

洪水時の地形の浸食堆積履歴が河川生息場の 好適性に及ぼす影響

INFLUENCE OF SPATIOTEMPORAL PATTERNS OF EROSION AND DEPOSITION
PROCESSES DURING FLOODS ON RIVERINE HABITAT SUITABILITY

兵藤誠¹・竹門康弘²・角哲也³・栗津陽介⁴・鄧朝暉⁵

Makoto HYODO, Yasuhiro TAKEMON, Tetsuya SUMI, Yosuke AWAZU and Zhaohui DENG

¹正会員 京都大学 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 理博 京都大学准教授 防災研究所水資源環境研究センター(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博士(工) 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 京都大学 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵非会員 農博 いであ株式会社 情報システム事業本部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

This article shows how spatiotemporal patterns of geomorphological processes influence riverine habitat suitability. We conducted a case study in a middle reach of the Tenryu River in Japan and a set of interval-recording-cameras has been installed at 60m above the riverbed on the electric supply tower located in the middle of a river corridor. Firstly, we identified different types of habitat structures in a reach, such as riffles, side pools, and back waters, and analyzed characteristics of inundation processes for each habitat type. Secondly, we analyzed, at a micro scale, hardening and softening processes of habitat structures by small floods in relation to lotic and lentic inundation characteristics. Thirdly, in order to analyze erosion and deposition processes at a macro scale, we developed a 2-D model using the photogrammetric method and analyzed temporal series of the aerial photo data and 2-D-transformed data by quantifying deposited and eroded areas due to different types of floods.

Key Words : *spatiotemporal patterns, habitat suitability, shifting habitat mosaic, riverbed softness, geomorphological process*

1. はじめに

河川生息場は、瀬・淵、ワンド、たまり等、様々な構造(要素)の組合せにより構成されており¹⁾、地形の浸食や堆積の履歴と深く関連している。このような地形変化の履歴は、上流からの洪水流の規模や頻度、供給土砂(量と質)によって規定され^{2), 3)}、河川生息場の多様性(不均質性)を決定する。具体的には、河川生息場構造(の要素)が経年的に創出や消失を繰り返し、変動履歴(時間的・空間的パターン)の結果として形成されるものである⁴⁾。生息場構造には、栄養塩や植生繁茂等も含まれるが、洪水や土砂移動の特性と関連して形成されるものである。健全な河川生態系を復元し、適切な河川管理を行うためには、変動履歴を適切に評価する必要がある。しかしながら、現在普及している様々な手法(例え

ば、HEP, AUSRIVAS, PHABSIM, RIVPACS, IBI)や自然再生に関する取り組みでは、この観点が適切に取り入れられていない⁴⁾。近年の研究により、変動履歴の中において多様な生息場が存在することが、生物多様性を最適化する可能性が示唆されている^{5), 6)}。生息場の変動履歴に関しては、例えばタリアメント川(北イタリア)における Shifting Habitat Steady State⁷⁾や生息場寿命(Habitat Age)⁸⁾に関する研究がある。しかしながら、地形変化による生息場が、モザイク状にシフトする(Shifting Habitat Mosaic)中で、それぞれの生息場構造の時間的な変化の特性を経時的に追跡し、定量的に明らかにした研究は殆どない。更に、洪水規模と生息場構造の変動履歴の関連性について、洪水時の浸水特性や河床軟度の変化に着目して、定量的に分析した研究はない。本研究では、洪水による地形変化が比較的生じやすく礫床河川である天竜川(16.4km周辺)を対象として、

