

天竜川における副流路の湧水環境創出による アユ産卵床の造成に関する研究

A Study on Restoration of Upwelling-Zone for Spawning Redds of Ayufish in the Tenryu River

泉 公祐・竹門康弘・兵藤 誠⁽¹⁾・角 哲也

Kousuke IZUMI, Yasuhiro TAKEMON, Makoto HYODO⁽¹⁾ and Tetsuya SUMI

(1) いであ株式会社

(1) IDEA consultants, Inc.

Synopsis

Spawning redds of Ayufish (*Plecoglossus altivelis*) have been degraded by decrease in sediment supply and increase in turbidity derived from reservoir sedimentation in the lower reaches of the Tenryu River, Japan. We conducted a series of habitat surveys in the two reaches of the Tenryu River to seek the spawning redds and suitable physical conditions. Then, we found the spawning redds of the fish in the upwelling-zones of hyporheic water in the secondary channels. Based on the results of habitat survey, we conducted an experiment in the Tenryu River in order to create a new riffle connected with upwelling-zone of hyporheic water. The work resulted in successful creation of upwelling zone and we found the spawning redds of Ayufish in the new riffle, whereas no spawning redds were found in riffles in the main channel.

キーワード: アユ, 湧水, 産卵床, 濁度

Keywords: Ayufish, up-welling zone, spawning redds, turbidity

1. はじめに

1.1 研究背景

日本全国には、約3000基のダムが存在する。日本は、雨が多く1000~3000m級の山脈が連なり河川が短く急勾配のため、降った雨はすぐ平野に流れ込み海に出てしまう。そのため、大雨が降れば洪水に、また雨が降らなければ渇水になりやすい。ダムは、これらの洪水、渇水による被害軽減のために大きな役割を担っている。特に、1970年代に、人口増加や工業用水、農業用水の需要の増加から、多くのダムが建設された。

一方で、ダムは下流の河川環境に大きな影響を与える。洪水攪乱の規模や生起頻度が減少することにより、下流河川の水質や水生生物の生息場が変化し、

シルトの堆積や藻類の異常繁殖、河道の樹林化などの問題が生じている。また、ダムの土砂捕捉効果で堆砂が進行することにより、ダムの貯水容量が減少し洪水調節機能が低下するだけでなく、下流河道の粗粒化や河床の低下も生じている。天竜川は、急峻な地形と脆弱な地質のために、豪雨や洪水により大量の土砂が流出する。天竜川には15のダムが存在するが、上流から多量の土砂供給があるため堆砂が進行しており、ダム湖の貯水容量の減少や治水安全度の低下、ダムの土砂捕捉効果による海岸線の後退、洪水時の濁水を溜め込むことによる濁水の長期化などが深刻な問題となっている。濁水長期化が発生すると、アユの餌である付着藻類の上にシルトが堆積し、アユが十分に餌を食べることができなくなってしまう。天竜川はアユの名産地であるが、近年漁獲

量は長期的に減少傾向にあり，天然アユをいかに増加させるかが課題となっている。

天竜川では，これらの問題を解決するために，「天竜川ダム再編事業」が行われている。既設の利水専用ダムである佐久間ダムに排砂バイパスを建設し，恒久的な堆砂対策を施すものであり，治水容量と利水容量の確保による佐久間ダムの長寿命化，土砂供給の連続性の確保による海岸線後退の抑制，下流の河川環境の改善を目的としている。現状の計画では，砂分を中心に土砂供給をすることが検討されているが，砂分中心の土砂供給は，新たに流出する砂が礫の隙間を埋めて，アユの卵が捕食されやすくなるなど，河床環境が逆に悪化してしまうのではないかと懸念がある。今後，このような物理環境の変化が生態系に与える影響をさらに検討していく必要がある。

1.2 研究目的・研究手順

天竜川の貴重な水産資源であるアユの産卵床は河床環境に大きく依存し，佐久間ダムを始めとする上流ダム群の建設の影響による，河床の粗粒化や硬化，濁水長期化などにより，好適なアユの産卵環境が失われつつある。そこで，本研究では，河川環境の改善目標としてアユの産卵環境を指標にし，悪化した河川環境を改善する手法を確立することとした。

本研究ではまず，天竜川において河床材料，水質，流速，河床軟度などの河床環境に関する現地調査を行い，河川環境の現状の評価を行った。また，濁水長期化が深刻な天竜川で，水質面でアユの好適な産卵床条件を満たす湧水環境の重要性に着目し，湧水の流れる流路を造成しアユの産卵床を創出する手法を検討し，2015年度に湧水河道掘削実験を現地で実施した。さらに，航空写真を用いて，湧水流路の空間分布特性の把握，湧水流路の変化の生じる攪乱規模の役割などについて検討を行い，湧水環境再生のために長期的に必要な対策を検討した。

2. 現地調査

調査地は，天竜川14km～18kmの約4kmの区間とした（Fig. 1）。この区間は16.3km地点にある中部電力鉄塔上に設置したカメラから1時間ごとに撮影したインターバル写真を用いて分析できるという利点がある。調査ハビタットは，鉄塔上流側，下流側共に，瀬，たまり，ワンドが最低1地点ずつ入るように設定した。

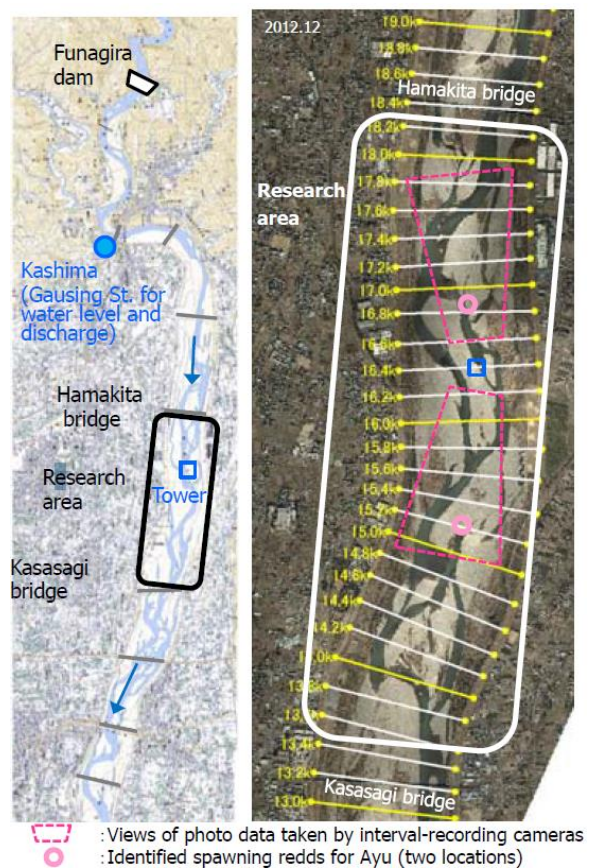


Fig. 1 The research area in the Tenryu River Japan

2013年度の現地調査は，2013年7月16日，8月30日，10月3日，11月22・23日，12月1日，12月15日の計6回実施した。その間に，9月に4,900m³/s，10月に2,100m³/sの500m³/sを超える出水があった。

調査項目は，アユ産卵床調査，河床軟度調査，水質調査，河床材料調査である。調査方法の詳細を以下に示す。

2.1 アユ産卵床調査

2013年11月，12月調査では，天竜川漁業協同組合の協力を得てアユ産卵床の探索を行った。調査区間である天竜川16.5km周辺は，アユの主要な産卵場であったが，近年は縮小している。

