

河川生息場の変動履歴分析のための河床地形モニタリング手法の開発

A Geo-morphological Monitoring Method for Analyzing Riverine Shifting Habitat Mosaic

兵藤誠・栗津陽介・竹門康弘・角哲也・鄧朝暉⁽¹⁾

Makoto HYODO Yosuke AWAZU, Yasuhiro TAKEMON, Tetsuya SUMI, Zhaohui DENG⁽¹⁾

(1) いであ株式会社

(1) IDEA Consultants, Inc., Japan

Synopsis

Some recent studies highlighted dynamic nature of spatiotemporal patterns of riverine habitats. Existing habitat evaluation tools, however, lack this perspective. In order to analyze spatiotemporal patterns that support biological diversity, we conducted a case study in a middle reach of the Tenryu River. Firstly, a set of interval-recording-cameras have been installed to monitor spatiotemporal changes caused by various flood events with different intensity and frequency. Secondly, we measured riverbed softness of habitat units, of which riffles are of particular importance for Ayu fish (*Plecoglossus altivelis altivelis*) as a spawning redd. Finally, we developed a monitoring method to analyze changing patterns of riverbed and riverine shifting habitat mosaic using a photogrammetric method. Habitat data recorded via several interval-recording-cameras were transformed into ortho data, and showed the effectiveness to analyze and quantify the spatiotemporal patterns.

キーワード:河床地形モニタリング, 変動履歴, シフティングハビタットモザイク, 河床軟度, 生物多様性

Keywords: geo-morphological monitoring, spatiotemporal patterns, shifting habitat mosaic, riverbed softness, biological diversity

1. はじめに

1.1 現状の河川環境の評価手法と課題

治水と環境の一体的な管理を行うためには、河川環境を適切に評価する必要がある。河川環境の評価を行う手法として様々なツールが存在する。例えば、Habitat Evaluation Procedures (HEP) や Australian River Assessment System (AUSRIVAS) 等であり、HEP は、複雑な生態系の概念を特定の対象生物の生息場に置き換え、その生息場適性指数 (Habitat Suitability Index: 質×空間×時間) に基づき定量的に評価する手法である (US FWS, 1981)。AUSRIVASは、水生昆

虫を指標として、その生息場に係る物理環境を指標とした予測モデルにより、自然状態 (リファレンス) と現状を比較し、分類化や重み付けにより点数付けを行っている (Parsons et al., 2001)。

これらの手法は、河川生態系の「現状」について評価を行うことで、自然再生事業や環境アセスメントにおける代償措置等の合意形成の場で活用されている。利害関係者間で認識を共有するツールとして国内でも適用された事例がある。

しかしながら河川生態系は、Fig.1に示すように、二次流路、瀬や淵、ワンドやたまり等の河川生息場 (の要素) が経年的に創出や消失を繰り返し、生息

場環境の変動履歴（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が、現在普及している手法は、変動履歴という観点を適切に評価できていない。

近年の研究では、河川生息場の機能を評価する上で、Shifting Habitat Mosaicという概念が着目されている。それは、「氾濫原の河川生息場は、ある生息場の要素を見ると消失・創出の変化（更新）が生じるが、ある一定の領域スケールから俯瞰的に見ると、瀬や淵、ワンドやたまり等の生息場要素の配置は変化するが、全体の構成要素は比較的安定して存在する」(Arscott et al., 2002)という考え方であり、河川環境を評価する上で重要な指標となる。河川生息場に着目して評価を行うためには、その変動履歴を適切に捉えると共に、生物多様性（個体数や種数）を最適化する変動履歴を把握する必要がある。既往研究により、河川生息場の空間的な多様性が生物多様性を最適にすることが示唆されている (Takemon, 1997)。更に、生息場寿命 (Habitat Age) という新たな視点から、時間的な変化の中で、河川生息場が多様に存在することの重要性が示されている。北イタリア・タリアメント川では、河川に隣接する山付の高所からデジタルカメラで1時間間隔に撮影した画像を用いて河川生息場形成後の継続時間を分析し、継続時間が異なる河川生息場が多く存在することが種の多様性を高めることを把握した (Arscott et al., 2002)。河川生息場の時間的・空間的パターンと生物多様性の関係を把握するためには、河川生息場の要素毎の変動履歴を定量的に追跡し、時間的及び空間的パターンを編み合わせるような分析を行う必要がある。

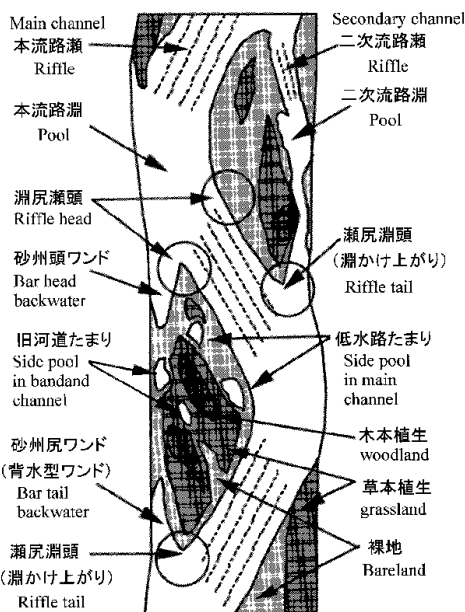


Fig. 1 Riverine habitat structure (竹門康弘, 2007)

1.2 本研究の目的と本論文の位置づけ

本研究は、河川生息場の時間的・空間的な変動履歴を適切に分析し、生物多様性（個体数と種数）を最適にする変動履歴の条件を設定した上で、その条件を満たすための土砂（粒径及び量）と流況（ハイドログラフ）のシナリオを推定し、シナリオを実現するための管理手法を提案することを最終的な目的とする。

本論文では、その第一段階として、河川生息場の変動履歴に着目し、異なる洪水規模による河床地形の応答について詳細に把握した。具体的には、河床地形に多様な変化が生じる天竜川（16.3k付近）を対象に、河道内に設置されている鉄塔（中部電力所有の許可工作物）の河床から約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設置して、鉄塔より上下流に向けて1時間間隔の撮影記録を行った。この結果を用いて洪水時の流れの特性や、その結果として生じる河川生息場の変動履歴を分析した。次に、河川生息場として、瀬、たまり、ワンドの河床の軟度を調査し、洪水時流れの特性との関連性を考察した。その中で天竜川の天然資源として重要なアユの産卵床となる瀬に着目して、産卵にとって好適な河床環境の形成過程、特に産卵床にとって重要な軟らかい河床が形成される流量条件を、現地の河床軟度調査、及び河床変動解析により分析した。更に、河道内に設置したデジタルカメラの撮影画像について、解析写真測量技術を用いてオルソ化を行い、河川生息場の変動履歴を定量的に分析するための、新たな河床地形モニタリグ手法を開発した。

1.3 天竜川対象地区の概要

本論文で対象とする天竜川では、天竜川ダム再編事業が行われており、本事業は恒久的な土砂対策の施設整備を行うことにより、佐久間ダムの治水・利水容量を維持するとともに、土砂移動の連続性を確保すること、また、ダム貯水池内からの土砂供給による河川環境の改善、及び海岸線後退の抑制等を目的としている。一方で、天竜川のダム下流の河道区間では河床の粗粒化や樹林化、ダムによる洪水時の濁水長期化によるシルトの付着等の変化が生じている。また、近年アユの漁獲高が減少しており、じれらの問題を解決する必要がある。

天竜川16.3k付近は、天竜川の最下流に設置されている船明ダムの下流区間であるが、洪水により河床地形が変化しやすい状況にあり、また、減少傾向にあるが、瀬ではアユの産卵が確認されている。アユの産卵環境として、瀬の中で礫が浮石の状況であり、かつ、河床軟度が高い（河床が軟らかい）箇所が好適であることが分かってきた（角ら, 2011；鈴木ら,

