

天竜川におけるアユ産卵に適した河床地形特性と置き土の効果の把握

Suitable Riverbed for Ayu Spawning Redds and Effective Gravel Replenishment in the Tenryu River

兵藤誠・泉公祐・竹門康弘・角哲也

Makoto HYODO, Kosuke IZUMI, Yasuhiro TAKEMON and Tetsuya SUMI

Synopsis

Riverbed is consisted of various habitat types, e.g., riffles, pools, side pools, back waters, etc. These habitats are changing in time and space by deposition and erosion processes caused by floods. These processes should be appropriately considered in the ecological evaluation. This article discusses riverbed characteristics of spawning redds for Ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*), in relation to changing patterns of habitats in the Tenryu River, Japan. Habitat surveys were conducted to understand the riverbed characteristic by comparing physical parameters of spawning redds with other habitat types, e.g., water quality, riverbed softness, grain size distributions, photo data via interval-recording-cameras, aerial photo data, etc. It also examines effectiveness of sediment replenishment options, applying a 2D riverbed variation model. Two options of renewing an existing riffle at main channel and creating a new riffle and spring water at a secondary channel are discussed.

キーワード: 生息場, 産卵床, 変動履歴, 置き土, 河床軟度

Keywords: habitat, spawning redd, spatiotemporal patterns, sediment replenishment, riverbed softness

1. はじめに

1.1 アユ産卵床に関する既往研究

河床地形は、瀬や淵、たまり、ワンド等の生息場によって構成され、洪水とそれに伴う浸食や堆積によって創出や消失を繰り返す動的な変動履歴を有している。そのため、生息場の評価にあたっては、この観点を取り入れることが重要である(兵藤ら, 2013 & 2014a)。日本の河川生態系の代表的な魚種であるアユに着目すると、産卵床に関して多くの研究が行われている。既往研究では好適な産卵環境として、瀬であること(石田, 1961; 兵藤ら, 2014a)、浮石環境であること(石田, 1962 & 1964)、河床材料の粒径は適正範囲に幅があるが30mm以下の砂礫の割合が多いこと(石田, 1961)等が示されている。浮石環境の礫底であることは、アユは産卵の際に河床の砂礫を動かして、その間に卵を産み着ける習性が

あり、自ら動かすことのできる小さい砂礫を選んで産卵していると考えられている(石田, 1961)。産卵特性から、アユの産卵に適した場の物理特性として、平常時の流速や水深(石田, 1962; 知花・玉井, 2002)、フルード数(野上, 2001)、摩擦速度(鬼束ら, 2007)等に注目した研究成果も見られる。しかしながら、これらの知見は、静的な指標に基づく評価が一般的であり、変動履歴に着目した研究は殆どない。動的な指標については、魚類の生活史の時間的・空間的連続性に着目し、礫の露出率を算出して瀬の生息場を評価した研究がある(田代, 2002)。また、好適と言われる産卵環境について、石田は合流点・湾曲部等の周辺に州が発達して瀬が生じ、流路は複雑で流水と河床との動的平衡が保たれる場所であり(石田, 1964)、それが瀬頭に多いこと(石田, 1967)を示した。しかし、その環境が創出される条件について、生息場の空間的な階層構造、及び、

中規模河床形態、砂州の移動や変動履歴の観点から、動的な土砂移動特性や空間分布特性に着目した研究は殆どない。兵藤ら（2014）は、瀬頭は小規模洪水で硬化し、中規模以上の洪水で土砂堆積が生じて軟化するプロセスを示し、軟らかい瀬頭の形成には中規模以上の洪水による土砂堆積が必要で、砂州前縁部にそのポテンシャルが高いことを示した。しかし、実際に現存したアユ産卵床や卵に対して、その河床環境や空間的な階層構造、形成プロセスを解明したものではない。

1.2 天竜川におけるアユの現状

天竜川はアユの産地として有名であるが、近年、漁獲量は減少傾向にある。天竜川におけるアユの流下量は、80年代後半までは20億尾以上が確認されることが多かったが、90年代以降では多くても数億尾である（天竜川漁業協同組合，2012）。繁殖後の流下稚魚数と翌年の遡上量が正の相関関係にあることは既に知られているので、アユの漁獲量の減少は、アユの流下量の減少が要因であると考えられる。現在、天竜川では、アユの生息・生育環境に着目すると、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おり、アユの生息・生育環境の改善が課題となっている。

1.3 研究目的

本研究では近年減少傾向にある天竜川のアユの産卵床に着目し、河床地形の変動履歴によって現状の産卵床の河床環境や空間分布の特性を解釈することを目的とする。また、その結果を基に、好適な産卵床を創出するための手法として置き土に着目し、アユの産卵に適した河床地形が再生・創出されるポテンシャルを分析評価することを目的とする。

本稿に掲載する成果は、新たな研究成果ではなく、近年に投稿した2つの論文（兵藤ら，2014b；泉，2014）を統合したものである。アユ産卵床の再生を実際の現場で適切に進めていくためには、産卵床の特性や条件を把握した上で対策手法を立案する必要があり、その一連の流れを示すことが重要であると考えて、統合してとりまとめた。

また、本研究は、既往研究でアユ産卵が多いと推定されている天竜川16.4k周辺のかささぎ大橋から浜北大橋の区間（天竜川漁業協同組合，2012）を対象とする（Fig. 1）。対象区間は、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

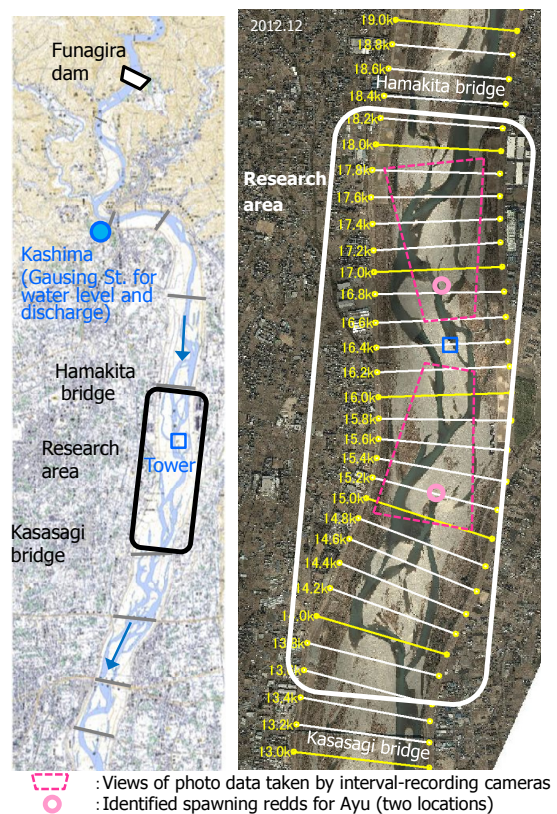


Fig. 1 The research area in the Tenryu River Japan.