2.2 河床軟度調査

河床軟度調査は，シノと長谷川式土壌貫入計を用いて行った。シノとは，長さ30cm程度の先のとがった鉄の棒に目盛りを刻んだものであり，河床に一定の力で5回突き刺し，平均値をその貫入深(cm)として記録するものである。簡便な方法であり，複数の地点を計測することが可能である。産卵床の調査では，多地点の情報から面的に河床軟度の分布を求めることが重要であるため，シノによる計測は有効である。長谷川式土壌貫入計は，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河床の硬さを計測するものである。初期値を記録した後、落錘を落下させるごとの貫入深さ(cm)を記録し、その値が変わらなくなった時点、値が変わり続ける場合は貫入深さが20cmを越えた時点でその場所での計測は終了した。深さ100cmまでの河床の硬さを連続的に高精度での計測が可能だが、計測に時間を要し多くの地点を計測することは困難である。

シノは、瀬では上、中、下流それぞれ5ヶ所ずつ、その他のハビタットでは上、下流それぞれ2ヶ所ずつ計測した。長谷川式土壌貫入計は、上、中、下流それぞれ川岸と流芯部の2ヶ所ずつで計測を行った。

2.3 水質調査

水質調査は、ポータブル水質計(HORIBA製 U-50 Multiparameter Water Quality Checker)を用いて、水温、DO濃度、PH、濁度(NTU)、電気伝導度を計測した。水質調査は、表層水と間隙水について行った。間隙水は、シリコン採水管を河床表面から約20cm鉄杭を打ち込んだところへ埋め込み、シリンジで吸い上げたものを用いた。アユは、河床の礫を動かし河床から10数cmの範囲に産卵を行うため、産卵床としての好適性を評価するために、河床から20cmの間隙水を用いた。また、表層水に対しては、バクテスタ(共立理化学研究所製)も行い、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、CODを測定した。

調査点は、表層水は各ハビタット1ヶ所、間隙水は瀬の上、中、下流の3箇所ずつで計測した。

2.4 河床材料調査

河床材料調査は、画像解析により行った。各ハビタットの川岸に25×25cmのコドラートを置き、50cm上方から撮影した写真を用いて、面格子法により分析を行った。写真内のコドラートを縦横それぞれ5分割した格子を作成し、格子点上の礫のサイズを求めた。粒径は長軸と中間軸の平均値として算出した。

3. 現地調査結果

3.1 アユ産卵床調査結果

本研究で行った現地調査の結果、上たまり瀬21と下たまり瀬22の2ヶ所でアユの産卵床を発見することができた。これらの地点は共に、湧水の湧出するたまりから主流路に接続される流水環境で、洪水時に副流路となる地点であった。また、いずれも砂州下流部に位置していた。このような湧水の湧出するたまりから流れ出る瀬を「たまり瀬」と呼んでいる。



Fig. 2 Habitat name of upstream and downstream of 16.4km

3.2 河床軟度調査結果

シノによる河床軟度の2013年11月調査結果をFig. 3に示す。

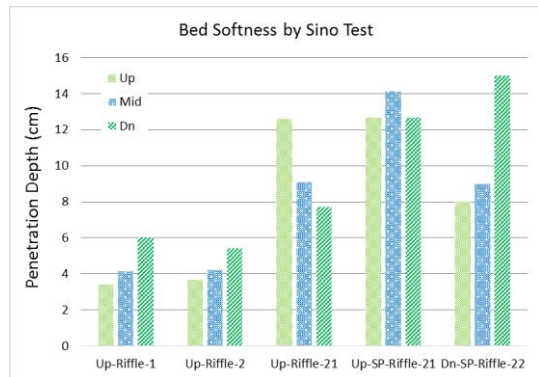


Fig. 3 Comparison of riverbed softness measured by Shino (2013)

アユの産卵床が発見されたたまり瀬と、主流路の瀬で河床軟度の値の比較を行った。たまり瀬においては、シノの貫入深がそれぞれ13.2cm、10.7cmであったが、主流路の瀬では10cmに満たない地点が多かった。たまり瀬は砂州下流部に位置しており、洪水時に土砂堆積が生じやすいために河床が軟らかくなったと考えられる。アユの好適な産卵床には、礫が浮き石状に軟らかく堆積した状態が必要とされていることから、たまり瀬はアユの好適な産卵床としてのポテンシャルが高かったと推察される。

3.3 シノと長谷川式土壌貫入計の相関

本研究では、シノによる河床軟度測定と合わせて、同じ地点で長谷川式土壌貫入計による河床軟度測定も行った。長谷川式土壌貫入計では、人的誤差が生じにくく定量的に河床軟度が測定できるが、シノでは誤差が生じる可能性がある。しかし、シノは持ち運びに便利で簡易に測定できることから、アユ産卵床調査では広く用いられている。そこで、シノによる河床軟度と、長谷川式土壌貫入計による河床軟度の間の相関関係を求め、シノによる河床軟度の定量性を評価した。長谷川式土壌貫入計の結果の内、アユの産卵床の環境条件となりうる15cmの深さまでの一回あたり平均貫入深度を用いた。シノの貫入深さは、5cm以上のデータのみを抽出して用いて、相関関係を算出した。なお、調査結果は、栗津(2013)と村井(2012)を引用し、5年分のデータをグラフに示した。

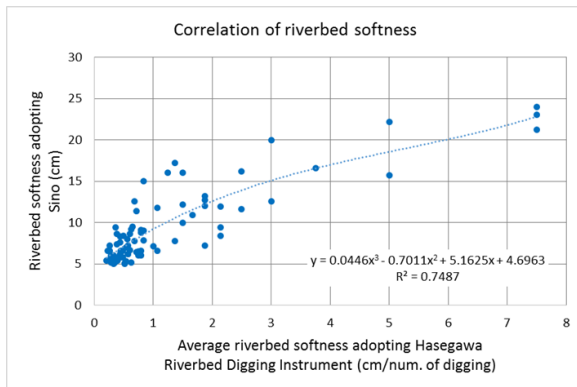


Fig. 4 Correlation of riverbed softness between Shino and Hasegawa Riverbed Digging Instrument

Fig. 4より、シノと長谷川式貫入試験機の河床軟度の間には、強い相関 ($R^2=0.7487$) が認められた。この結果から、シノにより河床軟度を定量的に評価可能と考えられる。シノは簡便であることから短時間で多地点の河床軟度が測定できる点でも、アユの産卵床の河床軟度の評価方法として有効であるといえる。既往研究より、シノで10cm以上刺さる地点がアユの産卵に好適であることがわかっている。Fig. 4より、シノ10cm以上貫入する地点は長谷川式土壌貫入計で1回あたり1cm以上貫入する地点におおよそ対応している。このことから、シノで10cm以上貫入する、もしくは長谷川式土壌貫入計で1回あたり1cm以上貫入する地点を、アユの好適な産卵床条件として考えることが有効であると考えられる。

3.4 水質調査結果

天竜川では濁水の長期化が深刻化しており、礫表面へのシルトの堆積による良好なアユの餌である付着藻類の減少が大きな問題となっている。現地調査

において、湧水の湧出するたまり瀬では、濁度が低い湧水が流れていることが確認できた。実際に、主流路の瀬では400NTU程度で濁度が高い地点が多かったのに対して、副流路のたまり瀬では100NTU程度で透明度が高かった。湧水は、砂州内を伏流する間にフィルタリングされ透明度が高くなると考えられる。

各ハビタットで1ヶ所計測した、表層水の溶存酸素濃度の調査結果をFig. 5に示す。

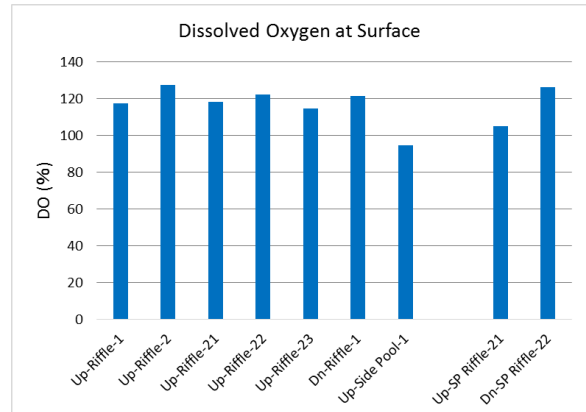


Fig. 5 Comparison of Dissolved Oxygen (DO) at surface (2013)

