

大規模出水による中規模河床形態の変化と河道内湧水の生態機能に関する研究

Study on Changes in the Reach Scale Channel Geomorphology by a Large Flood Event and Ecological Function of Instream Springs

山崎弘美⁽¹⁾・竹門康弘・高橋真司⁽²⁾・兵藤誠⁽³⁾・鳥居高明⁽³⁾⁽⁴⁾・角哲也

Hiromi YAMASAKI⁽¹⁾, Yasuhiro TAKEMON, Shinji TAKAHASHI⁽²⁾, Makoto HYODO⁽³⁾, Takaaki TORII⁽⁴⁾ and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

(2) 東北大学 工学研究科 技術室

(3) いであ株式会社

(4) 静岡県立大学大学院 薬食生命科学総合学府 環境科学専攻

(1) Department of Urban Management, Kyoto University

(2) Tohoku University

(3) IDEA Consultants, INC., Japan

(4) Graduate School of Integrated Pharmaceutical and Nutritional Sciences, University of Shizuoka

Synopsis

Instream springs have attracted attentions as a measure for restoration of ecological function in the lower reaches of the Tenryu River, where riverbed environment has been deteriorated by reduction of sediment dynamism and prolonged turbidity derived from the series of dams constructed upper stream. We found that Ayu fish made reproduction in the spring channels and the number of spawned eggs showed a positive correlation with the flow discharge of the spring channel. The reproductive success of the fish was expected to increase with increasing the number of spring channel larger than 12,500m² in area which were created by combination of large and small floods.

キーワード: アユ産卵床, 湧水流路の流量, 砂州地形分析, 中規模河床形態, 湧水流路面積

Keywords: spawning redds for ayufish, spring channel discharge, sandy bar topography analysis, reach-scale channel configuration, spring channel area

1. はじめに

1.1 天竜川流域の概要

天竜川は、長野県茅野市の赤岳を源とし、愛知県、静岡県 の 3 県を横断する幹川流路延長 213km、流域面積 5,090km² の一級河川である(Fig. 1). 河床勾配は、上流域の支川は約 1/40~1/100 と急流であり、本川は、

上流部で約 1/200 程度、中流部で約 1/300~1/700、下流部で約 1/500~1/1,000 程度と比較的急流である。川幅について、22-21km は 600m~800m に広がる区間、21-11km は約 800m で一定、11-9km は 600m と狭い区間、9-7km は 900m まで拡幅し、7-4km は 700m の区間、4-3km の間で 400m と狭く、3km~河口は拡幅していく(Fig. 2) (天竜川流砂系協議会, 2018).

流域の年間降水量について、上流域では内陸性気候のため平地帯で 1,200~1,800mm と少なく、それを東西に挟む南アルプスや中央アルプスの山岳地帯では 1,400~2,800mm と多く、中流域では山間地形のため南からの暖湿気流の影響により 1,800~2,800mm と多い。下流域は典型的な太平洋側気候であり、1,700~2,000mm となっている(国土交通省中部地方整備局, 2009)。鹿島観測所における平水流量は $162.93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、平均年最大流量は $4,554 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (天竜川流砂系協議会, 2018)、戦後の最大流量は昭和 43 年の台風 10 号における $10,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ である(浜松河川国道事務所 HP)。計画高水流量は昭和 36 年 6 月, 昭和 40 年 9 月, 昭和 43 年 8 月洪水等の既往洪水について検討した結果より、鹿島における基本高水のピーク流量を $19,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、上流ダム群により $4,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ を調節し、計画高水流量は $15,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ である (国土交通省河川局, 2008)。



Fig. 1 A map of the Tenryu River basin. Study sites were established in the lower reaches in the square.

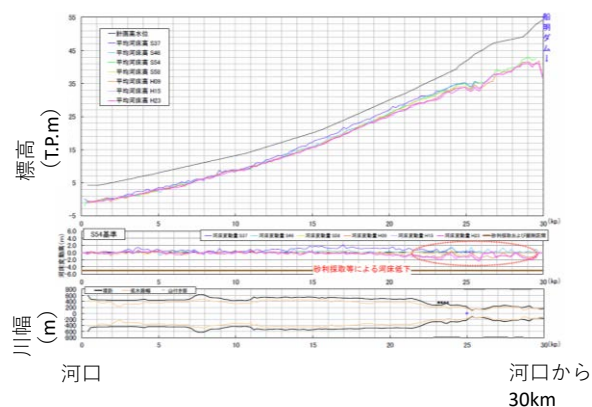


Fig. 2 Riverbed height and river width (Sediment transport system conference in Tenryu River, 2018)

1.2 天竜川の現状と課題

天竜川では、流砂系総合土砂管理が計画されており、土砂に関する課題を流砂系全体で総合的に解決するために必要な対策・土砂動態を把握し、将来の土砂に関わる変化を想定した上で、関係機関と連携して土砂管理を推進するものである。流砂系とは、山や河岸侵食により生産された土砂が河道に入り、ダムや河道に一部堆積しながら流下し、河口、海岸まで到達するまでの系を示す。この源頭部から天竜川全側及び海岸までの一貫した土砂動態と運動領域をまとめて天竜川流砂系という。天竜川の区域としては、上流から土砂生産があり、平岡ダム上流まで谷底平野河道領域である。そこから、下流側には平岡ダムを含めたダムが4つあり、湛水域と河道域を繰り返す。船明ダムから河口2kmの区間は扇状地河道領域であり、本研究の対象区間でもある。2kmから

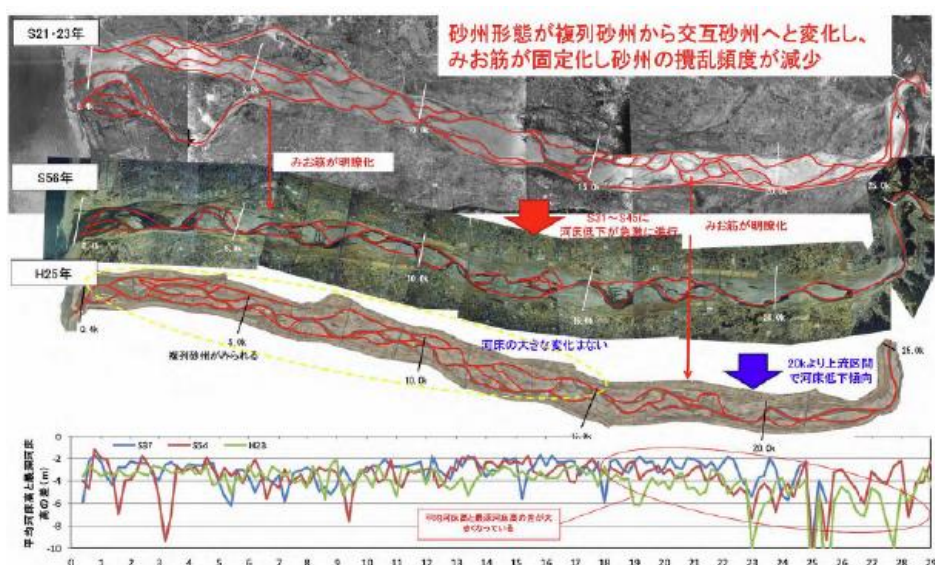


Fig. 3 Long-term changes of mainstream (Sediment transport system conference in Tenryu River, 2018)



Fig. 4 Turbid water runoff from Sakuma dam (Taken by Takemon)

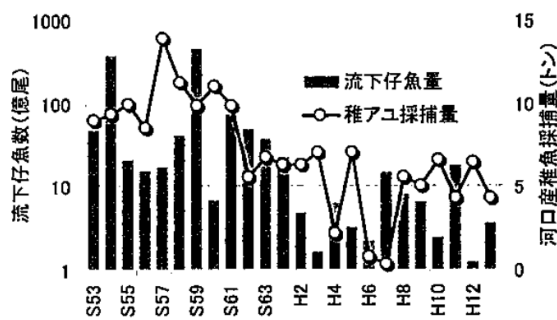


Fig. 5 Changes in the number of larvae flowing down (Yataka, 2012)

河口区間は河口領域で、河口テラス・海岸領域へとつながっている。土砂管理目標は、1) 総合土砂管理による河口テラスの回復及び海岸汀線の維持、2) 総合土砂管理による河川環境の保全・回復、3) 適正な土砂利用の3つがある。

天竜川上流は、急峻な峡谷地形であり発電ダムの建設に適していたため、1950年以降ダムが建設されてきた。その後、天竜川本川では、1983年9月の洪水や2006年7月の洪水により浸水被害が発生し、天竜川水系には発電ダムだけでなく、治水・利水を目的とした多数のダムが建設された。一方で、山間部では、中央構造線をはじめとする多くの断層が通り、脆弱な地質構造により土砂生産が活発な土地であることから、ダムの堆砂問題や機能低下、土砂移動の連続性の阻害といった問題が発生している(天竜川流砂系協議会, 2018)。また、発電ダム群の建設に加え、砂利採取を行ったことにより、天竜川の下流域では土砂量が減少し、河床の低下・固定化(Fig. 3)・粗粒化、砂州の単列化・樹林化、濁水の長期化といった問題も生じる。特に、濁水の長期化については天竜川で大きな問題となっている。近年、全国的に川の濁りが問題視されており、その一般的な要因は、山腹

の崩壊、道路工事、裸地の増加、山林の荒廃、田んぼからの濁水であると言われている(高橋, 2016)。これらの要因から天竜川では、本川下流の佐久間ダムでは、多くのシルト分を含む土砂が堆積し、ダム下流河川では、出水時にシルト分が流出し、濁水の長期化を引き起こすことが大きな課題となっている(Fig. 4)。濁水の長期化により、アユの餌である藻類の生長が妨げられ(宮川ら, 2014)、アユの産卵場環境が悪化することにより、近年のアユ個体数の減少を招いている(高橋, 2016; 谷高, 2012)。

この問題に対して、総合土砂管理の現状では、ダム管理として、上流ダム群のダム湖に堆砂した土砂の掘削や船明ダムにおける洪水時のローラーゲートの開放、河道内対策として、洪水時に治水上、安全度が低い箇所の土砂を掘削し、海岸へ輸送するといった計画が実施されている。佐久間ダムからの土砂は、毎年36万 m^3 の土砂に加えて、2~26万 m^3 の土砂を下流域に還元することが決定している。これにより、砂州が固化している現状に対して、土砂を投入することで、河道内の土砂を動かしやすくすることが目的である。適切な土砂投入量については数値シミュレーションにより議論されているが、土砂投入のプラスの効果や土砂投入による好ましい地形条件、その地形に対しての流量や土砂供給量条件等の提案には至っていない。本研究では、アユを対象として、アユの繁殖場として好適な砂州地形について、現状の把握と長期的な地形変化の把握について議論した。

1.3 好適なアユの産卵環境

アユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) は、サケ目アユ科の淡水魚であり、日本列島、朝鮮半島、中国大陸東部に分布している。秋に河川の下流で産卵をして、ふ化した仔アユは海へ下ってプランクトンを食べて冬の間生活をする。アユは春になると遡上し、藻類(コケ)を主食としている。そのため、水がきれい、川底に藻類が付きやすい環境が必要である。アユの寿命は、1年といわれているが、まれに2年生きる個体も存在する(高橋, 2016)。

日本の河川生態系の代表的な魚種であるアユの産卵床に関する研究は多く行われている。既往研究では、好適なアユの産卵環境の条件として、流速は約60~120 cm s^{-1} 、水深は10~60cm程度、礫径が5~30mm(水産庁, 2009)、瀬であること(石田, 1961; 兵藤ら, 2014)、きれいな礫が浮石状態である(石田, 1962; 石田, 1964)ことが挙げられ、瀬の下流側には産卵活動の際に待機できる淵があることが望ましいと言われている。また、サケ科の魚類の産卵床は、河床勾配が3%以下で流速が25 cm s^{-1} ~90 cm s^{-1} 、水深が17cm~76cmである場所が望ましいと報告され

ている (Hendry & Cragg-Hine, 1997). また、アユは体長によって選好する産卵床の河床材料粒径が異なる (Kondolf & Wolman, 1993). 一方で、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く (石田, 1961), アユは産卵の際に、河床の砂礫を動かして卵を産み着ける習性があるため、自ら動かすことが可能である小さい粒径の砂礫を選んで産卵していることも報告されている (石田, 1961).

天竜川では、2015年以前に本川の瀬のみに着目して、アユ産卵床の研究が進められてきた。既往研究では、衛星写真から産卵床環境の適地を推定する方法を確立し、本川において好適な瀬がどの位置に分布するのかを解明した。軟らかい河床の位置について、瀬の上流端の始点から終点までの長さを計測し、砂州上流端を0とした時に、上流砂州の偏角が150度付近、下流砂州の偏角が、約20度のところに存在していることが確認された。この結果より、航空写真で本川のアユ産卵床に適する河床が予測することが可能になった (中島ら, 2011). そして、米国ミシシッピ大学にて開発されたCCHEDモデルを用いて、本川の好適なアユの産卵床を抽出する解析が行われた。解析結果を用いて、粒径の結果から礫底、河床変動量から河床軟度、流速から瀬を判別し、これらの重なりが期待されるところをアユの産卵適地として抽出し、本川の産卵床としての適地は副流路と本川との合流点であることが推定された (鈴木ら, 2011). 本川の瀬の中でもアユの産卵床適地は、底質が軟らかく間隙水の溶存酸素濃度が高い瀬頭が好適であるとされているが、近年土砂供給の減少に伴い、河床の軟らかい場所が間隙水の溶存酸素濃度の低い瀬尻に変化している (村井ら, 2012).

産卵床造成事業は、当初、本川で事業が進められていた。2006-2007 年度に実施された、天竜川漁協の産卵床造成では過去に産卵の実績があり、上下流に淵やトロがあるところで、河床材料が 30cm 以上もしくは 1mm 以下のものが少ない場所で行われた。作業としては、重機による掘削・洗浄、大礫の除去、河床ならしと保護区域の設定を行っていた。しかしながら、効果は確認されたものの、天竜川では主産卵場が水深 1m 以上の深瀬に形成されるという特性から利用効率が低いと判断され、河口から 9km 前後に限定する方針となった。しかし、2008 年度、産卵床造成区間においては、本川で産卵が確認できたが、一方で産卵が確認できない区間も見受けられた。したがって、確実に産卵床を造成することが優先すべき課題の一つとなった。2009 年度の産卵床造成では、造成後の出水により産卵床は見つからず、2010、2011 年度においても産卵床は確認できなかった (高橋, 2009 ; 高橋, 2012).

濁水の長期化により、本川における産卵床造成は、期待された効果を得る事が難しくなったため、側流路を湧水流路にして湧水瀬を造る方へと考えが移行した。そこで、2013 年度に湧水瀬に着目して産卵床調査を行った結果、本川との接続部周辺で流水環境になっている箇所 (湧水流路) の瀬の部分で産卵床が確認された。副流路でアユの卵が発見された湧水流路の瀬は、いずれも砂州下流部に位置していた。産卵床の形成要因は、砂礫堆のフロントと流路の水位差が約 1.5m あることにより上流からの河川水の一部が砂州を伏流し、砂州下流で砂州によりフィルタリングされた濁りのない伏流水が湧出する環境ができたと考えられている。砂州のフィルタリング効果については、17.4kp 左岸砂州で置き土を設置することにより、側流路で湧水流路の創出を再現した。このとき、置き土が水位差を生み出し、増水時に置き土を乗り越えて侵食し、その土砂が置き土の下流で瀬を造るといったことを想定した。造成した結果、昔の天竜川を取り戻したように湧水が生じて、河床も軟らかくなっていた。しかしながら、出水に伴い置き土は決壊し、伏流水が流れる環境が失われた。以上の結果から、湧水を如何に瀬へ安定供給するかが課題として残った。

側流路で造成した湧水流路は、出水による攪乱により安定した湧水瀬ができないため、そこで、15.2km 地点では、既存の湧水を用いて湧水流量を増やし、湧水瀬を造る方法に切り替えた。そこでは、湧水導水路の掘削と湧水の流れる瀬の造成を行った。その結果、湧水流量は 1.25~1.5 倍増加し、河床軟度の高い湧水瀬が造られ、アユの卵も確認された (Fig.6). その湧水瀬は、かつて流路であった位置に形成されており、潜在的な砂州を流れる伏流水の流路が存在し



Fig. 6 Spring riffle (Izumi, 2016)

ていた可能性がある(兵藤ら, 2014). しかしながら, 河床環境の改善のための短期的な対策としては有効ではあるが, 出水時に持続されないのが大きな課題となった(泉ら, 2016).

他にも湧水環境ポテンシャルがあるところを探索した結果, 調査地点は 8-9km 左岸砂州が選定された. 8-9km 左岸砂州は, 砂州が安定的で, 砂州自体が出水により消失しない, 湧水が創出される側流路が存在するといった特徴があり, 人が実際に入って作業することも容易であった. 2018 年 1 月に 8.2~9.0kp 左岸砂州において産卵床造成工事を実施したが, そこでは同年の産卵時期にアユの産卵床を発見できなかった.