2011; 村井ら, 2012)。そのため、ダム上流域からのシルトや砂の供給量が増えて、シルトや砂、礫の構成比が著しく崩れると礫間に目詰まりが生じ（浮石環境が減少し）、河床環境が悪化する。また、シルトにより礫が被覆されると付着藻類が劣化し、アユの採餌環境に負の影響を及ぼすこと等が懸念されている。アユにとって好適な河川環境を維持するためには、上流域からの適切な土砂（量と質）の供給と土砂を輸送する洪水流のバランスを解明することが重要となる。

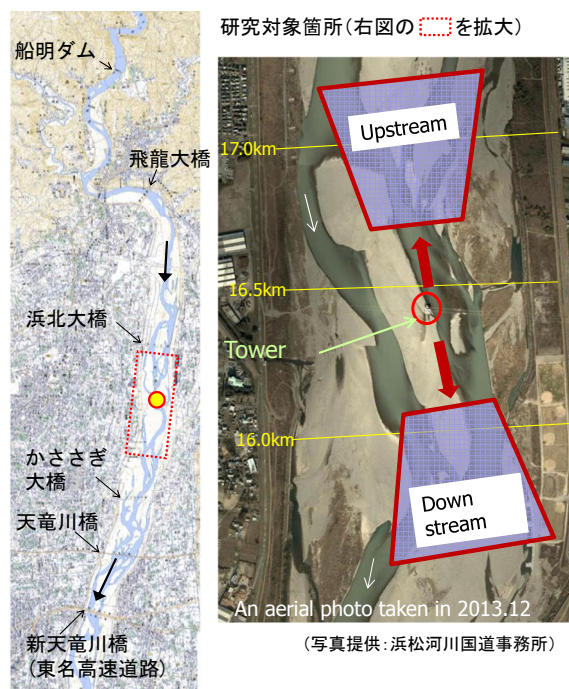
2. 河床地形モニタリング

河床地形モニタリングでは、河川生息場をマクロ及びマイクロの異なる空間的スケールで捉えるために、インターバル撮影機能付きデジタルカメラにより、洪水時流れの特性や河川生息場（の要素毎）の変動履歴をマクロ・スケールで把握し、生息場要素の河床軟度に着目して変動履歴をマイクロ・スケールで把握するために現地調査を行った。

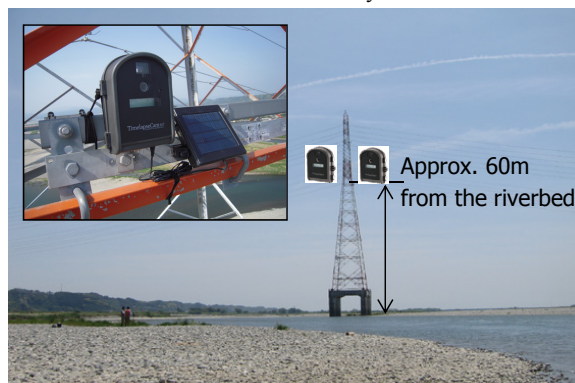
2.1 カメラモニタリングの概要

河川生息場の変動履歴をマクロ・スケールで把握するために、天竜川（16.3km付近）の河道内に設置されている鉄塔（中部電力所有の許可工作物）の河床から約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2012年8月8日に設置し、設置したカメラから鉄塔の上流及び下流に向けて1時間間隔で（5時から19時までの毎時15回、夜間を除く）、撮影記録を行った（Fig 2.）。各カメラに太陽光パネルを設置し、電池による通常のバッテリーを併用することで長期間の連続撮影を可能とした。また、1ヶ月に一度程度、鉄塔上で撮影データの回収を行うとともに、撮影角度の調整や故障したカメラの交換、バッテリー交換等の維持管理を行っている。

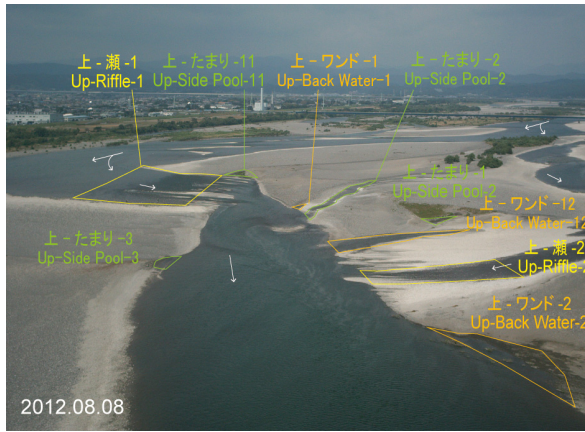
インターバル撮影機能付カメラによる撮影画像をFig. 3に示す。生息場環境として、上下流を合わせて瀬を3個、ワンドを7個、たまりを6個特定し、これらの変動履歴をカメラによるモニタリングで追跡した。モニタリングでは、2012年8月8日以前の5月17日にカメラ設置に関する現地テストを行っており、その際に鉄塔での塔上作業を行いカメラによる撮影画像を記録しているため、本論文ではその画像も活用する。また、モニタリングは8月8日以降、現在に至るまで継続的に行っているが、瀬の河床軟度の調査を2012年9月、10月、11月の3回にわたり行っているため、ここで論じるモニタリング結果は、2012年8月8日から同年12月末までの約3ヶ月間を対象とした。



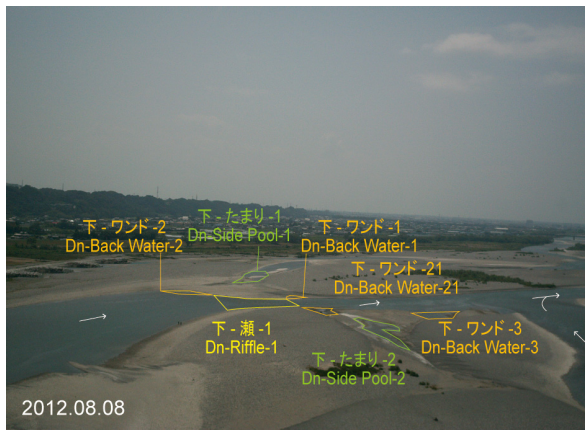
(a) The study site selected is located at 16.3km from the river mouth, which is a downstream reach of the Funagira dam (located the most downstream at 30 km). Several interval-recording-cameras have been installed to monitor spatiotemporal patterns of riverine habitat at upstream and downstream reaches of the study site.



(b) Interval-recording-cameras were located in a middle of the river channel, approximately 60 m high from the riverbed. These cameras have been equipped with solar panels, enabling data accumulation of a longer period. Fig. 2 A camera monitoring location at the Tenryu River. Interval recording of camera photo data has started since 8 August 2012 to date. Photos were also taken on 17 May 2012 as a field test of the interval recording prior to its implementation, and therefore were used in this article to analyze spatiotemporal patterns of riverine habitat.



(a) A view of an upstream reach from the camera site



(b) A view of a downstream reach from the camera site
 Fig. 3 Views of interval recording photo data by camera monitoring. Habitat units of upstream and downstream reaches were identified. At the beginning of this camera photo monitoring, in total 3 riffles, 7 back waters, 6 side pools were identified. Spatiotemporal patterns of these habitat units identified were monitored via these cameras set.

