

アユの産卵に適した河床形態に関する研究

角 哲也・中島佳奈*・竹門康弘・鈴木崇正**

* 情報学研究科

** 東邦ガス

要 旨

天竜川では、土砂吸引バイパスによる佐久間ダムから下流域への土砂供給が計画されている。本研究では、土砂供給がアユの産卵環境にどのような影響をもたらすのかを予測するために、航空写真から産卵場適地を推定する方法について検討を行った。既往研究と現地調査により、礫底で比較的最近に土砂が堆積した瀬がアユの産卵に適しており、砂州と瀬の位置関係がアユの産卵適地の重要な条件の一つであることが推定できた。この情報をもとにアユの産卵に関する SI モデルを作成し、産卵適地を航空写真上で抽出した。さらに、過去の航空写真を用いて、これら産卵適地の経年変化とその原因について考察を行った結果、砂州波長の伸張に伴って産卵適地の箇所数が年々減少する傾向が明らかとなった。

キーワード：アユ、産卵床、河床軟度、GIS、天竜川

1. はじめに

近年、河川横断構造物の設置や河川改修といった人為的インパクトが物理環境と生態環境に及ぼす影響を定量的に予測する環境アセスメントと、ともに劣化してしまった生態環境を再生するための手法・技術の必要性が叫ばれている。とくに、河川で漁業を営む人々にとって、河川環境への人為的インパクトによる漁獲高の変化は死活問題につながるため、物理環境の変化が生態環境に及ぼす影響の解明が切望されている。

河床の物理環境の変化については、近年の計算機能力の急激な発達によって、ある程度の予測が可能になりつつあるが、生態環境の予測については困難を極めており、信頼に足る環境アセスメントの実現を阻んでいる。この予測が困難な理由として、物理環境の変化が生態環境に及ぼす影響の定量的評価法が十分には確立していないことがあげられる。土砂量や流況等の物理環境の変化と生物の変化との因果関係を定式化するためには、河床地形や水理構造と対応する生息場に注目することが有効である。

そこで、本研究ではアユの産卵環境に着目し、航空写真から産卵場適地を推定する方法について研究を行った。なお、研究対象として、静岡県天竜川下流域を選択した。

2. 天竜川におけるアユの産卵環境

2.1 天竜川の河道特性

天竜川は長野県の諏訪湖に発し、静岡県浜松市東側

で遠州灘にそそぐ流域面積約5,090km²、幹川流路延長213kmの国が管理する一級河川である。流域平均年間降水量は2,000mmであり、1930年代半ばから水力発電などのダムが設置されてきている。一方、天竜川流域には、中央アルプス山系及び南アルプス山系の3,000m級の山々が連なるとともに、中央構造線をはじめとする構造線が走っており、崩壊地も多く日本でも有数の土砂流出の多い地域である。このため、流域内に建設された貯水15ダム（本川5ダム、支川10ダム）は堆砂が進行しており、排砂バイパス（美和ダム、松川ダム、小渋ダム）、カーテンウォール付・ゲートレス放流管（片桐ダム）、掘削・浚渫（佐久間ダム、秋葉ダムなど）などの日本を代表する堆砂対策が実施・計画されている。

このような豊富な土砂生産条件のもとで、ダム群完成以前の天竜川の河床形態は、複列砂州が形成され、砂礫河原が広がる河川環境であった。しかし現在では、土砂供給が少ないため複列砂州から交互砂州（＝単列砂州）へ変化していることが航空写真により確認される。5～10km 区間において、S22 から S36 にかけて複列砂州が交互砂州（＝単列砂州）へ変化しているが、この間に砂利採取（S29 開始）や佐久間ダム建設（S33 竣工）が行われている。10～20km 区間においても、S36 から S41 にかけて複列砂州が交互砂州（＝単列砂州）へ変化しているが、3.3～25km 区間では S30 代後半から砂利採取量が増加（S40～42 で最大採取量）している。

さらに、河床材料の粒径分布にも変化があり、下層（表面-1m）の河床材料は、経年的に粗粒化もしくは細

粒化傾向はみられない。しかし、表面の河床材料は縦断変化から見てダムによる粗粒化の傾向がみられる。その結果、砂礫がゆるく堆積した軟底ができにくくなっている。これによって、アユが産卵しにくくなる等、生物にとって棲みにくい環境となっている。

天竜川では、古くから相次ぐ大出水に見舞われ、さらに、沿川の浜松市等の市街化が著しく進み、洪水被害の危険性は増加の傾向にあり、抜本的な治水対策が強く望まれていた。このため、本格的な堆砂対策の実施により利水ダムへの治水機能の追加と下流域への土砂供給の促進を目的とするダム再編事業が佐久間ダムを中心に計画されており、侵食海岸の保全等、流砂系の総合土砂管理の実践事例としての期待が高まっている。この事業により、約50年に渡る河川の土砂環境は今後大きく変化していくことが予想され、これに伴う環境への影響を予測することが必要となっている。