本川では, 濁水の影響よりアユの卵が発見されず, その濁水を改善するためには, ダムの水質浄化はすぐに見込めない. そこで, アユ産卵床にとって好適な環境の基盤となる湧水を創出するためには, 本川の濁質を濾過する必要がある(Fig. 7). 既往研究によると, 濁質の濾過効率は砂州変動量と二次多項式近似の関係にあること, 濁質成分に含まれるダム有機物量の濾過効率は砂州変動量と正の相関があり, 砂州変動量が多いほど濾過効率が高まることが報告されている(高橋, 2019).

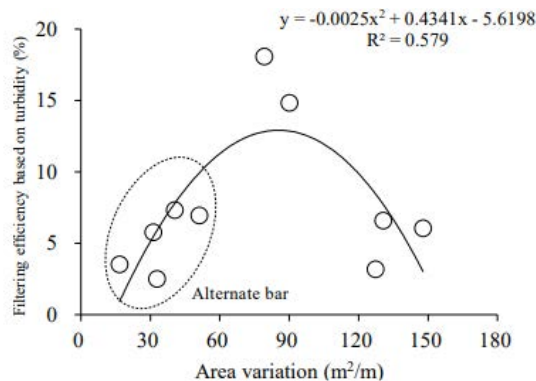


Fig. 7 Filtering efficiency based on turbidity (Takahashi, 2019)

1.4 研究目的

15.2km 地点の砂州について, 短期的な対策では有効であるが, 出水時に持続されないといった結果であった. 8-9km 左岸砂州については, 瀬が持続することは非常に厳しいことが分かった. 本研究では, 近年減少し続けているアユを増やすために, アユの繁殖にとって重要な湧水流路(河川水が砂州を伏流した湧水が流れる流路)において, 既存の湧水流路の流量を増やすのではなく, 元から流量の多い自然の湧水流路の活用に新たに着目した. 自然の湧水流路がアユの繁殖にもたらす条件やその湧水流路ができるような地形条件について検討することが目的である.

以上で述べたように, 天竜川では, 濁水の長期化の影響により, 本川ではアユの繁殖場環境の劣化が進行している. そこで, 湧水環境に着目し, アユ産卵床の造成を試みたが, 出水の度に消失又は縮小し, 持続性が低いといった問題が浮き彫りになった. そこで本研究では, 自然の湧水流路に着目して, アユの繁殖場に適した湧水流路の物理化学的環境条件の検討を行う. そして, その環境がどのような地形条件により生み出されるのかを明らかにする. その上で, 解明されたアユの繁殖にとって好適な地形条件を形成するための流況及び土砂管理方法について提案する.

2. アユ繁殖場に適した湧水流路環境

2.1 調査地点の選定

既往の知見より, アユ産卵床のポテンシャルが高い船明ダム下流の浜北大橋(18.4kp)~河口(3kp)の間を湧水流路の調査区間とした. 野外調査は, 2018 年度が2018年11月10~12日の3日間, 2019年度が2019年11月13-17日の5日間に実施した. 河床の攪乱については, $4,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度の中規模以上の洪水が生じ, $2,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度の小規模洪水では河床が固化することが知られている(兵藤ら, 2013). $4,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の河川流量の生起確率は, 1960~2018年の59年分の流量データ(水文水質データベース)より, 水文統計ユーティリティーを用いて計算した結果, 約4年に1度の出水であることが確認された. 2018年度の調査地点の選定では, 洪水の攪乱による地形変動に基づいて湧水流路となる地点を探索することを目的として, 9月の $4,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 7月と10月の2回の $5,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程の中規模出水前後で, 水位が比較的に安定している2018年2月27日と10月29日の衛星写真を用いた(Fig. 8). 2019年度の調査地点の選定では, $4,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上の出水はなかったため, 2018年2月27日と2019年5月8日の衛星写真を参考に調査地点を選定した.

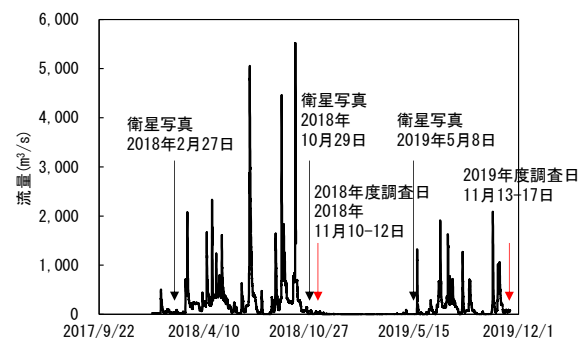


Fig. 8 Flood event and Annual discharge history at Kashima Station in the Tenryu River

湧水流路の発見方法については、1章で述べた湧水創出の仮説に基づいて、2018年2月の地形で流路だった場所が、2018年度調査では2018年10月の時点、2019年度調査では2019年5月に土砂が堆積して陸化した砂州の下流にワンドが存在する地点を探索した(Fig. 8). 以上により、2018年度では4箇所の砂州で5箇所の調査地点を設定し、比較のために本川と毎年モニタリングを行っている12.2-7.4km左岸砂州の計7地点を調査地点とした(Fig. 10). 本調査で確認されたアユ産卵床地点及び瀬の範囲について、橙色の丸●及び矩形で示す(Fig. 10). 18.8-15km左岸砂州のSt.1は、湧水

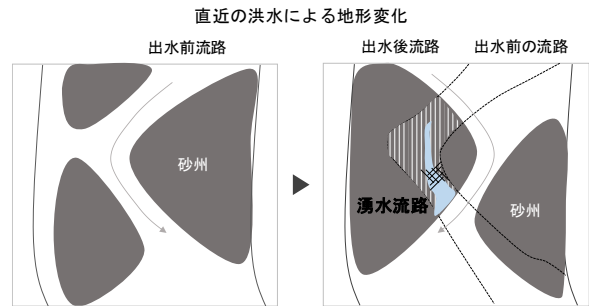


Fig. 9 Hypothetical diagram on creation process of spring flow channels on the bar initiated by the previous floods.



(a) 18.8-15km左岸砂州



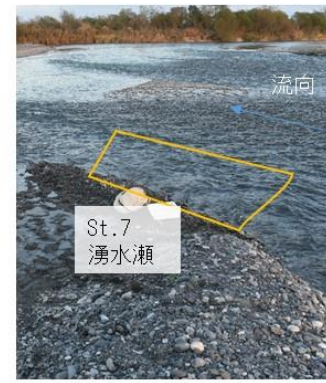
(b) 17.4-14.2km右岸砂州



(c) 14.2-9.3km右岸砂州



(d) 12.2-7.4km左岸砂州



(e) 9.3-6.6km右岸砂州

Fig. 10 Map of seven stations in five reaches (a)-(e) in the lower Tenryu River (2018 FY)



Fig. 11 Map of seven stations in five reaches (a)-(d) in the lower Tenryu River (2019FY)

の湧き出し口であり、St.2は本川を調査地点とした。17.4-14.2km右岸砂州のSt.3及びSt.4は、いずれも湧水瀬であった。14.2-9.3km右岸砂州のSt.5では、湧水瀬の瀬頭(downwelling-zone)で物理環境調査を行った。12.2-7.4km左岸砂州のSt.6では、2018年1月にアユ産卵床造成工事を行った場所であり、伏流水の瀬頭上流(downwelling-zone)で物理環境調査を実施した。9.3-6.6km右岸砂州のSt.7は、本川の水が混入した湧水瀬である。St.2, 7以外の調査地点は、湧水のワンドである。2019年度では、2箇所の砂州で5か所の調査地点を設定した。17.4-14.2km右岸砂州上流のSt.8、下流のSt.9は同じ湧水流路でいずれも湧水瀬である。14.2-9.3km右岸砂州上流のSt.9、St.10は工事の濁水が混入した瀬であり、St.9は河川水が混入した湧水瀬であった(Fig. 11)。

2.2 調査の項目と方法

本研究では、2018年度調査で選定した6か所の湧水流路と1か所の本流、2019年度調査で2か所の湧水流路と3か所の工事及び本川の濁水を含む湧水流路の計12か所について、物理化学的環境を知るために、流速、流量、水温、溶存酸素量(DO)、電気伝導度(EC)、pH等の水質、河床軟度を測定するとともに、アユ産卵床周辺の生物調査を行った。

(1) 流速

流速は、プロペラ流速計を用いて測定を行った。測定方法は、1点法を用いて水面から水深の6割の位置で測定した。流速値は5秒間の平均値を5回測定し、その平均を用いた。川幅は巻き尺で測定し、水深は折れ尺で横断方向に複数箇所測定を行い、そこから断面積を算出した。そして、各断面の断面積に平均流速を乗じ、積算することで算出した。

(2) 水質調査

DO は、ポータブルマルチメータ(HACH 製 HQ30d)を用いて測定した。pH、EC は、pH・電気伝導度測定器(HORIBA 製 D-54)を用い、濁度については、ポータブル濁度計(東亜 DDK 製 TB-31)を用いて測定を行った。

(3) 河床軟度・河床材料

河床軟度については、シノを用いて測定した(Fig. 12)。シノとは、長さ 30cm の先の尖った鉄の棒にメモリを刻んだものである。河床に一定の力を加え、5 回突き刺した平均値を貫入深として扱う。河床軟度を知るために簡易な測定方法であり、複数の地点を効率的に計測することができる。

河床材料の粒径の測定は、バットに河床材料を広げ、折れ尺と共にデジタルカメラで撮影し、その写真を ImageJ の Grid 機能を用いて、グリッドの交点の粒径を測定した。

(4) アユ産卵床調査

アユの産卵床の卵数を定量的に測定するために、直径が 7.5cm、長さ 34cm の新村式アユ産卵床探索筒を用いて定量調査を行った(Fig. 13)。Fig. 13 の筒の左側を掌で塞ぎ、河床に対して平行に挿入し、筒内が河床から 0~10cm の位置の砂礫で完全に満たされるまで採取した。採取した砂礫は、水が満たされたバットに移し、卵の有無を目視で確認した。卵が確認された場合は、バットに土砂を広げ、卵数をカウントし、速やかに卵塊を原位置に戻した。また、卵の推定個数は、式(1)を用いて算出した。

$$\text{卵の推定個数(個)} = X \div Y \times Z \quad (1)$$

X: 衛星写真より算出した瀬の面積(cm²)

Y: 1 すくい の面積(7.5cm×34cm=225cm²),

Z: 1 すくい の卵数

1 すくい: 1 回すくった時の卵数



Fig. 12 Survey tool for riverbed softness

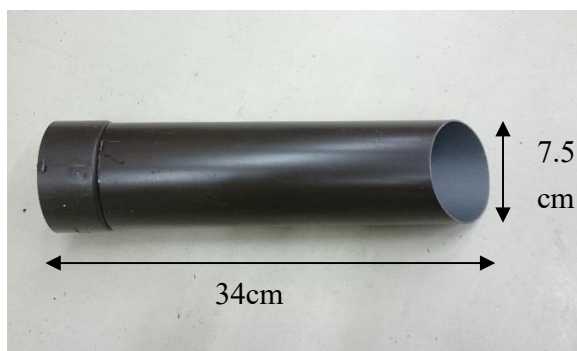


Fig. 13 Ayu egg sampler used for spawning redds survey (produced by Y. Niimura).



Fig. 14 Ayu eggs

間隙生物の調査は、いであ株式会社で開発された間隙生物採取器具を用いて、アユ産卵床周辺の間隙生物調査を実施した(Fig. 15, Fig. 16)。採取の手順については、まず中空パイプにハンマーヘッドを装着し、ハンマーを用いて50cm程地面に貫入する。貫入後、ハンマーヘッドを外し、採水ポンプのチューブを中空パイプの先端部まで挿入する。ハンドポンプを用いてパイプ内に浸透してきた間隙水を吸引し、10L採水を行う。採水した10Lは125 μmメッシュのネットを用いて濾過し、ネット上の残存物をエタノール入りのボトルへ入れ実験室に持ち帰った。採取した試料は実体顕微鏡を用いて可能な限り下位分類まで同定した。

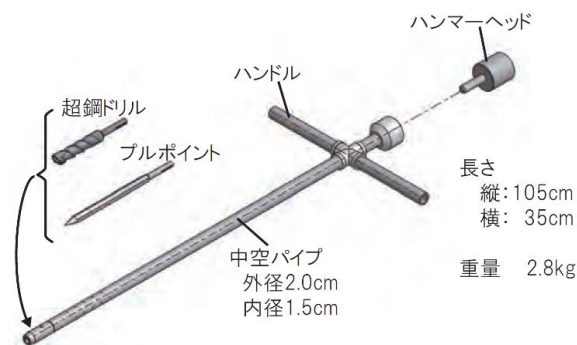


Fig. 15 Hyporheo sampler (produced by T. Torii).



Fig. 16 Hyporheo sampler of suck-up type with a strainer and a hand pump (produced by T. Torii).

2.3 調査結果及び考察

2.3.1 現地調査結果

(1) アユの産卵床の有無と産卵数

2018年度のアユの産卵床は、St.3, St.4, St.5及びSt.7の4箇所で確認された(Fig. 10). いずれの地点も右岸の砂州であった。また、本川であるSt.2及びSt.1, St.6では、アユの産卵床は確認されなかった。式(1)により推定された卵数は、St.7では約650個、瀬が大きいSt.5では約18,000個、St.3では約8,000個、St.4では約4,000個であった(Fig. 17). 2019年度のアユの産卵床は、St.8, St.10, St.11で確認された(Fig. 18). 推定された卵数は、St.8で17,938個、St.10で3,608,333個、St.11で最も多い93,810,000個であった。St.9, St.12ではアユの産卵床が確認されなかった。

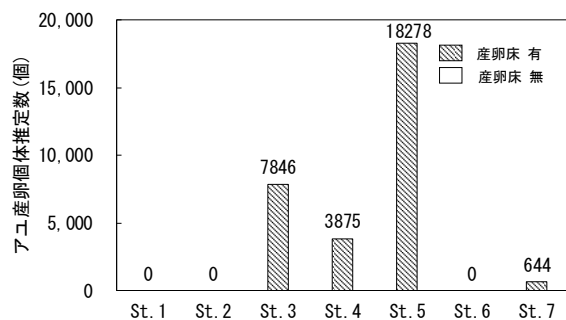


Fig. 17 Estimated number of spawning Ayu eggs(2018FY)

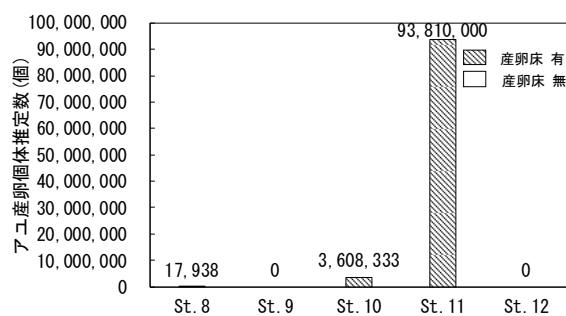


Fig. 18 Estimated number of spawning Ayu eggs(2019FY)

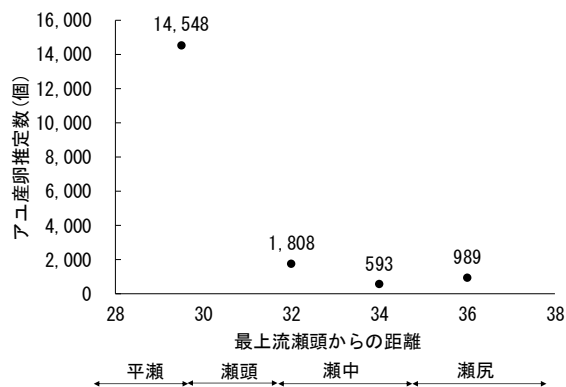


Fig. 19 Longitudinal distribution of spawning Ayu eggs (St.8)

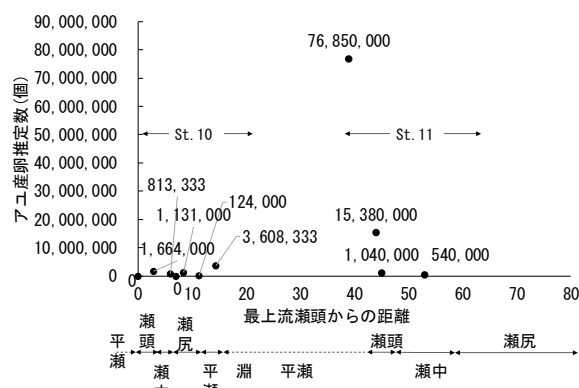


Fig. 20 Longitudinal distribution of spawning Ayu eggs (St.10, 11)

(2) アユ産卵数縦断分布

アユ産卵床における産卵数の縦断分布を評価するために、St.8, St.10及びSt.11の3地点において早瀬を上流から下流にかけて瀬頭・背中・瀬尻の3種に分類し、縦断方向に産卵床調査を実施した。St.8及びSt.11でアユの産卵数は瀬頭で多く、下流に行くに従って産卵数は減少した(Fig. 19). St.10では、淵と瀬頭で卵数が多い傾向が認められた(Fig. 20).

