図に示すように河道が直線化する。環境上の配慮はその後に行われるが，環境の基盤となる河川地形形成がすでに制限されているため，実効性のある工夫にも自ずと限界がある。そのため，より計画上流段階での配慮が

必要である。これに対し，環境の視点から必要な川幅に関する目安が「美しい山河を守る災害復旧基本方針（平成30年改訂）」等に記載されたが，河道の法線形状についてはそのような目安は記載がない。

河道平面形と河川地形との関係性は河川工学上の関心事であり古くから研究がある。近年は高い信頼性を得た2次元河床変動計算モデルが普及し環境分野も含めて幅広く展開されている。しかしながら，災害復旧のプロセスを考えたときには，曲がりや拡幅など平面形変化に対する応答という視点で，地形の応答だけではなくハビタットや生物相も含めての知見が必要となる。例えば川幅曲率比に対する洗掘量の関係²⁾などの既往の知見は基本的に直轄河川のような大河川を対象としており，中小河川での研究事例は少ない。また，河道の一部を拡幅する部分拡幅については検討事例が少なく³⁾，ハビタット形成等環境面に関する報告⁴⁾もあるが国内の事例は少ない。そのため，中小河川の特に山間地から扇状地区間に焦点を絞った河道平面形と環境面も含めた河道特性の応答の把握が必要となっている。

そこで本研究は，中小河川の多地点を現地調査し，直線部，曲線部，拡幅部という平面形タイプごとに比較することで，河川地形，物理環境および魚類相との関係性を明らかにすることを試みたのでその結果を報告する。

2. 調査方法

(1) 対象区の設定

現地調査において設定した調査区の河道平面形を図-2に示す。調査区は対象河川の直線部（STR），それから近傍の湾曲部（BND），拡幅部（WDN）に対応する箇所を選定した。対象河川は，岐阜県と岩手県における河床勾配1/70～1/400程度の11の中小河川，24地点の縦断距離およそ200mを調査区とした。

(2) 現地調査

現地調査では，河道平面形状の相違に対し，地形，流水環境，魚類相の応答を把握することを目的に，①地形と地被の調査，②水深・流速分布の計測，③魚類の採捕を行った。一連の調査は今後のデータの集積を意識し，なるべく簡易としている。調査完了に要する時間は調査員4名で90分程度である。

①については，UAVで撮影した空中写真を画像解析によって3次元化する方法で行った。まず，区域内を取り囲むよう標点を施す。次に標点を3次元座標値として出力可能なレーザー距離計（Leica Geosystems製，DISTO S910）を用いて測量する。ここでは，反射シートを利用することで測定距離を200m程度まで伸ばした。測量後，UAV（DJI製，Mavic Pro）を用いて対地高度70m程度で垂直および浅い角度での空撮を行った。この方法では，水面下の地形は厳密には得られないが，河道形状を大まかに把握する上では十分であり，②の物理環境計測がそれを補足する。②の水深と流速の計測については，①の標点を基準とした9つの測定断面で水域の3点，計27点を基本に電磁流速計（ケネック製，LP-20）を用いて計測した。二次流路等がある場合は適宜補足した。③魚類の採捕では，調査員2名がタモ網およびサデ網を用いて30分間採捕し，魚種と体長を計測した。

(3) 分析

撮影した空中写真をSfM解析が可能なソフトウェア（Agisoft製，Photoscan Professional）で解析し，点群データを生成，DEMおよびオルソ画像を得た。これをGISソフトウェア（QGIS Ver.3.4）に取り込み，水際の部の状態（護岸，裸地，植生）の抽出した。法線の曲がりを表すパラメータとして，9つの設定断面の中心点座標から最小二乗法を用いて区間の曲率半径（ r ）を算出した。

