

ヨシノボリが選好する載り石環境の 成立条件と形成メカニズム

FORMING CONDITIONS AND PROCESSES
OF RIVERBED WITH LOOSE STONE ON FINE SUBSTRATES
FOR SPAWNING BED OF RHINOGOBIUS

斉藤思温¹・知花武佳²・原田大輔³・伊藤悠⁴
Shion SAITO, Takeyoshi CHIBANA, Daisuke HARADA, Yu ITO

¹非会員 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

³学生会員 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴非会員 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

Substrate condition is an important factor for fish habitat evaluation. Especially, the substrate condition for spawning redd of *Rhinogobius* is quite strict. They need riverbed with loose stone on fine materials (Nori-Ishi in Japanese). To clarify the forming conditions and processes of the environment, gravel size distributions of runs in Kanto district was investigated. One of the substrate measurement methods is an area grid sampling method, and the other is a volumetric sampling one. Comparing the results of these two methods, vertical deposition patterns can be understood. The forming conditions can be analyzed based on hierarchical scale structure. To form the suitable environment, geological condition must be volcanic rock, slope changing must develop well, enough large materials concentrates, outer bank side of run must not be eroded, and the point must be inner bank side. It was clarified that percentage of large boulders in riverbed subsurface layer is a quantitative parameter for the forming condition of loose stone on fine materials and buried stone.

Key Words : *substrate, loose stone, subsurface layer, vertical deposition pattern, Rhinogobius*

1. はじめに

魚類の生息場にとって、どのような粒径の礫が、どのような構造で堆積するか、ということは極めて重要なファクターである。それにも関わらず、ある生物種がどのような底質を好むか、という研究こそ数多く存在する(例えば^{1),2)}ものの、そこで表現されるミクロなスケールでの底質が、どのような条件およびメカニズムで決定されているのか、ということは未だに十分解明されていない。

本研究では、底質の影響を強く受ける、産卵期のヨシノボリ類(*Rhinogobius*) (以下、ヨシノボリとする)を指標種とした。ヨシノボリのオスは、大礫の下に土砂を口やひれを用いて掘り出し、そこに産卵のための空間を作り出して、大礫に卵を付着させる。このため、産卵床として好まれる底質は、表層に100~200mm程度の大礫が存在し(例えば、^{1), 3)}、その下には20mm程度以下の砂利が存在する²⁾という、いわゆる載り石環境である。

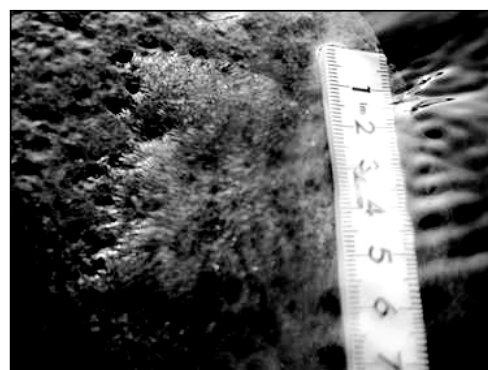


図-1 中津川で確認されたヨシノボリの産卵床

しかし、本研究において、関東地方の河川を網羅的に調査したが、ヨシノボリの産卵床がまとまって確認されたのは相模川水系中津川の特定期間のみであった(図-1)。このことから、一般によく知られている載り石環境も、良い環境を形成するためにはいくつかの条件が必

要だと考え、こうした載り石環境がどのような条件およびメカニズムによって形成されるか、ということの解明を目的とする。

2. 載り石環境の定量的把握手法

載り石環境を定量的に把握するため、セグメント1（扇状地区域）の平瀬において、河床材料調査を行なった。表層の粒度分布は面積格子法（120cm四方、30cm間隔の格子を用いた全25点）から明らかにした。その下層にある準表層はおよそ最大粒径程度の深さを対象とし、その粒度分布を体積採取法（25cm四方、深さ20cmをすべて採取、ただし中間径128mm以上の大礫のみ50cm四方から採掘し、解析時に1/4にして評価）から明らかにした。

