

渡良瀬川山地部における生息場としての 河床構造と流域・河道特性の関係性

RELATIONSHIP BETWEEN RIVERBED STRUCTURE OF HABITAT AND
BASIN/CHANNEL CHARACTERISTICS IN THE MOUNTAINOUS REGIONS OF
WATARASE RIVER

須川遼¹・知花武佳²・三國谷隆伸³・川口淳郎¹

Ryo SUGAWA, Takeyoshi CHIBANA, Takanobu MI KUNIYA and Atsuo KAWAGUCHI

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 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 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³非会員 工修 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

The riverbed structure is often focused in terms of habitat for the benthic animals in previous studies, however the mechanism how such kind of riverbed is formed, or what basin/channel characteristics affect the structure is yet to be clarified. By conducting field surveys at the mountainous regions of the Watarase River, this study clarifies the relationship between riverbed and basin/channel characteristics, and evaluates the riverbed in terms of habitat for benthic animals. First of all, it was found that the representative diameter of the bed material corresponds to the critical diameter for the mean annual maximum discharge. This is due to the existence of large boulders. The shape of size distribution curve is almost same among all sites because of the harmonious size distribution from boulder to gravel. In milder reach with alternate bars, riverbed material on flat riffle is diverse, but it was monotonous in steeper reach with step-pool structure due to the sorting process. Size distribution of fine gravel and sand, however, should be coarse and uniform in order to create soft riverbed.

Key Words : Mountainous region, Habitat for benthic animals, Grain size distribution, Flat riffle, Geology

1. はじめに

(1) 背景と目的

1997年の河川法改正以降, 生物多様性への配慮の必要性が指摘され続けている。そうした中で, 様々な生物種を対象に, その種がどのような環境を好むかという研究は非常に多く蓄積されてきた。その一方で, 例えば底生動物が好む環境は一体どのような流域・河道特性によって構築されるのかという研究は, ダム直下など一部の特殊な区域に集中しており, 未だ十分になされているとはいえない。そこで本研究は, 底生動物の一例としてヨシノボリのような底生魚類や大型の水生昆虫を想定し, 既往研究で好適だと言われているような生息環境が, どのような環境因子によって形成されるのかを, 流域特性(地質・洪水流量)や河道特性(横断面形状・河床勾配・人工構造物)が様々な変化する山地河川¹⁾を対象に, 現地観測から突き止めることとする。

(2) 研究手法

早瀬・淵・平瀬というユニットが繰り返される実河川(図-1)において, 早瀬は大礫が集積しやすく淵は砂利が溜まりやすいというように, 局所的な流況に支配される共通の性質がある一方で, 平瀬にはその河川特有の特徴が反映されやすいと考えている。また, 底生動物の多くの種が平瀬を生息場としている。そこで本研究では, 平瀬が底生動物の生息場としてどの程度良好であるかを一般的な指標で評価し, その平瀬の良好さがどのような流域・河道特性によって規定されるかを解明することを最終目標とする。しかし, 全てのユニットを含むリーチスケールの環境を議論するのに比べ, 交互砂州上の分級により特定の河床材料のみが存在する平瀬と流域・河道特性との関係性は見えづらいため, 本研究では以下の小目的を設定し, 段階的にスケールダウンする。