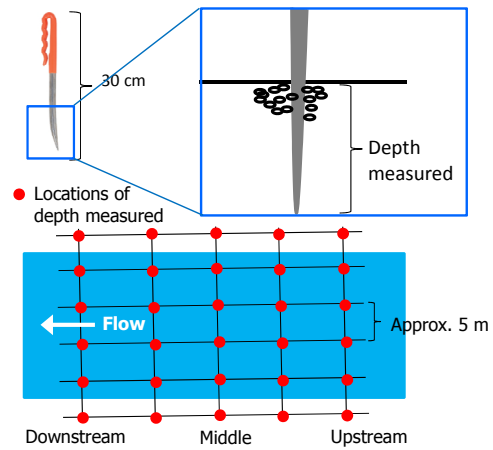


Fig. 4 Survey on riverbed softness by “shino”. As shown in the fig.4 up, shino was used to measure riverbed softness by sticking it with certain weights into riverbed and measuring the depth of being stuck. A matrix was organized at each habitat unit, in which grids were locations of depth measured. Depths measured five times at each grid were averaged and adopted as the riverbed softness.

2.2 河床軟度調査の方法

河床軟度調査では、河川生息場（瀬，たまり，ワンド）について、生息場の大きさに応じて流下方向に最大12ライン～最小3ライン，流下方向に垂直（横断方向）に最大16ライン～最小5ライン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．計測にあたっては，縦横断方向にメジャーを張り，格子点間の距離を把握できるようにした．河床軟度の計測の方法は，目盛を刻んだシノを河床に一定の荷重をかけて突き刺し，その貫入深を記録した．1地点につき，5回行いその平均値を河床軟度とした．河床が軟らかい程，河床軟度の値は大きくなる．

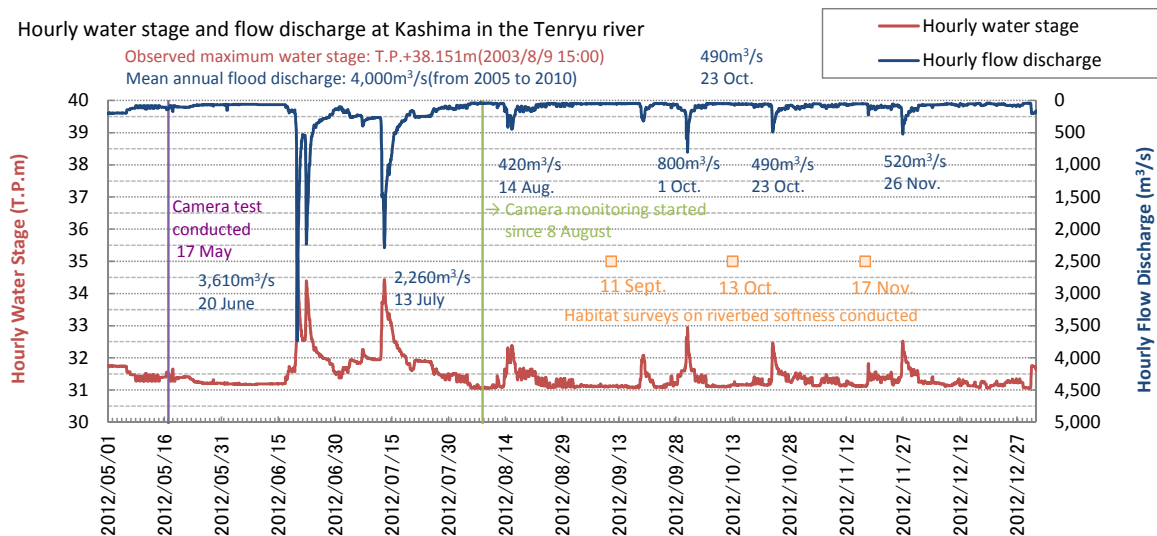


Fig. 5 Hydrograph on hourly water stage and discharge at Kashima

3. 河川生息場の変動特性分析

本章では、インターバル撮影機能付デジタルカメラによるモニタリングの撮影画像と現地での河床軟度の調査結果を用いて、異なる洪水規模による河川生息場の変動特性について詳細に分析する。

3.1 観測期間のハイドロ特性

観測期間のハイドロ特性をFig.5に示す。ここに示す時刻水位及び時刻流量は鹿島地点のものであり、25km地点に設置されている。また、時刻水位は水文水質データベースの値であり、時刻流量は平成23年度のH-Q式から換算したものであるため、流量は確定値ではなく参考値である。カメラを設置した2012年8月8日以降を見ると、8月14日に約420m³/s、10月1日に約800m³/s、10月23日に約490m³/s、11月26日に520m³/sの洪水が生じた。平均年最大流量が4,000m³/s（2005年～2010年の平均値）であるため、観測期間に発生した洪水は小規模である。カメラを設置する前の期間を見ると、6月20日に約3,610m³/s、7月13日に2,260m³/sの中規模洪水が生じており、また、これらの洪水発生前の5月17日にカメラテストを行い、鉄塔上から撮影した写真がある。そのため、中規模洪水（6月20日：約3,610m³/sと7月13日：約2,260m³/s）及び小規模洪水（10月23日：約490m³/s）による河川生息場や河床地形の変化に着目して変動履歴を分析した。なお、小規模洪水として10月1日洪水があるが、暴風により設置したカメラの角度が変化し、洪水時の流れの特性を把握することができなかった。

3.2 河床地形変化と河床軟度

(1) 中規模洪水時の河川生息場の変動特性

2012年5月17日と8月8日の写真を比較して、その間に生じた中規模洪水による河川生息場の変動特性を把握した。

上-瀬-1の左岸側上流部の砂州が本川下流側に延びた結果、瀬の上流部に土砂が堆積して早瀬部分が長大な瀬へと変化した（Fig.6 (a)）。

上-瀬-2では、右岸側上流部の砂州が二次流路2に対して左岸側に向かい移動（右岸側に堆積）し（Fig.6 (b)）、それに伴って瀬の左岸側が浸食され（Fig.6 (c)）、瀬が大きく蛇行し、瀬が二次流路1に対して垂直に合流する形状となった。また、瀬の左岸側が下流へ延伸したことにより（Fig.6 (d)）、瀬の延長が大きくなるとともに、止水環境である上-ワンド-2が新たに形成された。

二次流路3に着目すると、洪水前にあった砂州が流出したこと（Fig.6 (e)）、及び二次流路2と3の分派地点で土砂堆積が生じて止水環境となり、上-たまり-1及び上-ワンド-12が形成された。

二次流路4に着目すると、洪水後に二次流路2（上-瀬-2に向かう流路）と二次流路4の分派地点から二次流路1に渡る比較的広い範囲で土砂堆積が生じて止水環境となり（Fig.6 (f)～(g)）、上-ワンド-1及び上-たまり-2が形成された。

上記より、平均年最大流量程度の中規模洪水が生じると土砂移動が生じ、堆積・侵食の過程により流路や河川生息場が変化し、既存の生息場環境の変化（拡大や縮小、消失）や新たな生息場環境が創出されることが分かった。

(2) 小規模洪水時の河川生息場の変動特性

2012年10月23日に生じた小規模洪水（約490m³/s）について、インターバル撮影機能付デジタルカメラによる1時間毎の撮影画像を用いて、洪水時流れの特性や河川生息場の変動特性を把握した。

上流域（Fig.7）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、旧河道（Fig.6の二次流路4）を先行して洪水流が通過し、小規模洪水時に

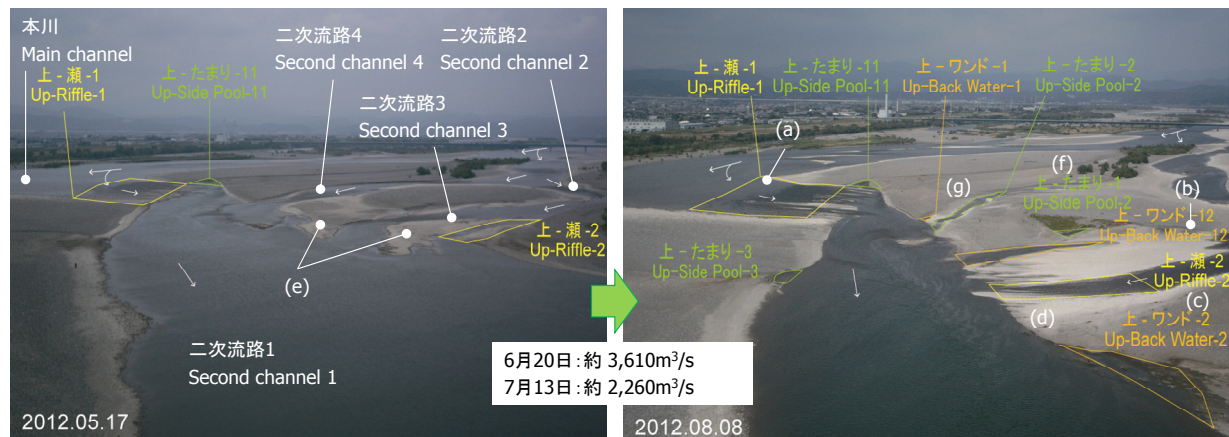


Fig.6 Geo-morphological change before and after events of middle size floods occurred on 20 June and 13 July 2012.