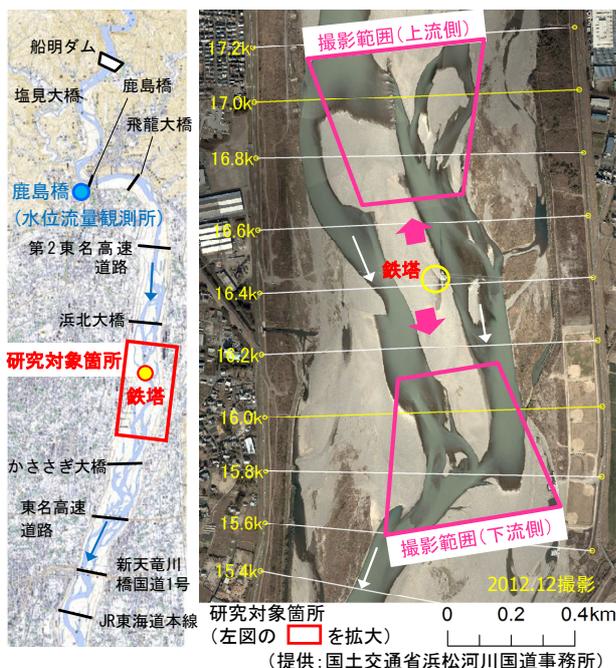


図-1 研究対象箇所位置図

洪水時の浸水特性と河床軟度に着目し、洪水による地形の浸食・堆積履歴が河川生息場の好適性に及ぼす影響を把握した。なお、対象箇所の河道特性は、セグメント2-1、河床勾配は1/520~1/650程度、代表粒径(60%)は60~73mm、複列~交互砂州の河床形態を有している。

2. 調査・分析方法

研究対象箇所である天竜川16.4k周辺は、本川最下流に位置するダム(船明ダム:30k地点の水力発電ダム)より十数キロ下流に位置し、近傍の水位流量観測所には鹿島(25k)がある(図-1)。この16.4kの河道中央には中部電力の送電鉄塔があり、砂州上から約60mの高さにインターバル撮影機能付きデジタルカメラを複数台設置し、上流側、及び下流側の河床地形を1時間毎に連続撮影している。2012年5月17日に撮影テストを行った後、2012年8月8日にカメラを設置し連続撮影を開始した。カメラからの撮影範囲は図-1に示す通りであり、撮影画像及び、連続撮影の開始直後の生息場分布の状況を図-2に示す。航空写真とカメラ撮影の時点が異なるため河床地形が異なっているが、連続撮影の開始時点では、瀬(上流2箇所、下流1箇所)やたまり(上流4箇所、下流2箇所)、ワンド(上流3箇所、下流4箇所)が分布しており、多様な生息場環境が形成されていることが分かる。なお、たまりとワンドの定義については、平水時に本川、又は二次流路から、表層水が分断されている池をたまり、接続されている池をワンドとした。但し、平水時に表層水が連続していても、池の流水方向が本川、及び二次流路の流水の影響を受けていない(背水ではなく分断されて



図-2 インターバル撮影機能付きデジタルカメラ設置時の生息場の分布状況(2012年8月8日)

いる)と現地で判断できる池についてはたまりと定義した(具体的には、図-2の上-たまり-2と上-たまり-3)。

本研究では、撮影画像に含まれるこれらの生息場構造について、以下の①~③を行うことで洪水による地形の変動履歴が河川生息場の好適性に及ぼす影響を把握した。それぞれの調査・分析手法を以下に示す。

- ① インターバル撮影機能付きカメラの撮影画像による洪水流れの特性の把握
- ② マイクロ生息場の河床の硬化・軟化履歴の定量把握
- ③ マクロ生息場における浸食・堆積履歴の定量把握

(1) 洪水時流れの特性の把握の方法

洪水時流れの特性については、2012年10月23日の小規模洪水時(約508m³/s、鹿島)の時間毎の連続撮影画像を並べて、河川水位の上昇に伴う浸水の状況と洪水流の流向を画像から判断し、その特性を定性的に分析した。近年の時刻流量(鹿島)を図-3に示す。なお、本論文に示す流量は全て鹿島地点の値であり、2012年度までは時刻流量月表の値、また、2013年度については確定値がないため水文学データベースによる時刻水位を2012年度のH-Q式から換算したものをを用いた。平均年最大流量が4,500m³/s(1939年~2012年の平均値)であるため、観測期間(2012年8月8日以降)に発生した洪水は小規模にとどまっている。10月23日の小規模洪水を対象とした理由は、対象期間に大規模洪水が発生しなかったこと、後述(2)で行うマイクロ生息場との関連性を把握する必要