主流路の瀬、たまり瀬ともにDO濃度は100%を越えていた。湧水の湧出していた上たまり1ではややDO濃度が低いですが、そこから接続されるアユ産卵床の発見された上たまり瀬21では、DO濃度はアユの生存に十分な量まで回復していた。

間隙水のDO濃度の調査結果をFig. 6に示す。間隙水は、各瀬において瀬頭、中間、瀬尻の3地点ずつで計測した、

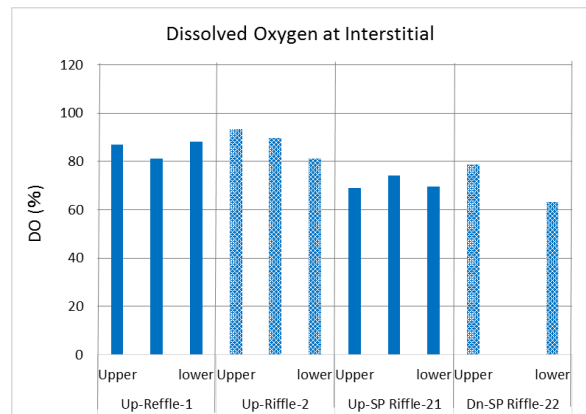


Fig. 6 Comparison of Dissolved Oxygen (DO) at interstitial layer (2013)

間隙水のDO濃度は、産卵床の発見されたたまり瀬では、主流路の瀬と比べてやや低いですがアユの産卵には十分な量であった。湧水が砂州中を浸透している間にDO濃度は減少するが、たまり瀬に流れ込むまで

にはDO濃度は十分に回復すると考えられる。

3.5 河床材料調査結果

各ハビタットの川岸に25×25cmのコドラートを置き、50cm上方から撮影した写真を用いて、面格子法により河床材料の画像解析を行った。河床材料の画像解析の結果をFig. 7に示す。河床材料は、好適なアユの産卵床形成に必要とされる、20mm～50mmの粒径の礫、20mm以下の砂礫、50mm以上の礫、の3種類に分類した。

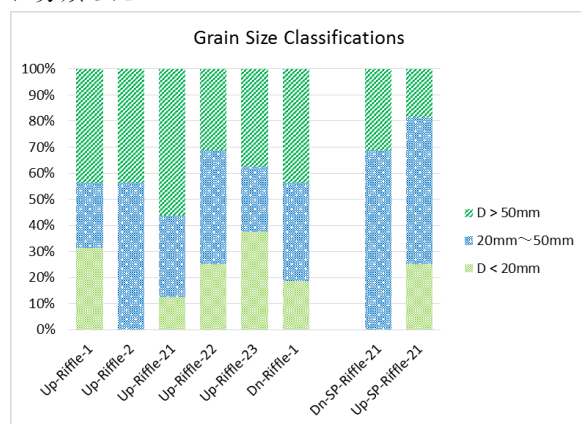


Fig. 7 Comparison of grain size classification among habitats of riffles

主流路の瀬と産卵床の発見されたたまり瀬を比べると、主流路では、50mm以上の粒径の割合が高くなっている。このことから主流路では、ダムの土砂補足効果によって上流からの土砂供給量が減少したことで、河床の粗粒化が進んでいると考えられる。また、たまり瀬では、アユの産卵に適した20mm～50mmの粒径の割合が高くなっている。砂州下流部に位置するたまり瀬では土砂堆積が生じやすく、平水時の流量が少ないために粒度は維持されるためであるとされる。

3.6 考察

現地調査を通じて、天竜川での河床環境の現状を知ることができた。天竜川では、ダム建設による土砂の補足効果が下流に徐々に伝わっており産卵場が減ってきている現状で、河床環境の改善策は必須の課題である。

2013年度の現地調査では、アユの産卵床が主流路の瀬ではなく、湧水の湧出するたまりから流路に接続される環境で発見された。主流路の瀬では、シノの貫入深が10cm以下の地点が多く、河床材料は50mm以上の土砂の構成割合が高かったことから、河床の硬化と粗粒化が進んでいることがわかった。調査を行った2013年度に4,900m³/sの規模の大きな出水が発生したにもかかわらず、河床軟度は低い地点が

多かった。天竜川では、佐久間ダムや船明ダム、秋葉ダムなどの上流ダム群の土砂補足効果による河床の硬化と粗粒化で、好適なアユの産卵床が自然とは形成されにくくなっていると考えられる。産卵床の発見されたたまり瀬では、主流路と異なり河床軟度は高く、河床材料は20mm～50mmのアユの産卵に適した粒径で構成されていた。これは、たまり瀬が砂州下流部に位置していたことが大きな要因であるとされる。アユがなぜ産卵床として主流路の瀬ではなくたまり瀬を選択したのかは、河床軟度、河床材料とあわせて低濁度の流水の流れる環境であったことが大きな要因であったと考えられる。中央構造体が南北に貫く脆弱な地質から、多量の土砂生産のある天竜川では、濁水の長期化が深刻である。湧水は、砂州中を伏流する間にフィルタリングされ、濁度は低くなる。濁度が低いことでアユの餌である藻類が育ちやすくなるため、アユの産卵に好適な環境となったと推察される。

4. 湧水導水路掘削と瀬の造成実験

4.1 目的と概要

2013年度の現地調査では、主流路の瀬ではアユの産卵床を発見することができず、湧水の流れる副流路の瀬においてアユ産卵床が発見された。現状の天竜川的主流路の瀬では濁水の長期化、河床の粗粒化、硬化によりアユにとっての好適な産卵床が自然とは形成されにくくなっていることがわかった。砂州下流部のたまり瀬の上流に湧水導水路を掘削し伏流水の湧出環境を作り、下流部に産卵床となる瀬を造成する対策を考えた。これにより、広域の伏流水を集めることが可能となり、目詰まりを起こしにくくなると予想される。また、砂州は上流から侵食されることから、砂州下流部の湧水導水路の存続時間は比較的長いと考えられる。さらに、たまり瀬部には掘削した土砂を置くことで、アユの産卵床にとって河床材料、河床勾配等が好適な瀬を作り出すことが期待できる。

2015年10月、天竜川15.2km砂州 (Fig. 1) のFig. 8に示す位置で湧水導水路の掘削、湧水の流れる瀬の造成を行った。Fig. 8中の既存ワンド、既存たまり共に、湧水の流れるハビタットである。この砂州は、2013年度調査でアユの産卵床が発見されている、アユ産卵床のポテンシャルの高い地点である。この実験は主に二つの要素から構成される。1点目は、既存たまりから湧水導水路を掘削し砂州中を流れる地下水をワンドに集めて、湧水の流量を増加させることである。2点目は、湧水の流れるワンドの出口に土砂を投入し、アユ産卵床に適した粒径、河床勾配

の瀬を創出することである。湧水導水路の掘削，ならびに湧水の流れる瀬の造成の詳細を次項に示す。



Fig. 8 Location of water supply canal and new riffle

4.2 湧水導水路の掘削

既存たまりから既存ワンドの上流に接続する形で、長さ60m、幅2~3mの湧水導水路の掘削を行った。Fig. 9に示すように、導水路の掘削により砂州中を流れる湧水を集めてワンドに供給し、ワンドの湧水量を増量することを目的としている。