Fig. 7 Flow direction and characteristics of geo-morphological change at the upstream reach in a small size flood event occurred on 23 October 2012.

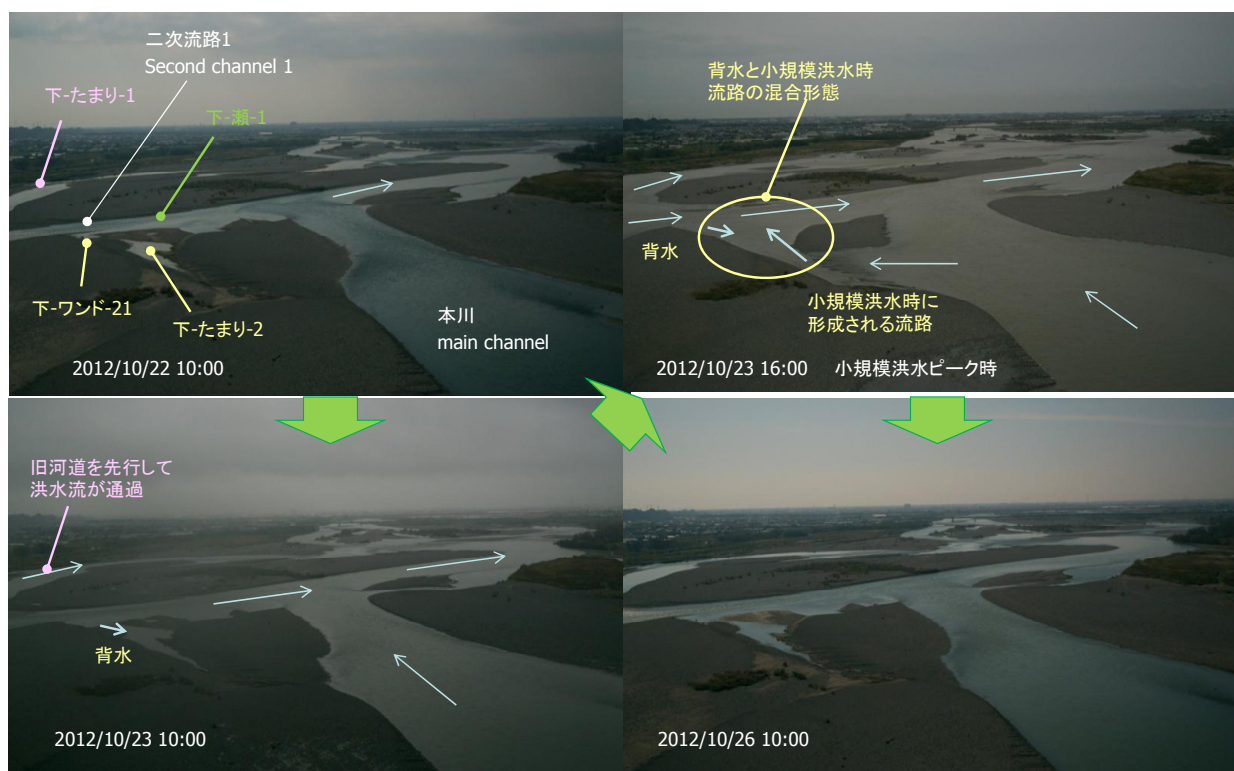


Fig. 8 Flow direction and characteristics of geo-morphological change at the downstream reach in a small size flood event occurred on 23 October 2012.

形成される流路となっている。この洪水流により規模の小さい土砂移動が生じ、上-ワンド-1と上-たまり-2を分断していた砂州が流出し、ワンドとたまりが統合されることとなった。

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。カメラからの撮影画像では、小規模洪水の前後で河床地形の変化が見られなかった。

上-瀬-2では、局所的に土砂が移動して瀬の右岸側の土砂が移動し、瀬の面積が横断方向に広がった。

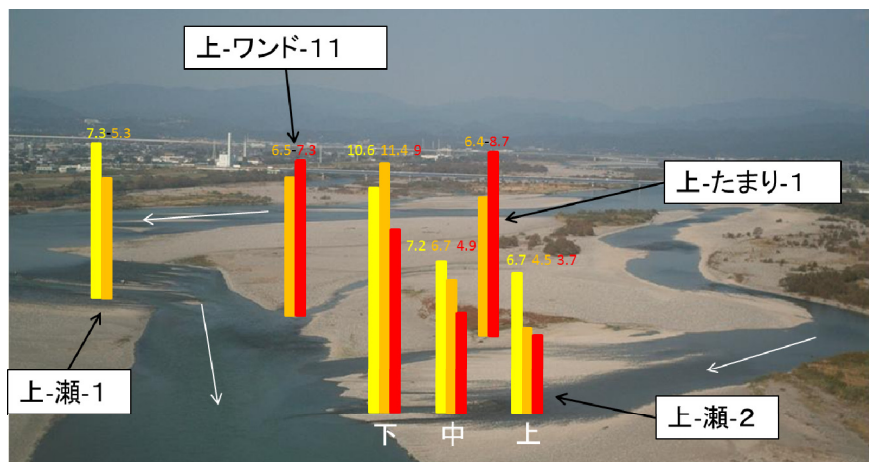
下流域 (Fig.8) の下-たまり-1をみると、水位上昇に伴い旧河道を先行して洪水流が通過しているが、小規模洪水による河川生息場の変化は生じていない。

下-たまり-2と下-ワンド-21では、水位上昇に伴い、

二次流路1の背水により冠水し、その後更に水位が上昇すると本川から二次流路1に向かう流路が形成され、洪水ピーク時の生息場環境は背水と流路の両方の流れが複雑に混合する形態であることが分かった。

以上より、小規模洪水時の流れの特性として、水位上昇に伴い旧河道を先行して流下するものと、背水により冠水するもの、またこれらの混合形態によるもの等、様々であることが分かった。また、小規模洪水では、背水により冠水する場所では河川生息場の変化は見られなかったが、旧河道を洪水流が流れるような流路が形成される場所（上-ワンド-1と上-たまり-2、上-瀬-2等）では、河川生息場の微地形が変化することが分かった。

(a) Distribution of riverbed softness in each habitat unit upstream.



(b) Distribution of riverbed softness in each habitat unit downstream.