3. 河道平面形の変化が物理的環境に与える影響

(1) 調査地点の環境形成に関するリーチスケール量

河道平面形を変化させると，局所的に中規模河床波の形成状態が変化し，それがさらに小さなスケールの物理環境や生息生物の状態に影響するものと考えられる。図

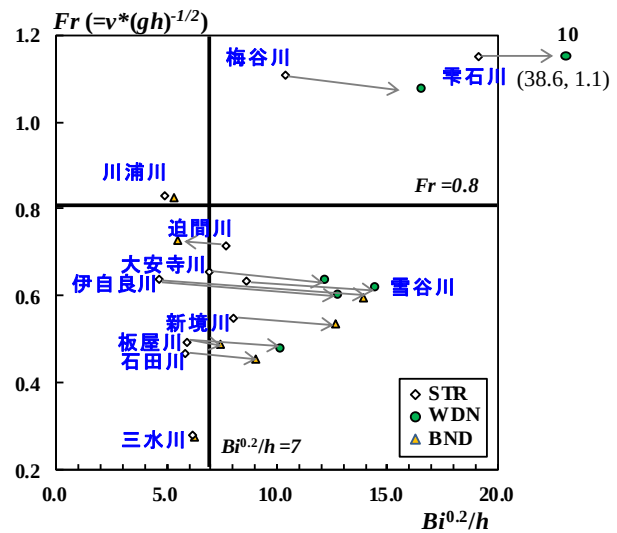


図-3 各観測地点における推定洪水流量に基づく川幅パラメータ ($Bi^{0.2}/h$) とFroude数 (Fr)

図-3はリーチスケールの視点から調査地点を俯瞰するために示すもので，各調査地における洪水時流量における川幅に関するパラメータ ($Bi^{0.2}/h$) とFroude数の関係を示している。同じ河川同士を補助線で結んだ（注：事前事後という意味ではない）。大石ら⁵⁾は，多数の中小河川におけるこれらのパラメータの分布と河道の様子（河道景観と呼ぶ）との関係性から，健全な砂州の河道景観の形成の目安 ($Bi^{0.2}/h = 7$) を示している。なお，洪水時流量の算定方法については，大石ら⁵⁾を参照のこと。これを見ると，直線部の調査地点はおおむね $Bi^{0.2}/h < 7$ であるが，拡幅部ではそれより大きくなり7を上回っている。すなわち，直線部では砂州が発生しにくい，拡幅部では局所的に発生できる条件になっている。一方，曲線部については， $Bi^{0.2}/h$ の変化は小さいが，一部は拡幅も伴っており，直線部より値が大きいものもある。

(2) 瀬淵の形成

河道の拡幅や蛇行の保全，再生は，生息場における流水環境の多様性を生み出すことが環境上の主たる目的となる。ここでは，河道平面形と流水環境の対応関係を概観するため，図-4に区域において観測された水深と流速の散布図を示す。ここでは便宜的に，瀬，淵の目安として，水深20cm以下かつ流速40cm/s以上を「瀬」，水深40cm以上かつ流速20cm/s以下を「淵」とし，図中にそれらの値の範囲をハッチで示している。

同一河川での直線部と比較すると，曲線部（図-4上段）では，直線部に比べ「淵」に相当する水深の大きい箇所が見られる。それに対し拡幅部（図-4下段）では淵の領域が直線部に比べて多少多いものの，その水深は必ずしも大きくない。渡邉ら⁶⁾は，淵の形成すなわち河床洗掘は，交互砂州性の洗掘と湾曲による二次流に起因する洗掘とに分けられ，現地河川の分析から，前者を切片，後者を川幅曲率半径比 (B/r) に対する傾きとした線形関係が見られることを述べている。本研究の結果もこれに対応しており，拡幅部では交互砂州性の洗掘に限定さ