さらに、福島ら⁴⁾および伊藤ら⁵⁾を参考とし、表層と準表層の粒度分布を比較することで、鉛直方向の堆積構造を分析した。

これらの粒度分布計測をひとつの平瀬につき左岸よりと右岸よりのそれぞれ1ヶ所ずつ行なった。ここで得られた粒度分布を足し合わせていくことで、より大きなスケールでの解析が可能となる。すなわち、左右岸のデータを足し合わせることで、1つの平瀬の粒度分布を表現でき、複数の平瀬の粒度分布をサブセグメント内で足し合わせることで、あるサブセグメントに見られる平瀬の粒度分布を表現できる。また、さらに大きなスケールとして、線格子法（河道縦断方向に長さ50m、1m間隔、全51点、河原上）のデータを足し合わせることで、ある河川のセグメント～サブ流域に存在する全体的な粒度分布を表現できる。

以上のように仮定し、いかなるスケールにおいても粒度分布が把握できる体制を整えた。こうした各スケールでの状況を河川間比較することにより、スケールごとに載り石環境形成の条件が考察可能となる。

こうした調査を、関東地方の広域の河川を対象として網羅的に実施することとし、利根川水系渡良瀬川、荒川水系高麗川、荒川水系入間川、多摩川水系浅川、相模川水系中津川の5河川を対象河川として選定した。そして、各河川につき5～7点の平瀬で上記の手法を実施した。

3. 載り石環境の成立条件と形成メカニズム

以下、載り石環境が成立する条件とメカニズムをスケールごとに述べる。

(1) サブ流域～セグメントスケール

線格子法により得られた、河川ごとの扇状地全域における粒度分布は図-2のようである。これを見ると、火山

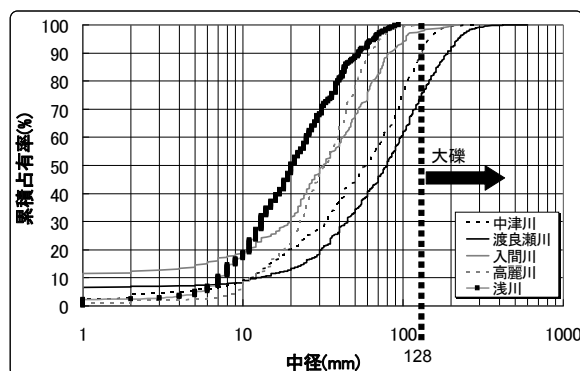


図-2 河川ごとの扇状地全域における粒度分布

表-1 岩種による物理的風化特性

岩石の種類	堆積岩	凝灰岩	火山岩	閃緑岩	花崗岩
基岩	○	○	○	○	○
岩塊			○	○	○
礫	○				
砂利	○				
砂	○				○
粘土	○				

（凡例）岩塊：人身大～以上 礫：人頭大～半身大

砂利：玉砂利～拳大 砂：栗粒大～碁石大

岩を主とする流域（渡良瀬川・中津川）では128mm以上の大礫が15%以上存在するのに対し、中生代の堆積岩を主とする流域（入間川・高麗川・浅川）では同様のサイズの大礫はほとんど見られない。これは小出⁶⁾の示した岩石の風化特性（表-1）と一致するが、この風化特性は山間部のみならず、セグメント1の河床状態にも影響を及ぼすことを示している。

さらに、大礫が一定量存在する渡良瀬川と中津川では、セグメント内であっても明瞭な勾配急変点（サブセグメント境界）が確認できるのに対し、そうでない河川では勾配急変点はあまり発達しないことが確認できた。なお、勾配急変点の定義は以下のとおりである。200m間隔で設けられた各地点の勾配を、その上下流1km区間の標高差から算出し、この勾配を縦軸に、距離を横軸に取り、関数近似を行なった。ここで、R二乗値が最大となる5次関数を、距離と勾配との関係を表す関数としてフィッティングした。この関数を各ポイントで微分し、その勾配微分値が極大となるポイントを勾配急変点候補とした。このうち、上下流の勾配変化が20%以上あれば勾配急変点とした。

(2) サブセグメント～リーチスケール

火山岩を主とする流域を持ち大礫が多く産出される河川では、勾配急変点ができることを述べたが、同じセグメントの中にあっても、この急変点を境に、200mm以上の大礫に対応する勾配のサブセグメントと、砂利に対応する勾配のサブセグメントに明確に分かれる。そのため、ヨシノボリの産卵床となりうる100～200mm程度の大礫