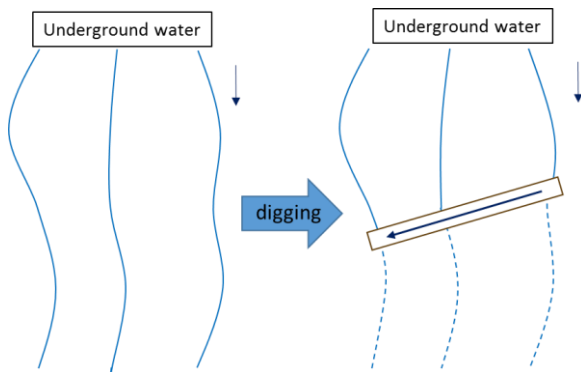


Fig. 9 Dig water supply canal

湧水導水路を掘削し開水路となることで、湧水の水温や水質の変化が発生する可能性がある。また、川辺に生息する他の生物への影響も考えられる。そのため、掘削した導水路の機能を保ちつつ、導水路の埋め戻しを行った。Fig. 10に示すように、埋め戻

しの際には、下層に通水性の良くするために粒径の大きな礫を、砂利を受け止めるための藁を上部に、さらに砂州構成材料の砂利を敷き詰めた。

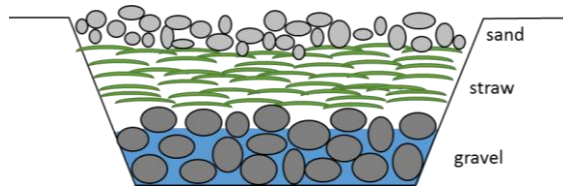


Fig. 10 Water supply canal are filled with gravel, straw and sand

湧水導水路完成時の出口の景観をFig. 11に示す。ワンドには、もともと上流端から湧水の流入があったところに、掘削した導水路からの湧水が加わる形となっている。



Fig. 11 Landscape of upstream of the Wando

4.3 湧水の流れる瀬の造成

湧水ワンドの出口に、置き土による瀬の造成を行った。Fig. 12に示すように、土砂を盛ることにより水をせき止めることで湧水ワンドの水位をせき上げて、人工的に適切な河床材料を敷き、適度な河床勾配を作り出すことで、アユ産卵に好適な新たな瀬を造成することを目的としている。アユが産卵前に休息することができる淵があることを条件として、造成地点を選んだ。

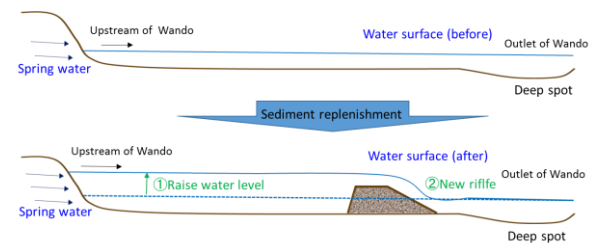


Fig. 12 Create new riffle by sediment replenishment

また盛り土後は、瀬の河床をアユの産卵に適した環境に整形を行った。さらに、元のワンドの生息場機能を維持できるように、瀬の横にエビや稚魚が適

上できる魚道を兩岸に作った．完成後の造成瀬の景観写真をFig. 13に示す．



Fig. 13 Landscape of new riffle

4.4 2015年度の現地調査日程と調査手法

2015年10月19日～21日の工事で、湧水導水路ならびに造成瀬が完成した．調査日程は、事前調査として2015年10月10～11日、工事時の経過観察として10月19日と21日、完成後は2015年10月25日、11月5日、11月12日の計6回現地調査を行った．調査ハビタットは、Fig. 14のように選定した．瀬1、瀬3、瀬4は既存の側流路の瀬であり、青線は、流量計測を行った地点を表している．またワンド上流部には、ワンド上流砂州からの流入と導水路からの流入があるため、双方で流量計測を行っている．

掘削実施前の9月に2,300 m³/sの出水があったが、施工後は1,000 m³/sを超える大きな出水は発生しなかった．



Fig. 14 Habitat name of 2015 field survey

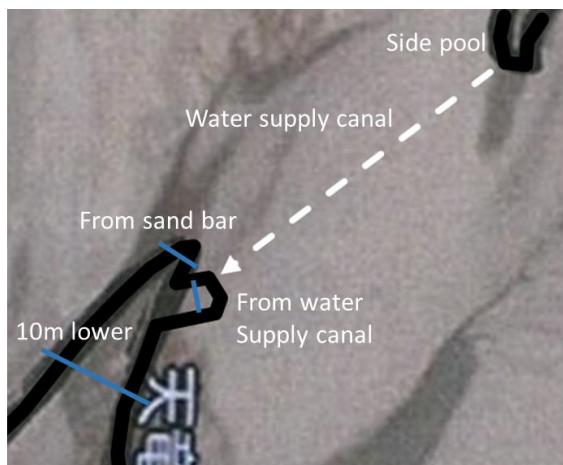


Fig. 15 Habitat name in upstream of the Wando

調査項目は、アユ産卵床調査、シノと長谷川式土壌貫入計による河床軟度調査、表層水と間隙水の水質調査、河床材料調査、流量収支調査である．さらに、ドローンで120m上空から撮影した写真を用いて、地形の把握を行った．

5. 2015年度の現地調査結果

5.1 湧水の濁度軽減効果

Fig. 14から、湧水の流れるワンド部と側流部で濁度が大きく異なることがわかる．湧水は砂州を伏流する間にフィルタリングされるため、濁度は低下する．濁水の長期化が深刻な天竜川において、砂州のフィルタリング効果の影響は大きいことがわかる．上流ダム群による土砂供給量の減少により、天竜川10km～20km区間では、砂州の波長が長くなる傾向にある．砂州の波長が長くなることで、流水のフィルタリング回数が減り、本来砂州の持つフィルタリング機能が小さくなっていると考えられる．

5.2 アユ産卵床調査結果

2015年11月5日の現地調査の結果、今回創出した造成瀬の4ヶ所でアユの産卵床が発見された．各箇所の産卵床では一掬いの砂利から約60卵が見つかった（Fig. 16）．1産卵床の面積が1掬いの5倍と想定すると、4ヶ所の産卵総数は少なくとも千数百卵、埋まったものもあると考えると数千卵であると推定される．また、同日の調査の結果、側流路の瀬、主流路の瀬、ならびに下流側の湧水の流れるワンドでは産卵床は発見されなかった．また、発見されたアユの産卵床は、いずれも瀬の上流部に位置していた（Fig. 17）．



Fig. 16 Spawning eggs are found

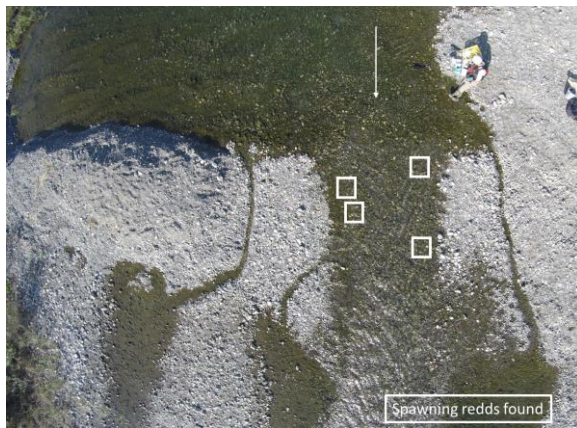


Fig. 17 Four spawning redds were found

5.3 流量収支調査結果

流量収支調査は、Fig. 14, Fig. 15に青線で示した地点で行った。調査結果をTable 1に示す。

Table 1 Comparison of discharge measured on 10, 25 October and 5, 12 November

	10/10	10/25	11/5	11/12
Q-upstream	19.65 m ³ /s	6.89 m ³ /s	5.26 m ³ /s	
Q-midstream	19.41 m ³ /s	6.20 m ³ /s	4.56 m ³ /s	
Q-downstream	16.03 m ³ /s	4.11 m ³ /s	3.43 m ³ /s	
From sand bar	0.104 m ³ /s	0.0545 m ³ /s	0.0415 m ³ /s	0.0626 m ³ /s
From water		0.0153 m ³ /s	0.0157 m ³ /s	0.0369 m ³ /s
Supply canal				
10m lower	0.122 m ³ /s	0.0849 m ³ /s	0.0858 m ³ /s	0.125 m ³ /s
New riffle		0.146 m ³ /s	0.242 m ³ /s	0.0255 m ³ /s
Kashima	202 m ³ /s	119 m ³ /s	89.5 m ³ /s	246 m ³ /s