第1の小目的は, 図-1におけるリーチスケール全体の粒度特性と, 流域・河道特性の関係性を解明することである。リーチスケールには河床に存在する全てのユニッ

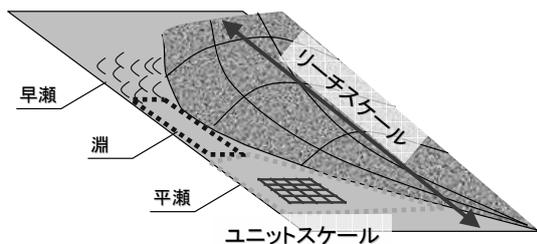


図-1 実河川の模式図

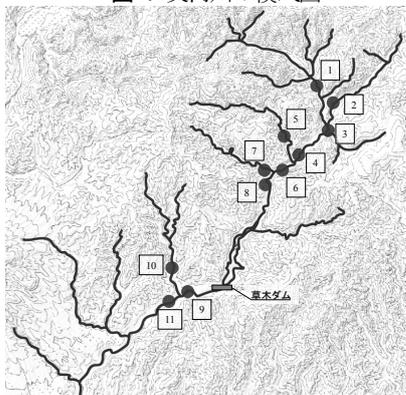


図-2 渡良瀬川観測サイト一覧

トが含まれるため、そのサイトにおける代表的な粒度分布を、このスケールで議論することになる。

第2の小目的は、図-1におけるユニットスケール（平瀬）の粒度分布と、流域・河道特性及び上記リーチスケールの粒度特性との関係性を解明することである。

第3の小目的は、底生動物に関する既往研究を参考に、一般的で定量的な評価指標を提案し、上記ユニットスケールの粒度分布を評価することである。

これらにより、どのような条件で良好な河床が形成されるかを議論する。

2. 現地調査

(1) 対象地

本研究が対象とする河川は利根川水系渡良瀬川である。この河川の山地部において、2012年11月末～2013年1月末にかけて上流から下流へ縦断的に11サイトで現地調査を行った（図-2）。この河川を選定した理由は2つある。1つ目は渡良瀬川の地質が多様であることから、縦断的に河川を調べていけば、地質という流域特性のインパクトを議論できると考えたためである。2つ目は草木ダムという大型のダムが存在することから、ダム上下流の比較ができるためである。

なお、河川間の比較により渡良瀬川の特徴を明確化するために、調査結果の分析において、三國谷ら²⁾が同様の調査を実施した多摩川・荒川・中津川におけるデータとの比較も行う。

(2) 調査項目

各サイトにおいて、リーチスケールの粒度分布を線格子法で計測した100個の礫径、ユニットスケールの粒度分布を面積格子法によって計測した50個の礫径から求める。また、平瀬というユニットでは、細粒土砂の粒度分布が底生動物にとって重要であると考え、平瀬において16mm以下の材料を採取し、実験室でふるい分けによる粒度分布測定を行った。

さらに、各サイトにおける洪水時の摩擦速度を求めるために代表的な横断面形状の測量も行った。

3. 調査結果の分析と考察

(1) リーチスケール

本節では渡良瀬川11サイトにおいて得られた粒度分布を、a)代表粒径 d_R 、b)粒径加積曲線の形状によって議論する。ただし、 d_R は河川工学において一般に用いられる60%通過粒径を指し、粒径加積曲線の形状は粒度分布を d_R で割り無次元化することによって比較を行う。

a)代表粒径 d_R と摩擦速度 u_*

山本¹⁾による既往研究において、扇状地（セグメント1）では代表粒径と平均年最大流量下の摩擦速度の関係性は一意に決まることが示されている。これは、この区間では河床と河岸がほぼ同一粒径の礫で構成されているため、洪水時に側方侵食が起り、平均年最大流量下で、河床材料の限界掃流力を少し上回る程度の水深になるよう川幅が自然調節されるためである。図-3はそうした山本の扇状地区間におけるデータを切り出したものに、本研究や三國谷ら²⁾の山地部（セグメントM）のデータを加筆したものである。

ここで、渡良瀬川と中津川のデータを見ると、そのうちの7割程度のデータが、扇状地区間における関係性の延長線上において、扇状地のデータと同程度のバラツキの範囲内に収まることがわかる。これは、渡良瀬川や中津川の流域地質は主に火山岩であるが、小出³⁾によればこの地質は風化特性上大礫を産出しやすい岩質であるということも影響している。すなわちこれらの河川においては、山地の急勾配区間においても、平均年最大流量時の摩擦速度でギリギリ移動できるような大礫が十分存在するため、河床表面がこれらで覆われることで、洪水時の掃流力と河床材料の粒径が対応するのだと考えられる。また、この関係性から外れている3割程度のサイトの多くは、図-4に見られるような側岸からの多量の細粒土砂流入が幾つも確認されている場所である。このように、扇状地とは異なり山地河川では、側岸からの土砂供給でデータがバラつくため、幅を持った議論になる。