(3) 流速及び流量

2018年度の流速について、St.7では 156.70 cm s^{-1} であり、調査した地点では最大の流速であった(Fig. 21). St.3では 43.42 cm s^{-1} であり、やや流速が遅い結果を示したが、St.4, St.5は 70 cm s^{-1} 以上の流速であった。湧水流路の流量の結果については、産卵床発見地点で少なくとも $0.31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ もの湧水量が確認できた(Fig. 22). 産卵床が確認できなかった地点での流量について、St.6では $0.02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、St.1では $0.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ と顕著に低かった。2019年度の流速結果は、St.10で 73.82 m s^{-1} と最も高く、その他の地点は、 $50.88 \text{ m s}^{-1} \sim 57.36 \text{ m s}^{-1}$ の範囲であった (Fig. 23). 流量の結果については、産卵床確認地点で $0.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \sim 0.61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ もの流量が

確認された(Fig. 24).

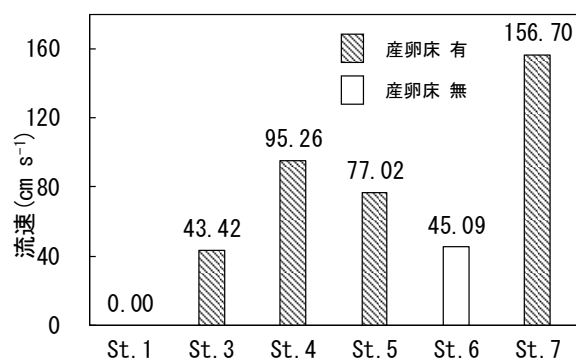


Fig. 21 Flow velocity at spawning redds (2018FY)

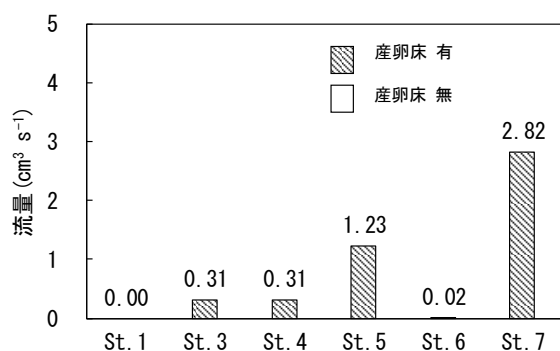


Fig. 22 Quantity of flow at spawning redds (2018FY)

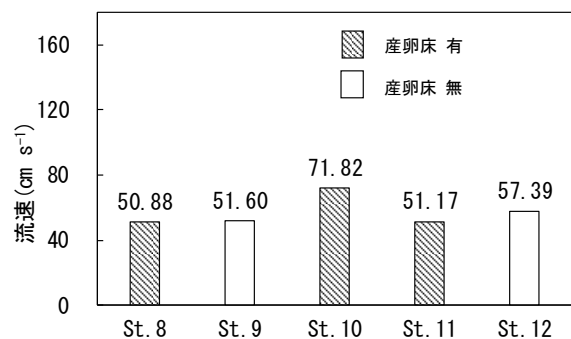


Fig. 23 Flow velocity at spawning redds (2019FY)

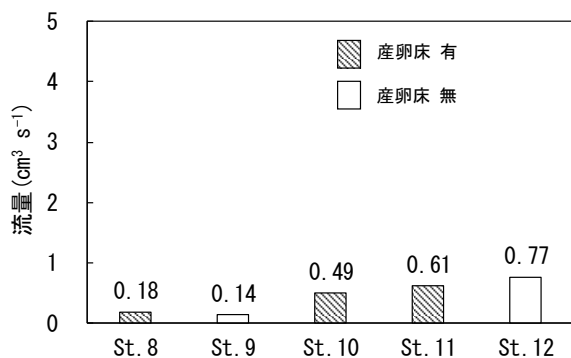


Fig. 24 Discharge of flow at spawning redds (2019FY)

(4) 水質

2018年度調査結果について、産卵床発見地点と本川のDOは90%以上であり、産卵床が確認されなかったSt.1及びSt.6のDOは61.0%及び86.7%だった(Fig. 25). 濁度については、St.7では本川の水が流入してきているため、10.1NTUと少し大きな値を示しているものの、St.5では5.5NTUを示し、透明度の高い水であることが確認できた(Fig. 26). 2019年度の結果について、濁度は河川水や工事による濁水の混入があったものの、アユ産卵床の発見されたSt.8, St.10及びSt.11では2.8~6.3NTUであり、産卵床が確認されなかったSt.9及びSt.12においても2.2NTU及び5.2NTUと比較的透明度の高い水であることが確認された(Table 1, Fig. 26). ECは12.62~13.66ms l⁻¹の範囲であった. pHについては、アユ産卵床が確認された地点で7.04~7.46であり、確認されなかった地点で6.87~7.46であった.

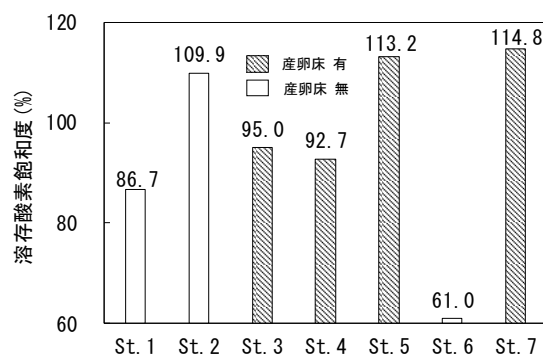


Fig. 25 Dissolved oxygen saturation concentration at each point (2018FY)

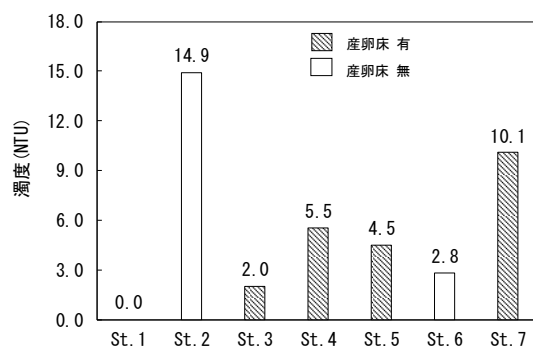


Fig. 26 Turbidity at each point (2018FY)

Table 1 Results of Water quality (2019FY)

St.	流速 cm s ⁻¹	流量 m ³ s ⁻¹	EC mS m ⁻¹	DO %	DO mg l ⁻¹	濁度 NTU	pH
8	50.88	0.18	12.62	-	-	3.3	7.13
9	51.60	0.14	13.11	-	-	2.2	6.87
10	71.82	0.49	13.66	-	-	2.8	7.04
11	51.17	0.61	12.97	-	-	6.3	7.46
12	57.39	0.77	12.69	-	-	5.2	7.46

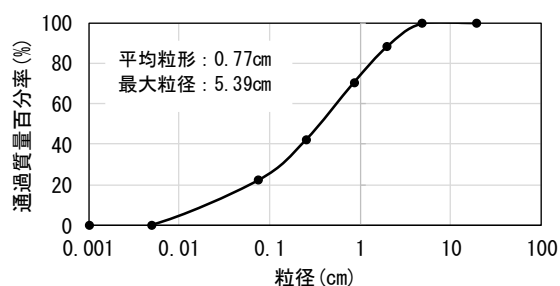


Fig. 27 Particle-size accumulation curve (St.3)

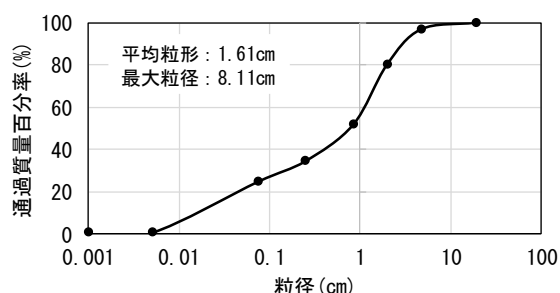


Fig. 28 Particle-size accumulation curve (St.7)

(5) 河床軟度と河床材料

2018年度の河床軟度について、アユ産卵床である St.3 では 12cm, St.4 では 21cm, St.7 では 9cm 河床に貫入した。河床材料については、礫に藻類が付着している地点ではアユの産卵床は存在せず、藻類が付着していない礫がある瀬において産卵床を確認できた。粒径については、産卵床が確認された St.3 で平均粒径 0.77cm, 最大粒径 5.39cm であり(Fig. 27), アユ産卵床が確認されなかった St.7 で平均粒径 1.61cm, 最大粒径 8.11cm であり、産卵床発見地点の方が小さな粒径を示した(Fig. 28)。

(6) アユ産卵数と湧水流路の流量の関係

湧水流路内の流量がアユ産卵床に及ぼす影響を評価するために、アユ産卵床発見地点の推定卵数と湧

水流量の関係をまとめた(Fig. 29)。但し、本川からの流入量が多く、見かけ上流量が多かった St.7 は解析から除外した。相関分析の結果、アユの産卵数と湧水流量間には、正の相関($n=5$, $r=0.977$)が見られ、1% 有意であった。

(7) 砂州の侵食・堆積

2018年の調査地点では、Fig. 30の黄色の点線で示すように、出水による土砂移動と堆積によって、かつて流路であったところに土砂が堆積し、砂州前縁部で湧水が形成され、その湧水に瀬が形成された箇所アユの産卵床が確認された。

侵食堆積面積量について、St.3, 4の砂州全体においては、侵食面積が 0.276 km², 堆積面積が 0.249 km² であり、特に、産卵床の上流においては、洪水により新しく堆積した土砂が多いことが確認された(Fig. 30)。また、St.5では、侵食量が 0.064 km², 堆積量が 0.065 km² であり、決して多くの土砂が更新されたわけではないが、Fig. 31の侵食堆積面積の衛星写真より、アユの産卵床が発見された上流側では、小さな旧河道が洪水により堆積し、湧水流路が現れることが示された。

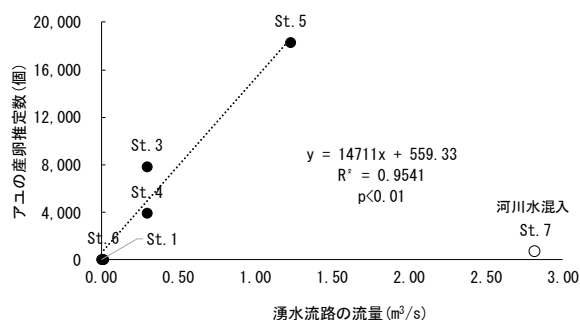


Fig. 29 Relations of estimated number of spawned eggs of Ayu fish to discharge of spring channels



Fig. 30 Erosion deposition area (Right bank sand bar at from 17.4 km to 14.2km)



Fig. 31 Erosion deposition area (Right bank sand bar at from 14.2 km to 9.3km)

(8) 間隙生物

St.6 と St.5 の間隙生物調査の結果について、St.6 では、環形動物のイトミミズ亜科(*Tubificinae*)、節足動物のソコミジンコ目(*HARPACTICOIDA*)、ケンミジンコ目(*CYCLOPOIDA*)、クロカワゲラ科(*Bathynellidae*)、ユスリカ科(*Chironomidae*)、緩歩動物の緩歩動物門(*Tardigrada*)の計6分類群が確認され、節足動物が108個体、緩歩動物が1個体、環形動物が2個体であった(Fig. 32)。節足動物の6種群の中では、ソコミジンコ目(*Harpacticoida*)が90個体と最も多く確認された(Fig. 33)。一方、St.5では、線形動物の線形動物門(*NEMATODA*)、環形動物のイトミミズ亜科(*Tubificinae*)、節足動物については、オヨギダニ属(*Hygrobates sp.*)の一種、ササラダニ亜目(*Oribatida*)、貝虫亜綱(*OSTRACODA*)、ソコミジンコ目(*Harpacticoida*)、ケンミジンコ目(*Cyclopoida*)の一種、トビイロカゲロウ科(*Leptophlebiidae*)、クロカワゲラ科(*Bathynellidae*)、ヌカカ科(*Ceratopogonidae*)、ユスリカ科(*Chironomidae*)及びヒメドロムシ科(*Elmidae*)の一種の合計10分類群が確認された。節足動物が203個体、線形動物が6個体、環形動物が2個体であり(Fig. 32)、特にユスリカ科は多く確認された(Fig. 34)。以上の結果より、St.5の方が出現した分類群数と総個体数は多かった。また、いずれの地点においてもクロカワゲラ(*Capniidae*)が確認された。

生物群集内の多様性の評価は、Shannon-Wiener の多様度指数(H')を用いて行った。これは、生物多様性を評価する定量的な方法の1つであり、値が大きいほど多様性が高いことを示す。Shannon-Wiener の多様度指数は、産卵床発見地点である St.5 で 2.03、産卵床が発見されなかった St.6 で 1.06 であった。

2.4 考察

天竜川下流域において、18kp～7kp区間に点在する

砂州内を流れる湧水流路では、複数のアユ産卵床が確認された。2018年度では、湧水流路のうち、4,000～5,000 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の出水より侵食堆積の影響を受けた砂州内に形成された湧水流路の瀬で、4,000～18,000個のアユの卵が確認された。2019年度では、年最大の出水規模が2000 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 程度と小規模ではあったが、

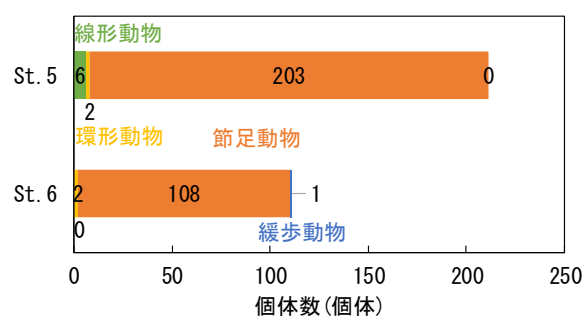


Fig. 32 Numbers of Interstitial fauna

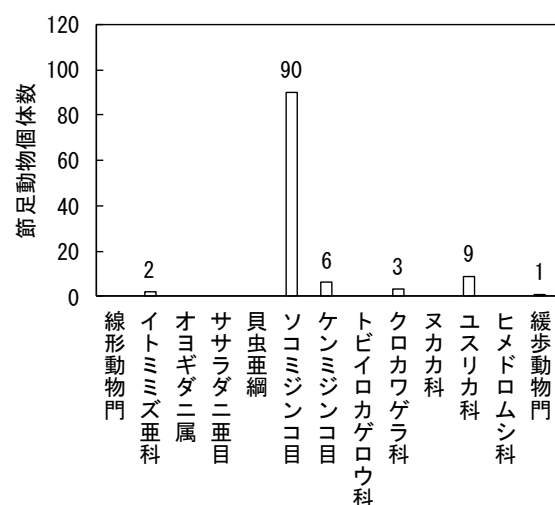


Fig. 33 Numbers of Arthropod at left bank from 12.7km to 7.4km

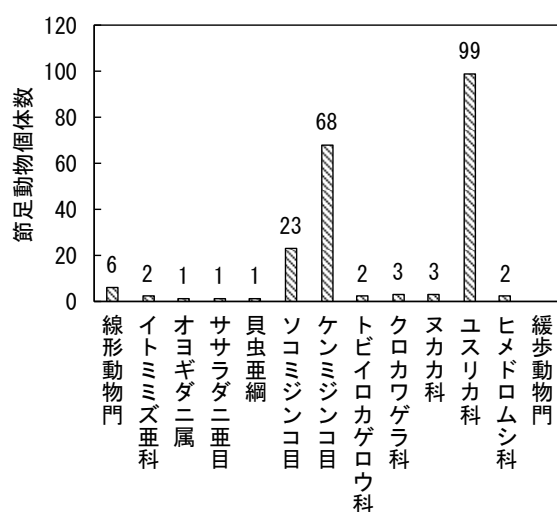


Fig. 34 Numbers of Arthropod at left bank from 14.2km to 9.3km

2018年度と同様に、侵食堆積の影響を受けた砂州内に形成された湧水流路内で産卵床が確認され、7,900~3,600,000個のアユの卵が推定された。既往研究において、砂州内の湧水流路が産卵場として好適な条件になり得ることは示されていたが、流程間においての産卵床分布状況は明らかとなっていなかった。本研究の成果より、アユの産卵床は流程の中流～下流の広範囲に渡って点在していることが実証された。しかしながら、全ての湧水流路で産卵床が確認されなかったことから、産卵床は複数の環境条件が揃った湧水流路でのみ形成されたと考えられる。産卵床が確認された湧水流路の流速は、 $78.0 \pm 36.2 \text{ cm s}^{-1}$ 、流量は $0.85 \pm 0.87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、DOは $103.9 \pm 10.1\%$ （2018年度調査のみ）であり、これらの物理環境条件が必要であることが示唆された。加えて、河床条件として、河床軟度9~21cm、河床材料の平均粒径が0.77cmと河床が適度に軟らかく、粒径の小さい砂利で構成されていることも産卵床環境条件として必要であると示唆された。これらの環境条件を併せ持つためには、現状の天竜川では、本川ではなく砂州内の湧水流路に限定されることになる。