側流路の流量に着目すると、すべての日程において側流路上流が最も高く、下流にいくにつれて低下している。これは、流入流量の一部が砂州へ浸透し

ているためであると考えられる。特に、側流路中流と側流路下流を比較すると流量は大きく減少しており、これは地形的に下流砂州へ浸透しやすいためであると考えられる。このように、天竜川のような網状流路を持つ河川では、砂州内への浸透が生じやすく、調査地の湧水の流れるワンドのような湧水環境が自然と形成されやすいと考えられる。

ももとのワンドの湧水湧出量である砂州湧出流量、ワンド総流量である湧出10m下の流量と比較して、導水路掘削による効果を検討する。導水路の掘削により砂州湧出量の1/2~1/3程度の流量を、ワンド総流量の1/3~1/4程度を湧出させることができた。これにより、湧水ワンドの総流量は、1.25倍~1.5倍に増加している。また、鹿島地点での流量は各調査日で大きく変動しているが、湧水流量は大きな変動はない。このことから、現地の流量に大きな影響を受けず湧水量は安定していると推察される。

5.4 河床軟度調査結果

側流路の既存の瀬である瀬1、瀬2、瀬3と、今回造成した造成瀬におけるシノによる河床軟度の調査結果をFig. 18に示す。

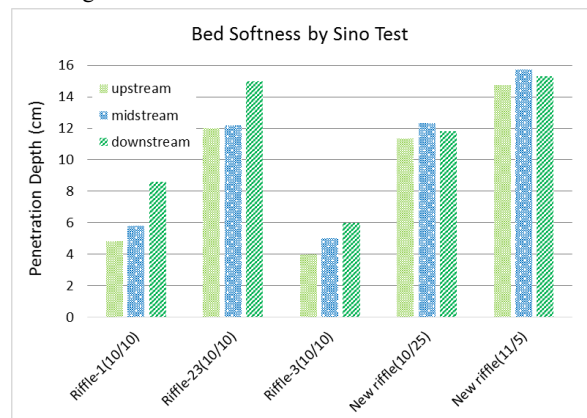


Fig. 18 Comparison of riverbed softness measured by Shino (2015)

側流路の瀬2においては、河床軟度は10cmより高かったにもかかわらずアユの産卵床は発見されなかった。これは、主流路、側流路では底質に濁質が沈着しているためであると考えられる。側流路の瀬では場所によって河床軟度は異なるがシノの貫入深さが10cm以下の低い地点が多いのに対して、造成瀬では河床軟度は10cmを超えている。造成瀬では、置き土をした影響により河床軟度が高くなったと考えられる。また、10月25日と11月5日の造成瀬での河床軟度の調査結果から、造成瀬では河床軟度が高い状態が維持されることがわかった。これは、湧水ワンドでは側流路や主流路と比べて流量が非常に少ないため、平水時の河床の硬化が生じにくいためであると

考えられる。このことから、主流路で河床の硬化が進む天竜川において、瀬の造成はアユの好適な産卵床を創出するための有効な手段といえる。

5.5 水質調査結果

11月5日調査で計測した、表層水のDO濃度の調査結果をFig. 19に示す。砂州湧出と導水路湧出のDO濃度を比較すると、砂州湧出の方が低い値を示した。これは、砂州湧出の湧水は導水路湧出と比べて、伏流距離が長いためであると考えられる。湧水は湧出直後にはDO濃度が低くなるが、下流になるにつれてDO濃度が増加していく傾向にあるのが分かる。また計測地点の位置関係から、湧出後DO濃度は急激に回復し、造成瀬ではアユの産卵に十分な量まで回復していることがわかる。このことから、湧出後DO濃度は急激に回復するため、DO濃度の観点からも湧水環境はアユの産卵に好適な環境となることがわかった。

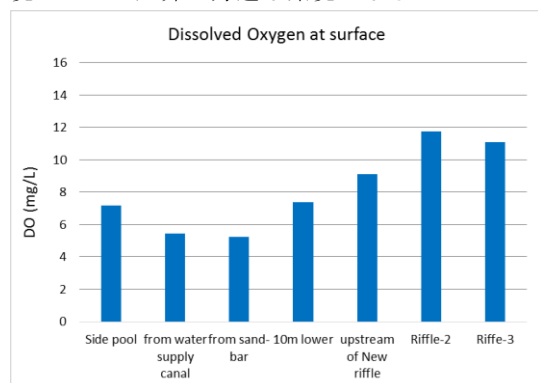


Fig. 19 Comparison of Dissolved Oxygen (DO) at surface (2015)

河床から20cmの間隙水のDO濃度の調査結果をFig. 20に示す。造成瀬の間隙水は、表層水のDO濃度と同程度に高いDO濃度を持つことが分かる。また造成瀬では上流、中流、下流の全地点でDO濃度は高い値となっている。造成瀬では、DO濃度は表層水、間隙水ともにアユの産卵には好適な状態となっていることがわかった。

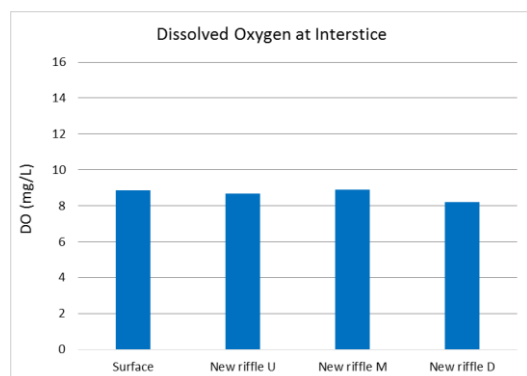


Fig. 20 Comparison of Dissolved Oxygen (DO) at interstitial layer (2015)

5.6 考察

2015年度の現地調査では、既存の主流路の瀬ではアユの産卵床が発見されず、造成した瀬でのみアユの産卵床が発見された。2013年度の調査でも湧水環境でのみ産卵床が発見されたことから、天竜川におけるアユの好適な産卵床に対しての湧水環境の重要性を改めて確認した。この実験は、1)湧水導水路の掘削と2)湧水の流れる瀬の造成の主に2つの要素から構成されている。それぞれの結果を以下にまとめる。

1) 湧水導水路の掘削により、湧水ワンドの流量を1.25~1.5倍に増加させることができた。しかし、今回の湧水導水路掘削では、もともとのワンドの上流の砂州からの湧水量の方が多かった。そのため、導水路を掘削する場合は、より効率よく湧水を集められる地点を検討してから行うことが必要である。しかし、湧水の流路は地上から確認することは困難であるため、湧水の分布を推測できる手法の確立が望まれる。具体的な手法として、植生分布を利用することが考えられる。植生の成長には水の存在が不可欠のため、植生は砂州下を流れる湧水分布に沿って成長する可能性がある。また、流路の時系列変化から湧水分布を推測できると考えられる。流路となっていた地点は、他地点より通水性が良く、洪水により地形変化が生じた後、砂州内で旧流路であった筋に沿って湧水の流れる可能性が考えられる。湧水分布の予測手法の開発が今後の課題である。

2) 今回造成した湧水の流れる瀬は、河床軟度は高い状態が維持されており、またアユの産卵に適した20mm~50mmの粒径の土砂の割合が高かった。調査では、造成瀬でのみ産卵床が発見されたことから、河床の硬化と粗粒化が進む天竜川において、産卵床の造成は有効な手段であり、今後継続して実施し造成技術を高める必要がある。また、産卵床の造成地点として、湧水の流れる環境を選択することが重要であると考えられる。天竜川では濁水の長期化が深刻で、2013年度調査、2015年度調査においてともに、湧水の流れる環境で、アユの産卵床が発見されている。湧水の流れる環境に瀬が存在すれば、アユは産卵場として選択する傾向が天竜川では見られるため、湧水地点における産卵床の造成は有効である。