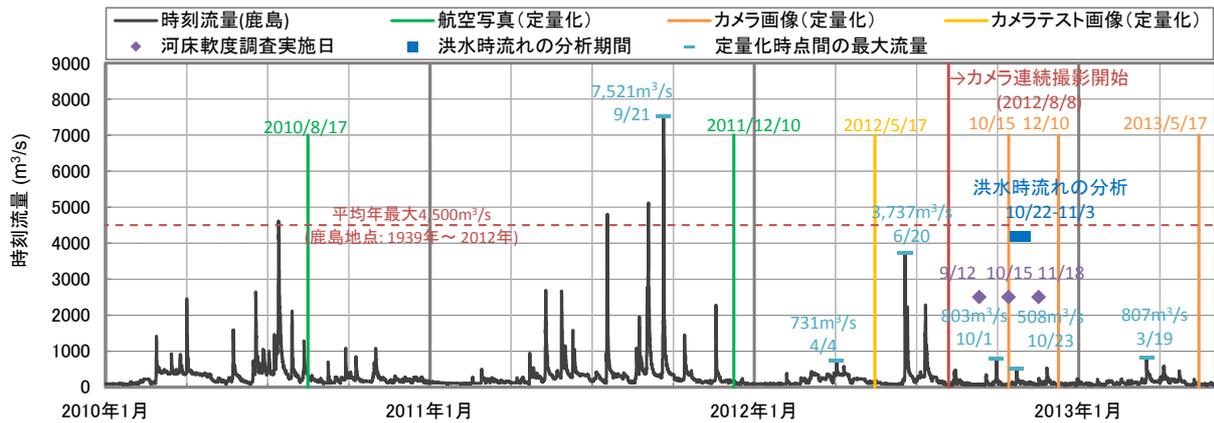


図-3 調査概要と洪水履歴(鹿島地点)

があり、その調査時期が2012年10月～12月であったこと、洪水時にカメラ画像が問題なく記録されていることを条件としたためである（10月1日の洪水では暴風によりカメラの角度が変化し記録できなかった）。他の期間の小規模洪水については、観測期間中の河床地形の変化が小さく洪水時流れの特性は概ね同じであったので、本論文では2012年10月23日を、現在の河床地形における小規模洪水時の特性として論じるものとする。

(2) マイクロ生息場の硬化・軟化履歴の定量把握の方法

生息場の河床の硬化、及び軟化プロセスを把握するために、河床軟度を2012年9月、10月、11月の3回に渡り計測した。具体的な調査方法は、生息場毎に、大きさに応じて流下方向に3～12の測線、流下方向に垂直（横断方向）に3～16の測線を引いてマトリックスを作成し、その格子点の河床軟度を計測した。計測方法は、シノという長さ30cm程度の先のとがった鉄棒に目盛を刻んだものを用いて、河床に人力で一定の荷重をかけて突き刺し、その貫入深（cm）を記録したものである。1地点につき5回行いその平均値を採用した。河床が軟らかい程、河床軟度の値は大きくなる。土壌の固さを計測する手法として、長谷川式土壌貫入計によるものがあるが、本研究では多数の地点を継続的に調査する必要があり、より簡易な方法としてシノを用いて調査・分析を行った。

(3) マクロ生息場の浸食・堆積履歴の定量把握の方法

河床地形の浸食・堆積過程を定量的に把握するため、まず、画像解析技術を応用して撮影画像のオルソ化（平面直角座標系の平面二次元画像へ変換）を行う手法を開発した。次に、これらのオルソ化した画像を重ね合わせることで浸食、及び堆積箇所を把握できるため、様々な洪水の規模に着目して浸食・堆積の履歴を面的に把握した。更に、この変化を面積として定量化し、洪水規模と浸食・堆積履歴との関連性を分析した。

画像解析技術の基本的な理論は、測定対象面（河床地形）に設定された平面座標系 XY と、写された写真面に

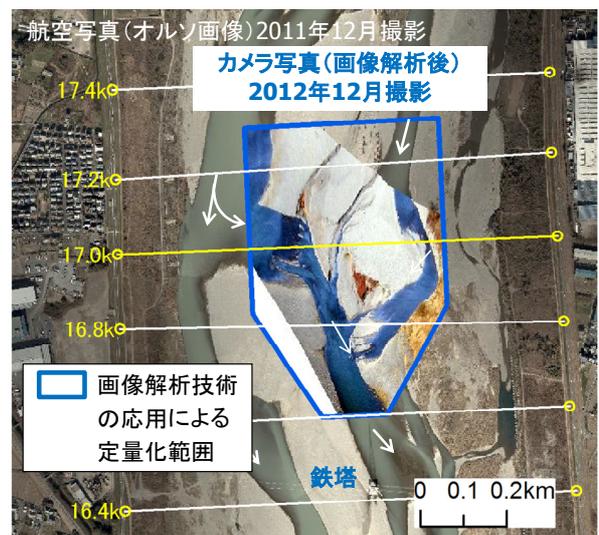


図-4 河床地形の浸食・堆積過程の定量化手法

設定された平面座標系 xy との間に、式 (1) が成立する。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1}, \quad Y = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad (1)$$