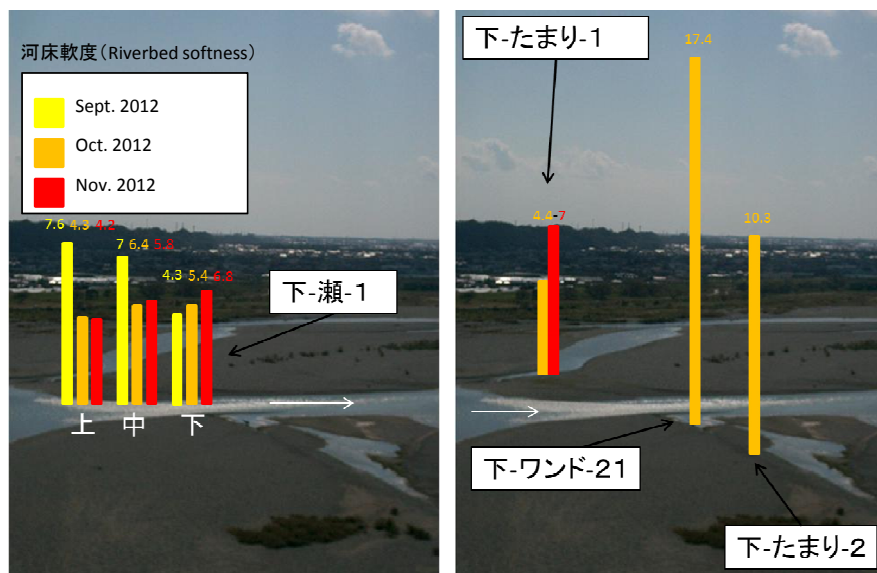


Fig.9 Distribution of riverbed softness in each habitat unit. Surveys were conducted three times in September, October, and November 2012. Numbers shown in the Fig. 9 represent the softness. Longer bars correspond to larger numbers, meaning that the riverbed is soft and vice versa. Data obtained in each grid of a matrix developed for each habitat unit were averaged. In the case of riffles, data were categorized by an upstream, middle, and downstream reach, prior to being averaged.

(2) 河床軟度調査結果

上記(1)の結果は、カメラ画像から見た河川生息場のマクロ・スケールの地形変化を示したものであるが、マイクロ・スケールでどのような変化が生じているのかを、2012年9月、10月、11月に行った河床軟度調査を用いて把握した(Fig.9)。河床軟度はマトリクスの格子点(流下方向:3~12ライン,横断方向:16~5ライン)で計測しており、Fig.9ではこの結果を基に、ワンド及びたまりについては調査箇所全体の平均値、瀬については上流部,中流部,下流部の3つの区域に分けてそれぞれ平均値を算出して記載した。

たまりやワンドなどの止水的河川生息場では、小規模洪水が起こるたびに河床軟度が高くなっていることがわかった。上-たまり-1や下-ワンド-21は、マクロ・スケール(撮影画像)では変化が見られなかったが、小規模洪水時に背水により冠水する場所であるため、洪水の末期等に細粒土砂が堆積しやすい地形であることが、河床を軟化させているものと考えられる。

上-瀬-2の9月から10月の変化をみると、瀬の上流部(瀬頭)で河床が硬化し、下流部が軟化した。また、10月から11月では、瀬全体の河床軟度が小さくなった。これは、9月や10月の小規模洪水により、瀬の上流部の河床が侵食し、下流部に堆積するような小規模な土砂移動により生じたものと考えられる。規模は小さいが、瀬の中でこのようなマイクロ・スケールの土砂移動が生じることで瀬頭が硬化したのと考えられる。

下-瀬-1では、9月の段階では瀬の上流部の河床軟度が大きく下流部が小さかったが、11月になると、河床軟度の縦断的な傾向が逆転し、瀬の上流部の河床が硬化し下流部が軟化した。また、瀬全体の河床軟度は小さくなっていった。この要因は、上記の上-瀬-2と同様のマイクロ・スケールの土砂移動が生じたためと考えられる。

(3) 河川生息場の変動特性の考察

上記の(1)と(2)の結果から、2012年6月と7月の2,000~3500 m³/s程度の中規模洪水により、マクロ・スケールで判別できる土砂移動が生じて、瀬の更新やワンドやたまりが新たに形成されるような変化が生じたことが分かった。

また、9月~11月に生じた小規模洪水時には、河川生息場内でのマイクロ・スケールの変化が生じた。具体的には、洪水時に背水により冠水するような止水的生息場では、洪水の減衰期等に細粒土砂を堆積させることで、河床を軟化させた。瀬については、

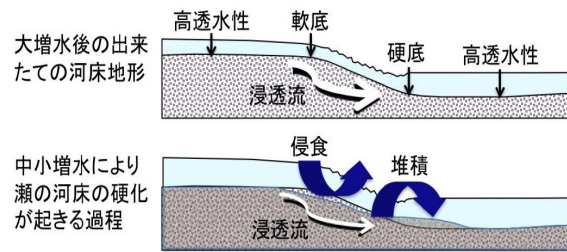


Fig. 10 Erosion and deposition processes occurred due to a small size flood event. A riffle head gets coarse since smaller particles are eroded and washed away. A riffle tail on the other hand gets soft due to deposition occurred by the riffle head erosion. Small scale geo-morphological change due to a small scale flood determines characteristics of micro habitat in a riffle.

上流部の河床(瀬頭)が侵食し、下流部(瀬尻)に堆積するような小規模な土砂移動により、瀬頭が硬化し、瀬尻が軟化のような変化を生じさせ、瀬は全体的に河床が硬化することが分かった。瀬の周辺の河床の軟化・硬化が生じる過程の概念図はFig.10のように示すことができる。

アユの産卵にとっては、瀬の重要性については勿論であるが、その中でも、瀬頭の河床が軟らかい場所が適していることが分かっており、その状況は、洪水時に土砂移動が生じるような砂州が瀬の上流側(洪水時の土砂移動により瀬頭を堆積させる砂州がある場所)にある。今回の調査結果から、そのような場所は2,000~3,500m³/s程度の中規模以上の洪水によって形成されると考えられる。一方、小規模洪水が生じる場合には、瀬頭を硬化させるため、アユの産卵床を劣化させていると考えられる。このことから、中規模洪水の発生時期や頻度が重要であることが分かった。

3.3 河床変動解析による河床地形変化の把握

洪水規模による河床地形変化の特性を把握するために、天竜川13km~19km区間を対象に河床変動計算を行い、異なる洪水規模による河床地形の変化の傾向を把握した。本論文では、CCHE2Dというミシシッピ大学で開発された平面二次元河床変動計算ソフトを用いて計算を行った(e.g., Wu, 2004 & 2007)。計算メッシュを作成するCCHE-MESHはグラフィカルユーザインタフェース(GUI)が良く、河床データの挿機能充実している。またCCHE2Dは、有限要素法によって離散化を行い計算するため、計算安定性が高く汎用性が高いという特徴がある。

(1) 解析方法及び解析条件

CCHE2Dにおける基礎式を示す.

(a) 流体の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial (uh)}{\partial x} + v \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここに, x, y は水平方向の座標系, u, v [m/s]は x, y 方向の水深平均流速, h [m]は水深である.

(b) 運動量保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial (h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに, η [m]は水位, $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ [N/m²]は x - y 座標系の水深平均レイノルズ応力, τ_{bx}, τ_{by} [N/m²]は底面せん断応力である.

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\nu_i \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= \nu_i \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{xy} &= 2\nu_i \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{yx} &= \nu_i \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに, ν_i [m²/s]は渦動粘性係数である.

$$\begin{aligned} \nu_i &= l^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \\ l &= \frac{1}{h} \int \kappa z \sqrt{1 - \frac{z}{h}} dz = \kappa h \int_0^1 \zeta \sqrt{1 - \zeta} d\zeta \approx 0.267 \kappa h \end{aligned} \quad (4)$$

ここに, l [m]は混合距離, κ はカルマン係数 (ここでは0.41とする), ζ は相対水深である. $\frac{\partial U}{\partial z}$ は鉛直方向の流速勾配を水深平均したものであり, 以下のようにして求める.