以上のことから、河床の硬化と粗粒化が進む天竜川においては、アユ産卵に好適な河床条件を創出する産卵床の造成が効果的であり、さらに造成地点として湧水流路を選択することで、水質条件でもアユ産卵に好適な環境を創出できると推察される。また、砂州内を流れる湧水分布をあらかじめ推測すること

が可能になれば、掘削によりより効率よく湧水量を増加させることが可能となる。そのため、航空写真を用いて湧水流路の空間分布特性、湧水流路に変化の生じる攪乱規模などについて検討を行うことにした。

6. 航空写真分析

現地調査結果から、天竜川における湧水環境の重要性が示された。ここでは、航空写真を用いて、湧水流路の空間分布特性の把握、湧水流路の変化の生じる攪乱規模の役割を明らかにする。

6.1 湧水流路の空間分布特性

天竜川は網状流路をもつ河川であり、河道には交互砂州と複列砂州が存在する。Fig. 21に示すように、9-18km区間に6つの交互砂州と2個の複列砂州、0-9km区間に6つの交互砂州と1つの複列砂州が存在する。砂州番号をFig. 21に示す。



Fig. 21 Alternate bars and double row bars in Tenryu River 0-18km

湧水流路は濁度が低く、明度の違いにより航空写真からも判別が可能である。そこで、2007年8月、2011年12月、2012年12月の航空写真から、湧水ワンド、湧水たまりのピックアップを行った。9-18kmにおける航空写真の湧水の空間分布をFig. 22上に、0-9kmにおける航空写真での湧水の空間分布をFig. 22下を示す。この章では、9-18km砂州上にあるハビタットを“たまりa1”と、0-9km砂州上にあるハビタットを“た

まりb1”と呼ぶことにする。



Fig. 22 Spatial distribution of spring-fed channels in 2007, 2011 and 2012 (upper 9-18km and lower 0-9km)

航空写真が撮影されたのは、2007年8月、2011年12月、2012年12月である。航空写真が撮影された2007年8月～2011年12月の間の年最大流量は、2008年の1,878m³/s、2009年の1,549m³/s、2010年の4,615m³/s、2011年の7,520m³/sである。この間の地形変化は7,520m³/sによるものであると考える。また、2011年12月～2012年12月の間は、2012年に発生した3,700m³/sの出水が最大流量である。

Fig. 22から、12の交互砂州のうち、河口付近などの砂州を除いて10の砂州上に湧水環境が存在する。2007年、2011年、2012年のそれぞれに存在する湧水ワンド、湧水たまりの総数をTable 2に示す。

Table 2 The number of spring-fed channels in 2007, 2011 and 2012

	2007	2011	2012
Side pool	19	25	22
Wando	21	15	16
Total	40	40	38

湧水環境の総数は、各年度で大きな差は見られない。湧水環境は出水により消失するものと新たに生成されるものがあるためであると考えられる。2015年度の実験で湧水導水路の掘削、ならびに湧水の流れる瀬を造成した地点はFig. 22にあるワンドa 24であり、航空写真からは同様の砂州下流部に位置する湧水環境が多数存在することがわかる。ワンドa 24は水面面積が約2,000m²であり、これより大きい、または同等の面積を持つワンドは、2012年航空写真で5つ（ワンドa 21, ワンドa 5, ワンドa 12, ワンドb 21, ワンドb 22）存在する。2015年度の実験では、湧水環境の下流にアユが産卵期に休息することができる淵の存在する地点を選択したが、ワンドa-24以外の地点においてもアユの産卵に適した水理、水質条件をもつ湧水流路は存在すると考えられる。

6.2 湧水流路の時空間変化特性と攪乱の役割

Table 2より、各年で湧水環境の総数に大きな差は見られないが、消失、新たに形成されるものが存在する。ここでは、7,520m³/s, 3,700m³/sそれぞれの攪乱の発生による、湧水環境の変化過程を明らかにする。0-9km区間の砂州上に存在する湧水環境の変遷をTable 3に、9-18km区間の砂州上に存在する湧水環境の変遷をTable 4にまとめた。2007年から2011年の変化はその間の最大流量の7,520m³/sの出水によるもの、2011年から2012年の変化は3,700m³/sの出水によるものとしている。

Table 3 The History of spring-fed channels (0-9km)

	habitat	2007	7520m ³ /s	2011	3700m ³ /s	2012
Alternate bar b1	Wando b1	●	→			
	Side pool b21	●	→			
	Wando b21	●	→			
Alternate bar b2	Side pool b1	●	→			
	Side pool b2	●	→			
	Wando b2	●	→			
	Side pool b22	●	→			
Alternate bar b3	Wando b3	●	→			
	Wando b4	●	→			
	Side pool b23	●	→			
	Side pool b24	●	→			
	Side pool b31	●	→			
Alternate bar b4	Wando b22	●	→			
	Side pool b3	●	→			
	Side pool b4	●	→			
	Wando b23	●	→			
	Side pool b5	●	→			
	Wando b5	●	→			
	Wando b6	●	→			
Wando b7	●	→				
Alternate bar b5	Side pool b25	●	→			
	Wando b24	●	→			
Alternate bar b5	Wando b8	●	→			
Double row bar b1	Wando b9	●	→			

Table 4 The History of spring-fed channels (9-18km)

	habitat	2007	7520m ³ /s	2011	3700m ³ /s	2012
Alternate bar a1	Side pool a1	●	→			
	Side pool a2	●	→			
	Wando a1	●	→			
	Side pool a21	●	→			
	Wando a2	●	→			
	Wando a21	●	→			
Alternate bar a2	Side pool a3	●	→			
	Wando a3	●	→			
	Side pool a4	●	→			
	Wando a4	●	→			
	Wando a23	●	→			
	Side pool a22	●	→			
	Wando a22	●	→			
Double row bar a1	Wando a31	●	→			
	Wando a32	●	→			
Alternate bar a3	Side pool a5	●	→			
	Side pool a6	●	→			
	Wando a5	●	→			
	Wando a6	●	→			
Alternate bar a4	Side pool a23	●	→			
	Wando a7	●	→			
	Wando a8	●	→			
	Side pool a24	●	→			
	Side pool a25	●	→			
Double row bar a2	Side pool a26	●	→			
	Wando a24	●	→			
	Wando a9	●	→			
Alternate bar a5	Wando a25	●	→			
	Side pool a31	●	→			
	Side pool a7	●	→			
	Side pool a8	●	→			
	Side pool a9	●	→			
	Side pool a10	●	→			
	Side pool a11	●	→			
	Side pool a13	●	→			
	Wando a10	●	→			
	Side pool a14	●	→			
	Side pool a12	●	→			
Wando a11	●	→				
Side pool a29	●	→				
Wando a12	●	→				
Side pool a33	●	→				
Side pool a27	●	→				
Side pool a28	●	→				
Wando a26	●	→				
Side pool a32	●	→				
Wando a27	●	→				

6.3 湧水環境の形成過程に対する攪乱の役割

洪水攪乱の規模と湧水環境の変遷の比較により、7,520m³/s, 3,700m³/sの攪乱が、湧水環境の形成、消失過程に与える影響を考える。なお、天竜川の年一回生起確率の洪水は、4,500m³/sである。まずは、7,520m³/s, 3,700m³/sのそれぞれの攪乱による湧水環境の変化を、消失した、新たに生成された、形状が変化した、変化しなかったもの、の4種類に分類した。分類結果をTable 5に示す。()内の数字は変化した湧水環境のうち、ワンドの数を表している。

Table 5 Change of the number of spring-fed channels by flood

	7,520m ³ /s	3,700m ³ /s
Disappear	17 (11)	5 (1)
Formed newly	18 (9)	3 (2)
Deformation	8 (6)	5 (1)
No change	15 (4)	29 (12)