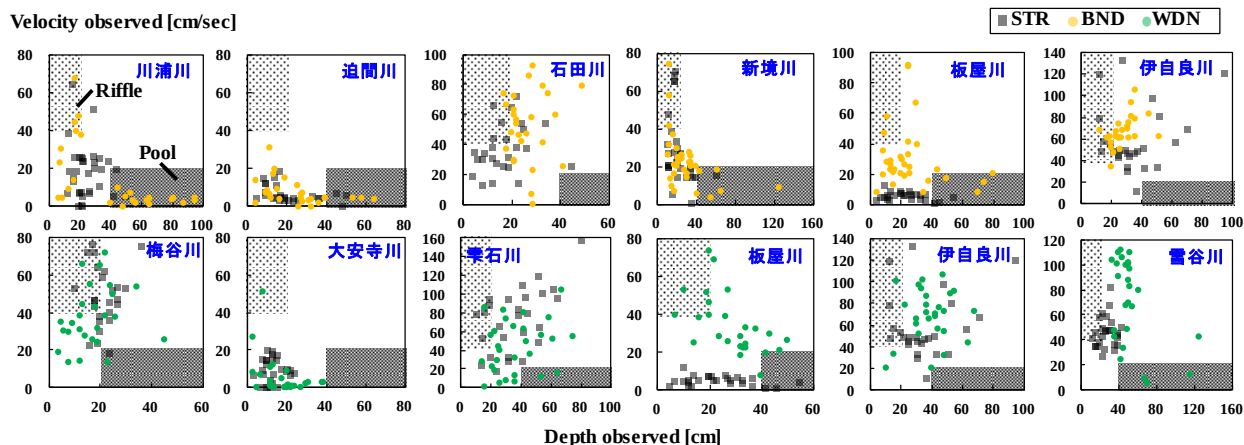


図-4 地点別の水深流速関係（黒：直線部，黄：曲線部，緑：拡幅部，一部河川のデータを省略）

れることから、相対的に淵を得にくく、曲線部では同じ川幅でも淵を得やすいことが本調査結果から分かった。

ただし、曲線部で必ず淵ができていたわけではなく、例えば石田川では、河道内に固定砂州が付いているもの、みお筋が外岸側の護岸に寄って速い流れとなっていた。曲がりの緩急と淵の形成について図-5に示す。この図では、曲率半径川幅比（ r/B ）を横軸、観測水深の最大値の同じ河川の直線部の値に対する比（ H_{max}/H_{maxs} ）を縦軸にとり、前述の便宜的な淵の条件が得られたものに赤丸をつけた。また、図には河道計画において湾曲による水深上昇を見込む目安である⁷⁾ $r/B=10$ のラインと、既往の知見との比較のため模型実験と現地データ等から得られた目安線²⁾を付記した。これを見ると、 $r/B < 10$ では、 H_{max}/H_{maxs} が1以上の相対的に深い箇所を持つ河川が多くその多くが「淵」の条件を満たしていることが分かる。多少のばらつきは伴うが、淵の形成という環境の観点からも $r/B < 10$ は一つの目安として有効であるだろう。

拡幅部について見ると「淵」ほどではないが、全体として低流速、大水深になる傾向があり（図-4下段）、直線部の環境が単調である場合（板屋川）は、流況の多様性は大幅に改善される。雪谷川は他と傾向が異なっており「淵」も一部見られるが、大部分が高流速・大水深となっていた。現地では、拡幅した断面全体に土砂が堆積しさらに草本植物が繁茂することで、みお筋幅が拡幅していない区間の幅よりも狭くなるまで縮小していた。拡幅部の川幅縮小は、元の川幅や摩擦速度に戻るよう生じるのが典型的な例であり⁸⁾、直轄河川等では拡幅された低水路部への細粒土砂の堆積をきっかけに植物定着と合わせて縮小が生じる例が報告されている⁹⁾。雪谷川では、堆積土砂に粗いものも含まれており、細粒土砂に加え掃流砂による砂州形成の効果も複合し、著しいみお筋縮小が生じたのではないかと考えられる。このように、拡幅の程度によっては狙いの瀬淵環境が形成されない場合が見られる。現在、河床変動計算やそれに基づく植物消長モデルの進展により植生定着の予測はかなり高いレベルにまで到達しているが、長期的予測は依然課題も多