により河床地形が変化しやすい状況にある。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となっている。また、本研究で着目する河床形態は、流路幅との関係で特徴付けられる中規模河床形態（村本ら，1977）であり、対象箇所は、概ね複列砂州～交互砂州に分類されている。

2. アユの産卵に適した河床地形の特性の把握

2.1 調査・分析方法

既往研究でアユ産卵が多いと推定されている天竜川16.4k周辺（天竜川漁業協同組合，2012）を対象として、以下の(1)～(5)の調査分析を行った

(1) アユの産卵床調査

天竜川のかささぎ大橋～浜北大橋を対象に、2013年11月～12月の期間内で、天竜川漁協共同組合の協力を得て不定期に調査区間に行き、アユ産卵床の探索を行った（Fig. 1）。本区間は、2006年頃には天竜川におけるアユの主要産卵範囲であったが、その後は年を追って縮小し、近年の2010年では主要産卵分布範囲を確認することができない程までに縮小した（天竜川漁業協同組合，2012）。また、近年の天竜川では、稚魚の流下については調査により確認され

ているが、産卵床は探索努力にも関わらず、アユの産卵場所として一般的な浅瀬では殆ど確認されていない(天竜川漁業協同組合, 2012)。

(2) 水質調査

アユ産卵床の物理的特性を把握するため、産卵床とその他の生息場(瀬, たまり, ワンド)を対象に、水質について現地で計測を行い、比較評価することで産卵床の物理的特性を分析評価した。調査は2013年11月22日に実施し、水質の具体的な調査項目は、水温、水深、溶存酸素量(DO)、濁度等を計測しているが、ここでは明確な傾向が見られた溶存酸素量(表層水、及び、河床から約20cm下の間隙水)について論じるものとする。

(3) 河床軟度調査

河床軟度については、水質調査と同様に、産卵床とその他の生息場(瀬, たまり, ワンド)を対象として調査を行った。河床軟度調査には、長谷川式土壤貫入計(大島造園土木株式会社製造)や著者らが行うシノによる方法(兵藤ら, 2013)、足踏みによる方法(鬼束ら, 2007)等、様々な方法が試行されている。長谷川式土壤貫入計は、2kgの落錘を50cm落下させ、そのエネルギーで先端の円錐コーンを土中に貫入させることで、深さ100cmまでの河床の硬さを連続的に計測するものである。精度のバラつきが少ないが、1地点の計測に時間を要するため、多くの地点を調査するには多くの労力と時間が必要となる。一方で、シノとは長さ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)を記録するものである。簡便な方法であり多くの地点を効率的に調査できるが、その精度を検証する必要がある。そこで、シノと長谷川式土壤貫入計を用いて同じ地点で計測し、河床軟度の相関関係を示した結果をFig. 2に示す。長谷川式土壤貫入計については、計測結果の内、アユ産卵床の環境条件となりうる15cmの深さまでの1回当たりの平均貫入深度を用いた。なお、調査結果は、村井(2012)及び栗津(2013)の結果に著者らの調査(泉, 2014)を加えた3カ年のデータを用いたものであり、シノと長谷川式土壤貫入計による結果に高い相関を確認でき、シノによる簡易な調査の有効性を検証することができた。そこで、河床軟度の計測方法については、より簡易な方法としてシノを用いて行うこととした。

(4) 河床材料調査(画像解析)

アユ産卵床とその他の瀬を対象に、各生息場の水際に25cm×25cmのコドラートを設置し、50cm上方か

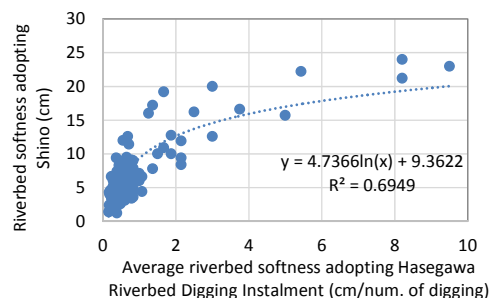


Fig. 2 Correlation of riverbed softness between Shino and Hasegawa Riverbed Digging Instalment.

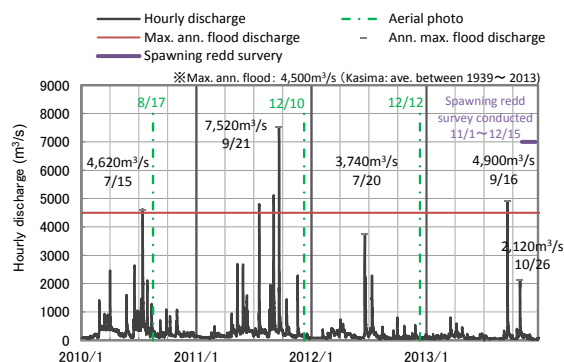


Fig. 3 Hydrograph of the hourly discharge at the Kashima station in the Tenryu River.

ら写真撮影を行い、その結果を画像解析により粒度分布の算定を行った。具体的には、撮影画像に含まれる25cm×25cmのコドラートについて、縦横それぞれの方向に4分割した格子を作成し、格子の交点上に存在する礫の粒径(長軸と短軸の大きさ)を算出した。粒径は長軸と短軸の平均値として算出し、アユの産卵に適した20~50mm, 20mmより小さい, 50mmより大きいものの3つの粒径区分を行い、存在率を算出して図化した。本手法では、線格子法や面格子法と同様に粒径の小さい河床材料を計測することはできないが、アユの産卵床を構成する礫に着目した調査であるため、簡便な本手法を用いて分析することとした。

(5) インターバル撮影機能付デジタルカメラによる地形変化の把握

著者らが河道内鉄塔上に設置したインターバル撮影機能付デジタルカメラ(1時間毎に撮影:以下、インターバルカメラと称する)により、産卵期直前の2013年9月16日と10月26日の中規模洪水による地形変化を把握した。調査期間前後の時刻流量ハイドロをFig. 3に示す。アユの産卵調査の行った2013年11月~12月の前に、鹿島地点(Fig. 1参照)において、9月16日に4,900 m³/sの中規模洪水、10月26日に2,120 m³/sの小~中規模洪水が発生した。なお、平均年最

大流量は約4,500 m³/s である。以降、本論文で流量を取り扱う際は、常に鹿島地点の時刻流量値を用いることとする。また、画像解析技術を応用して、撮影画像を平面直角座標系にオルソ化を行い、河床地形の変化を面的・定量的に把握し分析評価した。本論文では結果のみを提示し、解析手法の詳細については既往研究論文(兵藤ら, 2013)を参照されたい。

アユ産卵床の地形変化を中規模河床形態や砂州の移動特性の観点から考察するため、調査期間より前の2010年8月、2011年12月、2012年12月の航空写真から、経年的な河床変動の履歴と砂州との位置関係を把握した。Fig. 3に示すように、これらの航空写真の時点間には、7,520 m³/s の大規模洪水と3,740 m³/s の中規模洪水が生じており、地形が大きく変化していることが特徴である。

また、調査区間(かささぎ大橋～浜北大橋)を対象に、横断測量成果を用いて浸食と堆積、その差分についての河床変動土量を算出することで、アユ産卵場が浸食卓越であるのか堆積卓越であるか、また、過去からの砂州の移動特性としてどのような特徴を有しているのかを分析評価した。

2.2 結果と考察

(1) アユ産卵床及び卵の確認箇所の状況

アユ産卵床調査の結果、2013年11月22日にインターバルカメラの上流側で1箇所、12月15日に下流側で1箇所の計2箇所の礫床のみでアユ産卵床及び卵を確認したが、他の箇所では確認することができなかった(Fig. 4)。確認された2箇所は、上-たまり-瀬21と下-たまり瀬-22と示された箇所であり、既往研究等から一般的に好適な環境と言われる流路の瀬(石田, 1961; 兵藤ら, 2014a)ではなく、湧水のたまりから流路に接続される流水環境(以降、たまり瀬と称する)であった。また、12月15日に確認された卵は発眼卵であった。現地で確認した状況から、両地点ともに河床構成材料は河床構成材料は20~50mmの礫の割合が多く、砂による目詰まりが生じていない浮石環境であった。

(2) 水質の特性

アユ産卵場と卵が確認された「たまり瀬」と、インターバル撮影機能付デジタルカメラの画角に存在する瀬やたまり・ワンド(Fig. 4)を対象に、溶存酸素量を比較分析した。