以上のような現状を把握したうえで、天竜川ダム再編事業による環境への影響を評価する際には、目標となる環境を考えることが必要となる。天竜川の場合は、天竜川のダム群完成以前の河川環境を目標とすることが考えられる。

2.2 天竜川におけるアユの産卵特性

アユの産卵に必要な条件として、石田・一条(1990)は、河川の瀬であること、粒径が10mm以下であることおよび砂礫が浮き石状態、すなわち、足で踏むとザクザクしている必要があることを述べている。また、石田(1976)は5つの河川を調べ、河口から標高50mまでの平均河床勾配と産卵床の河口からの距離とが相関が高いことを示し、流速(20-120cm/s)、水深(10-60cm)、粒径(10mm以下で特に5mm以下)および浮き石状態かどうかパラメータであると指摘した。また、西田(1978)はアユの産卵場所が淵尻の瀬頭に位置することを指摘しており、産卵適地の条件を河床地形と結びつけて検討することの重要性を示している。このように、アユの産卵場を評価する際、河床環境に着目する事が有効である。

天竜川において、現状では深瀬が主な産卵場となっているが、河床環境を改善すれば、多くのアユが浅瀬にて産卵すると期待できる。2009年5月に天竜川漁業協同組合からの委託によりたかはし河川生物調査事務所が作成した「平成18-20年度天竜川アユ資源保全調査報告書」(2009)によると、2006年に河口から15-15.5km付近の寺谷(2箇所)で、そして2007年に河口から約10.5km上流の池田(3箇所)においてアユの産卵場の造成が行われ、そのうち寺谷の1箇所を除く地点で産卵が確認された。

以上の結果を航空写真上にプロットし、これらの地点の特徴を抽出した結果、「少なくとも片岸が裸地である部分が存在する砂州の下流側の軟底で、砂州を乗り越える瀬の上下流」が産卵適地と推定された。軟底とは、河床の砂礫が浮き石状態、すなわち、足で踏むとザクザクしている状態である。これが好適である理由として、アユは産卵をする際に、卵を増水や天敵から守るために、表層部の砂利を掘り起こして卵を産む習性があり、軟底が産卵しやすいという行動的な理由と、「軟底の瀬」では間隙水の流速が大きいために産みつけられた卵に多くの溶存酸素が供給されることが期待されるという適応的な理由とが考えられる。

本研究では、この河床の軟らかさを「河床軟度」と定義し、河床軟度が高い礫底の瀬をアユの産卵にとって最適な河床環境であるとした。

3. 研究手法

3.1 研究の流れ

既往の研究より、アユの産卵床に適した環境は、河床軟度の高い浮石状態の砂礫であると推定された。このような場所を特定するためには、河床調査を詳細に実施する方法が考えられるが、より簡便な方法で推定する方法として、航空写真から産卵場適地を推定する手法の開発を行った。

本研究は以下に示す①～⑦の手順で行った。

- ①今までに産卵が確認された地点を当時の航空写真上にプロットし、それらの地点の特徴をリストアップし、その結果からアユの産卵場の適地の仮説を立てる。
- ②次に、天竜川の河口から船明ダムまでの区間においてArcGISを用いて航空写真上に等高線を描き、瀬を特定する。
- ③そして、それらの瀬について瀬と砂州の位置関係、大きさ、植生の有無などの特性値をGISを用いて抽出する。
- ④次に、抽出したデータをExcelに取り込み、それらの関係性を分析する。
- ⑤以上で得た関係と産卵が確認された地点のデータよりアユの産卵場に関するSIモデルを作成し、これを用いてあらためて産卵適地を航空写真上に抽出して記す。
- ⑥SIモデルを0～30kmの区間にあてはめて天竜川のアユ産卵適地の分布(ポテンシャルマップ)を予測する。
- ⑦最後に、得られたSIモデルを多年度において撮影された航空写真に適用し、天竜川の河道の歴史的变化に対するアユの産卵適地の経年変化を調べ、考察を行う。

ここでSI(Suitability Index)とは、HEPにおいて「質」を表す指標の一つであり、評価種の生息条件を規定する植物、繁殖条件などの環境要因別に、0(全く適さず)から1(最適)までの数値で適正度合いを示すものである。またHEPとは、Habitat Evaluation Procedure(ハビタット評価手法)の略称で、野生生物のハビタット(生育・生息環境)としての適否という視点から、生態系を総合的に評価するために開発された手法である(例えば、田中(2006))。総合的というのは、ハビタットのえさ条件や繁殖条件などの「質」、ハビタットとして機能する「空間(面積)」、ハビタットとして存在する「時間(期間)」という3つの異なる視点から評価することができるからである。