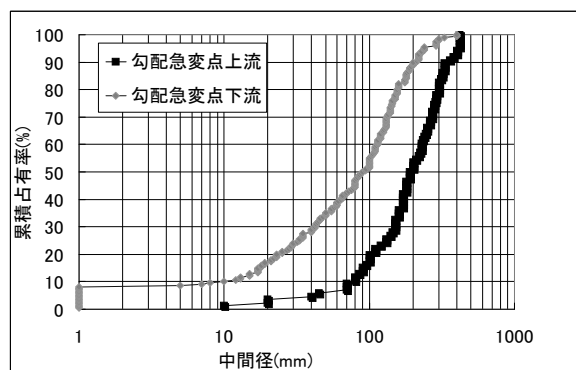


図-3 渡良瀬川勾配急変点上下流の礫径比較
(面積格子法により表層礫径を測定)

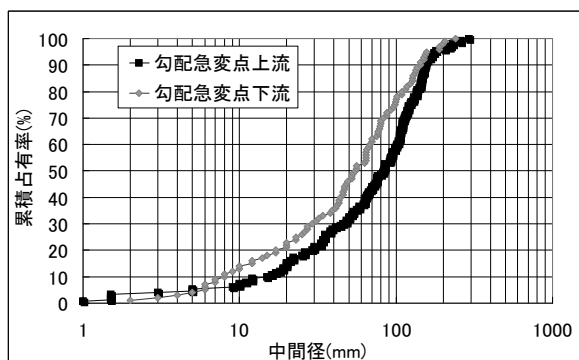


図-4 中津川勾配急変点上下流の礫径比較
(面積格子法により表層礫径を測定)

は勾配急変点より上流に集積する。一方、粒度の多様な堆積岩を主とする流域では、勾配急変点が成立しづらく、大礫は2つのサブセグメントを通して分散し、細粒分の中へ埋没しがちである。

ここで、勾配急変点の生じる、渡良瀬川と中津川の粒度分布の河道縦断方向の変化を確認する。

まず、渡良瀬川では、42.5km付近に勾配急変点が存在し、ここから上流44.8km付近までは1/170程度の勾配が、ここから下流36.2km付近までは1/260程度に急変し、下流部では上流部とは明らかに異なる粒度分布を示す(図-3)。具体的には、上流部には下流部には存在しない300～400mmクラスの大礫が20%程度存在しており、下流部には上流部にほとんど存在しない10～70mmクラスの中礫から砂利が30%程度存在している。これを山本の提唱する粒径集団の概念で整理すると、勾配急変点を経ることで、主モードであるA集団はそれほど変化がないものの、上流で見られたC集団が消失し、新たなB集団が現れる、というように表現できる。すなわち、渡良瀬川のセグメント1における粒径集団の変遷は、主モードの材料が変化するというよりは、大礫が失われ、砂利が加わることによって、不連続に進行する、と言える。そして、勾配はC集団の大礫によって規定されるため、勾配急変点が生じるのである。