消失

7,520 m³/sと3,700 m³/sの洪水による変化を比較すると、7,520 m³/sの洪水発生時には3,700 m³/sの洪水発生時の3倍以上の湧水環境が消失している。変化要因

を見ると、7,500m³/sの洪水では、砂州形状の変化に伴うもの（ワンドa 2など）が半数以上の12個あり、面積100m²未満の小さい湧水環境の消失（たまりa 5など）が5個あるのに対して、3,700m³/sの洪水では砂州形状の変化に伴う消失は1つも確認されなかった。このことから、7,520 m³/sの洪水には砂州形状を変えるほどの影響があるために湧水環境の消失に大きな影響力を持つが、3,700 m³/sの洪水の影響は少ないことがわかる。また、ワンドの消失が7,520 m³/sでは多く見られるのに対して3,700 m³/sではほとんど見られない要因は、砂州形状の変化の有無と砂州下流部に位置するというワンドの空間分布特性が影響していると考えられる。

新たに形成

次に新たに生成された湧水環境について検討する。7,520 m³/sの洪水発生時には3,700 m³/sの洪水発生時の6倍の湧水環境が新たに創出された。7,520 m³/sの洪水で形成された湧水環境は、洪水発生前は流路であった地点に位置していたものが11あり、最も多かった（ワンドa 24など）。また、3,700 m³/sで創出した3個の湧水環境のうち2つも旧流路に位置するものであった。7,520 m³/sの洪水による変化では、主流部が湧水環境へと変化しているが、3,700 m³/sの洪水では主流部でなく副流部に新たな湧水環境が創出されている。7,520 m³/sの洪水では、砂州下流部に土砂堆積が生じることで、砂州前縁部に新たな湧水環境が生成されていると推察される。また、3,700m³/sの洪水では砂州形状を変えるほどの変化は生じないが、副流部へは土砂堆積により新たな湧水環境を創り出す能力があることがわかった。

形状が変化

次に、洪水によりたまりからワンド、もしくはワンドからたまりに変化した湧水環境について検討を行う。7,520 m³/sの洪水により変化した湧水環境は8個あるが、そのうち半数以上の5個が洪水によりワンドからたまりへと変化している（ワンドa 1など）。7,520 m³/sの洪水により砂州下流部へ土砂堆積が生じ、ワンド部が砂州内に取り込まれるためであると考えられる。3,700m³/sの洪水では、ワンドからたまりになるものは見られず、砂州内の湧水環境が、小規模で結合や分離するものに限られた。

変化なし

変化しなかった総数を比較すると、3,700 m³/sの洪水でも変化しなかったものが多くなっている。その中でも、2007年時点から存在し、3,700 m³/sと7,520 m³/sの洪水を乗り越えて存在し続けるものは13個あ

る。13個の存在位置を見ると、砂州の中心部近くに存在するものが多い（たまりa 2など）。砂州の侵食や堆積は砂州の外淵から進むため、影響を受けにくいからであると考えられる。

これらより7,520 m³/sと、3,700 m³/sの攪乱による影響をまとめる。7,520 m³/sの洪水は砂州形状の変化を伴い、湧水環境の変化に大きな影響を与える。消失した湧水環境のうち71%、新たに生成された湧水環境のうち61%は、砂州形状の変化によるものである。湧水環境の形状が変化した要因のうち、ワンドからたまりに変化したものも砂州の形状変化によるものであることを考えると、7,520 m³/s規模の洪水は、主に砂州形状の変化により湧水環境の変化に影響を与えていると考えられる。これに対して、3,700 m³/sの出水では、砂州内の湧水環境の小規模な変化に限定される。しかし、旧副流路部への土砂堆積による新たなワンドの創出が2地点で見られたことから、3,700m³/s規模の洪水でも、副流部にはアユの産卵に好適な環境が形成されやすいといえる。

6.4 湧水環境の時系列変化と好適な産卵床の条件

2015年度の調査でアユの産卵床を造成したのは、ワンドa-24である。また、2013年度現地調査でアユの産卵床が発見された地点は、ワンドa-31にあたる。これらの地点はともに、流路部に土砂堆積が生じ新たに形成された、旧流路地点に存在しているワンドである。前項より、出水により新たに形成された湧水環境のうち、62%は出水前に流路だった地点である。ここでは、流路から湧水のワンドに変化した地点に着目して分析を行う。

旧流路に位置する湧水環境の位置関係をFig. 23に示す。

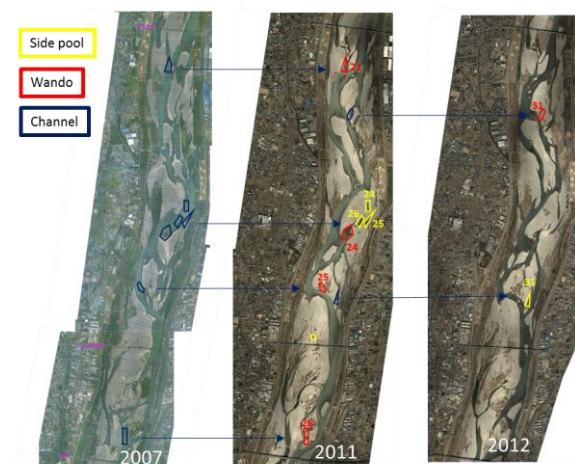


Fig. 23 The location of spring-fed channels formed newly by flood

Fig. 23に示すように、7,520 m³/sの洪水では主に主流部が、3,500 m³/sの洪水では副流部が、土砂堆積により埋まることで新たな湧水環境が創出されている。湧水流路の中でも旧流路であった地点は、土砂が堆積してから比較的時間が経過していない。比較的最近土砂が堆積することがアユの好適な産卵環境を創り出すことから、旧流路から変化した湧水環境は、河床軟度、河床材料がアユの産卵に好適な状態になりやすく、アユの産卵床としてのポテンシャルが高いと考えられる。そのため、2013年度調査や2015年調査においてアユの産卵床の発見につながったのではないかと考えられる。

また、出水により新たに形成された湧水環境のうち、62%は出水前に流路だった地点であることから、旧流路である地点は湧水の流路になりやすいと考えられる。その要因としては、以下の2点が考えられる。1点目は、旧流路の湧水環境では、出水により新しく土砂が堆積しており、流路内に新たに堆積した土砂は他地点と比べて河床材料の粒度が粗いことで通水性がよいのではないかと考えられる。2点目は、濁水の長期化が深刻な天竜川では、河床の礫を覆うように多量のシルトが付着している。このため、河床部は、他地点と比べて透水性が低くなり伏流水の流路になりやすいのではないかと考えられる。これらの要因により旧流路部では湧水の流路となりやすいと推測されることから、地上からは見えない砂州内の湧水の分布を、過去の流路の変遷から予測することが有効である。

6.5 砂州波長と湧水環境の時期列変化

湧水環境の時系列変化に対する攪乱の役割は明らかになった。ここでは、湧水の存在する砂州の特性が湧水環境の形成過程に与える影響を検討する。砂州の特性の中でも砂州の波長に着目し、砂州波長ごとの湧水環境の変化特性を検討することにした。

砂州波長が最も長いのは交互砂州a5で3.2km、最も短いのは交互砂州b3で0.6kmである。7,520m³/sの洪水により新たに形成された湧水環境・変化しなかった湧水環境と砂州波長の関係をFig. 24にまとめた。

Fig. 24より、砂州波長が長くなるほど7,520m³/sの出水時に新たに形成される湧水環境が減少することがわかる。これは、砂州形状の変化により新たに形成される湧水環境は砂州下部に多く見られるためであると考えられる。また、7,520 m³/sの出水時にも変化しなかった湧水環境は、砂州波長が長いほど多くなる傾向にあることがわかった。これは、流路から遠い砂州中心部にある湧水環境は変化が生じにくいためであると考えられる。産卵前の比較的最近に