3.2 河床環境条件の現地調査

(1) 現地調査地点

天竜川の河口から約22km地点までの範囲で、車で調査地点付近までアプローチすることが可能であり、産卵がおこなわれている可能性が高い地点を対象とした。現地調査は平成22年11月に実施したが、最近2年間で実施された河道内の樹林伐採と、その後の出水による大規模な河床変動により、砂州地形や水の流れが大き

く変化しており、当初の予定地でも調査困難な場所もあった。そこで、天竜川漁業協同組合の助言を参考に、アユの産卵が行われている可能性が高いFig.1に示す合計8箇所において現地調査を行った。

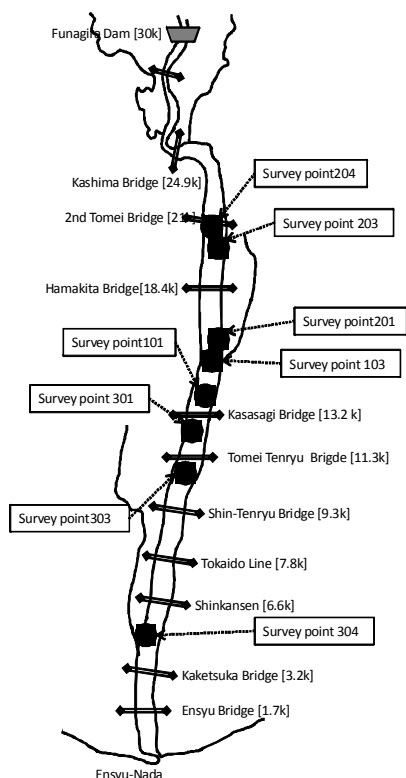


Fig. 1 Survey Area

(2) 現地調査項目

現地調査では各地点においてGPSの値の測定、流速、水深、砂州の貫入試験、砂州内のDOの測定を行った。まず流速は各調査ポイントにおいて5回ずつ流速計を用いて水面から60%の深さの位置で計測し、この値を平均流速とした。

砂州の貫入試験は長谷川式貫入試験機を用いて計測を行った。長谷川式貫入試験機は2kgのおもりを50cmの高さから自由落下させるといったものである。調査ではそのおもりを落下させるごとにその貫入深の値を記録していき、その値が変わらなくなった時点、もしくは値が変わり続ける場合は貫入深が50cmを超えた時点でその場所での計測を終了することとした。この結果から得られる貫入深(cm)の値をおもりの落下回数で割った値を河床軟度(cm/回)と呼ぶことにする。つまり、この値が大きければその場所の河床は柔らかく、反対に、小さければ硬い河床であるということになる。

本研究では、河床軟度として、アユが石を動かして産卵をする範囲として深さ10cmまでの値と、現地調査においてDOの値を図った位置までを考慮する深さ20cmまでの値についてそれぞれ整理した。しかしながら、天竜川はアーマ化が進行していることを考慮し、以降の考察はすべて深さ20cmまでの河床軟度のデータを用いている。

DOの測定は、各調査ポイントにおいて河川の表流水と陸上（砂州の礫下）、水中（河床の礫下）の3か所から採水を行って、DOメーターを用いて計測を行い、

複数のメーターが示す値のうち、はずれ値を除いた他の値の平均値をその箇所での値とした。陸上と水中のDOの測り方は、それぞれ地表面から深さ20cmのところに球形のスポンジを先端にかぶせたチューブを埋設し、水を一定量吸い出してDOメーターで測定した。

4. 現地調査結果

4.1 河床軟度と環境要因の関係

河床軟度とDOの関係は、Fig.2に示すように、河床軟度が高いほどややDOが大きく、河床軟度が低いと、DOが小さくなる場合が確認された。これは、河床が固いと河床材料が攪乱されることが少なくなり、間隙水が外からの酸素の供給を受ける機会が少なくなるためと考えられる。また、瀬の上流側と下流側においてDOの値に差があるか検討をするためにt検定を行ったが、2つの間に有意な差は見られなかった。

次に、水深と河床軟度の関係は、Fig.3に示すように、水深が浅い場所の河床軟度の値は場所によりさまざまであり幅広い値をとるが、水深が深くなるに従い河床軟度の値の散らばりは少なくなっていた。これは、流心部は流速が速く、掃流力が大きいいため河床が掘られるが、掘れ続けることはなく、その場所はアーマ化することによって河床が硬くなると考えられる。