溶存酸素量は、表層水と間隙水について2013年11月22日に調査を実施しており、調査結果をFig. 5に示す。アユの卵が確認された上-たまり瀬-21と下-たまり瀬-22をみると、表層水で平均 11.8 mg/l、間隙水

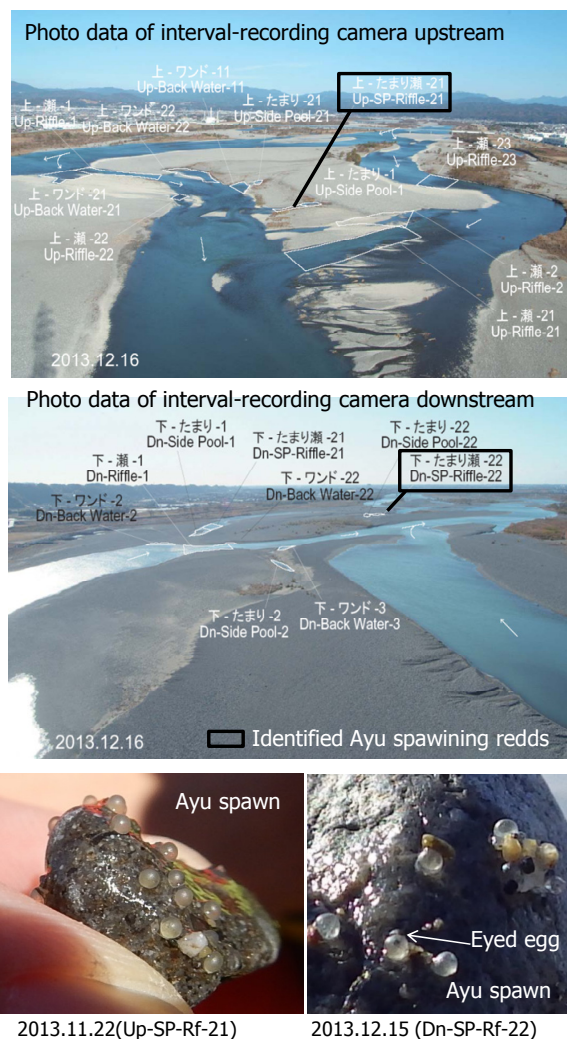


Fig.4 Spawning redds and eggs found. Downstream and upstream photos at 16.4 k-point were taken via interval-recording cameras hourly over the survey period. Habitat types were identified and two spawning redds were found.

でも平均 6.9 mg/l であった。表層水は、瀬と比較すると同程度であり、ワンド・たまりと比較すると大きい値を示した。一方で間隙水は、表層水と比較して小さいが、表層水で流水環境と接続されていなくても、間隙水で一定の酸素が供給されていることが分かった。

(3) 河床軟度の特性

河床軟度の調査結果をFig. 6に示す。値が大きい程、地中への貫入深が大きく河床が軟らかい(河床軟度が高い)ことになる。卵の確認されたたまり瀬では、河床軟度が 12.5 cm(平均値)を示しており、瀬やワンドよりも大きい値を示していた。瀬の河床軟度が小さい理由については、瀬は、中規模程度以上の洪水で土砂堆積等が生じるが、その後の小規模

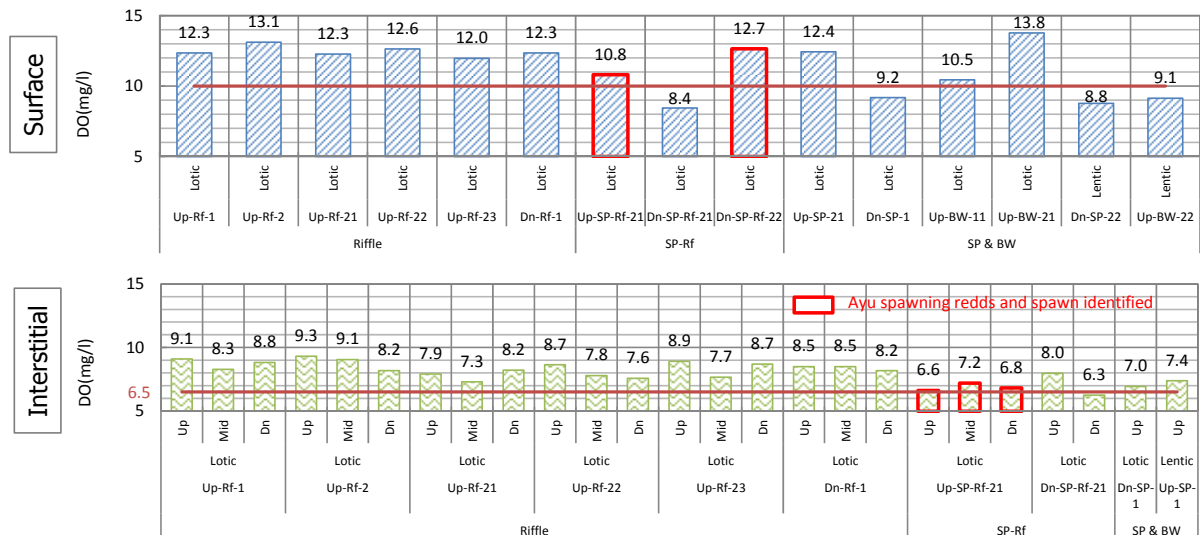


Fig. 5 Comparison of Dissolved Oxygen (DO) at surface and interstitial layers among habitats of different types. Surveys were conducted on 22 November 2013.

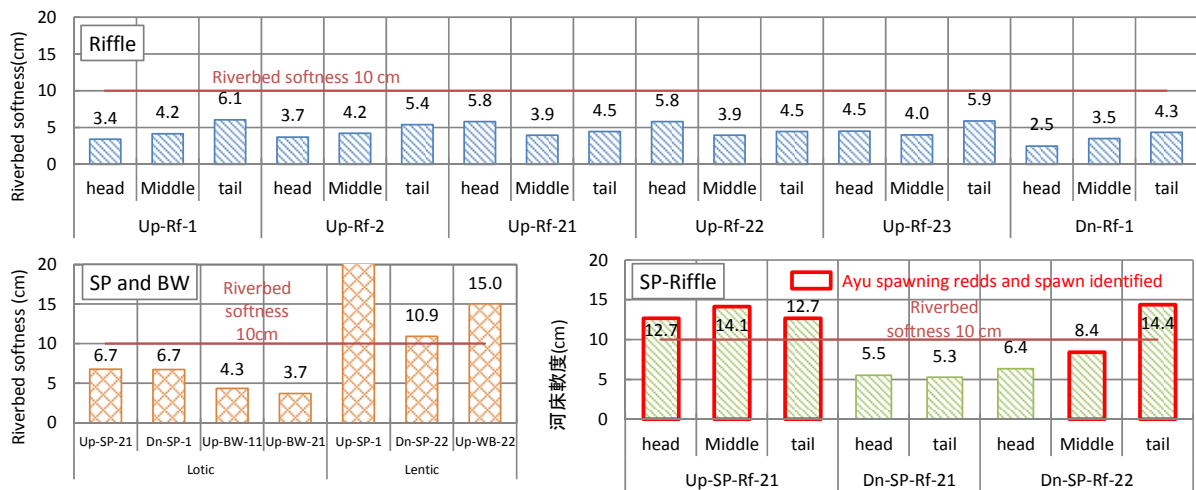


Fig. 6 Comparison of riverbed softness measured by Shino among habitats of different types. Surveys were conducted on 22 November 2013.