式 (1) は、測定対象面が水平面でもなくとも（鉛直面や斜面でも）、平面形状であれば成立する。

$$x_i b_1 + y_i b_2 + b_3 - x_i X_i b_7 - y_i Y_i b_8 = X_i \quad (2)$$

$$x_i b_4 + y_i b_5 + b_6 - x_i Y_i b_7 - y_i Y_i b_8 = Y_i \quad (3)$$

式 (2) と式 (3) の8つの未知係数 $b_1 \sim b_8$ は、4点以上の標定点の測定値の組 (X_i, Y_i, x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n; n \geq 4$) に対して、式 (1) を展開して線形方程式に変換することで、最小二乗法により求めることができる。

具体的には、カメラの画角の中に任意の8地点に杭（標的）を設置し、RTK-GPSを用いて座標を計測した。本論文では、この中の4つの座標を基準点として二次元モデルを構築（オルソ化）した。本モデルと航空写真を重ね合わせた定量化のイメージを図-4に示す。その結果、



図-5 小規模洪水の連続撮影画像と洪水時流れの特性 (2012年10月22日～11月3日)

水平方向に1 m 程度の解析精度のモデルを構築することができた。研究対象箇所の川幅が約800 m 程度あることから、浸食・堆積履歴を定量化する上で適切な精度を有していると考えられる。但し、厳密には解析範囲の端部では補正が外挿補間となりやや精度が落ちる等の課題はあるが、相対的な変化量は十分に定量化できているため、本論文では解析精度の向上については今後の課題とする。

カメラ撮影画像を用いて定量化を行う期間は、観測開始時の2012年8月8日～2013年5月17日までを対象とした(図-3)。しかし、本期間には小規模洪水しか発生しなかったため、中規模・大規模洪水による浸食・堆積過程を把握する必要があった。そこで、2010年8月17日と2011年12月10日の航空写真(オルソ画像:浜松河川国道事務所提供)、2012年5月17日のカメラテスト時の撮影画像を加えて定量化、及び分析を行うことで、2011年9月21日の大規模洪水(7,521m³/s)、及び2012年6月20日の中規模洪水(3,737 m³/s)による地形の変化を把握した。これにより、全体として2010年8月17日～2013年5月17日までの期間を対象として、規模の異なる洪水による浸食・堆積履歴の分析を行った。

3. 結果と考察

(1) 洪水時流れの特性の把握

上流側(図-5の上段3枚の写真)の上-ワンド-1及び上-たまり-2に着目すると、水位の上昇に伴い旧二次流路を先行して洪水流が通過し、小規模洪水時に形成される流路となっている(小規模洪水時の流水環境)。上-たまり-1では、上-瀬-2の周辺の水位的上昇に伴い、背水により冠水する特性であることがわかる(小規模洪水時の止水環境)。下流側(図-5の下段3枚の写真)の下-たまり-1をみると、カメラの撮影範囲から外れているが、水位

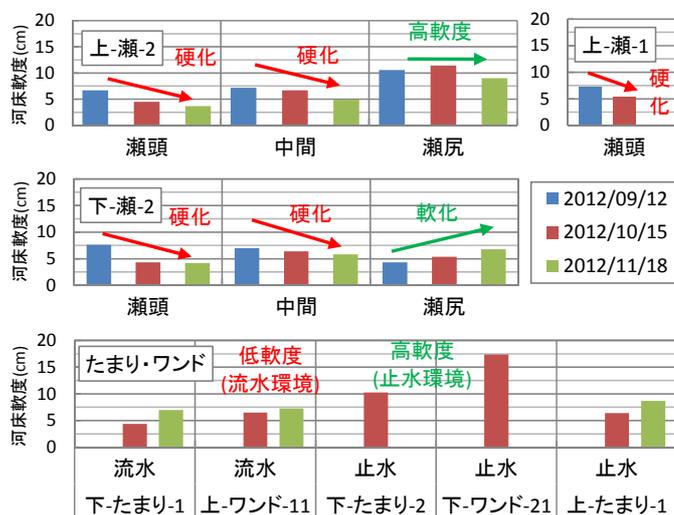


図-6 小規模洪水時の河床軟度の変動履歴

上昇に伴い、本たまりの上流側から洪水流が越流して流路となっている(小規模洪水時の流水環境)。下-たまり-2と下-ワンド-21では水位上昇に伴い、それぞれ二次流路(上-瀬-2)及び、本川の背水によって冠水した(小規模洪水時の止水環境)。更に、洪水ピーク時には、二次流路と本川の背水が混合するような複雑な形態となっていた。以上より、小規模洪水時の流れの特性として、大きくは流水環境、及び止水環境の2つの浸水形態が存在することが分かった。