また、アユの産卵推定数と湧水流路の流量との関係には、正の相関が見られ、湧水流路の流量は好適な産卵床条件の基本的な十分条件の1つであることが示された。次の課題として、湧水流量の流量が多い地形について分析することで、好適なアユ繁殖場の増やす対策につながると考えた。

アユ繁殖場の形成履歴から、アユの繁殖成功には、既存流路に土砂が堆積して新たな湧水流路が形成されることが必要であることが示唆された。砂州が更新された箇所では、更新されない部分と比較すると河床間隙が大きく、本川から砂州内を通り、透明度

の高い水が湧くと考えられる。したがって、砂州の更新は濁質が低い水を創出するための条件の1つと考えられる。

湧水流路の間隙生物は、アユの産卵発見地点で12種類が確認された。また、クロカワゲラ科がアユの有無にかかわらず確認されたことから、本種は間隙水域への流入域判断の指標種となり得る。しかしながら、間隙生物の調査地点数が少なかったことから十分な議論が困難であり、間隙生物から見た湧水環境の指標性及びアユ産卵床との関係性については、今後の検討課題である。間隙生物の多様性は、調査地点数は少ないもののアユ産卵床地点で高く、産卵床周辺の砂州は間隙生物にとっても好適な生息環境が形成されていることが示唆された。したがって、間隙生物の多様性は、生物学的に湧水流路の好適なアユ産卵床探索の評価指標の1つとなる可能性があると考えられる。

3. 湧水流路の流量が多い砂州地形

3.1 調査方法

3.1.1 湧水流路形状の分析方法

(1) 湧水流路の流量測定

2018年11月10~12日の3日間、2019年6月6~7、13~15日の5日間、2019年11月13~17日の5日間、合計13日間にわたり、河口から22km区間の全15砂州の全湧水流路を対象として、可能な限り調査を行った。湧水流路の調査地点選定は、調査日以前で出水がない低水時の衛星写真を用いて、既往研究を参考にワンドや色が紺色の水域を対象とした(泉, 2016)。調査地点は、8砂州から19地点抽出した(Fig. 35)。湧水量測定方法は、前章で示した方法と同様に、湧水瀬もしくは湧水湧き出し口にて、巻き尺、折れ尺、プロペラ流速計を用いて、横断測量と複数箇所の流速測定を行い、流路横断面積に平均流量を乗じて算出した。

(2) 湧水流路面積の測定方法

湧水流路の面積を測定のために、湧水流路を定義付けた。湧水流路測定結果に基づく現況の湧水流路では、湧水流路の流量測定地点から上流のワンドの水域を湧水流路の範囲とした(Fig. 36)。一方で、過去の衛星写真に基づき分析を行う湧水流路については、本川に合流するまでのワンドの水域を対象とした。ここでのワンドの定義は、本川に対して概ね10m以上の窪みになっている水域とした。湧水流路面積の測定は、衛星画像上に Adobe 社の Illustrator で湧水流路を描画し、NIH の ImageJ を用いて湧水流路面積を定量的に測定した。湧水流路を囲う際に、ピクセル内に少しでも湧水流路がかかっている場合、湧水流路と判断する。

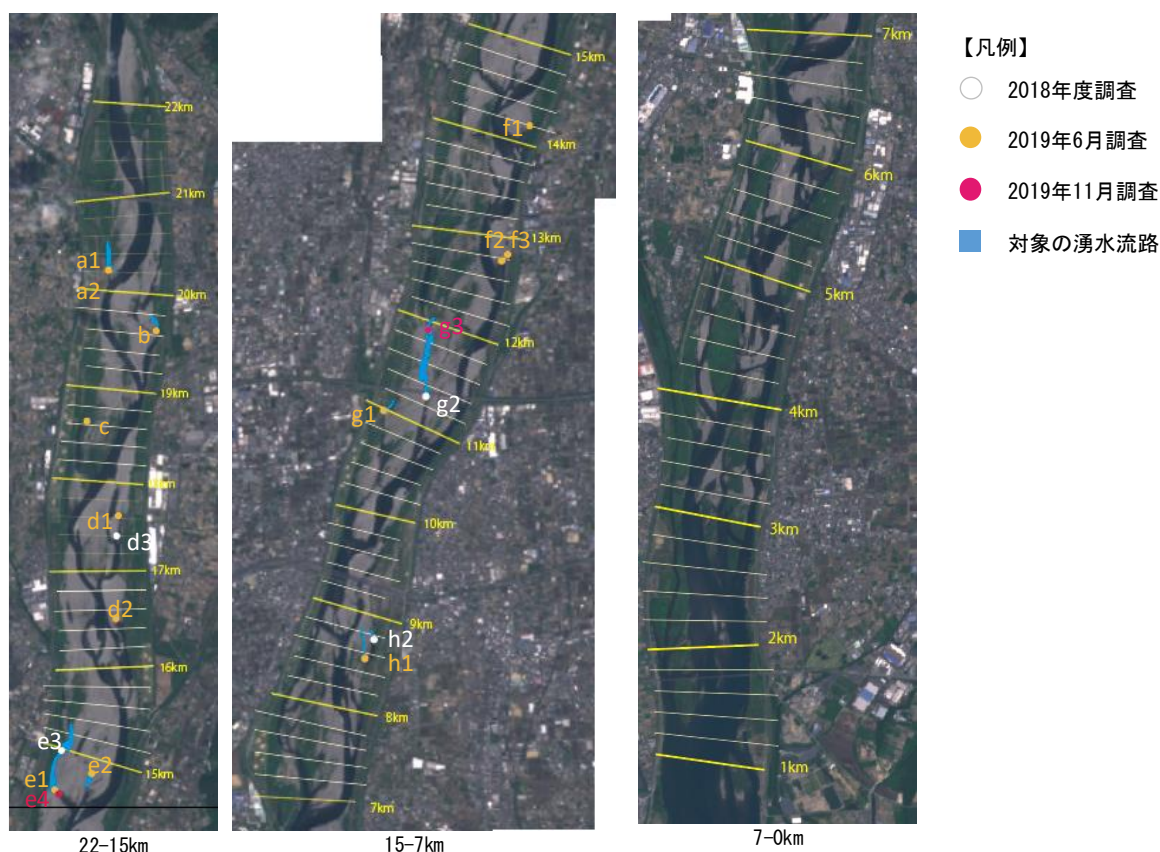


Fig. 35 Discharge survey point of spring channels

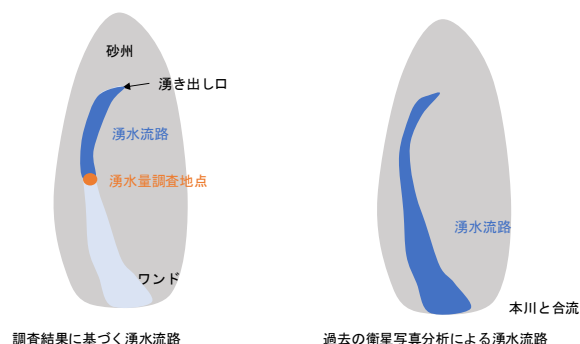


Fig. 36 Definition of spring channel area (Left : Definition of field survey point, Right: Definition of area measurement using satellite image)

3.1.2 中規模河床形態について

土砂移動プロセスによって、雨が降り、山地斜面や侵食により供給された土砂が、侵食地形(流路、谷など)や堆積地形(扇状地など)を作り出す。その地形には、形態規模により、小規模河床である砂漣、砂堆、反砂堆があり、中規模河床形態として砂州が形成される。砂州は、最も規模の大きい河床形態であり、その波長は、水路幅と密接な関係がある。砂州の種類は、湾曲部の凸岸に見られる固定砂州(point bars)、左右交互に周期的に表れる交互砂州(alternate bars)、

川幅水深比が大きいときに川の横断方向に複数の砂州が出現する砂州を複列砂州、またはうろこ状砂州(多列砂州)に分類される(山本, 2010)。中規模河床形態を主に支配する無次元量は、無次元掃流力 τ^* , h (平均水深)/ d (代表粒径) $^{-1}$, B (川幅) h^{-1} の3つである(村本ら, 1978)。これらの無次元量値を用いて、2019年5月8日の衛星写真に基づいて天竜川下流域の中規模河床形態の分類を行ったところ、 BI (河床勾配) $^{0.2} h^{-1}$ は97であるため、複列砂州であった(Fig. 37)。

一方、他の既往研究において中規模河床形態は、流路形状と砂州の分布状況との組み合わせによって、砂州なしの直線流路、単列砂州有の直線流路、固定砂州有の蛇行流路、複列砂州、網状砂州の5つに分類されている。中規模河床形態の分類に用いられているパラメータは、蛇行度(Shumm, 1985)、流路数(Brierley and Fryirs, 2005)、川幅水深比(Rosgen, 1994)といったパラメータである。日本の木津川では、蛇行度、流路数により中規模河床形態の分類がされている(Choi, 2014)。

天竜川下流域の中規模河床形態は、中規模河床形態のパラメータである砂州波長、蛇行度、流路数のうち、蛇行度及び流路数を用いて分類を行った。

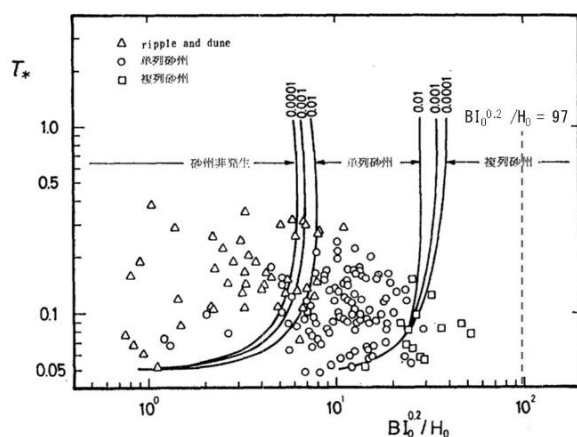


Fig. 37 Division of reach-scale channel configuration (Kuroki et.al., 1984)

3.1.3 中規模河床形態の計測方法

(1) 砂州波長及び砂州蛇行度

砂州波長は、砂州の長さを知る指標であり、出水前後で砂州の伸縮を知るためにも用いるができる。砂州蛇行度は、小さいほど直線的に流路が蛇行するため、長細い砂州が形成される指標となる。流路の蛇行の程度を表す指標として、蛇行度(S)を採用した。一般的に蛇行度 S が 1.4 程度以下では、1 蛇行長内に 2 つの淵を持つ蛇曲河道であり、S が 1.4 より大きい場合には、1 蛇行長内に 3 つ以上の淵が存在する迂曲河道に分類される。S が 2.5 以上では、自然短絡を生じ易くなるため、これが S の最大蛇行度となる(山本, 2004)。今回測定した砂州波長、蛇行度の測定方法は、以下の手順である。

(a) 流路の認定

出水の規模により水漬く幅が違い、蛇行は大蛇行と小蛇行の 2 種類があると考え、それぞれの蛇行に対して流路認定を行った。大蛇行については、大～中規模出水時により川幅全体が水漬く場合、小蛇行については、小規模出水により植生間が水漬く場合の主流路の蛇行を想定した。それぞれの流路において、大蛇行は高水敷と低水路の境界間、小蛇行については植生間の流心部を取るようにして線を引いた。複列砂州の場合は、砂州のユニットを重視した。(Fig. 38, Fig. 39).

(b) 蛇行の頂点の設定

蛇行の頂点の認定は、砂州波長、蛇行度の測定にあたって重要な設定である。高水敷と低水路の境界に線を引き、大蛇行及び小蛇行それぞれの流心部を通る流路線と接するところを頂点とした。接している区間が長い場合は、流路の曲がり角から曲がり角の中心とする。実際には、高水敷と低水路の境界に接していない点が存在する。その場合、大蛇行では、高水敷と低水路の境界間を半分超えているとき、小

蛇行については、植生間の長さを流心線が半分を超えることを条件として頂点と認定した。

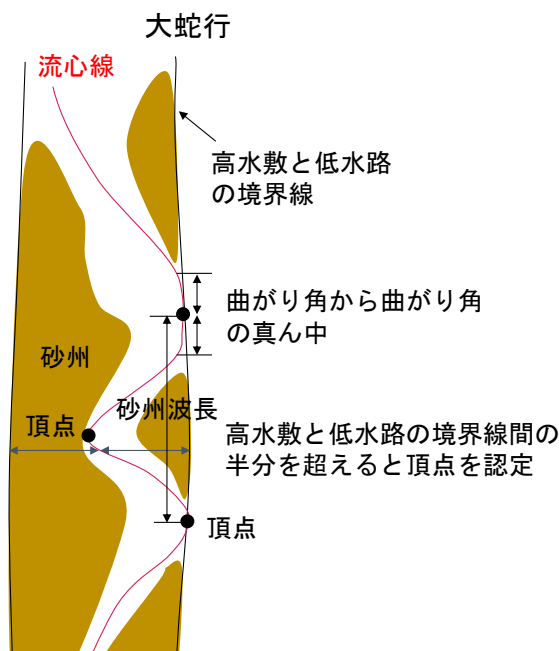


Fig. 38 Definition of channels and vertices of large meanders

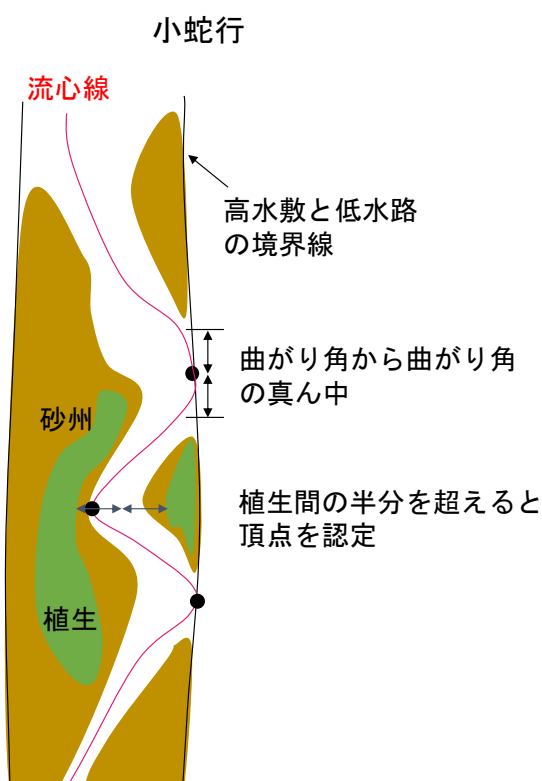


Fig. 39 Definition of channels and vertices of small meanders

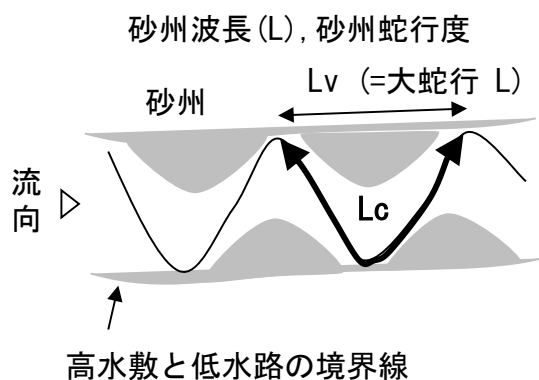


Fig. 40 Definition of channel length and valley length

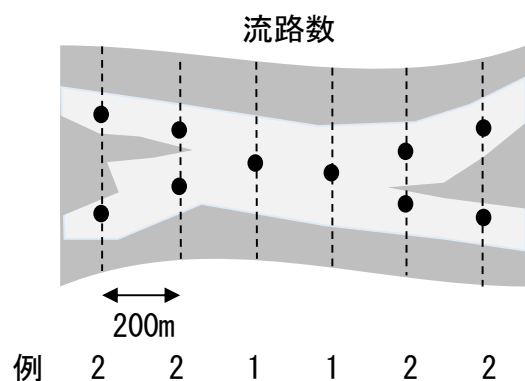


Fig. 41 Number of channels

(c) 砂州波長, 砂州蛇行度の測定方法

砂州波長については, 右岸であれば右岸の大蛇行の頂点同士を結び, その長さを砂州波長(L)とする. 蛇行度については, 頂点間の蛇行の長さ L_c (Curve Length)を砂州波長 L_v (Valley Length)で割った (L_c / L_v) 値をとる (Fig. 40).

(2) 流路数

流路数は, 複列化の指標であり, 値が大きいほど複列していることを示す. 測定方法は, 200m ごとに, 流下方向に対して垂直に線を引き, ワンド, たまりを含めた水面の数を数える (Fig. 41).

3.1.4 出水前後の地形変化

(1) 対象出水について

1960~2019 年のハイドログラフ (水文水質データベース, 国土交通省浜松河川国道事務所提供) より, 過去の出水の履歴を調査した. 1960~1990 年の 30 年間に於いて, $4,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 規模の出水は概ね 3 年に 1 度起こっていた. 1991~2018 年においては, 概ね 4 年に 1 度と大きな出水が起きにくくなる傾向であった.