洪水を繰り返す中で、アユ産卵床としての好適性が時間の変化とともに劣化するためである（兵藤ら，2014a）。また、たまりの値が高いのは、小規模洪水時に細粒土砂が堆積しやすいためであり（兵藤ら，2014a），たまり瀬とは特性が異なっている。以上のことから、アユ産卵床と卵が確認されたたまり瀬では、他の生息場と比較して溶存酸素量や河床軟度が高いことから、アユの産卵には流水・湧水環境、及び、軟らかい河床が必要であることが推定された。

(4) 河床構成材料の特性

河床材料の調査・分析結果をFig. 7 に示す。アユの産卵床と卵が確認された「たまり瀬」は、他の瀬と比較して20~50mmの粒径割合が大きい。一方で「たまり瀬」は、50mmより大きい粒径の割合は通常の瀬

に比べて小さく、20mmより小さい割合は明確な傾向は見られない。この結果と現地で確認した状況から、アユ産卵床としては周辺に大きい礫（50mm程度以上）が存在せず、小さい砂礫（50mm程度以下）で構成されていることが重要であると考えられる。

(5) 河床地形の変動履歴（マイクロスケール）

2013年9月16日の4,900 m³/s の洪水前後に、鉄塔上流側のインターバルカメラで撮影された2時点の画像について、画像解析技術を応用してオルソ化を行い、浸食及び堆積箇所（変動履歴）を抽出した結果をFig. 8 に示す。

中規模洪水ではFig. 8 I に示すように、砂州前縁の土砂堆積により瀬が縮小するような変化が生じている。左岸側の副流路2では、新たな瀬（上-瀬-23）

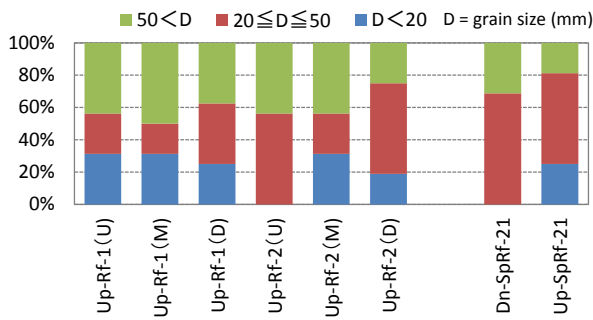


Fig. 7 Comparison of grain size classifications among habitats of riffles. Surveys were conducted on 22 November 2013 and analyzed by image processing. Letters described in () for each riffle refer that U is the riffle head, D is the riffle tale, and M is in the middle location between U and D.

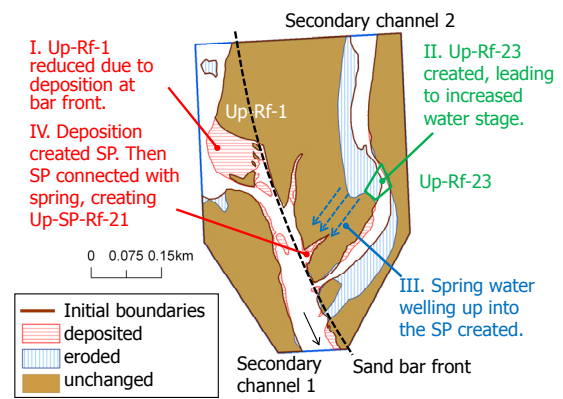


Fig. 8 Riverbed change by erosion and deposition after middle flood in September 2013 with the discharge of $4,900\text{m}^3/\text{s}$. The photogrammetric method was used for developing 2 D orthogonal data.

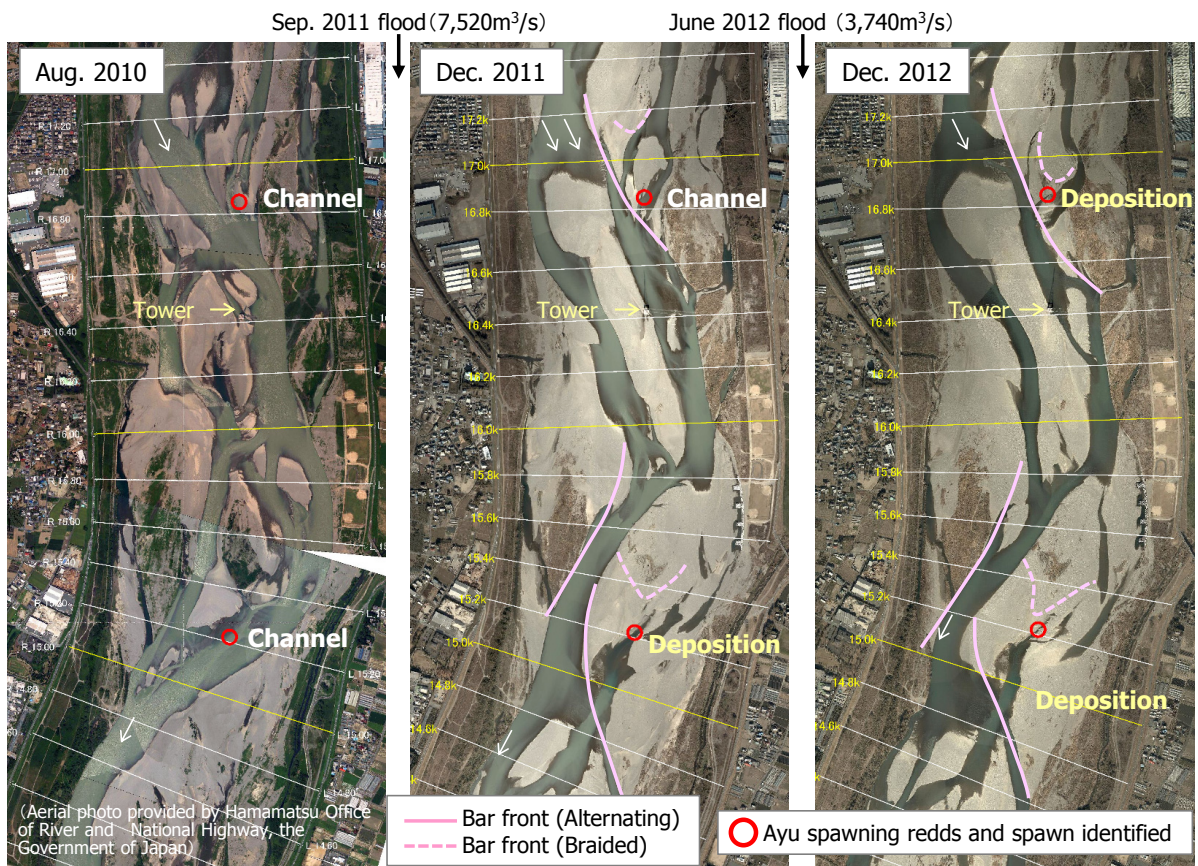


Fig. 9 Riverbed changing patterns at a reach scale by Aerial photos from 2010 to 2012 in relation to configuration of sandbar front and spawning redds.