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{h} \int \frac{\partial U}{\partial z} dz = \frac{u_*}{h\kappa} \int_{z_0}^1 \frac{1}{z} dz = C_m \frac{u_*}{h\kappa} \quad (5)$$

ここに, U [m/s]は流速の絶対値, u_* [m/s]は摩擦速度の絶対値, C_m は係数 (=2.34375) である.

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= h^{-1/3} \rho_w g n^2 u U \\ \tau_{by} &= h^{-1/3} \rho_w g n^2 v U \end{aligned} \quad (6)$$

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho_w} = \frac{1}{\rho_w} \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (7)$$

ここで, ρ_w [kg/m³]は水の密度, g [m/s²]は重力加速度, n [m^{-1/3}/s]はマニング係数である.

$$n = d^{1/6} / A \quad (8)$$

ここで, d [m]は50%粒径とし, $A=20$ としている.

(c) 掃流砂の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q_{bk}}{U} \right) + \frac{\partial (\alpha_{bx} q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial (\alpha_{by} q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b^*k}) = 0 \quad (9)$$

ここで, q_{bk} [m²/s]は粒径階 k の単位幅掃流砂量, q_{b^*k} は粒径階 k の平衡掃流砂量, α_{bx}, α_{by} は流砂の方向余弦, L [m]は緩和距離スケールである.

(d) 掃流砂の平衡流砂量式 (Wu, Wang and Jia の式)

$$\begin{aligned} \phi_{bk} &= 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_{bk}}{\tau_{ck}} - 1 \right]^{2.2} \\ \phi_{bk} &= q_{b^*k} / \left[p_{bk} \sqrt{s g d_k^3} \right] \\ n' &= d_{50}^{1/6} / 20 \end{aligned} \quad (10)$$

ここに, ϕ_{bk} は無次元掃流砂量, p_{bk} は粒径階 k の交換層における含有率, τ_{ck} [N/m²]は粒径階 k の限界掃流力, s は土粒子の比重, d_{50} は交換層における50%粒径である.

(e) 限界底面せん断応力の式

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{ck}}{(\rho_s - \rho) g d_k} &= \Theta_c \left(\frac{p_{ek}}{p_{hk}} \right)^{-m} \\ p_{hk} &= \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{d_k + d_j} \\ p_{ek} &= \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_k}{d_k + d_j} \end{aligned} \quad (11)$$

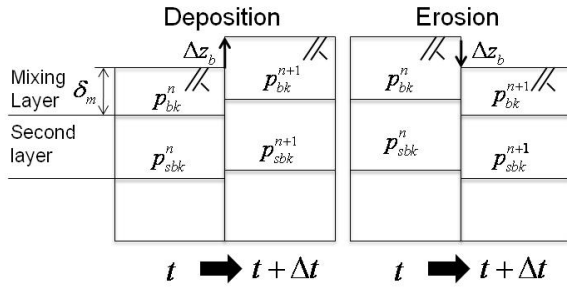


Fig. 11 Concept of mixing layers

Table 1 Conditions of a 2D bed variation simulation model.

計算区間	天竜川13km~19km	
初期河床条件	2004年2月の測量データ	
初期河床材料	2007年調査の粒度分布データ	
メッシュ	縦断方向	20m
	横断方向(高水敷)	15m~25m
	横断方向(低水敷)	10m
乱流モデル	混合距離モデル	
計算時間間隔	30 sec	
上流端条件	流量	2004年2月~11月の500m ³ /s以上を抽出
	土砂量	浮遊砂(LQ式)
下流端条件	水位	一次元不定流計算の結果

ここに, $m=0.6$, $\theta_c=0.03$ (シールズ数), p_{hk} 及び p_{ek} は粒径階 k の遮蔽確率及び露出確率である.

(f) 浮遊砂の輸送方程式

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + \alpha \omega_{sk} (C_k - C_k^*) \quad (12)$$

ここに, C_k は粒径階 k の浮遊砂濃度を水深平均したもの, C_k^* は粒径階 k の平衡浮遊砂濃度, ε_s [m²/s]は渦度拡散係数, α は係数である.

(g) 浮遊砂の平衡流砂量式

$$\phi_{sk} = 0.0000262 \left[\frac{\tau}{\tau_{ck}} - 1 \right] \frac{U}{w_{sk}} \quad (13)$$

$$\phi_{sk} = q_{s*k} / \left[p_{bk} \sqrt{sgd_k^3} \right]$$

ここに, q_{s*k} [m²/s]は単位時間・単位幅当たりの浮遊砂通過量である. 粒径階 k の土粒子の沈降速度 w_{sk} [m/s]である.

(h) 沈降速度 (Zhangの式)

$$w_{sk} = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d_k} \right)^2 + 1.09 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_k} - 13.95 \frac{\nu}{d_k} \quad (14)$$

ここに, ν [m²/s]は水の動粘性係数, d_k [m]は粒径階 k の粒径, ρ [kg/m³]は水と土粒子の混合密度, ρ_s [kg/m³]は土粒子の密度である.

(i) 流砂の連続式

$$(1 - p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \alpha w_{sk} (C_k - C_k^*) + (q_{bk} - q_{b*k}) / L \quad (15)$$

ここに, $\partial z_b / \partial t = \Sigma \partial z_{bk} / \partial t$, δ_m [m]は交換層厚, p_{bk} は交換層内における粒径階 k の含有率である (Fig.11を参照).

j) 粒度分布の変化

$$\frac{\partial(\delta_m p_{bk})}{\partial t} = \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + p_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} \right)$$

$$p_{bk}^* = \begin{cases} p_{bk} & : \partial \delta_m / \partial t - \partial z_b / \partial t \leq 0 \\ p_{sbk} & : \partial \delta_m / \partial t - \partial z_b / \partial t > 0 \end{cases} \quad (16)$$

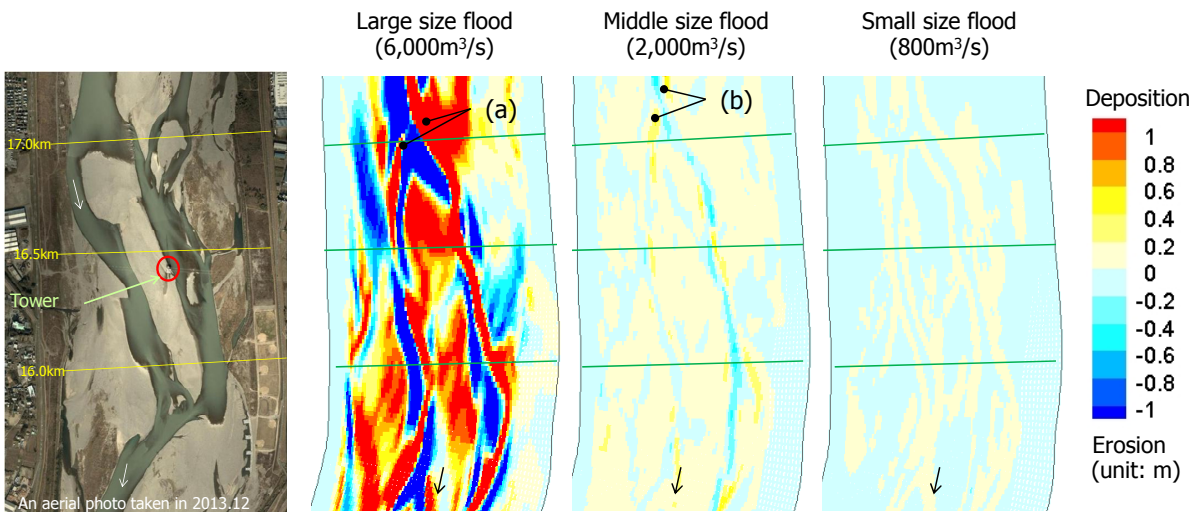


Fig.12 Results of the 2D bed variation simulation model.