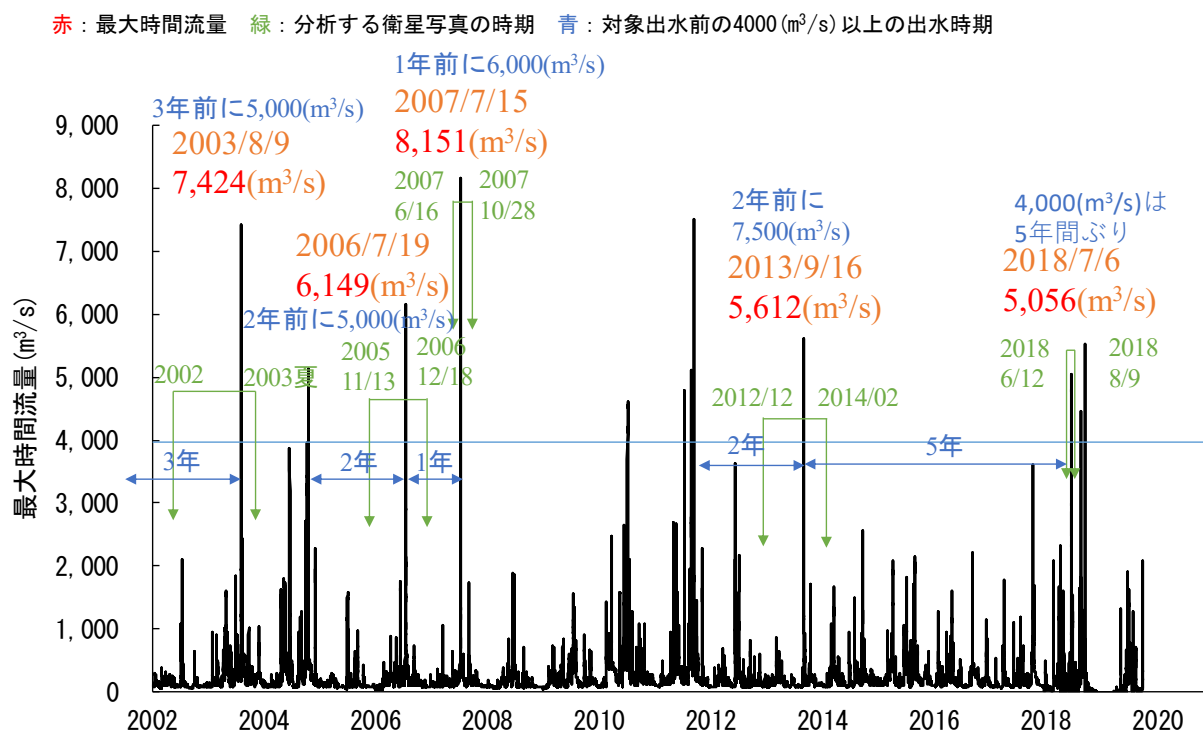


Fig. 42 Characteristics of flooding and timing of satellite image

Table 2 Characteristics of flood water and timing of satellite photography

衛星写真時の流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	80~120	90~200	90	73	100	310
年最大時間流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	5,190	7,427	5,127	6,149	1,052	8,151
生起確率	1/7	1/16	1/6	1/9	1/1	1/22
洪水回数 ₄₀₀₀		1	1	1	0	1
洪水回数 ₃₀₀₀		0	2	0	0	0
洪水回数 ₂₀₀₀		2	1	0	0	0
洪水回数 ₁₀₀₀		3	6	1	1	1
衛星写真の時期	2012 12	2014 02	2018 0612	2018 0809	2019 0508	
衛星写真時の水位 (m)	-2.74 ~-2.91	-2.95 ~-3.17	-2.82 ~-3.08	-3.38 ~-3.39	-3.41 ~-3.42	
衛星写真時の流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	110	80~120	120	100	65~125	
年最大時間流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	7,500	5,612	3,604	5,056	5,521	
生起確率	1/16	1/7	1/3	1/6	1/7	
洪水回数 ₄₀₀₀	4	1	0	1	2	
洪水回数 ₃₀₀₀	1	0	1	0	0	
洪水回数 ₂₀₀₀	8	0	6	0	0	
洪水回数 ₁₀₀₀	12	1	17	0	2	

分析に使用する衛星写真の選定では、土砂が動く $4000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 以上の出水に着目し、それらの出水の前後で比較的低水位、流量が小さい衛星写真を収集した。しかし、衛星写真技術の発達の関係上、出水前後で存在が確認された写真は 2002 年以降が多く、2002 年以降の 5 回の $4000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 規模以上の出水を対象とし、10 時期の衛星写真選定・分析した(Fig. 42)。現状の地形条件を評価するために、2019 年 5 月 8 日の衛星画像を用いた。

抽出した 5 回の出水(最大時間流量)は、2003 年 8 月 9 日で $7,424 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 、2006 年 7 月 19 日 $6,149 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 、2007 年 7 月 15 日 $8,151 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 、2013 年 9 月 16 日の $5,612 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 、2018 年 7 月 6 日の $5,056 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ である(Fig. 42, Table 2)。出水の特徴と衛星写真の水位や流量について、Table 2 に示す。水位や流量のデータは鹿島地点のデータを用いた。衛星写真の時期の水位については、近年河床が低下傾向にあり最新のもののほど低くなっている。選定した衛星写真の時間流量は、全期間を通して概ね $80 \sim 200 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ であった。2007 年 10 月 28 日については、流量が $310 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ であり、他の時期に比べて若干水位が高かった。選定した衛星写真間の時期の出水の特徴は、 $1,000 \sim 8,000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ の幅広い出水を対象とし、特に、2007 年から 2012 年にかけては $4,000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 規模以上の出水が 4 度であり、動的变化が期待された。一方で、2006 年か

ら 2007 年の間では、 $1,000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ の小規模出水が 1 度しか起きなかった。また、対象区間の最大出水は、2007 年 6 月と 10 日の間に起きた $8,151 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ の出水であった。

(2) 出水前後の地形変化のパラメータ

(a) アユの流下仔魚数

出水前後の地形変化を過去の衛星写真から分析する際に、アユの流下仔魚数の調査結果との関係性を評価することでアユの繁殖にとって好適な地形変化を検討した。アユの流下仔魚量は、滋賀県水産試験場の方法に準じて、流量法により以下の手順で推定されている。採集仔魚数を濾水量で除すことで単位水量当たりの流下仔魚数(尾/ m^3)を推定し、これに河川流量 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ を乗ずることで各調査時刻における単位時間当たりの流下仔魚数(尾/s)を算定する。これらの調査時刻間で平均をして、その時間に乗ずることで、調査時刻間の流下仔魚数を算定している。さらに、調査時間内で積算することで、各調査日の調査時間内における流下仔魚数(尾/調査時間)を推定する(鈴木ら, 2014)。

アユの流下稚魚数は、2002、2005~2007 及び 2016 年に増加していた(Fig. 43)。流下仔魚数が増加した年の出水がアユにとって好適な地形変化をもたらしていると考え、地形変化を明らかにするための目標値に設定した。

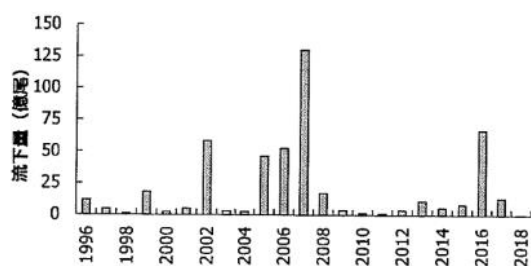


Fig. 43 Number of larvae that flow down ayu fish

3.2 湧水流量測定結果に基づく現状の地形分析

3.2.1 湧水流路単位での分析

アユの繁殖成功は流下仔魚数で評価されており、その量は極めて大きく年変動する。この変動が湧水流路面積や湧水流路数の影響を受けていると仮定し、湧水流量測定時と 2002～2018 年の過去の衛星写真を用いて固定砂州下流の右岸砂州から河口までの湧水流路の定量評価を行った。

まず、対象区間内の湧水流路の総面積、最大面積、平均面積の 3 項目とアユの流下仔魚数について、経年変化の関係について分析した。その結果、最大面積については、相関が見られなかったが、湧水流路の総面積、平均面積では、正の相関が見られたものの、いずれも有意ではなかった。一方、湧水流路ごとの流量と調査地点から上流の湧水流路面積の関係について分析した結果、両者には有意な相関が見られた (Table 3, Fig. 44)。したがって、湧水流路の流量が多い地点では、湧水流路面積が大きいことが確認された。

Table 3 Results of discharge of spring channels and spring channel area

番号	砂州名	湧水流路の流量 (m ³ /s)	湧水流路面積 (m ²)	調査日
a1	21.8 - 19.8 右岸砂州	0.209	14400	2019/6/6
a2		0.027	1110	2019/6/6
b	20.9 - 18.8 左岸砂州	0.442	3717	2019/6/6
c	19.8 - 17.4 右岸砂州	0.014	72	2019/6/6
d1	18.8 - 15 左岸砂州	0.005	72	2019/6/6
d2		0.021	442	2019/6/6
d3		0.000	241	2018/11/10
e1	17.4 - 14.2 右岸砂州	1.017	34873	2019/6/7
e2		0.314	6415	2019/6/7
e3		0.307	12329	2018/11/12
e4		0.406	43046	2019/11/16
f1	15 - 12.2 左岸砂州	0.009	42	2019/6/13
f2		0.008	76	2019/6/13
f3		0.005	67	2019/6/13
g1	14.2 - 9.3 右岸砂州	0.109	1889	2019/6/13
g2		1.233	33238	2018/11/10
g3		0.490	1458	2019/11/16
h1	12.2 - 7.4 左岸砂州	0.053	2580	2019/6/14
h2		0.016	1032	2018/11/11

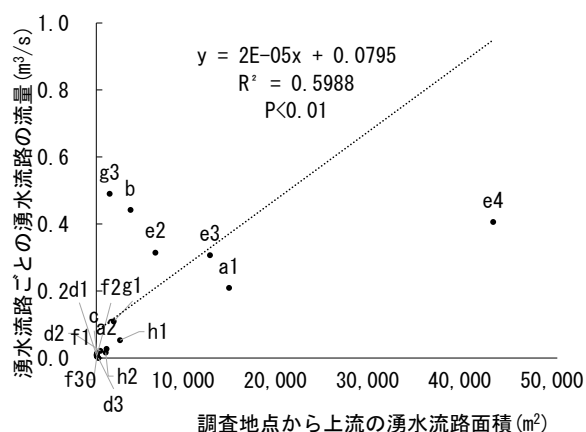


Fig. 44 Relations of discharge of spring channels to spring channel area of upstream from the survey point

一定の流量以上の湧水流路でアユの繁殖活動は好適になり得ると考え、ある閾値以上の面積を持つ湧水流路の総面積と数について検討した。具体的には、アユの流下仔魚推定数を目的変数として相関分析したところ、ある閾値以上の面積を持つ湧水流路の総面積は 7,500m² 以上で最大の相関が見られ、それ以上の湧水面積では相関が弱くなった (Fig. 45)。一方、特定の面積以上の湧水流路の個数は、12,500m² 以上の湧水流路の面積が最大の相関を示した (Fig. 46)。その際のアユの流下仔魚数と 12,500m² 以上の湧水流路の関係は 1% 有意であり、高いアユの仔魚数を期待するためには、12,500m² 以上の湧水流路が少なくとも研究対象区間全体で 10 湧水流路以上必要であることも確認された (Fig. 47)。これらの結果から、アユの繁殖にとっては、面積よりも数が重要であり、面積の大きな湧水流路が必ずしも流下仔魚数に貢献していないと考えられる。閾値を超える総面積が 22,500m² 以上の湧水流路では、相関が認められず、主に 500m 以上の細長い湧水流路であった。河川生態学からみた河川形態の分類として、可児藤吉が提唱した一蛇行区間に出現する早瀬、淵、平瀬の出現形態がある (渡邊, 2019)。本研究の調査区間では、長大な湧水流路では湾曲が見られるものもあり、複数の淵が存在していることが確認された。湧水流路の上流に産卵床がある場合、孵化した仔魚は流下する過程で流速の遅い淵で滞留し、本川までたどり着かないことが予想される。そのため、長い湧水流路の上流に湧水瀬があった場合でも、結果的に流下仔魚数の増加に寄与しないと考えられる。長大な湧水流路の経年変化 (60,000 m² 以上) から、5,000 m³ s⁻¹ 規模以下の出水により本川と側流路から湧水流路が出現し、6000 m³ s⁻¹ 規模以上の出水で湧水流路が消失する傾向が見られた (Fig. 48)。

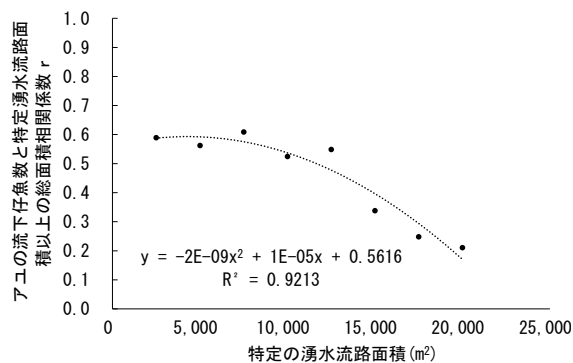


Fig. 45 Correlation coefficient between the number of larvae that flow down ayu fish and the total area above the specific spring channel area

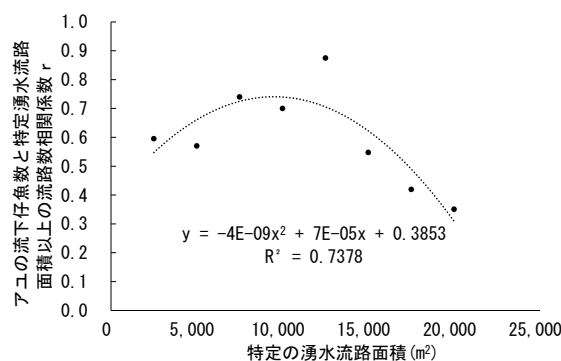


Fig. 46 Correlation coefficient between the number of channels and the total area above the specific spring channel area

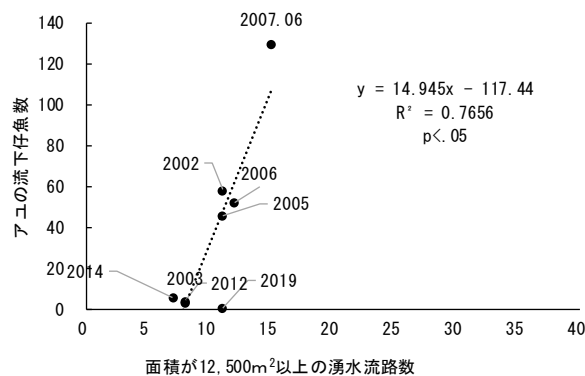


Fig. 47 Relations of number of larvae that flow down ayu fish to number of spring channels area over 12,500 m²

3.2.2 砂州単位の分析

アユの繁殖に好適な砂州地形形成を可能とする土砂管理を検討するためには、砂州単位での湧水流路の評価が必要である。そこで、調査を行った 8 砂州を対象として、砂州単位での実際の湧水流路の流量と中規模河床形態パラメータ、砂州ごとの湧水流路面積(調査地点より上流)について分析した(Table 4)。湧水流路の流量と面積については正の相関が見られ、

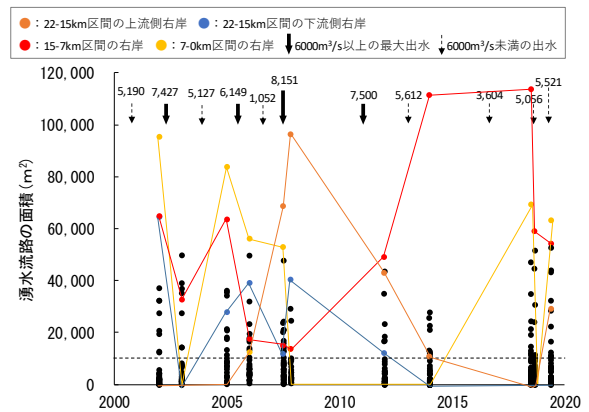


Fig. 48 Secular change of spring channels

両者には有意な関係が認められた(Fig. 49)。

中規模河床形態のパラメータの結果について、砂州波長は 2,087~4,937m, 蛇行度は 1.09~1.14, 流路数は 1.91~3.13 であった。2 章の調査でアユの繁殖が確認された 4 つの砂州は、流量が $0.175\text{m}^3\text{s}^{-1}$ を超える細長い湧水流路があった。そこで、砂州ごとの湧水流路の流量と中規模河床形態パラメータを説明変数として、関係図を示した(Fig. 50, Fig. 51, Fig. 52)。21.8~18.8km に位置する a, b の砂州では、2,000m 程の砂州波長で、流路数が 2 ほど、蛇行度が 1.10 以下と中規模河床形態で表すと、2,000m 程の単列から複列砂州の間(複列しかけた単列砂州)であることが確認された。一方、17.4~9.3km に位置する c, g の砂州は、比較的砂州波長が長く、流路数も 2.5~3.13 と複列していることを示しており、また、3.2.1 で述べた通り、非常に長大な湧水流路を有しており、アユの繁殖場としての効果はあるが、上流の方に繁殖場があっても、流下過程にある淵の影響により流下仔魚数の増加には寄与しないことが予想される。したがって、a, b の砂州の 2,000m 程の複列しかけた単列砂州がアユの繁殖にとって好適な砂州地形となり得