水深とDOの関係を見ると特に二つの間に関係は見られなかった。同様に、流速とDOの関係、流速と水深の関係からも関係性は見られなかった。

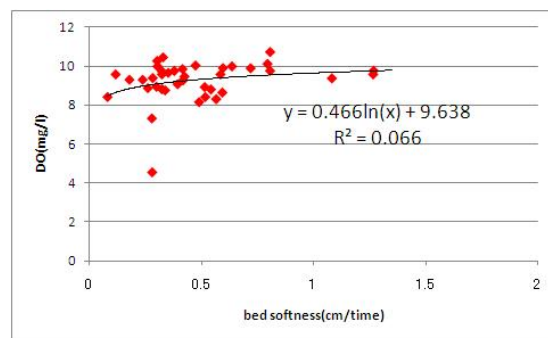


Fig. 2 Bed softness and DO

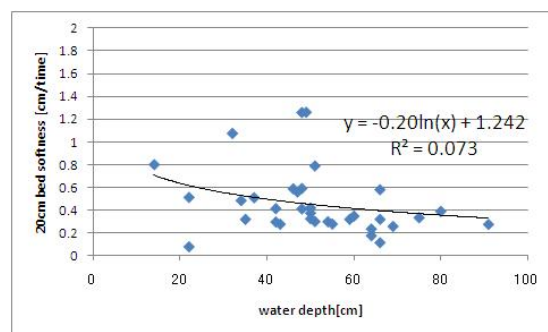


Fig. 3 Water depth and 20cm bed softness

4.2 瀬の河床軟度と砂州位置の関係

砂州の下流側に軟底が多いという既往の知見から、現地調査を行った地点のGPSの値からArcGISを用いて航空写真上に現地調査地点をプロットし、対象とした瀬と、その上下流に位置する砂州の相対的な位置関係を評価した。

具体的には、砂州の上流端から下流端までの水際線

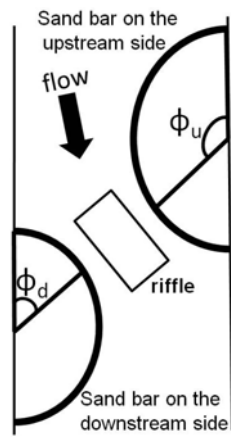
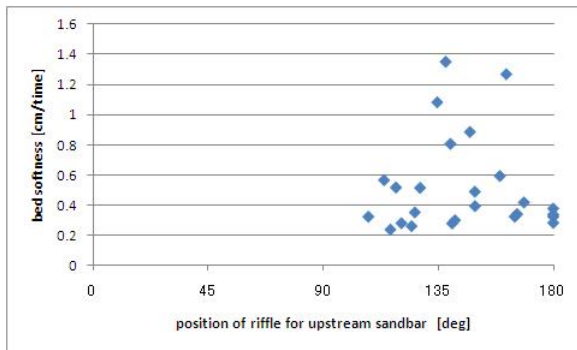
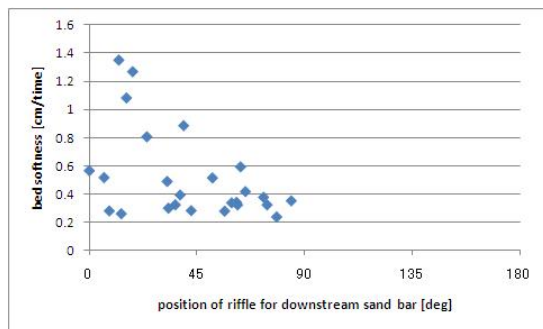


Fig.4 Position of riffle to upstream/downstream sand bars



(a) Position of riffle to the upstream sandbar



(b) Position of riffle to the downstream sandbar

Fig.5 Position of riffles to sandbars and bed softness

の長さとして、上流端から瀬の始点と終点までの長さをそれぞれ計測し、それらの割合を Fig.4 のように砂州の上流端を0とした場合の偏角 ϕ ($0 \leq \phi \leq 180^\circ$) で表現した。なお、対象とする1つの瀬に対しては、上流側に位置する砂州と下流側に位置する砂州の2対が存在し、それぞれに対して偏角 (ϕ_u (上流側砂州), ϕ_d (下流側砂州)) を定義した。なお、砂州の定義については、流路によって区切られている場合は水際線を境界とし、そうでない場合は、水際線が堤防にぶつかった点、または最も砂州の幅が狭まった点を砂州の境界とした。

このようにして得られた偏角と河床軟度の関係を Fig.5 に示す。これによれば、河床軟度の値が大きい、つまり河床が柔らかい箇所は、上流側砂州に対しては約 150° 付近、下流側砂州に対しては約 20° 付近に存在していることがわかった。この結果より、航空写真