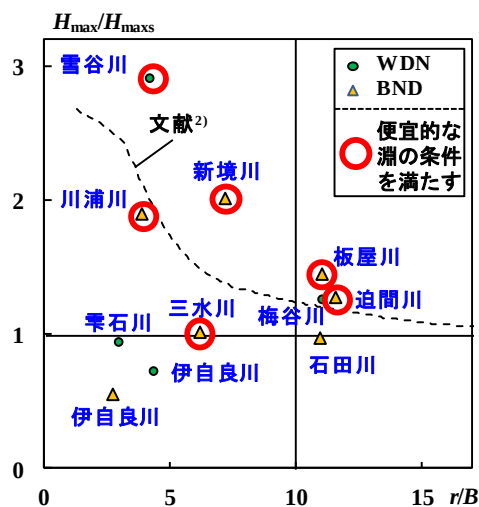


図-5 曲線部・拡幅部における水深最大値（直線区間の水深最大値との比： H_{max}/H_{maxs} ）と曲率半径川幅比（ r/B ）との関係

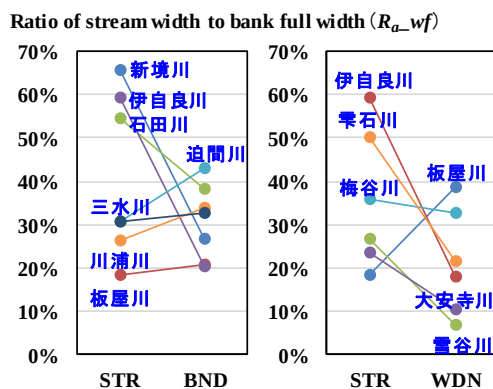


図-6 調査区間における川幅に対するみお筋の幅の比のため、現地データの蓄積が今後も重要となる。

(3) 河岸および植生

曲がりや拡幅によって発生する砂州は自然河岸を形成し、植物の定着の基盤となる。これらは生息場要素としても重要であるが、水域環境の形成要因ともなる。図-6は、調査区における川幅に対するみお筋幅の比を直線部と曲線部、拡幅部で比較したものである。まず曲線部に

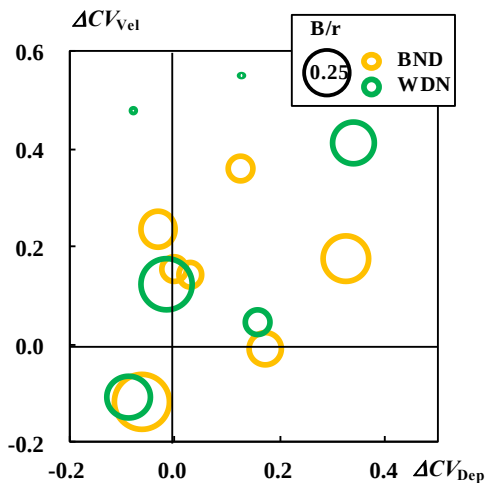


図-7 水深・流速の付加量と川幅法線曲率半径比の関係

注目すると、落差工がある迫間川を除けばみお筋幅比が直線部に比べて小さく、固定砂州によりみお筋が狭くなることが分かる。拡幅部についても同様であるが曲線部よりその傾向が強くなり、大安寺川や雪谷川では10%を下回るほどに小さくなっている。図-2に示すように、こうした河川では、河岸のほとんどが植生河岸の割合がほぼ100%になっており、河道全幅で草本植物が繁茂し、みお筋の極端な縮小との関係性が示唆される。

(4) 平面形の変化が流水環境の多様性にもたらす影響

直線部に対して平面形の変化を引き起こすことで、単純には流水環境の多様性が増加することが想定される。ここでは、直線部に対して河道平面形変化部の環境の多様性の相違を検討することで、直線部における平面形変化がもたらす影響を検討する。まず、水深、流速の観測値より、直線部における流速と水深の変動係数（標準偏差/平均値、 $CV_{Vel, STR}$ 、 $CV_{Dep, STR}$ ）を算出する。次に、直線部と曲線部もしくは直線部と拡幅部を合わせたデータに対し同様に変動係数を求める（例えば、 $CV_{Vel, STR\&BND}$ など）。そして、曲線部や拡幅部が存在することで、直線部と比べてどの程度、流速や水深に関する特性が多様化するかを評価するために、上記で求めた値の差分を求め（例えば、 $CV_{Vel, STR\&BND} - CV_{Vel, STR}$ ）、流速もしくは水深変動の付加量（ ΔCV ）とした。この付加量が大ききことは、直線部だけより、曲線部や拡幅部が存在する方が、環境の変異性が高いことを意味する。図-7は、両軸に水深、流速の付加量を河川ごとにプロットし、プロットの大きさを曲がりの急さを表す B/r に対応させて示したものであり、付加量の大きさが河道の曲がりの急さとの関係性を把握できる。これより、水深、流速の変異性が高い第一象限に大きなプロットが多く、曲がりによって環境変異性がもたらされることが示唆される。一方、変異性が大きくてもプロットが小さい場合や（曲がりが緩い）、変異性が小さいのに曲がりが急な場合もあり、必ずしも曲がりが環境の変異性をもたらすわけではないことも分かる。これまでに見たように、曲がりは淵の形成しやすさを促すなど、特定の環境を発生させるが、