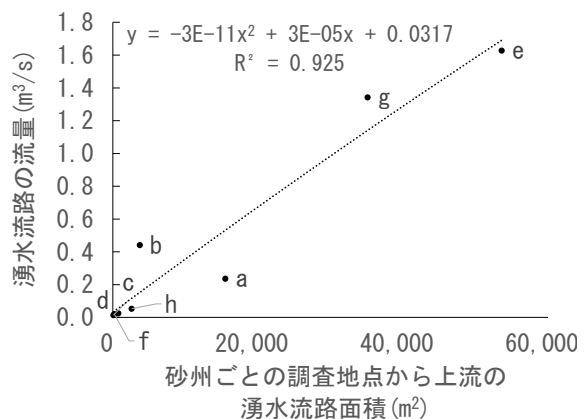


Fig. 49 Relations of discharge of spring channels to spring channel area of upstream from the survey point for each sandy bar

Table 4 Discharge and spring channel area for each sand bar

番号	砂州名		砂州波長 (m)	蛇行度	流路数	湧水流路の流量 (m ³ /s)	砂州ごとの調査地点から 上流の湧水流路面積 (m ²)	湧水流路の流量/砂 州面積 (m ³ /s/km ²)
a	21.8 -	19.8 右岸砂州	2,087	1.09	1.91	0.237	15,510	0.481
b	20.9 -	18.8 左岸砂州	2,183	1.10	2.09	0.442	3,717	0.866
c	19.8 -	17.4 右岸砂州	2,407	1.12	2.42	0.014	72	0.022
d	18.8 -	15 左岸砂州	3,982	1.10	3.05	0.025	755	0.026
e	17.4 -	14.2 右岸砂州	3,208	1.14	3.13	1.628	53,618	1.085
f	15 -	12.2 左岸砂州	2,740	1.13	2.50	0.021	185	0.069
g	14.2 -	9.3 右岸砂州	4,937	1.13	2.50	1.342	35,126	0.534
h	12.2 -	7.4 左岸砂州	4,830	1.11	2.75	0.053	2,580	0.100
i	9.3 -	6.6 右岸砂州	2,675	1.12	2.86			
j	7.4 -	5.6 左岸砂州	1,830	1.11	3.00			
k	6.6 -	5.2 右岸砂州	1,457	1.10	3.29			
l	5.6	4.5 左岸砂州	1,130	1.16	2.80			
m	5.2	3.1 右岸砂州	2,094	1.09	3.40			
n	4.5	2 左岸砂州	2,444	1.12	3.69			
o	3.1	0.9 右岸砂州	2,186	1.08	3.00			

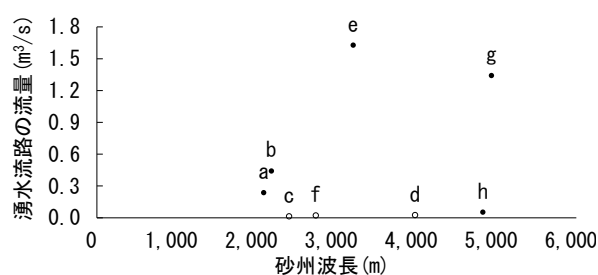


Fig. 50 Relations of discharge of spring channels to ber wavelength

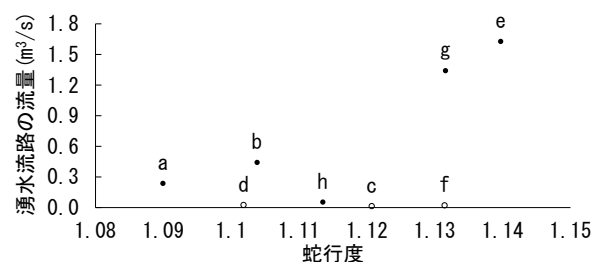


Fig. 51 Relations of discharge of spring channels to Sinuosity

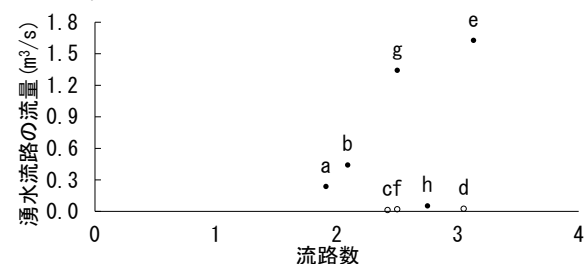


Fig. 52 Relations of discharge of spring channels to number of spring channels

ると考えられる。しかしながら、本研究の調査結果だけでは、地点数が少なく、統計的にも有意な結果を得ることができなかったため、今後の研究では、調査値点数を増やすといったの改善が必要である。

3.3 湧水流量が多い中規模河床形態

3.2.2 で述べた 2,000m 程の複列しかけた単列砂州がアユの繁殖にとって好適であると仮説を立て、湧水流量が多い中規模河床形態を明らかにするために、砂州波長、砂州蛇行度、流路数の 3 つのパラメータを用いて、2002 年から 2019 年までの地形分析を行った。過去の湧水流路の流量の測定データは存在しないため、ここでは、湧水流路面積を流量の代替とした。

アユの繁殖にとって好適な地形特性を知るために、中規模河床形態のパラメータにより分析を行った結果、流程の平均砂州波長では、2,250m でピークを持つ二次関数の関係が予想された(Fig. 53)。この二次関数を評価関数として、評価関数が最も凸になるところから流下仔魚数半分の値までの平均砂州波長のランクを 10 点として(平均砂州波長が 2,000~2,500m), 1,500~2,000m 及び 2,500~3,000m の平均砂州波長を 5 点、その他を 0 点とした。砂州波長のランクの点数とランクの範囲に相当する砂州の個数を掛け合わせて、砂州波長の好適性指数値を算出した(Table 5, Fig. 54)。砂州波長点として、好適性指数は 2012 年以降において低迷していることが見られた(Fig. 55)。2002~2007 年の砂州波長がアユの流下仔魚数に対し

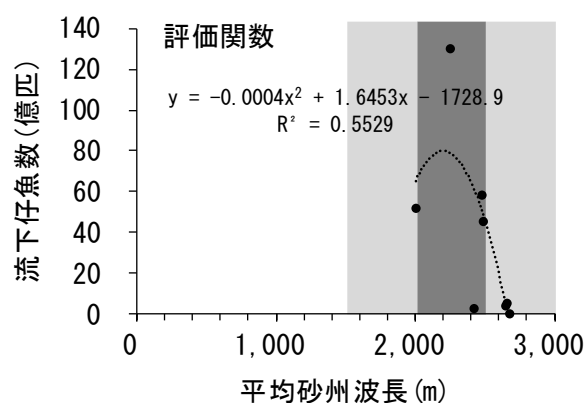


Fig. 53 Relations of number of that flow down ayu fish to average ber wavelength

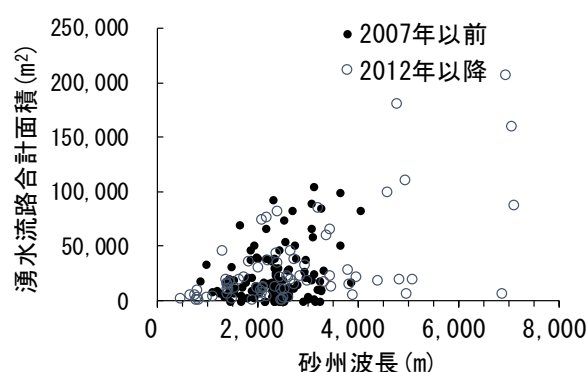


Fig. 54 Relationship total area of spring channels and ber wavelength

Table 5 Rank score of bar wavelength

砂州波長のランク	点数
1, 500m以下	0
1, 500-2, 000m	5
2, 000-2, 500m	10
2, 500-3, 000m	5
3, 000m以上	0

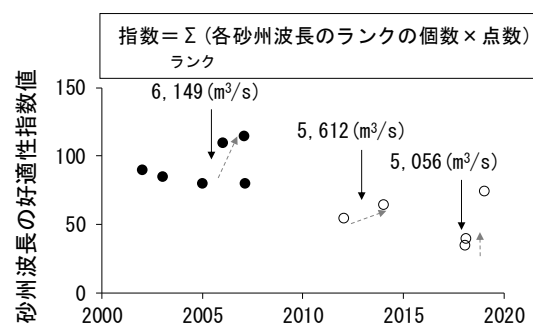


Fig. 55 Secular change of suitability index value of sand bar wavelength

Table 6 Results of RSCC parameters (August 9, 2018)

	砂州波長 (m)	蛇行度	流路数
22.1 - 20 右岸砂州	2,117	1.10	1.82
20.9 - 19.6 左岸砂州	1,411	1.31	2.74
20 - 16.6 右岸砂州	3,440	1.16	2.59
19.6 - 12.6 左岸砂州	7,115	1.10	2.71
16.6 - 9.4 右岸砂州	7,062	1.14	2.72
12.6 - 7.5 左岸砂州	4,980	1.09	2.76
9.4 - 6.6 右岸砂州	2,845	1.12	2.86
7.5 - 6.2 左岸砂州	1,430	1.19	2.86
6.6 - 5.8 右岸砂州	834	1.20	3.50
6.2 - 5.4 左岸砂州	804	1.17	3.25
5.8 - 5 右岸砂州	792	1.10	3.00
5.4 - 4.6 左岸砂州	774	1.20	2.75
5 - 3 右岸砂州	2,061	1.15	3.60
4.6 - 1.9 左岸砂州	2,745	1.17	3.69
3 - 0.6 右岸砂州	2,391	1.19	2.83

て好適な長さであることが示された。また、5,000m³/s以上の出水で砂州波長の好適性が高くなる傾向が見られた。

中規模河床形態パラメータのモードの経年変化は、2002～2007年では、砂州波長は2,000～3,000mに位置しており大きな変動は見られず、砂州蛇行度は大きくなると流路数が小さくなる傾向が見られた(Fig. 56)。2012～2014年については、砂州波長のモードは小さくなり、それに伴い蛇行度は大きくなる傾向にあった。2018年では、500～1,000mの短い砂州、4,500m以上の長い砂州に偏っており、砂州蛇行度が大きくなると流路数が増える傾向にあった。砂州波長の分布図による経年変化では、3つのパターンが確認された。2002～2007年では、砂州波長が2,000～3,000mの砂州が多く、2012～2014年、2019年については、4,500m以上の砂州波長が出現し、2018年では、500m程の短い砂州から4,500m以上の砂州まで幅広く存在している。長い砂州は19.6～9.4kmの区間に位置しており、短い砂州は、7kmから河口の間に位置していた(Table 6, Fig. 57)。長い砂州は、いずれも長大な湧水流路が存在し、流下仔魚に寄与しないと考えられる。一方で、短い砂州の湧水流路は、早瀬、淵、平瀬ができる前に本川と合流する流路が多く、アユ産卵床及び繁殖場が存在する確率は低いと考えられる。

中規模河床形態パラメータの平均値と標準偏差より、砂州波長の標準偏差が、2002～2007年までは800m以下であったのに対して、2012～2018年にかけて標準偏差は増加し2018年では2,000mを超える値となった(Fig. 58)。2002～2007年と2012～2019年の標準偏差の平均値についてt検定を用いると有意

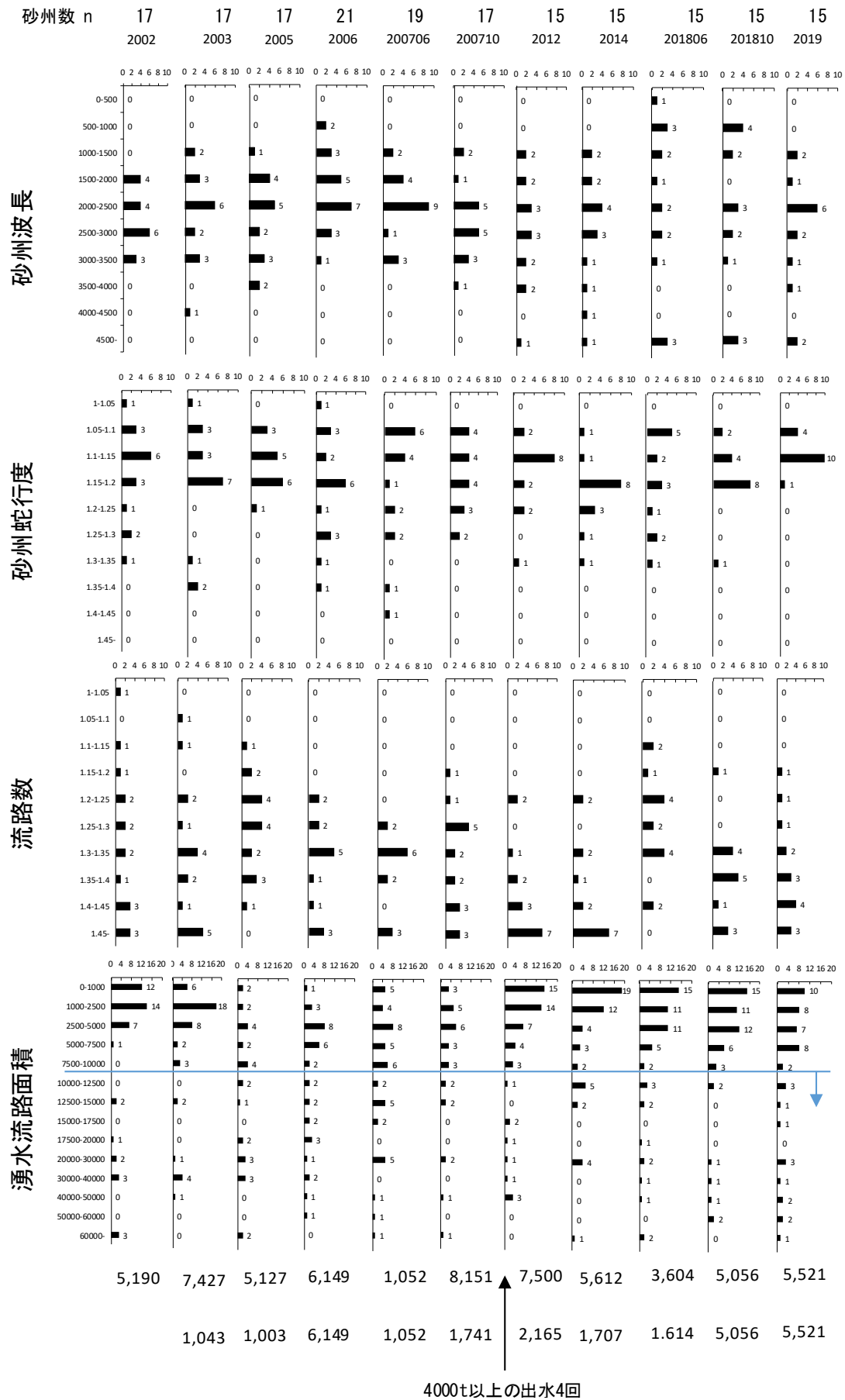


Fig. 56 Distribution of RSCC parameters and spring channel areas

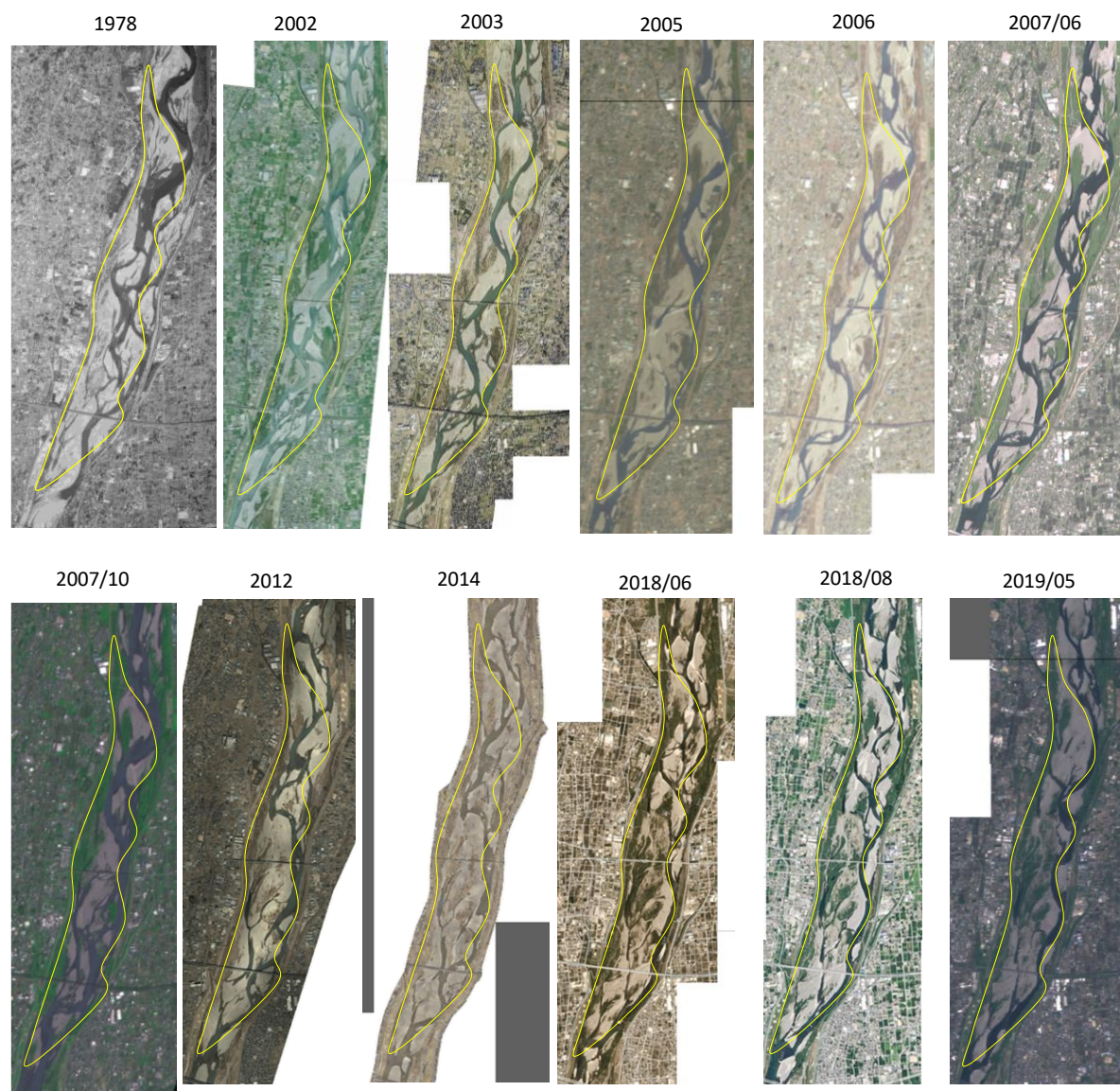


Fig. 57 Changes in the long right bank sandy bar (16.6-9.4km)