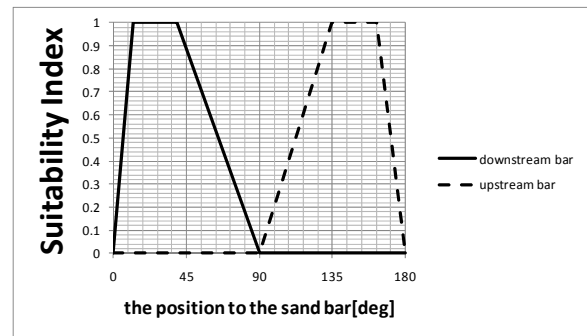


Fig.6 SI model of the position of riffle to sandbars

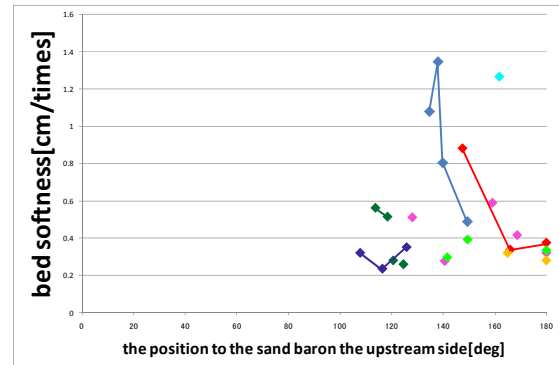


Fig.7 Position to the upstream sand bar and the bed softness

からアユの産卵に適する範囲を予測することができる。

表層20cmまでの河床軟度と偏角で表された瀬の砂州に対する位置を示したFig.5において、河床軟度の値が0.8cm/回以上である偏角の範囲をSI=1とすると、瀬の上流側砂州に対してはFig.6のように $\phi_u = 135^\circ \sim 162^\circ$ の範囲が、瀬の下流側砂州に対しては $\phi_d = 12^\circ \sim 39^\circ$ の範囲のSI=1となる。

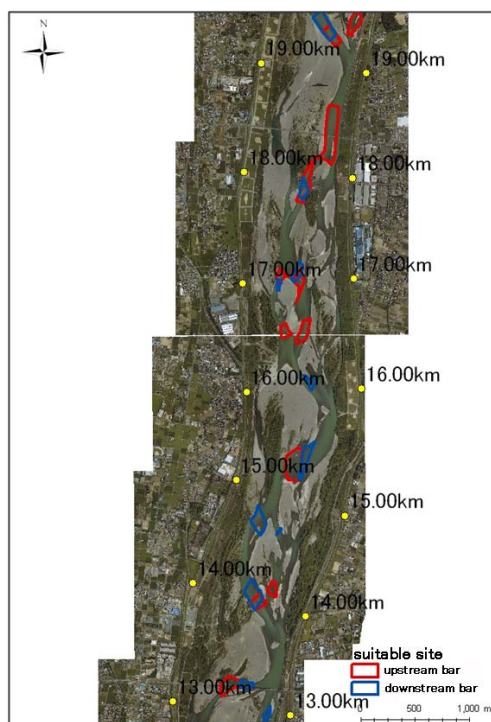
なお、調査地点とした一つの瀬ごとに、河床軟度の変化を上流から順に線で結んだ比較したものをFig.7に示す。これによれば、概ね、瀬の上流側が河床軟度が高く、下流側に行くにしたがって低くなっていくことがわかる。これは、瀬の上流側の淵に堆積した砂礫が、洪水後に瀬の上流側から安定して供給されて、常に新鮮な堆積層を形成する一方、下流側は流れによって細粒分が掃流されて締め固まるためと考えられる。

5. 天竜川でのアユの産卵適地の経年変化

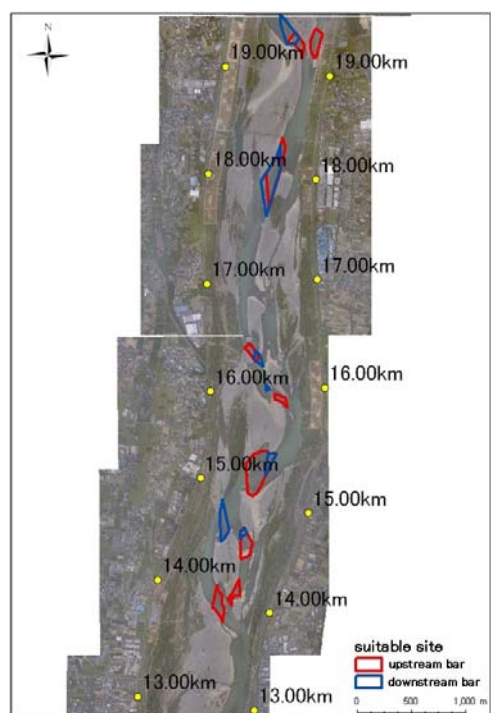
5.1 産卵適地の経年変化

上で得られたSIモデルを用いて、1981, 1983, 1987, 1991, 1999, 2006, 2007年の航空写真上に、砂州と瀬の位置関係からSI=1となる範囲を調査し、それらが重なった範囲を産卵場の適地と考えた。Fig.8に2006年8月および2007年8月の13-19km区間の解析結果を示す。