一方、中津川では2.9km地点付近に勾配急変点が存在し、ここから上流4.2km付近までは1/170程度の勾配が、

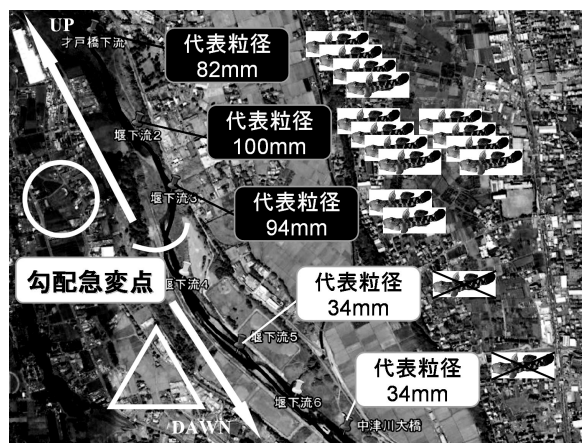


図-5 勾配急変点上下の粒径とヨシノボリの多寡

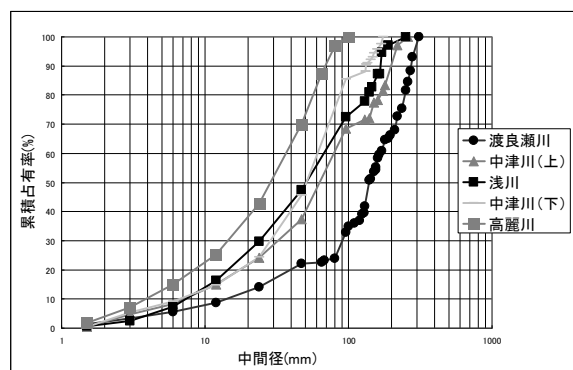


図-6 準表層粒径の比較

ここから下流1.0km付近までは1/230程度に急変する。これは渡良瀬川と類似した値である。そして下流部には上流部にほとんど存在しない10mm弱の砂利が10%程度存在しているという特徴も渡良瀬川と似ている。しかし、中津川では、上下流で最大粒径クラスに違いはなく、それよりもやや小さい50～150mm程度の材料が、上流部では55%を占めるのに対し、下流部では40%程度に過ぎない(図-4)。ここでも粒径集団の概念で整理すると、勾配急変点を経ることで、C集団自体は大きく変わらず、主モードであるA集団が上流では粗く下流で細くなっており、下流の方でB集団がやや拡張している、というように表現できる。このように、中津川の方が変化は小さいが、ヨシノボリの産卵床に影響する大礫の割合に差が出ていることは大きな意味を持つ。

実際にヨシノボリを観察すると、中津川では、勾配急変点より上流では数多くの産卵床が確認されたにも関わらず、それより下流では、ヨシノボリの個体そのものが確認されなかった。このヨシノボリの分布は載り石の有無を明確に反映していると言える。

a) 河床材料中の大礫割合

このように載り石の有無には大礫の存在が効いていることがわかったが、例えば、渡良瀬川の上流側のように大礫の割合が多すぎると浮き石になってしまう。そこで、図-6に示すような、異なるサブセグメントの準表層粒径

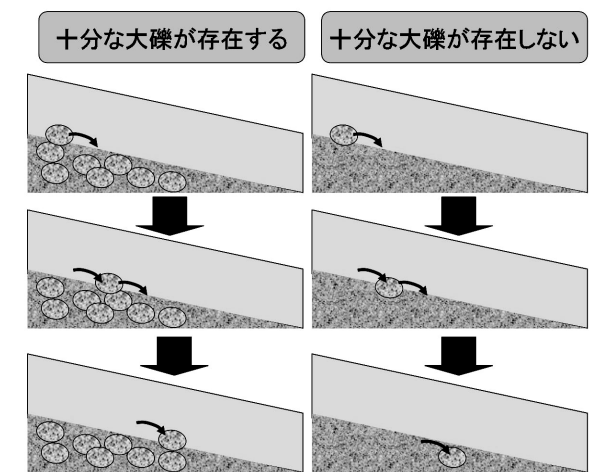


図-7 洪水時に流下する大礫のふるまい

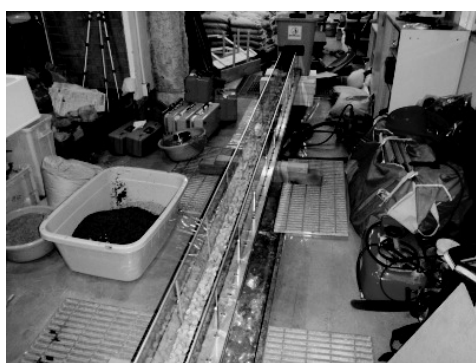


図-8 実験水路

に注目する。以下、これと現地で観察された底質状況とを比較する。

高麗川全域、中津川勾配急変点上流側、渡良瀬川勾配急変点下流側をそれぞれ比較すると、代表粒径 d_{60} は、40mm、80mm、170mmと推移しており、これに伴い、底質もはまり石、載り石、浮き石というように移り変わっている。渡良瀬川は下流側ですら浮き石状態であった。すなわち、準表層の粒度が全体的に大きくなることで、大礫の埋没度が小さくなることを確認できる。

しかし、注目すべきは中津川勾配急変点上流側と下流側、および浅川全域である。これらは準表層のA集団にさほど大きな差がないにもかかわらず、中津川勾配急変点下流側と浅川でははまり石に、中津川勾配急変点上流側では載り石となっており、事実表層の粒度は準表層以上に大きく異なっている(図-2浅川、図-4)。よって、はまり石から載り石への移行を、主モードであるA集団の粒度で論じることが難しい。