が創出され、瀬の上流の水位が堰上がったものと推定される (Fig. 8 II)。これにより、副流路1に対して水面勾配がつくことで、湧水環境が創出されたと考えられる (Fig. 8 III)。また、中規模洪水で砂州前縁のワンドに土砂が堆積してたまりが創出され、地下で接続される湧水環境のたまり瀬 (上-たまり瀬-21) が形成された (Fig. 8 IV)。このことから、2013

年9月16日の洪水発生前には、アユ産卵場は存在せず、産卵が確認された11月22日の2ヶ月前に生じた中規模洪水により、土砂移動と地形変化の結果として、アユ産卵場が創出されたことが分かった。著者らの近年の研究により、アユ産卵場として好適な環境は、砂州の下流側にある瀬であること (角ら, 2011)、産卵前の比較的最近に土砂が堆積すること (鈴木ら,

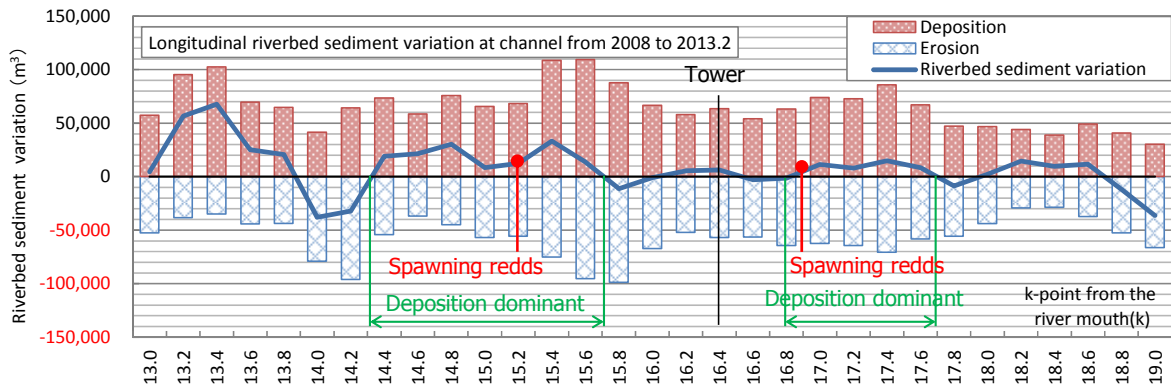


Fig. 10 Longitudinal profile of riverbed change volumes by erosion and deposition between 2008 and 2013.

2011), 瀬頭の河床が軟らかい必要があること(村井ら, 2012), 土砂堆積が中規模以上の洪水で生じる必要があること(兵藤ら, 2014a)等が示された. 本研究では, 実際に存在するアユ産卵場の河床変動履歴を把握することで, 砂州前縁で産卵床が形成されるポテンシャルが高いこと, 及び, 近年の研究成果(推定)を実証できる重要な事象を確認することができた.

(6) 河床地形の変動履歴(マクロスケール)

アユ産卵場と卵を確認した2箇所を対象に, 調査期間より更に前の2010年からの中期的な変動履歴について, 航空写真により整理した結果をFig. 9に示す. 鉄塔上流側の確認箇所は, 2011年12月までは流路であり, 2012年7月20日の3,740 m³/sの中規模洪水によって土砂が堆積した砂州前縁部であることが分かった. また, 鉄塔の下流側の確認箇所は, 2010年8月までは流路であり, 2011年9月21日に7,520 m³/sの大規模洪水を経て土砂が堆積した砂州前縁部であることが分かった. 但し, 砂州前縁には, 交互砂州によるものと, それより規模の小さい複列砂州によるものの両方が混在しており, また, これらの砂州は下流に伝播しており(Fig. 9), 双方がアユの産卵床の分布特性に関わっているものと考えられる. また, アユの産卵床の確認箇所では, 上下流共にかつての流路であり, 上流から押し出してきた砂州前縁が被さったところで, 表層が細かく, その下の基盤の構成材料が粗いことで, 湧水が流れやすい環境になったことが推定される.

更に, 調査範囲(かささぎ大橋~浜北大橋)を対象に, 2008年と2013年の横断測量成果を用いて5年間の河床変動土砂量を算出した結果をFig. 10に示す. 本図では, 浸食と堆積の変動土量をそれぞれに算出し, 差分を求めることで, 土砂移動の程度と, その場が浸食卓越又は, 堆積卓越であるかどうかを分析した. 好適な産卵床は堆積卓越の場であることが既

往研究から推定されており(竹門ら, 1995; 兵藤ら, 2014a), その推定を実態と比較分析することで検証した. その結果, 低水路内で浸食や堆積が発生しており, 土砂移動が生じる中で, 浸食と堆積が縦断的に交互に発生していることが分かり, リーチ・スケールで交互砂州が移動している状況が分かる. なお, この結果は, Fig. 9に示す航空写真の交互砂州の位置と概ね一致する. また, アユ産卵床と卵を確認した鉄塔上流側(16.9k)と下流側(15.2k)は, 共に堆積卓越の場であることが分かった. このように, 航空写真と河床変動土量から確認箇所はかつて流路であり, 洪水による土砂堆積で形成された砂州前縁部であることが分かった.

3. 置き土による対策効果の把握

アユの産卵に適した河床地形の特性を把握した結果, 洪水により砂州前縁等で土砂堆積が生じる環境を創出すること, 及び, 湧水環境を創出することが重要であることが分かった. そこで, アユの産卵に適した河床地形が再生・創出されるポテンシャルを把握するために, 置き土を実施した場合の効果について, 平面二次元河床変動解析を用いて分析評価を行った.

3.1 河床変動解析モデルの構築

(1) モデルの概要

ミシシッピ大学のYaokin Zhang氏らによって開発されたCCHE2D(Zhang, 2005)を用いて平面二次元河床変動解析を行った. CCHE2Dは有限要素法にて離散化し計算を行うものであり, 計算の安定性が高く汎用性が高いという特徴がある. また, 混合粒径を対象とした河床変動計算が可能であり, 置き土の量や質を変えた計算を行うのに適している. 本研究では, 河床地形の変化の形態に着目していることから, 掃流砂のみで計算を行った.

(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。

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

ここに、 ν_t [m²/s]は渦動粘性係数である。

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

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）

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

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

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

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。

Table 1 Computational conditions for verifying the 2 D bed variation simulation model for the Tenryu River.

Item	Condition
Period	February to December 2013
Length	7 km, 13.0 to 20.0 k-points
Initial riverbed data	Survey of cross sections as of February 2013
Geographical mesh data	Longitudinal: 22 m Lateral (channel): 20 to 30 m Lateral (high area): 11 m
Turbulence model	Mixing length model
Sediment	Sediment load: Bed load only Grains size distributions: survey data in 2007
Upstream boundary	Flows: hourly discharge data more than 500m ³ /s Sediment: none
Downstream boundary	Water stage: Results of a 1 D unsteady flow model

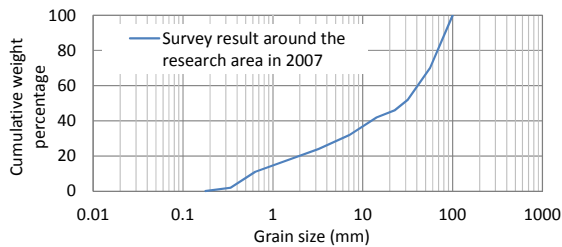


Fig. 11 Grain size distributions for the initial 2 D bed variation simulation model

(2) 解析条件及びモデルの再現性の確認

河床形状は、200m毎に計測された2013年2月の横断測量結果を用いて、天竜川13km～20kmの7km区間の計算メッシュを作成した。計算条件をTable 1に示す。上流端流量は、鹿島地点の水位データを2012年のH-Q式を用いて流量に変換して用いた。中規模洪水を含む2013年2月から2013年12月までの約1年間の洪水を計算対象とし、計算時間短縮のため500 m³/s以上のみを抽出し、上流端流量として用いた。また、下流端水位は、別途行った一次元不定流計算の結果を用いた。上流からの流入掃流砂量は無しとして計算した。上流側の境界条件の影響を受けないように、助走区間を上流側 2km (18～20 km) に設けた。また、河床変動計算の開始の前に流れのみの計算を行い、流況を安定させた状態から河床変動解析を行った。なお、粒度分布は2007年調査のものを用いた (Fig. 11)。