これらから得られた各年における産卵場の適地と考えられる箇所数を数え、その経年変化を整理したものをFig.9に示す。これを見ると、産卵場の適地と考えられる箇所数は1999年までは減少しているが、実際にアユの流下仔魚数が年々減少してきていることに一致する。しかし、1999年以降は産卵場の適地の箇所数が



(a) Aug.2006



(b) Aug.2007

Fig.8 Suitable spawning area from 13 to 19km river channel section derived by the SI model

増加していることがわかる。

Fig.9には、この変化がどの河道区間で顕著に見られるかを調べるため、河口から船明ダムまでの範囲を10kmごとに3つの区間に分けた値も整理している。すると、10～20kmの区間の産卵適地の箇所数の変化が最も顕著であり、1981年から1999年にかけて、適地は半分以下になり、2000年代にも大きく増減していることがわかる。

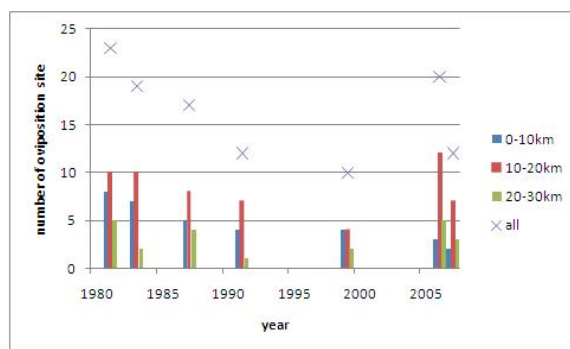


Fig.9 Time trend of suitable spawning area depend on river channel sections

5.2 産卵適地と砂州波長の関係

産卵適地が経年的に変化してきた理由を検討するために、Fig.10に対象区間の砂州の波長の経年変化を示す。1999年までは砂州の波長が年々長くなり、2006年にかけては短くなってきており、産卵場の適地が1999年までは年々減少し、その後2006年までは増加していることと相関が高いと考えられる。ここで言う砂州の波長とは、各年の航空写真から、側流ではなく、本流のみを考えた場合に見られる大きなスケールでの砂州の集まりを一つの砂州とみた場合の、砂州の上流端から下流端までの直線距離のことを指し、航空写真からArcGISを用いて計測したものである。

次に、砂州の波長の経年変化を流程ごとに検討した。まず、河口から船明ダムの区間を10km間隔で分けた場合、10～20kmの区間が、時間経過にともなう砂州波長の変化が顕著に現れ、20kmから船明ダムの区間ではそのような傾向はみられない。これは、河口からの距離が約22kmの地点から流路が大きく蛇行し、この地点から上流は川の両側が山に囲まれており、滞筋幅も狭く、砂州が変化しにくい環境にあることが要因であると考えられる。また、この結果は、アユの産卵適地の箇所数が10～20kmの範囲で大きく変化していることと関連があると考えられ、最も砂州の波長が長くなっている区間において産卵適地の箇所数が減少し、砂州の波長が短くなっている区間において産卵適地の箇所数が増加している。

これを5km間隔の砂州波長の変化として示したものをFig.11に示す。これによれば、特に15～20kmの区間で砂州の波長が1800mから2500mと大幅に増大している。Fig.12には、この区間での1981年と1999年における産卵場の適地を示すが、1981年にはこの区間内に4か所の産卵適地があったが、1999年には1か所のみになってしまっている。減少した理由としては砂州の波長が長くなったことにより、上流側砂州に対する適地と下流側砂州に対する適地が重ならなくなったためと考えられる。

15～20kmの区間で最も砂州の波長が長くなった理由としては、上流からの土砂供給と洪水流量の減少により、砂州の固定化と樹林化が進行し、その影響がこの区間に最も大きく出ているものと考えられ、その結果として、この区間のアユの産卵場の適地の減少にもつながっているものと推定される。