しかし、問題の3つのサブセグメントにおける粒径加積曲線を比較すると、大礫の割合は異なっていることがわかる。このことから、やはり大礫の埋没度の変化、特にはまり石から載り石への移行には、河床材料中の大礫割合が強く影響していることが確認できる。ここから、大礫が準表層中に含まれる割合が大きければ大きいほど、載り石が生じやすいと言えそうである。

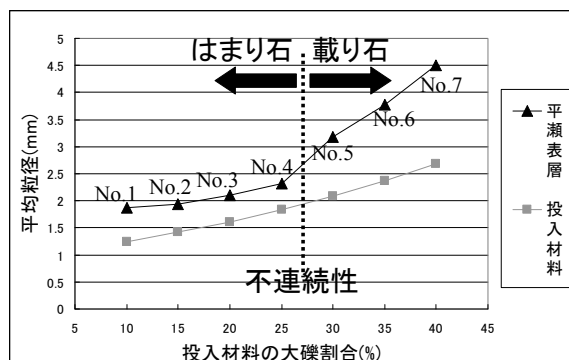


図-9 大礫割合による表層粒径の変化

b) 下層の大礫による表層の大礫の支持

準表層の大礫の割合が少し異なることで、載り石が形成されるか否かという大きな差が表層に現れることが推察された。そこで、以下のような仮説を立てた。

表層下に大礫が十分に存在するとき、洪水時に流下する大礫は、下層の大礫に支えられ、沈み込むことなく載り石環境を維持できる。しかし、表層下に十分な大礫が存在しない状況で洪水が発生すると、稀に転動してきた大礫も徐々に砂の中へ埋没していくこととなる。つまり、表層の大礫は、表層下に十分な大礫が集積することではじめて表層に現れるため、細粒分が優占する状況下では、大礫は流下とともに徐々に細粒分の中へと沈んでしまい、その存在比率から想定されるほど表層には現れない、ということになる。

c) 水路実験による検証

この仮説を検証するため、水路実験を行なった。実験に用いたのは、幅0.15m、長さ3.0mの亚克力製水路であり、黒木・岸⁸⁾の領域区分図において単列砂州となるように、流量や勾配などのパラメータを設定した。

材料は4種の粒径(1mm、3mm、5.5mm、8mm)を用い、いくつかの現地河川の準表層粒度とほぼ一致するように、徐々に大礫割合を増やしながら7回の通水を行なった。それぞれが、実河川において、48mm以下の砂～砂利、48～128mm程度の中礫、128～175mm程度の大礫、175mm以上の巨礫を代表するものとした。よって、この実験においては、5.5mmの材料と8mmの材料が現地河川での「大礫」に相当する。通水後、実験水路内にできた平瀬の粒度分布を測定し、平均粒径を算出した。

この結果、投入材料の平均粒径が徐々に増加するような条件を与えたにも関わらず、平瀬の平均粒径は、大礫割合が25%を超えたところから、急速に大きくなっている。すなわち、ここがはまり石と載り石の不連続な境界であり、両者が質的に異なることを示している。これにより、大礫割合が25%を超えると、大礫が急速に表出し、載り石環境となるとという仮説が検証された。