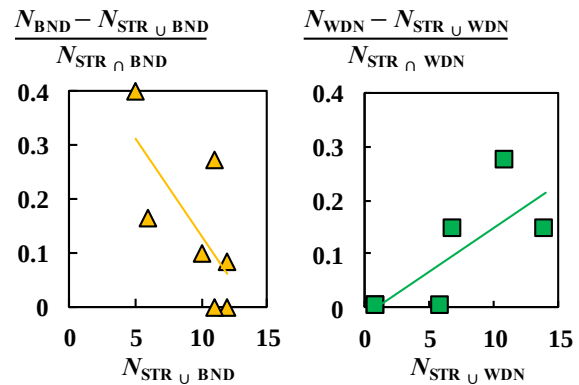


図-8 直線部および平面変化部の出現種のうち河道平面形変化部にのみ確認された種数の割合。（左：曲線部，右：拡幅部）

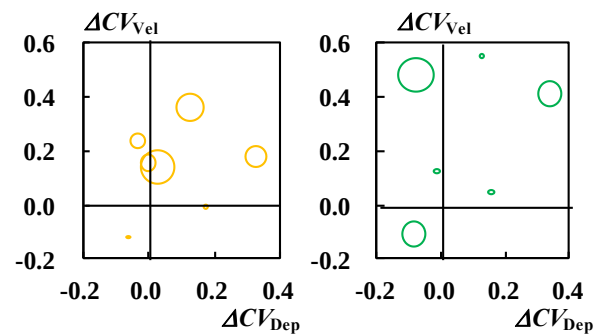


図-9 水深・流速の付加量と確認魚種の特異性の関係（左：曲線部，右：拡幅部）

河道内の流水環境は植物の侵入などにも影響されていた。また、直接的には検討していないが、施工からの時間経過や出水の経験の影響も受け、同じ平面形状でも観測される環境には幅があるものと考えられる。

4. 河道平面形の変化による魚類群衆の変化

魚類調査の結果、全体で32種の純淡水魚が採捕され、3種の国内・国外来種が含まれていた。直線部より曲線部もしくは拡幅部において種数が多くなった河川は11河川の中で6河川であり、平面形が複雑であれば単純に種数が多くなるというわけではなかった。そこで、本研究では限られたデータであることを認識しつつ、在来の純淡水魚（29種）を対象に次のような検討を試みた。

曲線部および拡幅部が存在することによる魚類群衆の変化を評価するために、直線部、曲線部、拡幅部で見つかった種数を N_{STR} 、 N_{BND} 、 N_{WDN} とし、各河川の直線部と曲線部もしくは直線部と拡幅部で共通して見られた種数を求めた（ $N_{STR \cap BND}$ および $N_{STR \cap WDN}$ ）。そして、曲線部のみ（ $N_{BND} - N_{STR \cap BND}$ ）もしくは拡幅部のみ（ $N_{WDN} - N_{STR \cap WDN}$ ）で見られた種数と、直線部と曲線部（ $N_{STR \cap BND}$ ）、および直線部と拡幅部（ $N_{STR \cap WDN}$ ）をまとめた総種数を算出した。図-8左は「直線部と曲線部をまとめた総種数： $N_{STR \cap BND}$ 」と、「この総種数に占める曲線部のみで見られた種の割合： $(N_{BND} - N_{STR \cap BND}) / N_{STR \cap BND}$ 」の関係性をプロットしたもので、同図右は拡

幅部 (N_{wdn}) を対象に示したものである。この図は横軸の値が大きければ、対象河川で見つかる種の数が多いことを示しており、縦軸の値が大きければ、その河川の中で直線部では見つからないが、曲線部（もしくは拡幅部）で見つかる種の割合が高いことを示している。また、図-9は図-7と同様に、水深、流速の付加量 ΔCV を両軸にとり、プロットの大きさを図-8の縦軸、すなわち平面形変化部にのみ出現した種の割合を示している。