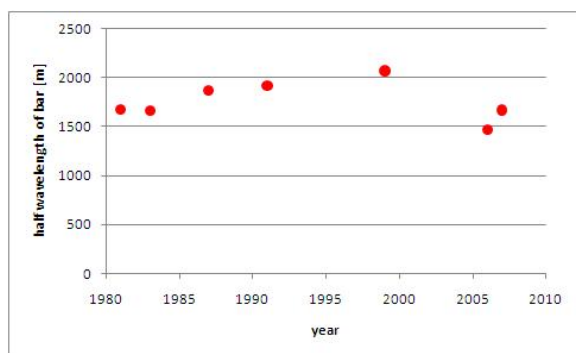


Fig.10 Time trend of sand bar wave length

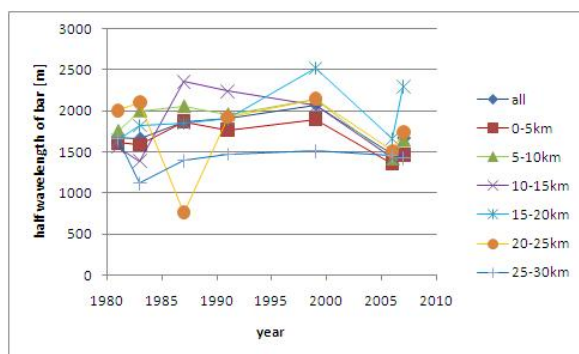


Fig.11 Time trend of sand bar wave length by 5km river channel sections

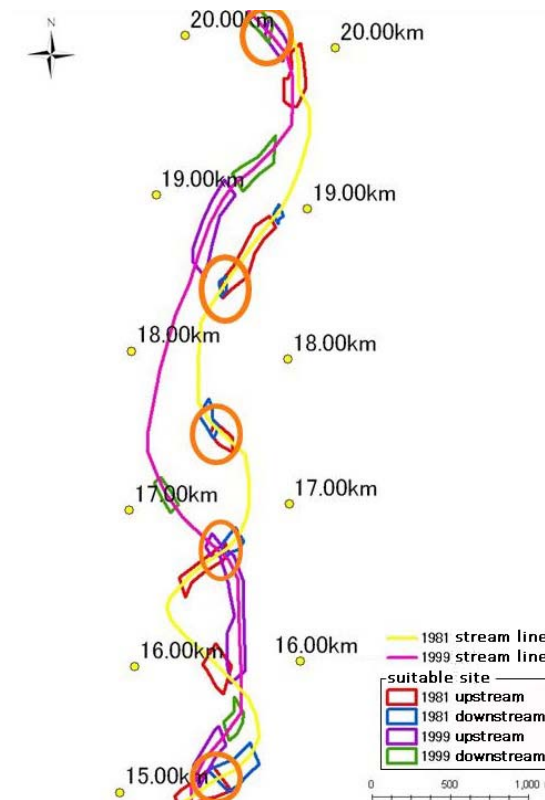


Fig.12 Time trend of suitable spawning areas from 15-20km

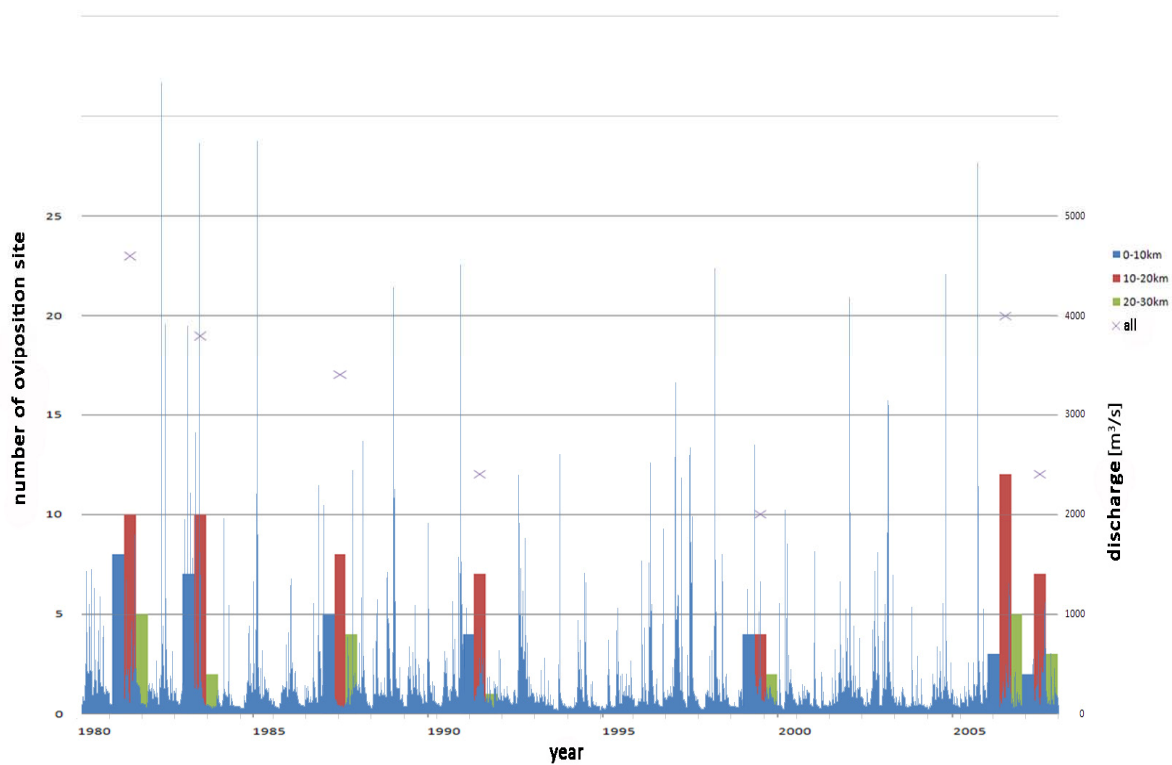


Fig.13 Major flood events and time trend of suitable spawning areas

また、15～20kmの区間において大きく流路が変化したのは1981年から1983年の時であるように見えるが、これはFig.13に示す時間流量の時系列で明らかのように、1982年の約9,000m³/sの年最大流量が影響していると考えられる。大規模出水時に河床が大きく変化し、その後上流からの土砂供給がないために河床地形は単調化してきたと考えられる。従って、砂州の波長を昔のように短くして、礫底で新鮮な土砂が堆積する瀬を増加させて、良好なアユの産卵環境を再生させるためには、上流ダムからの適正な土砂供給が重要である。

6. まとめ

本研究では、土砂供給がアユの産卵環境にどのような影響をもたらすのかを予測するために、航空写真から産卵場適地を推定する方法について検討を行った。

既往研究により、礫底で比較的最近に土砂が堆積した瀬がアユの産卵に適しており、砂州と瀬の位置関係がアユの産卵適地の重要な条件の一つであることが推定された。この情報をもとにアユの産卵に関するSIモデルを作成し、産卵適地を航空写真上で抽出した。さらに、過去の航空写真を用いて、これら産卵適地の経年変化とその原因について考察を行った。その結果、産卵適地の箇所数は年々減少しており、減少の理由として砂州波長の伸張が影響しており、その背景として大規模洪水の発生による河床変動と上流ダム群による土砂供給の減少が影響していることが示唆された。

なお、上記のアユの産卵適地が形成される土砂水理学的なプロセスについては、今後の研究課題である。また、本研究では佐久間ダム完成後の変化のみを調査したが、ダム建設前からの変化や、ダム完成後のダムからの土砂供給量との関係を調べることで、ダム再編

事業による環境への影響評価をより詳細に行うことが可能になると考えられる。

さらに、本研究は天竜川を対象に研究を行ったが、河床形態とアユの産卵環境に関する調査研究は、全国の他の多くの河川で実施されている。本研究で行った河床軟度等に関する調査を全国の河川においても実施することにより、アユの産卵に適した河床条件をより一般性のあるものにすることが可能になると考えられる。これらの結果から、アユの産卵場を維持・管理していく上での管理指標を具体的に決めることができれば、全国の河川において河床環境の改善が促進され、日本の代表的な水産資源の1つであるアユの個体数の増加にも大きく貢献するものと思われる。

謝 辞

天竜川における現地調査に関して、天竜川漁協組合の方々の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 石田力三、一条エリ子(1990)：アユ産卵用人工河川，Proc. of the Int. Symposium on Fishways, pp.81-84.