構築した平面二次元河床変動解析モデルの妥当性を確認するため、2013年8月30日 (流量90 m³/s) と12月16日 (流量 70 m³/s) の平常時の水面分布 (河床地形の水陸境界線) 及び流速分布を対象に、解析結果と比較した (Fig. 12)。2時点の測量成果等は存在しないため、解析については河床変動解析結果 (地形) による平常時の水面分布を算出し、再現対象についてはインターバル撮影機能付カメラによる画像の水面分布を用いた。その結果、画像と比べて流路幅にばらつきが見られるが、計算後の地形で、上-瀬-1の流路が狭くなる点、上-瀬-2の流路が2つに分かれる点、

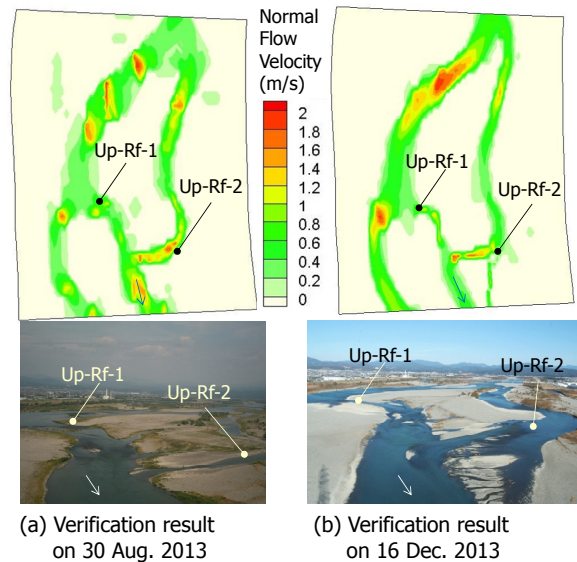


Fig. 12 Verification results of the 2 D bed variation model on 30 August 2013 (a) and 16 December 2013 (b). Water and terrestrial boundaries and velocity during normal flow conditions were compared between numerical results and interval-recording photo data. Between the time of (a) and (b), two floods occurred, a middle flood on 16 September (4,900 m³/s) and relatively small flood on 26 October (2,120 m³/s).

上-瀬-1や上-瀬-2等の瀬で流速が速くなっている点などが再現されていることから、河床地形を概ね再現することができた。

3.2 瀬の再生及び創出及び評価の方法

現地調査の結果から、アユの産卵に適した河床地形は、河床軟度が高く20～50 mm 程度の礫河床であり、その地形を形成するためには、洪水により砂州前縁等で土砂堆積が生じること、又は、土砂堆積により湧水環境が創出されることが重要であることが分かった。しかし、主流路の瀬の河床の粒径は大きく、河床軟度は低いため、アユの産卵に適した河床材料が存在しない。対象地区のように、船明ダム等のダム群により、上流域から砂礫の土砂供給を見込めない状況の下でアユ産卵床を創出するためには、新たに土砂を投入する必要がある。そこで、土砂を供給する手段として、比較的簡易に対策ができ、効果の即効性を期待できる置き土による効果を把握する。置き土の方法を、(1) 置き土による劣化した瀬の再生と (2) 置き土による土砂堆積の促進と湧水環境の創出の2つについて分析評価する。

(1) 置き土による劣化した瀬の再生

既存の瀬である上-瀬-1を好適化するために、上-

Table 2 Numerical cases for renewing an existing riffle at main channel by sediment replenishment. Numerical cases are consisted of the replenish location and flood discharge. For example, Case U-SF refers to sediment is replenished at the upstream location and receives small flood with the discharge of 2,100 m³/s.

Condition	Parameters
Replenishment location	Upstream (U), Middle (M), and Downstream (D)
Flood discharge	Small Flood (SF) : 2,100 m ³ /s, Middle Flood (MF) : 4,900 m ³ /s, and Large Flood (LF) : 6,000 m ³ /s

Table 3 Numerical cases for creating a new riffle and spring water at a secondary channel by sediment replenishment.

Case	Size of replenished sediment		
	Length (m)	Width (m)	Height above water surface (m)
A	20	350	0.5
B	20	350	1.5

瀬-1の上流側の砂州上の3箇所に置き土をして計算を行った。既往の研究より他河川では横断型の瀬はアユの産卵に好適であることがわかっている（角ら，2011），この瀬を選択した。置き土の場所は、砂州上流側（U），中央側（M），下流側（D）の3地点である（Table 2, Fig. 13）。なお、平水時に浸食されて濁水の原因にならないよう、500 m³/s以下の洪水時に冠水しない地点を選んでいる。置き土の形状は縦 65 m，横 75 m，高さ 1 m の約5,000 m³とし、河床構成材料は現地の河床材料と同様に、2007年の粒度分布を用いた。また、置き土の流下過程を明瞭にするため、置き土のみを移動床とし、置き土部分以外は固定床として計算した。流量は、中規模洪水（4,900 m³/s, MF）と小規模洪水（2,100 m³/s, SF），大規模洪水（6,000 m³/s, LF）の3種類を与えた。大規模洪水（6,000 m³/s）のモデル波形はHagerの提案した式を参考に式（12）のハイドロモデルを使用した。

ここで $Q(t)$ は時間 t [hour]における流量 [m³/s]， Q_p はピーク流量[m³/s]， t_p はピーク流量の発生時間 [hour]， m は定数である。なお、式には、 $Q_p=6,149$ ， $t_p=43$ ， $m=10$ を代入した。

(2) 置き土による土砂堆積の促進と湧水環境の創出

現地調査でアユの産卵床が発見された、河床軟度が高い副流路と同じ状況を作り出すため、Table 3 と Fig. 13 に示すような堤防状の置き土形状を検討した。平水時には水を堰き止めることにより横断測線



Fig. 13 Location and form of the replenished sediment for renewing an existing riffle at a main channel and for creating a new riffle and spring water at a secondary channel.

に平行な置き土の上流と下流の間に水位差を生み出し、増水時には水が置き土を乗り越え浸食することにより、置き土の下流に土砂を堆積させるためである。Case Aは、縦 20 m 横 350 m で置き土の高さは標高 21 m（平水時の水面より0.5 m高い）にした。Case Bは、Case Aと同じ位置と平面形状で、置き土の高さを標高 22 m（平水時の水面より 1.5 m 高い）とした。

(3) 河床地形の評価方法

アユ産卵床に適した河床は、洪水時に砂州前縁（瀬頭等）で土砂堆積が生じること、及び、湧水環境が創出されることであり、この点を置き土の効果として評価するものとする。そのため、置き土による劣化した瀬の再生では、置き土が洪水で流出すること、上-瀬-1の瀬頭に土砂堆積が生じること、瀬が残存することとした。置き土による土砂堆積の促進と湧水環境の創出では、置き土が洪水で流出すること、置き土の上流側が浸食し下流域を堆積させること（湧水環境の創出）、瀬が創出されることとした。