(2) マイクロ生息場の河床の硬化・軟化履歴の定量把握

図-6に、2012年9月、10月、11月に行った河床軟度調査結果を示す。ここでは、マイクロ構造から見た生息場の変動履歴を把握し、(1)で分析した洪水時流れの特性(流水環境、及び止水環境)との関連性を分析した。たまりとワンドについては調査箇所全体の河床軟度の平均値、瀬については瀬の中を上流部、中流部、下流部の3

期間： 2010年8月～2011年12月 2011年12月～2012年5月 2012年5月～2012年9月 2012年10月～2012年12月
 使用画像： 航空写真 航空写真とカメラ撮影画像 カメラ撮影画像 カメラ撮影画像
 洪水規模： 大規模(7,521m³/s) 小規模(731m³/s) 中規模(3,737m³/s) 小規模(508m³/s)

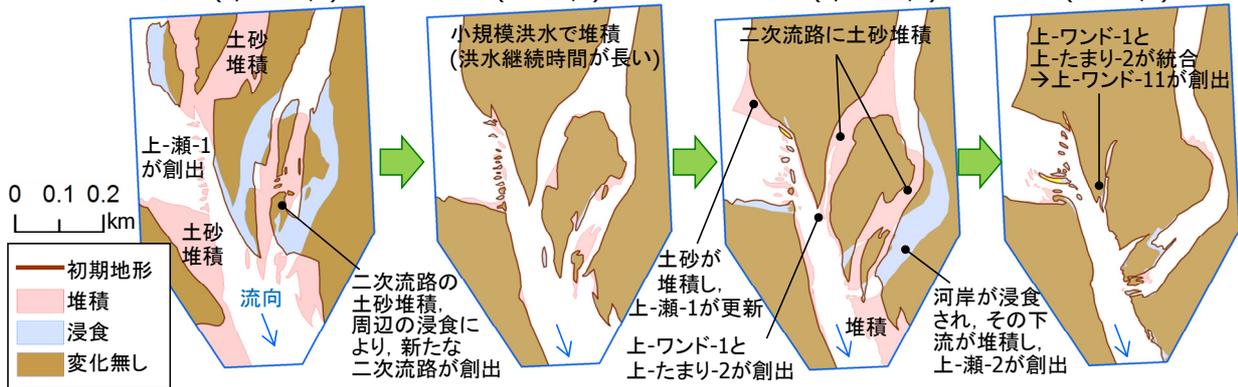


図-7 河床地形の浸食・堆積履歴の面的把握（大規模、中規模、及び小規模洪水による変化の抜粋）

つの区域に分けてそれぞれ平均値を算出した。図に示すように、各生息場の河床軟度は、流水環境と止水環境によって小規模洪水時の応答が明らかに異なることが分かった。図-6の上段と中段に示す瀬は、流水環境として捉えることができる。止水環境の生息場は、洪水の末期等に細粒土砂が堆積しやすく河床が軟化している。一方で、同じたまりやワンドでも、流水環境の生息場では、止水環境と比較して河床軟度が小さく、小規模洪水では生息場の河床を浸食するような表層の土砂移動により河床が硬化している。流水環境の中で瀬に着目すると、10月1日(803m³/s)、及び10月23日(508m³/s)の小規模洪水を受けることで、河床が瀬頭で硬化、瀬尻では軟化、又は軟度の高い状態を維持する傾向がみられた。これは小規模洪水により瀬頭の河床が浸食し、瀬尻に堆積するような規模の小さい土砂移動により生じたものと考えられる。