図-10 表層から大礫を取り除いた河床（平瀬外岸側）



図-11 表層から大礫を取り除いた河床（平瀬内岸側）

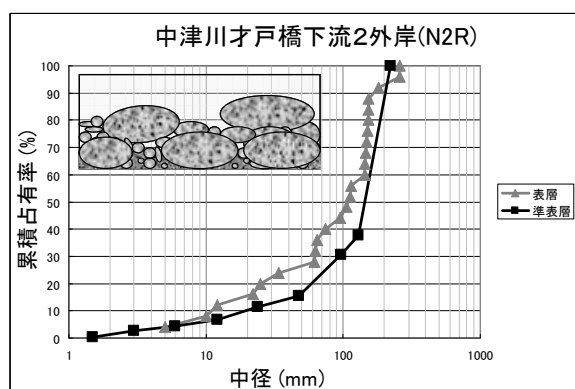


図-12 外岸における鉛直方向の堆積構造とその模式図

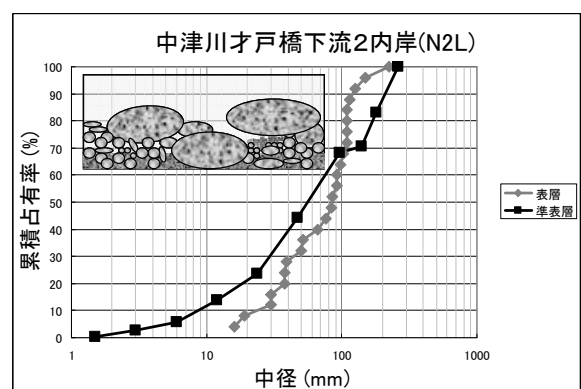


図-13 内岸における鉛直方向の堆積構造とその模式図

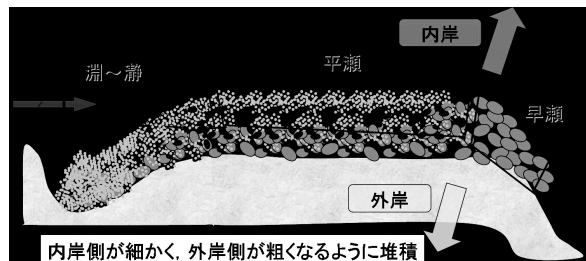


図-14 準表層の堆積状況（3次元）

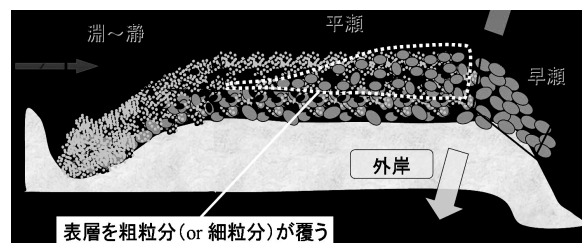


図-15 表層の堆積状況（3次元）

(3) ユニット～サブユニットスケール

交互砂州の形成に伴う平瀬の粒度分布を比較すると、内岸と外岸では、表層の粒度はほぼ同様であるのに対し、準表層の粒径に違いが見られた。図-11は、中津川の平瀬において、表層から大礫を取り除いたものである。

表層粒径はそれほど変化がないにもかかわらず、準表層においては外岸側に粗粒分が多く見られやや浮き石に近い環境であるのに対し、内岸側には図-11のように細粒分が集積していた。図-12、図-13は、この傾向を粒径加積曲線と模式図によって示したものである。なお、内岸のほうが外岸より準表層粒径が細かいという傾向は、調査された平瀬のうち87.5%の平瀬で確認されており、一般的な傾向と言える。ただし、例えば護岸が淵から平瀬にかけて連続して設置されている場合は、外岸側が洗掘され、淵のような横断面形状を見せる平瀬が存在する。

これを洗掘型平瀬と名付け、一般的な左右岸でそれほど偏りのない平瀬を平坦型平瀬と名付けると、上述した例外となるのはすべて洗掘型平瀬である。この洗掘型平瀬では、そもそも表層粒径が外岸側で大きくなっている。

前述のとおり、ヨシノボリにとっては、表層には大礫が存在する環境が望ましいが、それに加えて図-11の様に、その下には細粒分が存在することが望ましい。実際に中津川で産卵床が確認された際、そのほとんどが内岸側であった。

a) 準表層粒度の決定メカニズム

準表層粒径が内外岸で異なる理由について考察する。既往研究によれば、洪水時には河岸にぶつかり淵を形成した強い主流線は外岸側を比較的直線的に流下し、粗粒分が外岸側に堆積しやすいのに対し、減水期には主流線

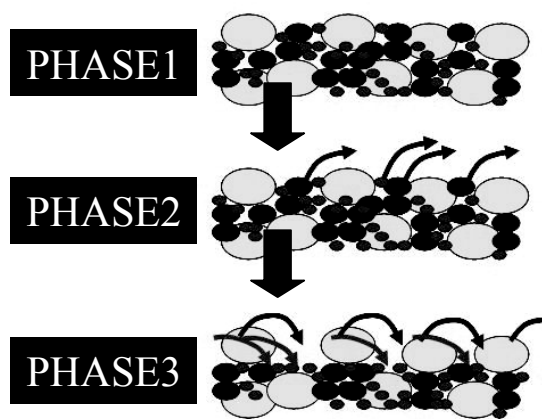


図-16 大礫が転動する際のふるまい

が砂州の前縁線を垂直方向に乗り越え、流れが左右に振れるため、河岸にぶつかった流れが二次流を生じ、細粒分は内岸側に運ばれやすい⁹⁾。この結果、平瀬準表層の堆積状況は図-14のようになる。