3.2 結果と考察

(1) 置き土による瀬の再生効果の把握

置き土の場所で比較すると（Fig. 14），いずれの流量でも砂州の下流側の置き土（D）では、流出量が小さくなった。流量が大きくなるにつれて土砂の流

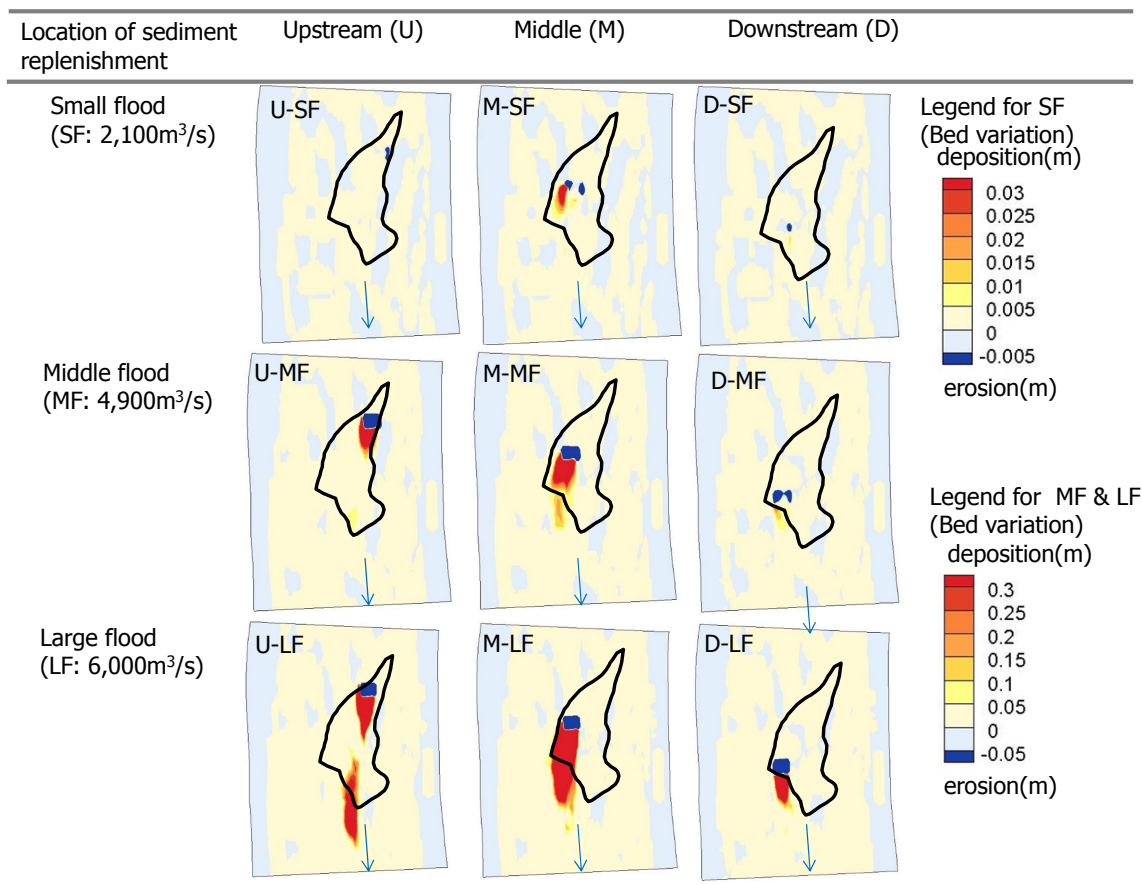


Fig. 14 Result of sediment replenishment for renewing an existing riffle at a main channel.

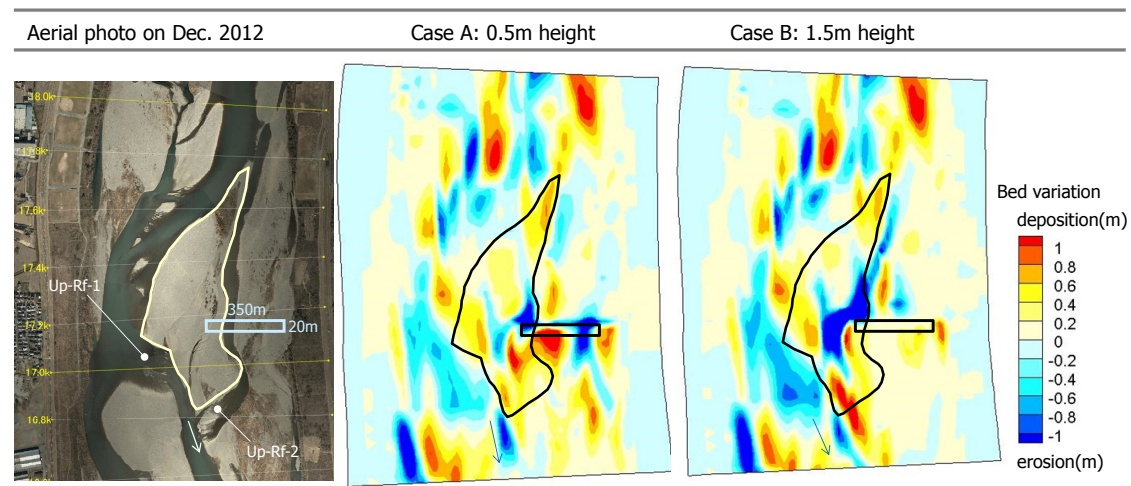


Fig. 15 Result of sediment replenishment for creating a new riffle and spring water at a secondary channel.

出量に大きな差が生じた。小規模洪水 (2,100 m³/s, SF) では全ての位置において、置き土の量に対して流出率が3%に満たず、置き土がほとんど流下せずに残存していた。また、大規模洪水 (6,000 m³/s, LF) では、全ての位置で85%以上が流出した。しかし、大規模洪水では河道全体に大きな地形変化が起きて上-瀬-1が消失する可能性があり、土砂移動のスケールが置き土の量を大きく上回ることから、置き土を

して新たな土砂供給をする必要がないと考えられる。

次に、中規模洪水 (4,900 m³/s, MF) の洪水で流出した置き土のうち、上-瀬-1に堆積した土量を算出した結果、上流部 (U) では100 m³、中央部 (M) では350 m³、下流部 (D) では230 m³であった。上-瀬-1の面積が約 5,000 m² (100 m × 50 m) であることから、上流部 (U) では2 cm、中央部 (M) では7 cm、下流部 (L) では4.2 cmが上-瀬-1に堆積したことに

なる。

2013年2月～12月までに実際に発生した洪水（800 m³/s, 560 m³/s, 4,900 m³/s, 2,100 m³/s）の内、小規模洪水（800 m³/s, 560 m³/s, 2,100 m³/s）では大きな浸食や堆積は見られなかったが、中規模洪水（4,900 m³/s）により大きな地形変化が生じ、砂州下流部に堆積が生じた。このことから、上-たまり瀬-21や下-たまり瀬-22のように、アユの産卵に適した河床軟度の高い副流路は、中規模洪水で形成されたと考えられる。また、中規模洪水により主流路内にも堆積が見られたが、現地調査では4,900 m³/s, 2,100 m³/sの洪水を経て河床は硬化していた。このことから、現在の天竜川の主流路では、中規模洪水が起こって河床が軟化しても、その後の小規模洪水によりすぐに硬化してしまい、産卵に適した河床環境は長続きしないと考えられる。

砂州上では上流部（U）や中流部（M）に比べて、下流部（D）で土砂の流出量が小さい結果になった。流出量が小さければ上-瀬-1への土砂供給量も少なくなるので、置き土の位置として、砂州下流部（D）は不適当であると考えられる。また、砂州上流部（U）に置き土をしたのでは、流出した土砂の瀬における捕捉率は低くなった。これは粗い粒径のものは流路まで届かず、細かい粒径のものは流路で堆積せず下流へ流されたからであると考えられる。このことから置き土の位置として砂州の上流部（U）も不適当であると考えられる。置き土の流下量の流量による違いを見ると、小規模洪水（2,100 m³/s）ではほとんどの土砂が流下しなかった。一方、大規模洪水（6,000 m³/s）が起きた場合には、土砂の多くが流下するものの、地形が大きく変化し、上-瀬-1が消失する可能性や、新たに産卵に適した瀬が形成される可能性があるため、置き土自体の効果が小さいと考えられる。以上の結果より、天竜川において置き土を行う場合は、年1回生起確率の3,000～5,000 m³/s 規模の洪水により最適化されるような場所や量を選択し実施することが有効であると考えられる。