差が認められた($t=-3.52$, $df=9$, $p<.05$). 2018 年以降から 19.6~9.4km の区間に長い砂州, 7km から河口に短い砂州が存在することが要因の 1 つであると考えられる. 長い砂州は, $4,000\text{m}^3\text{s}^{-1}$ 規模の出水が 2 年に 1 回以上の確率で生じた 2012 年の時期から, 徐々に拡大した. 長大な砂州が形成過程は, 地形的特性及び歴史による特性について検討した結果より, 右岸と左岸による高低差はあまり見られなかったため, 地形的な特性ではないと考えられる. 経年変化を確認すると, 長大な砂州は, 主流路が右岸に到達せず左岸側で直線化し, 河床低下により大蛇行による蛇行が固定化することで形成されたと考えられる (Fig. 57).

アユの流下仔魚数が比較的多い 2002 年, 2005~2007 年 6 月の 4 衛星写真に着目すると, いずれも砂州波長は, 2,000~2,750m であり, 標準偏差において

は 800m 以下と小さいため, ばらつきの少ない同程度の長さの砂州が河道内に存在していたと考えられる (Fig. 58). 特に, 2006 年では, 直前に $6149\text{m}^3\text{s}^{-1}$ 規模の出水があり, 砂州波長の平均が短くなり, 蛇行度が大きく, 複列する結果となった. アユの仔魚数が対象区間内で最も多く記録された 2007 年(衛星写真: 2007 年 6 月)では, 砂州波長の平均値が 2,000m 程で, 標準偏差が 500m 程であった. そして, 蛇行度の標準偏差が大きく, 流路数の平均が 2.75 と 2,000m 程度の複列している砂州であった. 2006 年及び 2007 年の衛星写真と 2019 年の衛星写真と現況の比較では, 2019 年の 14.2~9.3km 右岸砂州に長大な砂州がある区間に, 2006 年及び 2007 年では単列のような砂州となっている (Fig. 57). そのため, 砂州波長の平均が短く, 砂州の個数についても多いことが確認された. 一方, 2003 年の地形では, 中規模河床形態の

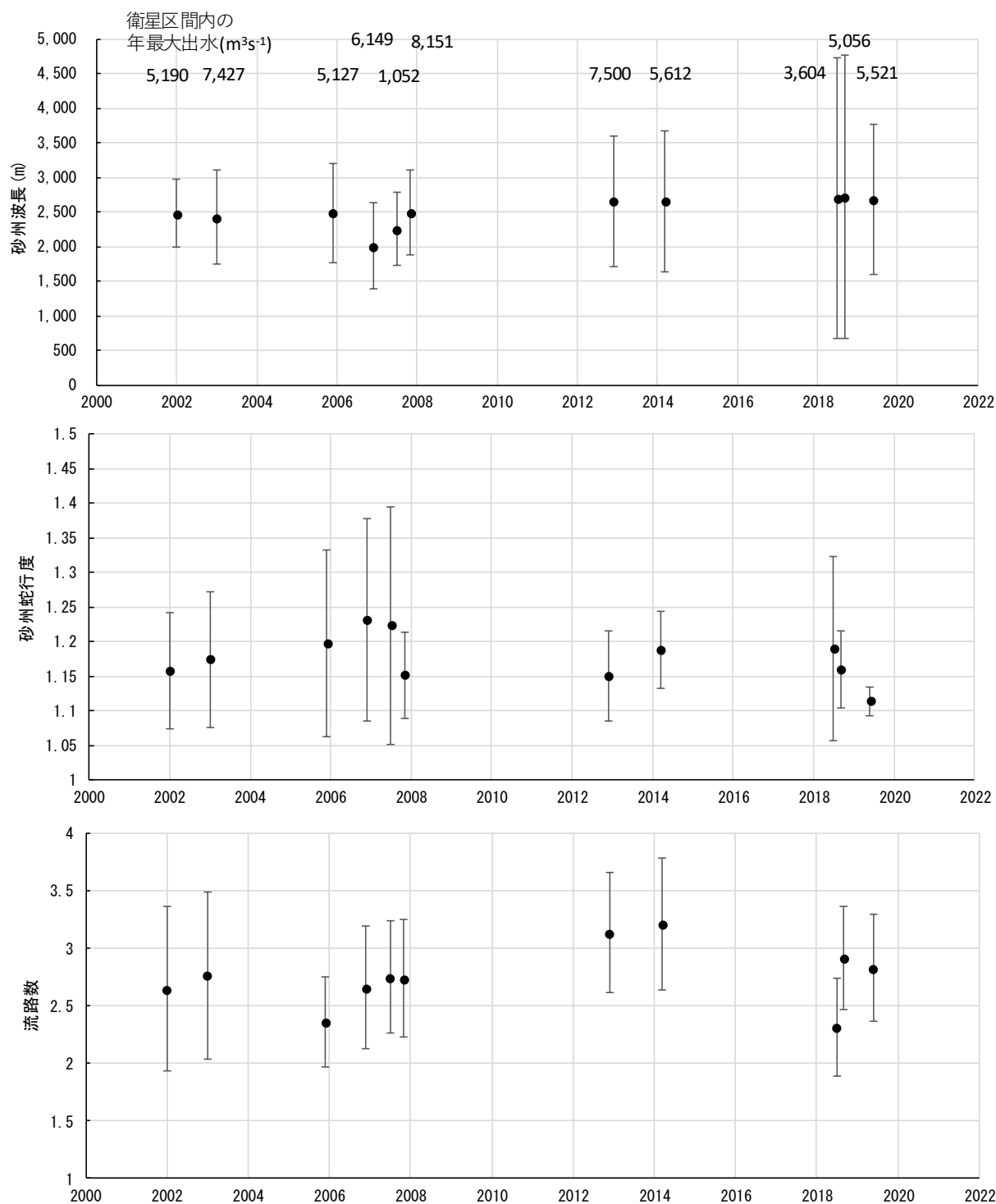


Fig. 58 Secular change of average and dispersion of RSCC parameters

パラメータの平均や標準偏差に大きな変化がなかったものの、アユの流下仔魚数が少なかった。この要因として、流路数の分布の結果から、流路数が 3.25 を超えているものが多く、流路の複列化が進行していたため、湧水流路ができにくい状況であったと考えられる。

アユ繁殖にとって好適な砂州波長について更に明確な基準を設けるために、アユの流下仔魚数と特定

の範囲の砂州波長の個数について相関分析を行った結果、1,500~2,750m で最大の相関($r=0.880$)が見られた (Table 7)。したがって、砂州波長については 1,500~2,750m がアユ繁殖にとって好適な条件であると示唆された。河川長は有限であり、砂州波長が 1,500~2,750m である同程度の砂州が多く存在するほど一砂州の面積が小さくなるため、長大な湧水流路が形成されにくくなると考えられる (Fig. 59)。

Table 7 Relations of number of larvae flowing down ayu fish tonumber of wavelengths of specific sand bars

砂州波長の範囲		2002	2003	2005	2006	200706	200710	2012	2014	201806	201810	2019	r
1000 -	3500	17	16	15	19	19	16	12	12	8	8	12	0.790
1250 -	3500	17	15	15	18	18	16	12	12	8	8	11	0.804
1500 -	3500	17	14	14	16	17	14	10	10	6	6	10	0.800
1750 -	3500	16	13	12	13	16	13	9	8	6	6	10	0.786
2000 -	3500	13	11	10	11	13	13	8	8	5	6	9	0.783
2250 -	3500	10	10	9	9	12	12	6	6	5	4	5	0.795
2500 -	3500	9	5	5	4	4	8	5	4	3	3	3	0.146
2750 -	3500	5	4	4	3	3	5	2	2	2	2	1	0.380
3000 -	3500	3	3	3	1	3	3	2	1	1	1	1	0.457
3250 -	3500	2	0	1	0	0	0	2	1	1	1	0	-0.175
1000 -	3250	15	16	14	19	19	16	10	11	7	7	12	0.740
1250 -	3250	15	15	14	18	18	16	10	11	7	7	11	0.776
1500 -	3250	15	14	13	16	17	14	8	9	5	5	10	0.786
1750 -	3250	14	13	11	13	16	13	7	7	5	5	10	0.772
2000 -	3250	11	11	9	11	13	13	6	7	4	5	9	0.738
2250 -	3250	8	10	8	9	12	12	4	5	4	3	5	0.757
2500 -	3250	7	5	4	4	4	8	3	3	2	2	3	0.309
2750 -	3250	3	4	3	3	3	5	0	1	1	1	1	0.470
3000 -	3250	1	3	2	1	3	3	0	0	0	0	1	0.512
1000 -	3000	14	13	12	18	16	13	10	11	7	7	11	0.701
1250 -	3000	14	12	12	17	15	13	10	11	7	7	10	0.723
1500 -	3000	14	11	11	15	14	11	8	9	5	5	9	0.764
1750 -	3000	13	10	9	12	13	10	7	7	5	5	9	0.776
2000 -	3000	10	8	7	10	10	10	6	7	4	5	8	0.702
2250 -	3000	7	7	6	8	9	9	4	5	4	3	4	0.814
2500 -	3000	6	2	2	3	1	5	3	3	2	2	2	-0.127
2750 -	3000	2	1	1	2	0	2	0	1	1	1	0	0.053
1000	2750	12	12	11	16	16	11	10	10	6	6	11	0.773
1250	2750	12	11	11	15	15	11	10	10	6	6	10	0.833
1500	2750	12	10	10	13	14	9	8	8	4	4	9	0.880
1750	2750	11	9	8	10	13	8	7	6	4	4	9	0.832
2000	2750	8	7	6	8	10	8	6	6	3	4	8	0.757
2250	2750	5	6	5	6	9	7	4	4	3	2	4	0.859
2500	2750	4	1	1	1	1	3	3	2	1	1	2	-0.207
1000	2500	8	11	10	15	15	8	7	8	5	5	9	0.679
1250	2500	8	10	10	14	14	8	7	8	5	5	8	0.728
1500	2500	8	9	9	12	13	6	5	6	3	3	7	0.803
1750	2500	7	8	7	9	12	5	4	4	3	3	7	0.803
2000	2500	4	6	5	7	9	5	3	4	2	3	6	0.674
2250	2500	1	5	4	5	8	4	1	2	2	1	2	0.686
1000	2250	7	6	6	10	7	4	6	6	3	4	7	0.320
1250	2250	7	5	6	9	6	4	6	6	3	4	6	0.268
1500	2250	7	4	5	7	5	2	4	4	1	2	5	0.439
1750	2250	6	3	3	4	4	1	3	2	1	2	5	0.319
2000	2250	3	1	1	2	1	1	2	2	0	2	4	-0.358
アユの流下仔魚数(億匹)		58.6	3.3	46.01	52.4	130.1		4.1	5.8			0.6	

天竜川下流域を対象として、新たに中規模河床形態の分類を検討した。本分類は、流路数及び蛇行度に基づいて行った。また、分類には、23kmの固定砂州下流の右岸砂州から河口の砂州を対象として、流路数及び蛇行度の平均値を用いた。天竜川下流域では、流路数の平均値より、直線河道、弱複列河道、中複列河道には属さず、強複列河道、弱網状河道、強網状河道に分類された。蛇行度により弱網状には、低蛇行度河道、中蛇行度河道、高蛇行度河道に分類された(Table 8)。アユの流下仔魚が多かった2002年、2005年、2006年、2007年6月は、強複列河道及び弱

網状河道に分類された($2 \leq \text{流路数}$ $\text{CN} < 3$)(Fig. 60)。強網状河道に分類されず、強網状河道の環境では不適であることが示された。一方、蛇行度に関しては、1.15以上が適しており、蛇行度が1.15の直線的な河道では、不適であると判断された。

以上より、アユの繁殖に好適な地形条件は、1,500~2,750m程度の強複列河道から弱網状河道が中規模河床形態の分類では適しており、これらの地形を管理目標とするとよいと考えられる。この好適な河床形態を維持するためには、どの程度の土砂移動量の適正についての検討が今後の課題である。

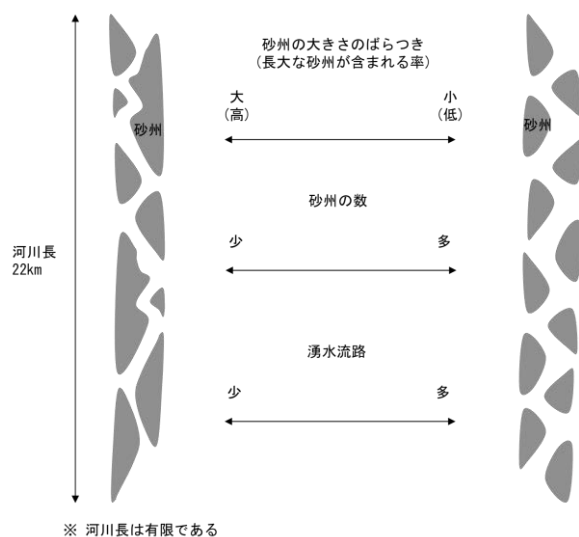


Fig. 59 Conceptual diagram of the number of sandbars by wavelength

Table 8 RSCC categories

	流路数	蛇行度	中規模河床形態
直線河道	$CN < 1.2$	$S \leq 1.20, 1.20 < S$	直線河道
弱複列河道	$1.2 \leq CN < 1.5$	$S \leq 1.20, 1.20 < S$	弱複列河道
中複列河道	$1.5 \leq CN < 2.0$	$S \leq 1.20, 1.20 < S$	中複列河道
強複列河道	$2.0 \leq CN < 2.5$	$1.15 \leq S < 1.20$	強複列中蛇行度河道
弱網状河道	$2.5 \leq CN < 3.0$	$S < 1.15$	弱網状低蛇行度河道
		$1.15 \leq S < 1.20$	弱網状中蛇行度河道
		$1.20 \leq S$	弱網状高蛇行度河道
強網状河道	$3.0 \leq CN$	$1.15 \leq S < 1.20$	強網状河道