まず図-8左に注目すると、曲線部については負の相関が見られ、対象河川で見つかる魚種数が多いほど、曲線部のみで見つかる魚種の割合は小さく、曲線部に生息する種の多くが直線部でも見られたことを示している。そして、その河川で見つかる魚種数が少ない場合には、曲線部のみで見つかる魚種の割合が高く、直線部では見つからない種が曲線部に生息していたと解釈できる。曲線部のみで見られる種の割合は、流速および水深の付加量が大きな河川で高くなっていた（図-9左）。つまり、魚種が多く生息するような河川では、曲がりによって生じる環境（例えば、淵）が、直線部にも存在することで多様なハビタットを有していた可能性が示唆され、曲線部のみで見られる種があまりいなかったものと考えられる。一方、生息する魚種が少ない河川では、直線部には存在していない物理環境を曲線部が有していたことで、曲線部のみで見られる種が存在し、その河川での種の増加に寄与していたものと考えられる。

拡幅部（図-7右）においては、傾向が逆になっており、種数が多い河川の方が拡幅部で特異的に見つかる種が多くなっていた。これは魚種数が少ない河川では、拡幅を行った場合、必ずしも種数の増加をもたらすわけではないことを示している。一方、魚種数が多く、環境が良好であることが想定される河川では、拡幅部が存在することで、さらなる種の追加が期待される。図-8右において、付加量が多い河川ほど、拡幅部のみで見つかる種の割合が高くはなっておらず、拡幅による流速・水深変動の付加は、曲線部とは異なる影響を魚類群集に及ぼしている可能性が考えられる。河川において優占的ではない魚種は、環境が劣化していないことを前提として、局所的な淀みや砂地で見つかることがあり、マイクロスケールで形成される特殊な環境に依存している場合がある。種数の多い河川で拡幅が行われ、このような特殊な環境が創出された場合にのみ、直線部には生息していなかった種が拡幅部で見つかったのかもしれない。このように、曲線部と拡幅部では直線部に対する応答が異なっており、平面形の変化による流速や水深の多様化が魚類群集に及ぼす影響について、個別に捉えていく必要があるものと考えられた。

5. 結論

本研究では、中小河川における河道平面形の変化に対する物理環境および生息魚類のインパクト・レスポンス関係の把握を試みた。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 直線部と拡幅部、曲線部を比較し、淵の形成に着目して関係性の評価を行った。淵は曲線部では見られるが拡幅部では少ない。淵ができる湾曲の目安は水位上昇の目安でもある $r/B < 10$ と対応している。
- ② 拡幅部では、淵の形成には顕著に影響しないが、特に元の環境が単調である場合には流水環境の多様性が大きく増加する。一方、大幅に拡幅された場合は土砂堆積と植物侵入によってみお筋縮小の影響を受け、狙いの瀬淵環境が形成されない場合がある。
- ③ 得られた魚類相データを直線部と平面形変化部と比較することにより、直線部のみに比べて平面形の変化があることで流速・水深が多様化する一方、曲線部と拡幅部とでは創出されるハビタットが異なり、生息する魚類の反応性に違いがあることが示された。

謝辞：現地調査においては、自然共生研究センターの諸氏に尽力していただいた。研究は河川基金助成（No.2017-5211-030、代表：大槻順朗）の一部を用いて行われた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, Vol. 342, pp. 87-96., 1984.
- 2) 山本晃一: 沖積河川: 構造と動態, 技報堂出版, 2010.
- 3) 大槻順朗, 大石哲也, 萱場祐一: 中山間地河川の部分拡幅部における被災分析と軽減手法および環境評価に関する事例研究, 河川技術論文集, Vol. 24, pp. 185-190, 2018.
- 4) Rohde, S., Schütz, M., Kienast, F., Englmaier, P.: River widening: an approach to restoring riparian habitats and plant species. River Research and Applications, Vol. 21(10), pp. 1075-1094, 2005.
- 5) 大石哲也, 高岡広樹, 原田守啓, 萱場祐一: 中小河川改修時の川幅設定が河道の景観に与える影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70(4), pp. I_997-I_1002, 2014.
- 6) 渡邊康玄, 長谷川和義, 北條紘次: 河川データによる河床洗掘の水理要因に関する検討, 水工学論文集, Vol. 34, pp. 313-324, 1990.
- 7) 財団法人国土技術研究センター (編): 河道計画検討の 手引き, 山海堂, 2002.
- 8) 山本晃一, 藤田光一, 佐々木克也, 有澤俊治: 低水路川幅変化における土砂と植生の役割, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp. 233-238, 1993.
- 9) 藤田光一, John A. Moody, 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, Vol. 551, pp. 47-62, 1996.

(2019. 4. 2受付)