ここに、 p_{sbk} は交換層の一つ下の第2層 (Second Layer) 内における粒径階 k の含有率である。

(2) 計算結果

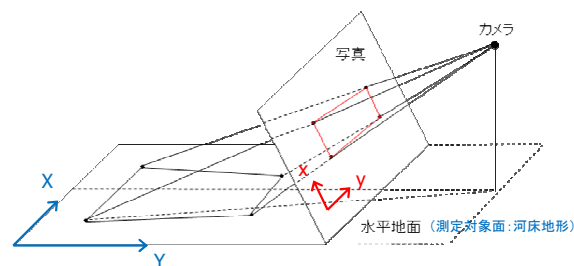
与えた洪水波形は、 $6,000\text{m}^3/\text{s}$ の大規模 (1/2.5年確率程度)、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ の中規模 (1/1年確率程度)、 $800\text{m}^3/\text{s}$ の小規模 (5/1年確率程度) の3つの規模である。大規模洪水では流路を横断するような堆積が確認できた (Fig.12 (a))。これにより、以前はなかったところに新たな瀬が造成されたと考えられる。

中規模洪水でも流路を横断するような形の堆積がみられたが (Fig.12 (b))、堆積の規模が小さかった。インターバル写真の比較からも、6~7月の中規模洪水によって瀬の更新が起きており、今回計算でもそれが概ね再現できたといえる。

小規模洪水では、僅かに堆積・浸食は起こるものの、地形を大きく変化させることはないことがわかった。これにより、現地調査の結果と合せて考察すると、小規模洪水時には、瀬が硬化する原因であると考えられる。

4. 河床地形モニタリング手法の開発

1時間間隔で鉄塔の上流及び下流の河床変動履歴を撮影してきたが、河川生態系は、本論文の冒頭で示したように、二次流路、瀬や淵、ワンドやたまり等の河川生息場 (の要素) の変動履歴 (時間的・空間的パターン) を把握するためには、各河川生息場の特徴 (面積や河岸延長等) を定量的に把握することが必要となる。そのため、これまでの撮影画像を基に、画像解析技術を用いて河川生息場の変動履歴を定量的に把握するための河床地形モニタリング手法を開発した。



測定対象面に設定された平面座標系XY
写された写真面に設定された平面座標系xy

Fig.13 An conceptual image of transforming recorded photo data into the ortho data.

画像解析技術の原理について、測定対象面 (河床地形) に設定された平面座標系XYと、写された写真面に設定された平面座標系xyとの間に、式(17)が成立する (Fig.13)。

$$\begin{aligned} X &= \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \\ Y &= \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x_i b_1 + y_i b_2 + b_3 - x_i X_i b_7 - y_i X_i b_8 &= X_i \\ x_i b_4 + y_i b_5 + b_6 - x_i Y_i b_7 - y_i Y_i b_8 &= Y_i \end{aligned} \quad (18)$$

式 (17) 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。式 (18) 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 (17) 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。

Table 2 Accuracy of the photo transformation into the ortho data. The target posts referred to as “□” in the No. column in this table were used for transforming photo data to the ortho data through the photogrammetric method.

No	Coordinate values measured by RTK-GPS		2D modeling results, ortho data values		Accuracy compared with measured values	
	X longitude (m)	Y Latitude (m)	X longitude (m)	Y Latitude (m)	$\Delta X(\text{m})$	$\Delta Y(\text{m})$
11 □	-133592.083	-61785.077	-133592.083	-61785.077	—	—
12 □	-133380.497	-61788.585	-133380.497	-61788.585	—	—
13	-133300.363	-61887.546	-133301.500	-61888.300	-1.137	-0.754
14	-133153.745	-61975.745	-133155.400	-61974.400	-1.655	1.345
15 □	-133149.182	-62037.259	-133149.182	-62037.259	—	—
16 □	-133505.510	-61900.398	-133505.510	-61900.398	—	—
17	-133477.368	-61936.546	-133478.500	-61937.900	-1.132	-1.354
18	-133409.339	-61909.945	-133408.100	-61908.900	1.239	1.045
Average (absolute value)					1.291	1.124



Fig. 14 Data transformed into the ortho data through the photogrammetric method. “○” in the fig. refers to a location where target posts having coordinate values have been set. 2D ortho data were developed based on No. 11, 12, 15, and 16, referred to as “□” in the fig., using a photogrammetric method.

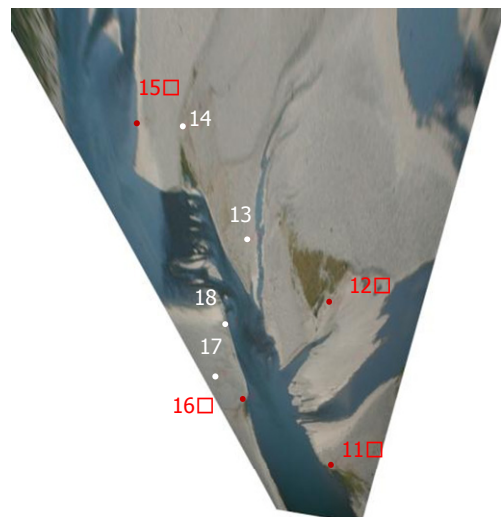


Fig. 15 Results of the 2D modeling based on photos taken on 15 October 2012. The target posts referred to as “□” in the fig. were used for transforming photo data to the ortho data through the photogrammetric method.

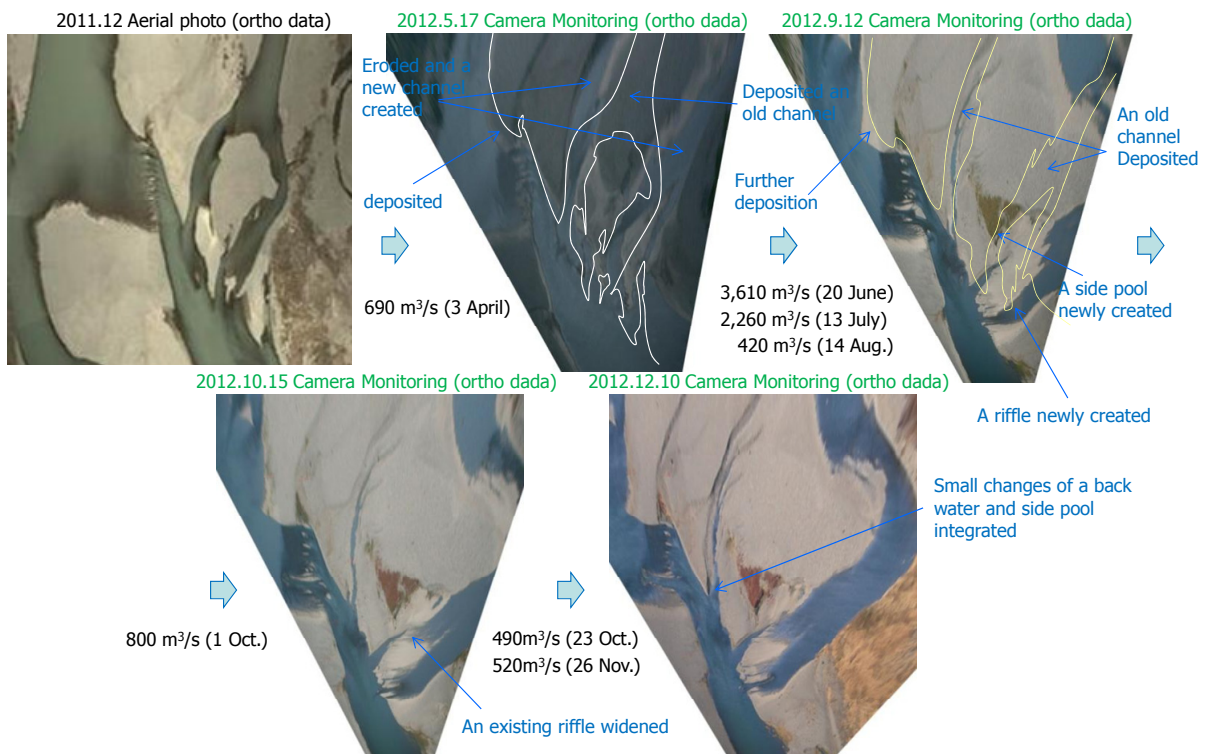


Fig.16 A set of ortho data transformed from the photo data by the photogrammetric method. White lines in the photo data dated 17 May 2013 depict water and terrestrial boundaries as of 12 November 2011. Light yellow lines in the photo data dated 12 September 2012 depict water and terrestrial boundaries as of 17 May 2012. This monitoring method in combination with photogrammetric method with the accuracy of approximately 1.0 m showed that it enables to obtain quantitative data and analyze spatiotemporal patterns of riverine habitat.