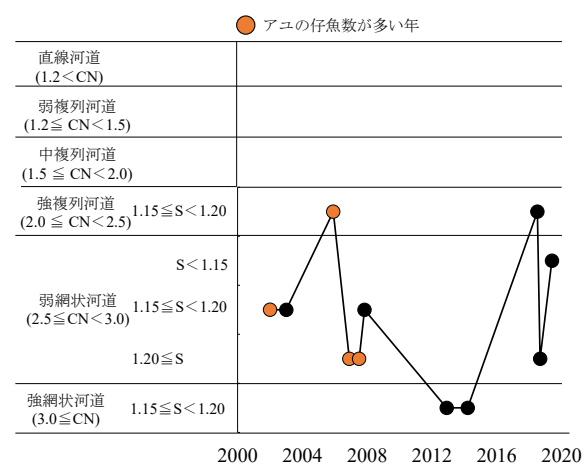


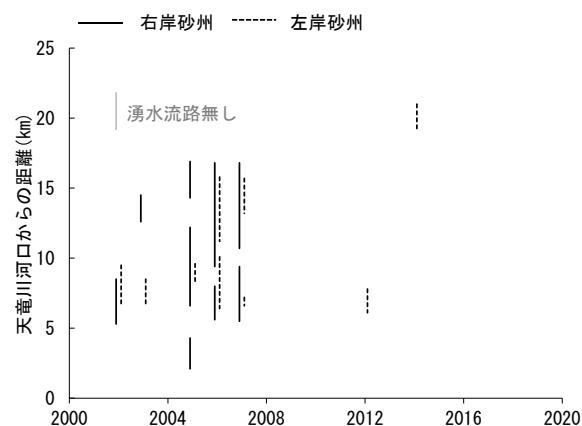
Fig. 60 RSCC categories

3.4 湧水流量が多い河床形態が形成される流程と流況

標準偏差が小さい砂州波長が 1,500~2,750m の強複列河道から弱網状河道は、アユの繁殖に適した河

床形態であることが示唆された。この結果を受けて、砂州波長が 1,500~2,750m, 流路数が 3 未満, 蛇行度が 1.15 以上の条件を設けて、アユの繁殖に適した砂州の流程を示した(Fig. 61)。2007 年の流下仔魚数の流下仔魚数に対する当時の地形は、2007 年 10 月の衛星写真の出水流量が $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 程度と高いことから、2007 年の 6 月の衛星写真を用いた。2018 年の流下仔魚数に対する当時の地形は、2018 年 8 月以降 $5,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の 2 回の出水による地形変化が予測されるため、2019 年 5 月 8 日の衛星写真を用いた。流下仔魚数の多かった年において、条件に適合した砂州の範囲は、2002 年で 14~5km, 2005 年で 18~2km, 2006, 2007 年で 12~5km であった。2012 年及び 2014 年においては、1 砂州ずつしか該当せず、2018 年度の流下仔魚数に対してアユ産卵時期に最も近い地形である 2019 年の砂州地形では、条件に該当する砂州はなかった。実際、主産卵範囲として、2006 年で 18~6km, 2007 年で 14~6km と推定され、2012 年及び 2014 年には主要な産卵範囲は確認されなかった(天竜川天然資源再生連絡会資料, 2017)。したがって、2006 年に誤差はあるものの、大まかな傾向は合致していた。

本研究の分析では、流下仔魚数が比較的多かった 2002~2007 年と少なかった 2012~現在の地形特性について検討を行った。この検討結果を用いて、1978 年以降 3 番目にアユ流下仔魚数が多かった 1986 年の河床地形に当てはめると、1,500~2,750m の強複列河道から弱網状河道は 21~16.5km, 15.6~13.4km, 7.8~1.5km の幅広い位置にあることが分かった。砂州波長は、 $2293 \pm 619 \text{ m}$ であり、アユ流下仔魚数が多かった 2002~2007 年の砂州波長の標準偏差が小さかったことが符合していた。



※2007年10月, 2018年6月及び8月は記載していない

※2018年の仔魚数には、対応する好適な砂州地形はなかった

Fig. 61 Secular change of sandy bar topography suitable for breeding ayu fish

出水による中規模河床形態のパラメータの変動について、砂州波長では、2002～2007年に $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 規模の出水が少なくとも2年に1度以上の確率で起こっていた出水が、2014～2018年の出水までの約5年間、1度も $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 規模の出水がなかった。2年に1度以上出水があった時期(2002～2007年)では、前年に出水が発生すると、砂州波長が短くなり(2007年10月除く)、蛇行度が大きくなり、複列化する傾向が見られた。5年間1度も $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 規模の出水がなかった2014～2018年の出水までの約5年間では、砂州波長が長くなり、蛇行度は変わらず、流路数は小さくなっていった。 $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 規模以下の出水では、流路を大きく変更することが少ないため、蛇行度は変わらないと示唆された。

河床波の特徴について、2002～2003年では流程が22-18kmでは単列、18-7kmでは複列になっており、7～3kmで小蛇行の河床波が見られた。2005年では、18～11km区間で小規模の河床波が確認された。2006～2007年では、大蛇行の河床波が見られ、小蛇行の河床波は確認されなかった。2012年以降、14-8km区間で流路が直線化し、小蛇行の河床波が現れた。8kmから下流は大蛇行のみの河床波が確認された。

出水による中規模河床形態の変動について、砂州波長は、 $6,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の大規模洪水により、19-3km区間において主流路が変動することにより砂州波長の伸縮が確認された。一方、 $6,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 未満の中～小規模出水では、ほとんど砂州波長の変化は見られなかったが、小蛇行の河床波を伴う河床波が確認された。その河床波は、中～小規模出水により小蛇行幅(植生間)で生じたものと考えられた。蛇行度について、2002～2007年では、波長が短くなると蛇行度が大きくなる傾向が見られ、2012年以降では、中～小規模出水後、小蛇行の河床波によって蛇行度が大きくなる傾向にあった。流路数については、出水規模に対する関係は見られなかったが、中規模出水が起こってから2年以上中規模出水がない場合、流路数が小さくなることが確認された。2018～2019年にかけて、 $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の中規模出水が複数回起こることにより、小蛇行の蛇行の頂点が大蛇行の頂点と一致する地点が増え、砂州波長が短くなった。したがって、2,000m程度の砂州を形成するためには、少なくとも2年に1度以内の頻度で、 $6,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の大規模出水が1度または $4,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の中規模出水が複数回起こることが必要であると考えられる。強複列河道及び弱網状河道を目指すには、少なくとも出水頻度が増える必要があると考えられる。

天竜川の流砂系総合土砂管理計画では、1979～2011年までの33年間の流況を繰り返した100年計算を実施し、新計画前の対策を想定した土砂収支を算定が

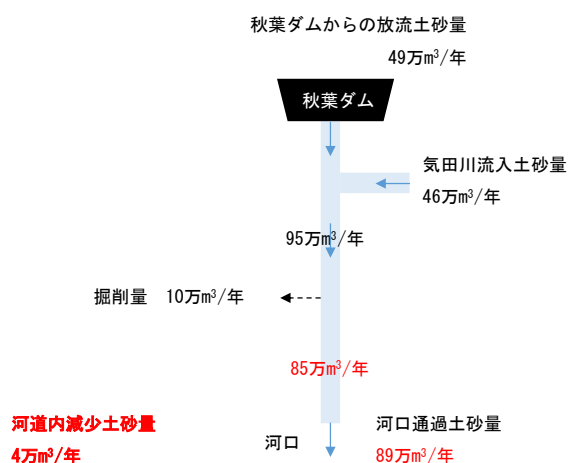


Fig. 62 100-year average sediment balance

なされた。その結果から、天竜川下流域の土砂収支は、秋葉ダムからの放流土砂量が49万 m^3 /年、支川の気田川から46万 m^3 /年が流入し、掘削量が10万 m^3 /年、河口通過土砂量が89万 m^3 であるため、毎年平均で4万 m^3 の土砂が減少する計算結果であった(天竜川流砂系協議会, 2018)(Fig. 62)。現在の河床高において、掃流力を高めるには少なくとも、現段階の計画から更に4万 m^3 /年を増やす必要があると考えられる。

3.5 湧水流路の流量が多い地形特性についての結論

現地調査と衛星写真を用いた分析により、湧水面積が大きい箇所では湧水流路の流量が多いことが確認され、両者には有意な関係が見られた。しかしながら、アユの流下仔魚数と特定の湧水流路面積以上の数を分析した結果、必ずしも、長大な湧水流路が良いとは限らず、むしろ、面積が $12,500\text{ m}^2$ 程度の湧水流路の数が重要であることが確認された。長大な湧水流路では、卵から孵化した仔魚が本川に到達することが難しく流下仔魚数に寄与しないと考えられる。

湧水流路の流量と湧水流路砂州ごとの湧水流路の流量には、正の相関が見られ、両者には有意な関係が見られた。湧水流路の流量が多い砂州は、調査及び衛星写真の分析の結果、砂州波長が2km程度の複列化しかけた単列砂州、長大な砂州が複列しかけた砂州の2種類考えられた。しかしながら、長大な砂州の長い湧水流路では、産卵が起きたとしても流下仔魚が本川まで流下できずに死亡する可能性が高いことから、流下仔魚数を増加させるためには不適であると考えられる。そこで、アユの仔魚流下仔魚数と過去の衛星写真の中規模河床形態のパラメータから砂州の評価を行った。

アユの仔魚流下仔魚数と過去の衛星写真の中規模河床形態のパラメータとの関係により、砂州波長が1,500~2,750mの強複列河道及び弱網状河道が、アユ繁殖にとって好適な地形であることが示唆された。中規模河床形態を目標として、河川管理を行う必要があると考えられる。しかしながら、現状、河床は粗粒化・固化しており、この河床を動かすために、自然による出水やダムからの放流量及び放流頻度を多くすることは極めて困難である。そのため、河床環境対策として、土砂量の増加やその土砂の粒径を細かくすることで、土砂を動かしやすくすることが可能であると考えられる。また、近年、河床の固定化に伴って、河道内の樹林化が起きている。河道内の樹林の伐採をすることも、河床の動的効果を促すためには、重要な対策の1つだと考えられる。

4. 結論

天竜川では、上流ダム群の建設、砂利掘削の影響により、河床の低下・固定化・粗粒化、砂州の単列化・樹林化、濁水の長期化が懸念されており、特に、濁水の長期化は藻類の生長を妨げ、アユの産卵場の劣化を引き起こし、アユ個体数の減少を招く原因の1つとなっている。近年、濁水の影響により、産卵床は本川ではほとんど確認されず、産卵床造成を実施しても成功には至らなかった。そこで、透明度の高い湧水環境で産卵床造成を実施したが、一時的に産卵床造成は達成されたが、出水により効果が継続されないことが課題となっていた。本研究では、アユの繁殖にとって好適な湧水流路環境について解明し、その環境の地形条件について検討し、持続的な産卵床造成に寄与する河床地形条件を求めることを目的とした。

湧水流路環境におけるアユ産卵床条件を明らかにするために、産卵床調査、物理化学的調査、生物調査を行った。物理環境調査では、流速・流量がある程度確保された、DOの高い透明度の高い水質で産卵床が発見され、これらの条件を1つでも極端に欠如する湧水環境では、アユは発見されなかった。また、湧水流路の流量が多い場所では、アユの産卵推定数は多い事が示唆された。間隙生物の多様性は、アユ産卵床が存在する箇所河床が適度に軟らかいことからDOが高く、そのDOを利用して生息していると考えられるため、生物学的に湧水流路の好適なアユ繁殖場としての指標となりうる可能性がある。

流量が多い湧水流路は、湧水流路面積が多いところであることが、調査及び衛星写真の分析より示された。さらに、アユの流下仔魚数及び湧水流路面積の経年変化の関係から、面積が12,500m²以上の湧水

流路数がアユの流下仔魚数に貢献していることが示唆された。大きな湧水流路は、流下仔魚数には寄与しないことが示され、12,500m²程度の湧水流路が良いことが確認された。

湧水流路の流量が多い河床形態について、中規模河床形態のパラメータを用いて分析を行った結果、流路数が多いと湧水流路ができにくく、蛇行度は1.15以上必要であり、砂州波長が1,500~2,750mの強複列河道及び弱網状河道が好ましいことが確認された。

出水規模については、目標の河床形態にするために、2年に1度の確率で、6,000m³s⁻¹以上の大規模出水が1度又は4,000m³s⁻¹以上の中規模出水が複数回起こることが必要であると考えられる。土砂供給量について、理想の河床形態に近づくためには、新土砂管理計画前の対策に加え40,000m³の土砂供給することが必要であると考えられる。

アユの繁殖にとって好適な湧水流路については、湧水流路単位で評価を行い、アユの繁殖のための土砂管理(目標地形の設定)については、砂州ごとの湧水流路の評価を行った。既往研究では、アユの繁殖の物理環境や水質について議論されてきたが、本研究では、これまで検討されてこなかったアユの繁殖にとって好適な中規模河床形態について議論を行った。

本研究の結果が、今後のアユの既存の湧水流路においての産卵床造成、天竜川下流への土砂供給等の対策の立案に貢献することを期待しているが、土砂の粒径といった詳細については課題が残った。今後、数値解析により検討する必要があると考えられる。

謝 辞

本論文の調査を行うにあたり、天竜川天然資源再生推進委員会、天竜川漁業共同組合、いであ株式会社、高橋真司様、野澤利治様、足立京子様には、調査をご協力頂きました。また、高橋勇夫先生には、アユの仔魚数に関する情報提供を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 泉公祐・竹門康弘・兵藤誠・喜多村雄一・角哲也

- (2016) : 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実験, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, I_439-I_444.
- 泉公祐 (2016) : 天竜川におけるアユ産卵床造成のための湧水流路の再生手法に関する研究, 京都大学修士論文, pp.19-32.
- 黒木幹男・岸力 (1984) : 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, 第 342 号, pp.87-98.
- 国土交通省河川局 (2008) : 天竜川水系河川整備基本方針, p.13.
- 鈴木邦弘・鈴木勇己・谷高弘記・井口明 (2014) : 興津川と天竜川におけるアユの産卵生態からみた現行の禁漁措置の妥当性, 静岡水技研研報 46, pp.85-91.
- 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
- 水産庁 (2009) : アユの人工産卵床のつくり方.
- 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) : 平成 18-20 年度 天竜川アユ資源保全調査報告書, 天竜川漁業協同組合 たかはし河川生物調査事業所.
- 高橋勇夫 (2012) : 平成 21-23 年度 天竜川アユ資源保全調査報告書, 天竜川漁業協同組合 たかはし河川生物調査事業所.
- 高橋勇夫・東健作 (2016) : 天然アユの本, 築地書館株式会社, pp.xii, 143-157.
- 高橋勇夫 (2017) : 2016 年におけるアユ仔魚の流下, 第 33 回天竜川天然資源再生推進委員会配布資料.
- 高橋勇夫 (2019) : 2018 年遡上群(2017 級群)の流下～産卵, 2018 年度第 3 回天竜川天然資源再生推進委員会配布資料.
- 高橋真司・兵藤誠・谷高弘記・角哲也・竹門康弘 (2018) : 天竜川における濁度成分の流程変化に基づく砂州地形の濾過機能推定, 防災研究所年報第 61 号 B, pp.739-747.
- 中部地方整備局 (2009) : 天竜川水系河川整備計画, pp.1-2.
- 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会 (1973) : 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告, 210, pp.65-91.
- 浜松河川国道事務所(不明) : 天竜川の概要 天竜川基本データ 近年の著名出水,
- http://www.cbr.mlit.go.jp/hamamatsu/river/gaiyo_tenryu/ (取得日 : 2019 年 10 月 18 日)
- 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.
- 宮川幸雄・森 照貴・小野田幸生・萱場祐一 (2014) : 濁水に含まれる無機物の堆積が付着藻類の一次生産に及ぼす影響, 土木技術資料, 56-2, pp.34-37.
- 村井彰弘・竹門康弘・角哲也 (2012) : アユの産卵に適した瀬の河床条件に関する研究, 卒業論文, pp.10-24.
- 村本 嘉雄・藤田 裕一郎 (1978) : 中規模河床形態の分類と形成条件, 水理講演会論文集, 22 巻, No.1, pp.275-282.
- 谷高弘記(2012) : 蘇れ、アユ躍る天竜川—個人の取り組みから漁協の取り組みへ—, 天竜川漁業協同組合.
- 山本晃一 (2004) : 構造沖積河川学—その構造特性と動態—, 第 10 章河道の平面形状, 山海堂.
- 山本晃一 (2010) : 沖積河川—構造と動態—, 技報堂出版株式会社, pp.17-18.
- 渡邊康玄 (2019) : 砂州 (中規模河床波) の形成と変化, 応用生態工学会若手のつどい勉強会 2019 資料.
- Brierley GJ and Fryirs KA A (2005) : Geomorphology and River Management:Applications of the River Styles Framework, Blackwell, pp.79-142.
- Choi Mikyoung (2014) : Studies on ecological evaluation of reach-scale channel configuration based on habitat structure and biodiversity relations, Kyoto University.
- Hendry K & CraggHine D (1997) : Restoration of riverine salmon habitats. Fisheries Technical Manual 4 Environment Agency, Bristol.
- Kondolf G M & Wolman M G (1993) : The sizes of salmonid spawning gravels. Water Resources Research 29, 7, pp.2275-2285.
- Rosgen DL (1994) : A classification of natural rivers, Catena 22, pp.169-199.
- Shannon CE (1948) : A mathematical theory of communication, At&T Tech J. , Vol27-3, pp.379-423.

(論文受理日 : 2020年10月30日)