- 石田力三(1976)：アユの産卵行動をさぐる，アニマ，No.43, pp.12-20.
- 天竜川漁業協同組合，たかはし河川生物調査事務所(2009)：平成18-平成20年度 天竜川アユ資源保全調査報告書。
- 西田睦(1978)：琵琶湖のコアユの産卵形態，Bulletin of the Japanese of Scientific Fisheries.
- 田中章(2006)：HEP入門〈ハビタット評価手続き〉マニュアル，朝倉書房。

Evaluation of Suitable River Morphology for Spawning of Ayu-Fish

Tetsuya SUMI, Kana NAKAJIMA*, Yasuhiro TAKEMON and Takamasa SUZUKI**

* Graduate School of Informatics

** Toho Gas Co., Ltd.

Synopsis

Reduction of the Ayu-fish production has been recognized as an influence of dam constructions by decreasing sediment supply in the Tenryu River. Recently, comprehensive sediment management by introducing sediment bypass technique at Sakuma dam has been planned in order to recover this sediment routing system in the river basin. Based on the background, it is requested to assess these impacts on downstream river and coastal areas. In this study, as one of appropriate indices to evaluate river environment, river morphological potential for suitable spawning area of Ayu-fish is researched by field survey and GIS analysis of aerial photo images. The results showed that gravel bed riffles with high river-bed softness suitable for the spawning usually located specific angles from upstream/downstream sand bars. Based the SI model based on the result, aerial photo analysis showed that possible spawning area is gradually decreasing by increasing of the bar wave length.

Keywords: Ayu-fish, spawning redds, river-bed softness, GIS, Tenryu river