航空写真で用いられるオルソ化の技術を応用して、インターバル撮影機能付デジタルカメラで鉄塔の高さ約60mから撮影した斜め写真画像のオルソ化（座標変換）を行った。オルソ化を行うために、カメラ画像の画角の中で、任意の8地点に杭（標的：target posts）を設置し、カメラの撮影画像から確認できるように反射板を配置した（Fig.14）。次に、RTK-GPSを用いて、各杭の中心点の座標を計測し、撮影画像の中に固定した座標値を与えた。本論文では、Fig.14に示すように、標的No. 11, 12, 15, 16を基準点として撮影画像の調整（引延しや短縮）を行い、オルソ化を行った。オルソ化した撮影画像をFig.15に示し、その座標変換の精度をとりまとめたものをTable 2に示す。解析精度の検証は、前述のNo.11, 12, 15, 16の基準点以外を対象に、測定値（RTK-GPSによる計測結果）と画像変換後の座標値を比較することで行った（Fig.15とTable 2参照）。その結果、解析精度は約1mであることが分かった。解析精度については、今後を精度向上していく必要があるが、本研究が対象とする天竜川16.3k付近では、堤間幅が約1kmあり、その中での約1mの精度であるため、河川生息場や河床地形の変動履歴をモニタリングし、定量的な評価を行う上では十分な精度を有していると考えられる。

更に、Fig.16は、カメラモニタリングの上流側で撮影した一連の写真画像について、上記の画像変換によりオルソ化した結果である。Fig.16の右上の2012年9月12日の画像の薄黄線は、一時点前の2012年5月17日の河床地形の水際ラインを示しており、河床地形変化を重ねてみる事ができる。この間では中規模洪水が発生しており、その結果は3.2 (1) で分析した通りである。しかし、画像をオルソ化することで堆積・侵食の過程をより明確に示すことができ、その変動履歴を定量的に示すことが可能となる（例えば面積変化等）。これらの結果を用いれば、生物多様性を最適にする河床地形や河川生息場の変動履歴を定量的に分析・評価することができるようになる。

5. 結論と今後の課題

河川生息場環境の変動履歴分析のための河床地形モニタリング手法の開発に関して以下の結論を得た。

適切な位置からインターバル撮影機能付デジタルカメラによるモニタリングを行うことで、洪水時流れの特性（流向や冠水の現象）や土砂移動特性、河川生息場環境の変動を推定できることが分かった。

カメラによるモニタリングと河床軟度調査の結果を基に、中規模洪水、及び、小規模洪水による変動履歴を分析した。その結果、中規模洪水では、瀬の

更新やワンドやたまりが新たに形成されるような変化が生じ、マクロ・スケールで河床地形が変化することが分かった。また、小規模洪水では、河川生息場内でのマイクロ・スケールの変化が生じた。具体的には、砂州の下流側のワンドやたまり等、背水により冠水するような止水的生息場では、洪水の減衰期等に細粒土砂を堆積させることで、河床を軟化させることが分かった。一方、瀬では、瀬の上流側を侵食して下流側に堆積を引き起こすような局所的な地形変化によって瀬頭を硬化させ、瀬尻を軟化させる働きをすることを把握した。アユの産卵にとって、瀬頭の軟らかい河床が好適であることが分かってきているが、そのような場合は中規模以上の洪水によって形成され、小規模洪水では瀬頭を硬化させることが分かり、中規模洪水の発生時期や頻度が重要であることが示唆された。

更に、解析写真測量技術を用いてオルソ化を行うことで、河川生息場の変動履歴（微地形の変化や浸食堆積過程）を定量的に示すことができた。これにより、本論文で示した河床地形モニタリング手法が実用的なレベルで適用できることが分かった。インターバル撮影機能付デジタルカメラによるモニタリングを適用することで、高価な航空写真による垂直写真撮影を行わなくても、河川生息場や河床地形の変動履歴をモニタリングすることができ、定量的に把握できることが分かった。本手法は、河川管理や河道管理の分野での適用も可能であると考えられる。

今後は、モニタリングの精度の向上を図るとともに、中規模洪水や大規模洪水による河川生息場と河床地形変化を把握・分析することで、知見を蓄積することが重要と考える。また、本研究対象区間では、インターバル撮影機能付デジタルカメラによるマクロ・スケールのモニタリングに加えて、月1回程度の頻度で河川生息場毎に、マイクロ・スケールでの変動履歴の把握（生息場を構成する礫、砂、流倒木、落ち葉等の割合変化）、底生動物調査、河床材料調査、河床軟度調査を行っている。これらの結果を基に、生物多様性を最適化する河川生息場の変動履歴を把握し、モニタリングや河川環境の評価技術を確立していく予定である。

謝 辞

本論文の作成にあたり、国土交通省 中部地方整備局 浜松河川国道事務所よりデータの提供及び、研究を効率的・効果的に進めるための調整等で協力して頂いた。また、鉄塔へのカメラ設置や記録データの回収、維持管理等では、中部電力 掛川電力所、及び株式会社シーテックに協力して頂いた。更に、天竜

川現地での調査にあたり、天竜川漁協共同組合、天竜川天然資源再生連絡会、京都大学防災研究所 水資源環境研究センター 社会・生体環境研究領域の研究室、いであ株式会社 建設統括本部 水圏事業部 河川部から多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

鈴木崇正・角哲也・竹門康弘・中島佳奈(2011): 土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測, 京都大学防災研究所年報 第54号B (Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.54B).

角哲也・中島佳奈・竹門康弘・鈴木崇正 (2011): 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 第54号B (Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.54B).

村井彰弘・竹門康弘・角哲也 (2012): アユの産卵床に必要な河床地形条件に関する研究, 応用生態工学会研究発表会講演集, pp. 158.

Arscott, D., Tockner, K. Nat, D., & Ward, J. (2002): Aquatic Habitat dynamics along a Braided Alpine River Ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy), *Ecosystems* 5: 802-814, DOI: 10.1007/s10021-002-0192-7.

Parsons, M., Thoms, M., & Norris, R. (2001): Australian River Assessment System: AusRivAS Physical Assessment Protocol, National River Health Program, Environmental Australia.

Takemon, Y. (1997): 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.

U.S. Fish and Wildlife Service. (1981): Standards for the development of habitat suitability index model for use in the Habitat Evaluation Procedures, USDI Fish and Wildlife Service, Division of Ecological Services. ESM 103.

Wu, W. (2004): "Depth-Averaged Two-Dimensional Numerical Modeling of Unsteady Flow and Nonuniform Sediment Transport in Open Channels," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, pp. 1013-1024.

Wu, W. (2007): *Computational river dynamics*: CRC.

(論文受理日 : 2013年6月11日)