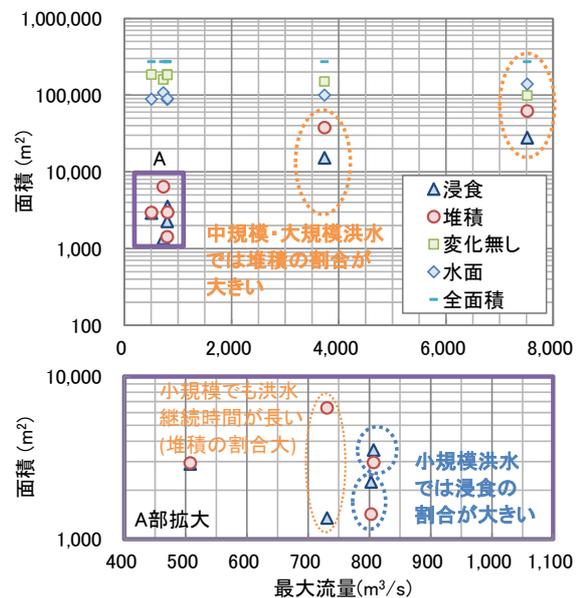


図-8 洪水規模と河床地形の浸食・堆積特性の関係

(3) マクロ生息場における浸食・堆積履歴の定量把握

a) 浸食・堆積履歴の面的把握

カメラ撮影画像の範囲の内、流下方向に700 m (16.6k～17.3k)、横断方向に約500mの範囲について、複数時点の航空写真と2次元モデルの重ね合わせを行い、時点間の浸食、及び堆積の変動履歴を面的に示した結果を図-7に示す。なお、解析に用いた撮影画像は、洪水の影響がなく水位が十分に低い平水時の時点のものを抽出したものであり、浸食、及び堆積とは平水時の水面に対する面的な変化を示したものである。2010年8月～2011年12月では、期間内に最大7,521m³/sの大規模洪水が発生し、規模の大きい堆積や浸食が生じた。右岸の上下流の流路の土砂堆積によって上瀬-1が創出され、左岸側の二次流路の土砂堆積と周辺の浸食によって新たな二次流路が創出された。2012年5月～2012年9月では、期間内に平均年最大流量(4,500m³/s)をやや下回る3,737m³/sの中規模洪水が発生し、比較的規模の大きな土砂移動が生じた。上瀬-1では瀬頭に新たな土砂堆積が生じて瀬が更新さ

れた。また、二次流路の土砂堆積、左岸側の河岸浸食、それに伴う下流の土砂堆積が生じることで、上瀬-2が創出された。2012年10月～2012年12月では、期間内に最大508m³/sの小規模洪水が発生し、流水環境である上たまり-2、及び上瀬-1が統合するような小規模の地形変化(浸食による生息場の消失)が生じた。上記の結果より、生息場の新たな創出や消失、既存生息場の更新、微地形変化等が発生し、それが洪水規模に応じて特徴付けられることが分かった。

b) 洪水規模と浸食・堆積特性との関連性分析

洪水規模と浸食・堆積履歴の関連性について分析するため、上記 a) の結果を用いて、2時点間に生じた洪水規模と、浸食、堆積、変化無し、及び水面(流水部)の面積との関係を把握した(図-8)。解析対象範囲の全面積(27.2万m²)を基準とすると、中規模・大規模洪水時に浸食、又は堆積する河床地形の動的な面積割合は19.5

～32.7% (5.3～8.9万m²)である一方で、小規模洪水時では1.5～2.5% (0.4～0.7万m²)であり河床地形に動的変化が生じる規模は非常に小さい。次に、浸食と堆積の割合に着目すると、平均年最大流量程度の中規模洪水、又はそれ以上の大規模洪水が発生すると、地形変化は浸食に対して堆積が卓越する結果となり、土砂堆積によって瀬が新たに創出され、更新される履歴をよく示す結果となった。一方で、小規模洪水が発生すると、堆積よりも浸食が卓越、又は浸食と堆積が同程度の結果となった。但し、2011年12月～2012年5月の期間内に生じた731m³/sの小規模洪水による変化では、堆積が卓越した結果となった。この結果を洪水時のハイドロ特性(図-3)と合わせて詳細にみると、本洪水の継続時間が長いこと、小規模洪水の傾向と異なり堆積を卓越させた可能性がある。

浸食・堆積の特性について、河床形態や砂州の位置の観点から考察する。本対象箇所は、交互砂州(半波長1km程度)と複列砂州(400m程度)が混在している。中規模・大規模洪水で堆積が卓越し、瀬が創出、又は更新した理由については、瀬が複列砂州の下流側に位置しており、一定規模の洪水(ここでは中規模以上の洪水)が発生すると、砂州が下流側へ伝播しやすい状況にあることが考えられる。瀬が砂州の下流側に形成されることは、既往研究の結果⁹⁾と一致した。一方で、小規模洪水時には、砂州前縁の土砂が殆ど動かず、滞筋である瀬に土砂が供給されない一方、瀬の中のみ土砂移動は生じるために浸食が卓越したものと考えられる。