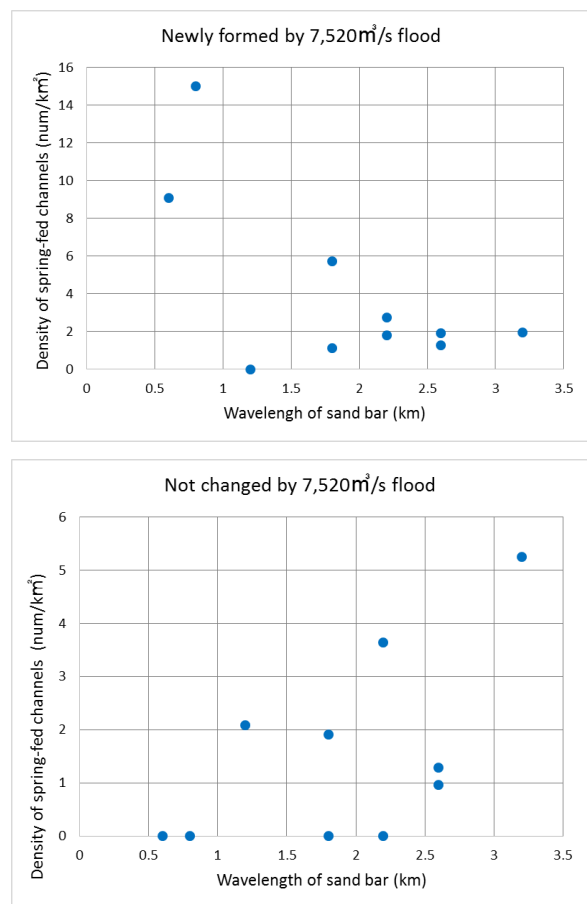


Fig. 24 Relationship between wavelength of sand bar and change of spring-fed channel by flood

土砂が堆積することがアユの産卵床として好適な環境となることから新たな土砂堆積で形成された旧流路に位置する湧水環境が良いとすると、砂州波長が短くなり砂州の総数が増えることで、アユの好適な産卵床の数は増えると考えられる。

6.6 考察

本章では、航空写真より湧水流路の空間分布特性の把握、湧水流路の変化の生じる攪乱規模の役割、砂州の特性と湧水環境の時系列変化に関する検討を行った。

湧水環境は、天竜川0~18km区間において、河口付近の一部の砂州を除いてほとんどの砂州に存在している。7,520 m³/s、3,700 m³/sのそれぞれの洪水による、湧水環境の変化をまとめると、7,520 m³/sの洪水では砂州形状に変化が見られるため、これに起因して多くの湧水環境が変化する。一方、3,700 m³/sの洪水では砂州形状に大きな変化は見られないため、砂州内の湧水環境が小規模で結合、分離するものに限られた。洪水により新たに形成された湧水環境の形成要因を調べると、旧流路であった位置に土砂堆積が生じ湧水環境となるものが全体の62%を占めた。

7,520 m³/sの洪水では砂州形状の変化により主流部に土砂堆積が、3,700 m³/sの洪水では副流部に土砂堆積が生じることで新たな湧水環境が形成されていた。2013年度、2015年度の現地調査でアユの産卵床が発見された地点は、いずれもこの旧流路であった地点にできた湧水環境であったことから、アユの産卵に好適な環境となりやすいことが推察される。これは、旧流路である地点は比較的最近に土砂が堆積しているため、河床軟度、河床材料がともにアユの産卵に好適な状態になりやすいからであると考えられる。また、流路の位置の変化から砂州内の湧水の流路が推測できることが示唆された。

砂州波長ごとの特徴を検討した結果、砂州波長が長くなるほど出水時にも変化しない湧水環境が多くなり、新たに形成される湧水環境は少なくなることがわかった。このため、砂州波長が短くなり砂州の総数が増加することが良質な湧水環境の増加につながると考えられる。天竜川では、1980年以降砂州波長が長くなる傾向にある。これは、上流ダム群の影響により土砂供給が減少していることに起因すると考えられる。そのため、ダムから適切な土砂供給を行い、砂州の蛇行度を増やす対策が有効である。また、上流から土砂供給を施し河床が動くようになることで、3,700m³/s規模の洪水でも流路内に土砂堆積を生じさせ、良質な湧水環境を創出させることが可能であると考えられる。適した土砂供給量を見つめることが、必要な対策である。

7. 結論

本研究では、現地調査、2種類のアユ産卵床造成のための湧水環境の創出実験、航空写真を用いた湧水流路の分布特性の検討、数値計算による湧水環境再生に必要な流況条件の検討を行った。

好適なアユの産卵床条件には、20-50mmの砂礫が多く存在することや、河床が浮き石上に軟らかく堆積しているなどの河床条件と、低濁度の流水が流れていること、DO濃度が高いなどの水質条件の両方が必要である。天竜川では上流ダム群建設による河床の粗粒化や硬化、濁水の長期化により、好適な産卵環境が失われつつあるため、河床環境の改善策は必須の課題である。

2013年度の現地調査では湧水環境でアユの産卵床が発見された。湧水は砂州内を伏流する間に濁質がフィルタリングされ、濁度が低くなる。そのため、湧水環境を利用することが水質面でアユの産卵に好適な環境を創り出すのに有効である。また2015年度の実験から、瀬の造成により高い河床軟度、適した河床材料の瀬を創出することができた。このことか

ら、瀬の造成はアユの産卵に適した河床条件を作り出すのに有効である。湧水環境に瀬を造成することが、河床環境改善のための短期的対策としては最も有効であると考えられる。また、湧水環境はもともと流路であった位置に形成されやすいことから、砂州内を流れる伏流水の流路を推測することが可能であり、瀬の造成に適した湧水環境の選択に活用できる。また、今後天竜川において湧水環境に瀬を造成する事業を行う場合の候補地としては、Fig. 22に示すワンドa 21, ワンドa 24, ワンドb 21で行うことが効果的であると考えられる。この湧水ワンドはそれぞれ天竜川17.6km, 15km, 8.2km地点に位置しており、2011年の7,520m³/sの洪水により新たに形成された湧水環境である。また、もともと流路であった地点に形成された湧水環境であるため、土砂が堆積してから比較的時間が経過しておらず、河床軟度は高いことが期待できる。さらに、これらの地点は水面面積が1,000m²以上あり規模の大きな産卵床の造成を行うことが期待できる。

航空写真分析より、出水により変化しない湧水環境は砂州波長が長くなるほど多くなる一方で、新たに形成される湧水環境は砂州波長が短くなるほど多くなる傾向があることがわかった。このことから、砂州波長が短くなり砂州総数が増えることで、アユの産卵に適した水質条件を満たす湧水環境はより増えると考えられる。また既往の研究より、砂州波長が短くなることにより、アユの産卵に好適な瀬が増加することがわかっている。天竜川では上流ダム群による土砂供給量の減少により、砂州波長が長くなる傾向にある。適切な土砂供給を施し、砂州波長を短くすることが、アユの産卵に好適な環境を創出するために必要な長期的な対策である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省 浜松河川国道事務所の方々には、流量データや横断測量データなど、データを提供していただきました。天竜川漁業共同組合の皆様方には、現地調査にご同行いただき、協力いただきました。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 水圏事業部には、現地調査にご協力をいただきました。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

石田力三・一条エリ子(1990) : アユ産卵用人工河川, Symposium on fishways

小林草平・竹門康弘（2013）：木津川における底生動物生息場としての瀬の形態の歴史，京都大学防災研究所年報，56b, pp.681-689
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に関する研究，京都大学防災研究所年報，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，54B, pp.719-725
高橋勇夫（2009）：天然アユが育つ川，築地書館

高橋勇夫・東健作（2006）：ここまでわかったアユの本，築地書館
兵藤誠・竹門康弘・角哲也（2014）：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, pp158

（論文受理日：2016年6月13日）