中流部（M）に置き土をして中規模洪水（4,900 m³/s）が生じた時、上-瀬-1には約7 cmの堆積が起きた。また置き土の量については、上-瀬-1を最適化するためには、5,000 m³程度が適していると言えるが、瀬の面積に応じて変える必要がある。今回はアユの産卵に好適であることがわかっている横断型の瀬を選択し（角ら、2011）、最適化する置き土の条件を検討した。

(2) 置き土による土砂堆積の促進と湧水環境の創出効果の把握

置き砂による土砂堆積の促進と湧水環境の創出効

果をFig. 15に示す。Case B（置き土高1.5 m）では、流量ピーク時に置き土を越水しなかった。Case A（置き土高0.5 m）では、流量ピーク時に越水し置き土の下流側に堆積が見られたが、流量減少後は置き土の右岸側にすり抜けるように流路ができたため、置き土の上下流で有効な規模の水位差は生じなかった。増水時の越水により下流部に土砂を堆積させることはできたが、平水時には置き土横に流路ができた水を堰き止めることができなかつたため、有効な規模の水位差を生じさせることができなかつた。平水時に置き土で水を堰き止め水位差を生じさせるためには、流路が掘れないようにあらかじめ粗い砂礫を置き土するなどの方法が考えられる。

4. 結論と今後の課題

本研究において、アユの産卵に適した河床地形の特性の把握において得られた結論は以下の通りである。

- 天竜川のかささぎ大橋～浜北大橋を対象としてアユの産卵床調査を実施した結果、2013年11月22日と12月15日に礫床2箇所のみでアユ産卵床と卵を確認した。その箇所はアユの産卵場所として一般的に好適な環境といわれる浅瀬ではなく、湧水のたまりから流路に接続される流水環境（たまり瀬）であった。
- アユの産卵床と卵を確認したたまり瀬は、瀬やワンド、たまり等の他の生息場と比較して溶存酸素量や河床軟度が高いことから、アユの産卵には流水・湧水環境、及び、軟らかい河床が必要であると推定された。
- アユの産卵の2ヶ月程前に生じた中規模洪水により、砂州前縁のワンドに土砂堆積が生じてたまりが創出され、近傍上流側の副流路に瀬が形成された。瀬による水位の堰上がりにより地下で接続される湧水環境のたまり瀬が形成された。
- 航空写真と河床変動土量から、アユ産卵床と卵の確認箇所は、かつて流路であり、洪水による土砂堆積で形成された砂州前縁部（堆積卓越の場）であった。但し、砂州前縁には、交互砂州によるものとそれより規模の小さい複列砂州によるものの両方が混在しており、また、これらの砂州は下流に伝播しており、双方がアユの産卵床の分布特性に関わっていると考えられる。
- 現状の天竜川のアユ産卵床は、洪水時に堆積が卓越する場に対応しており、砂州前縁部が好適な産卵環境を創出するポテンシャルが高い理由と考えられた。このようにアユ産卵床の形成においては、河床地形の変動履歴が重要な要素になること

を示した。

また、置き土による対策の効果の把握について、平面二次元河床変動解析を用いた分析評価により得られた結論を以下に示す。

- ・ 既存の瀬の再生では、砂州上で置き土をする場合、土砂の流出量と瀬での土砂堆積の状況から、砂州中流部に置き土をするのが望ましいことが分かった。また、既存の瀬を好適化するためには、5000 m³程度の土砂量を砂州中流部に置き土することが望ましいことが分かった。
- ・ 土砂堆積の促進と湧水環境（たまり瀬）の創出では、増水時の越水により下流部に土砂を堆積させることはできたが、平水時には置き土の周辺に流路ができて水を堰き止めることができなかつたため、有効な規模の水位差（湧水環境）を創出することができなかった。
- ・ 今後は、伏流水を考慮した分析評価の手法等により、湧水を含めて河床環境を評価する必要がある。

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。天竜川漁業協同組合には調査期間中、アユ産卵床の探索で協力して頂きました。また、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、シーテック 浜松支店、いであ株式会社 建設統括本部 水圏事業部に協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 栗津陽介（2013）：アユの産卵に適した河床環境の形成過程に関する研究，京都大学工学部地球工学科土木工学コース卒業論文。
- 石田力三（1961）：アユの産卵生態－Ⅱ，産卵魚の体型と産卵床の砂礫の大きさ，日本水産学会誌，27（12）。
- 石田力三（1962）：アユの産卵生態－Ⅲ，産卵場の水深と産卵魚の体型，日本水産学会誌，28（4），pp.339-404。
- 石田力三（1964）：アユの産卵生態－Ⅳ，産卵水域と産卵場の地形，日本水産学会誌，30（6），pp.478-485。
- 石田力三（1967）：アユの産卵生態－Ⅴ（産卵場の構造）。淡水研報，17（1），pp.7-19。
- 泉公祐（2014）：天竜川におけるアユの産卵に適した副流路の形成と土砂流入条件の関係，京都大学工学部地球工学科土木工学コース卒業論文。
- 鬼束幸樹・永矢貴之・白石芳樹・東野誠・高見徹・

の場眞二・秋山壽一郎・尾関弘明・畑中弘憲・中川由美子（2007）：アユの産卵に適した浮き石状態の発生条件，環境工学研究論文集，pp.59-66。

- 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，pp.711-718。
- 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54B，pp.719-725。
- 竹門康弘・谷田一三・玉置昭夫・向井宏，川端善一郎（1995）：棲み場所の生態学，平凡社。
- 田代喬・伊藤壯志・辻本哲郎（2002）：生活史における時間的連続性に着目した魚類生息場の評価，河川技術論文集，第8巻，pp.277-282。
- 知花武佳・玉井信行（2002）：生息域の季節変動に着目した魚類生息域適正基準に関する研究，水工学論文集，第46巻，pp.1145-1556。
- 天竜川漁業協同組合，たかはし河川生物調査事務所（2012）：平成21-23年度天竜川アユ資源保全調査報告書。
- 野上毅・渡邊康玄・中津川誠（2001）：真駒内川における魚類の生息環境，水工学論文集，第45巻，pp.1123-1128。
- 兵藤誠・栗津陽介・竹門康弘・角哲也・鄧朝暉（2013）：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，京都大学防災研究所年報 第56号B，pp.699-712。
- 兵藤誠・竹門康弘・角哲也・栗津陽介・鄧朝暉（2014a）：洪水による地形の浸食堆積・硬化軟化プロセスが河川生息場の変動履歴に及ぼす影響，土木学会論文集B1（水工学），Vol70，No.4，I_1345-I_1350。
- 兵藤誠・竹門康弘・角哲也（2014b）：天竜川におけるアユ産卵床の河床地形特性と変動履歴の関係，河川技術論文集，第20巻，pp.67-72。
- 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，応用生態工学会講演集，pp.158。
- 村本嘉雄・藤田裕一郎（1977）：中規模河床形態に関する研究，京都大学防災研究所年報第20巻B-2，pp.244-258。
- Zhang Y. (2005): National Center for Computational Hydroscience and Engineering. CCHE2D Sediment Transport Model (Ver3.290), The University of Mississippi.

（論文受理日：2014年6月11日）