生息場の好適性としてアユの産卵床に着目した場合、瀬の重要性は広く認知されているが、その中でも瀬頭で軟らかい場所が適していることが示されている^{9), 10)}。これまでの研究により、小規模洪水では瀬頭の浸食が卓越し河床が硬化することで、産卵場としての好適性が劣化することが指摘されていたが、本研究により、瀬が硬化(劣化)する過程を定量的に示すとともに、中規模以上の洪水によって土砂堆積を誘発し、瀬が創出、及び更新されることを明らかにした。また、たまりやワンドについては、中期以上の洪水で生息場が創出されること、小規模洪水時の浸水形態がマイクロ生息場を特徴付けていることが分かった。以上より、生息場の好適性を高めるためには、中規模以上の洪水が一定の頻度で発生すること、及び浸水形態の異なる生息場が多く存在することが重要であることが明らかとなった。

4. 結論

インターバル撮影機能付デジタルカメラにより、洪水時の流れの特性を把握することで、小規模洪水時の流水、及び止水環境が、マイクロ生息場(河床軟度)の特性と関連し、河床軟度は流水環境で高く、止水環境で低いことが分かった。瀬に着目すると、瀬頭の河床が浸食し、

瀬尻に堆積するような土砂移動が生じることが分かった。

解析写真測量技術を応用して、撮影画像を平面直角座標系に変換する2次元モデルを構築することで、浸食・堆積の変動履歴を定量的に評価できる新たな手法を示した。その結果、中規模以上の洪水が土砂堆積を誘発し、生息場を創出、又は更新させることが分かった。一方で、小規模洪水では浸食が卓越し、瀬頭が硬化するため、アユの産卵場の好適性が減少することが分かった。多様な生物に対する生息場の好適性を高めるためには、中規模以上の洪水が一定の頻度で発生すること、浸水形態の異なる生息場が多く存在することが重要であることを示した。

謝辞: 本研究にあたり国土交通省 浜松河川国道事務所からデータを提供して頂きました。調査の実施にあたり、中部電力 掛川電力所、天竜川天然資源再生連絡会、並びに天竜川漁業協同組合、シーテック 浜松支店に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹門康弘: 土と基礎の生態学-6. 砂州の生息場機能, 社団法人地盤工学会, 土と基礎 55(2), pp.37-45, 2007.
- 2) Sumi, T. and Kantoush, S.A.: Integrated management of reservoir sediment routing by flushing, replenishing and bypassing sediments in Japanese river basins, 8th International Symposium on Ecohydraulics, 2010.
- 3) Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C.: The natural flow regime, *BioScience* 47, No.11, pp. 769-784, 1997.
- 4) Hyodo, M., Takemon, Y. and Sumi, T.: Need for analyzing spatiotemporal patterns of river-corridor habitat structure in sediment management, *Advances in River Sediment Research - Fukuoka et al. (eds)*, pp.1557-1567, 2013.
- 5) Takemon, Y.: Management of biodiversity in aquatic ecosystems: dynamic aspects of habitat complexity in stream ecosystems. In: (ed. by Abe T., Levin S., & Higashi M.) *Biodiversity: An Ecological Perspective*. Springer, 259-275, 1997.
- 6) Ward, J.V., Tockner, K., Arscott, D.B. and Claret, C.: Riverine landscape diversity, *Freshwater Biology* 47, pp.517-539, 2002.
- 7) Arscott, D.B., Tockner, K., Nat, D. and Ward, J.V.: Aquatic Habitat dynamics along a Braided Alpine River Ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy), *Ecosystems* 5, pp.802-814, 2002.
- 8) Tockner, K., Lorang, M.S. and Stanford, J.A.: River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts, *River research and applications* 26, pp.76-86, 2010.
- 9) 角哲也, 中島佳奈, 竹門康弘, 鈴木崇正: アユの産卵に適した河床形態に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 54B, 719-725, 2011.
- 10) 村井彰弘, 竹門康弘, 角哲也: アユの産卵床に必要な河床地形条件に関する研究, 応用生態工学会講演集, pp.158, 2012. (2013. 9. 30受付)