既往研究ではこれらの現象が平瀬で起こると考えていたが、本研究のデータからは、このメカニズムによって決定されるのは、平瀬の粒度というよりも、平瀬の準表層における粒度とするのがより正しいと言え、表層は準表層に比べれば似通った粒度分布となっていた。

b) 表層粒度の決定メカニズム

最後に、内外岸で表層粒径が類似する理由について検討する。前述したとおり、洪水時から減水期初期にかけては流れが内外岸で大きく振れるが、このときに形成される層は、平水時に見える表層ではなく、その下の準表層である。表層が決定されるのはその後のことである。流量が減少すればするほど、上流の影響は下流に伝達しにくくなり、平瀬のように横断方向に平坦な場では内外岸の流れの偏りがなくなる。そのため、このとき転動する大礫は内外岸に偏りなく分散し、図-15のように表層を形成することが考えられる。

しかし、準表層の決定時において、大礫が移動するのは掃流力の高い洪水時であったことから、減水期の終期にあつて大礫が移動できるか否かを確認する必要がある。そこで、サブセグメントスケールの際とほぼ同様の条件で水路実験を行ない、徐々に流量を落としていったところ、確かに流量を落とした状態においても最後まで大礫が転動することが確認されたが、これは以下のような礫の動きによるものである(図-16)。

減水期の終期に大礫が転動を始めるより前に、準表層の粒度を決定する大礫は一旦堆積する(PHASE1)。この後、この大礫はなかなか動き出さず、その隙間を縫うように細粒分が少しずつ流下することとなる(PHASE2)。これにより、大礫の隙間に存在する細粒分は失われ、大

礫は不安定な状態となる。このとき、大礫の下層に細粒分はまだ残っているため、河床が平坦となっており、この大礫はしばらく転がり続ける(PHASE3)。このようなメカニズムが観察された。

4. まとめ

本研究では、ヨシノボリが産卵床として選好する載り石環境の成立条件と形成メカニズムを階層的に検討し、底質を規定する要因は、階層ごとに異なることを示した。

サブ流域スケールでは、「大礫が20%以上産出されるような火山岩地質が主となる流域であること」が、セグメントスケールでは「勾配急変点を有した扇状地であること」、サブセグメントスケールにおいては「大礫が一定区間に集中すること」が必要である。これは、はまり石と載り石とが、準表層中に存在する大礫割合によって不連続に変化するからである。

ユニットスケールでは「洗掘型平瀬ではなく平坦型平瀬であること」が、サブユニットスケールでは「細粒分が表層大礫の下に集積しやすい内岸側であること」が必要である。これは、平瀬の準表層粒度を決定するのは洪水流～減水期の流れであり、表層粒度を決定するのは、減水期終期の内外岸で偏りの少ない流れだからである。

参考文献

- 1) 石田裕子・竹門康弘・池淵周一：河川の土砂堆積様式に基づく底生魚類の生息場評価，京都大学防災研究所年報，pp.661-675，2006
- 2) 奥田千賀子・小野田幸生：河床底質の違いによる繁殖期トウヨシノボリ♂の産卵床選択に与える影響，ELR2008福岡 講演要旨集，pp.102，2008
- 3) 川那部浩哉・水野信彦：日本の淡水魚，山と溪谷社，1989.
- 4) 福島雅紀，櫻井寿之，箱石憲昭：山地河道における河床材料調査法に関する検討，ダム技術，vol.285，pp.41-49，2010
- 5) 伊藤悠・知花武佳：河床材料の鉛直構造分析を用いた浅川中流域の河床環境評価，河川技術論文集，vol.17，pp.401-406，2011
- 6) 小出博：日本の国土 一自然と開発一（上），東京大学出版会，1973
- 7) 山本晃一：沖積河川一構造と動態，河川環境管理財団，2010
- 8) 黒木・岸：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984
- 9) 生川寛之・知花武佳・山下貴美子，河原が淵一平瀬区間の底質に及ぼす影響とそのメカニズム，河川技術論文集，vol.16，pp.201-206，2010

(2012.4.5受付)