一方で多摩川と荒川のデータを見ると、そのほとんどは、 d_R の移動限界よりもはるかに大きい u_* の値となっている。これらの河川は、細粒土砂の生産が著しく活発な

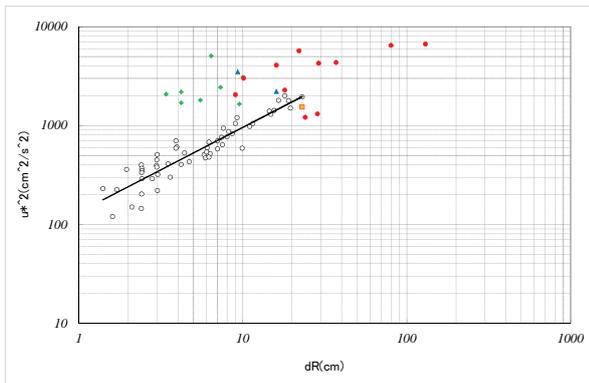


図-3 山本¹⁾の $d_R-u_*^2$ のグラフを改変したものに山地のデータを加筆 (○：扇状地，●：渡良瀬川 (栃木県日光市，群馬県みどり市の広域)，■：中津川 (神奈川県愛甲郡愛川町愛川橋)，▲：荒川 (埼玉県秩父市大滝二瀬ダム下流2km)，◆：多摩川 (山梨県甲州市，丹波山村，東京都奥多摩町，青梅市の広域))



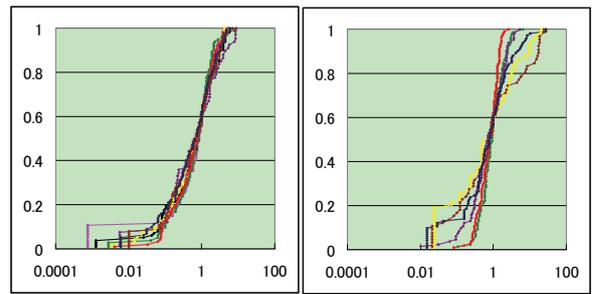
図-4 側岸からの土砂流入

破碎帯の通る，中生代の堆積岩を流域地質に有する．そのため，側岸から供給された多量の砂利は，大洪水の減水期や中小洪水でも輸送される上，平均年最大流量程度の掃流力がかろうじて動かせるような大礫はあまり産出されないため，河床材料が深層までごっそりと輸送され，河床表層を厚く覆いやすい．一方で，岩盤によって川幅が規定されていることにより側岸侵食が起こらないため，ほとんどの場合掃流力の割に小さな粒径の河床材料が厚い交換層で輸送されていると考えられる．

b) 粒径加積曲線の形状

リーチスケールの粒径加積曲線の形状を評価するために，代表粒径で無次元化，すなわち横軸を d/d_{60} とした粒度分布を表示しているのが図-5である．図-5(a)が本研究の渡良瀬川11サイトのデータ，図-5(b)が三國谷ら²⁾の多摩川山地部におけるデータである．

渡良瀬川の粒径加積曲線を見ると，全てのサイトで形状が良く一致している．一方で多摩川の粒径加積曲線は全く一致しない．これも前項の議論と同様の流域地質特性を表している．大洪水がかろうじて動かすことのできるような大礫を多く産出し，河床を覆うように厚く堆積する細粒土砂が少ない渡良瀬川では，大礫から砂までの多様な粒径が混ざり合ってゆっくりと動くため，どのサイトにおいても，粒度分布形状が維持される．一方多摩



(a) 渡良瀬川 (b) 多摩川

図-5 d_{60} で無次元化した粒径加積曲線

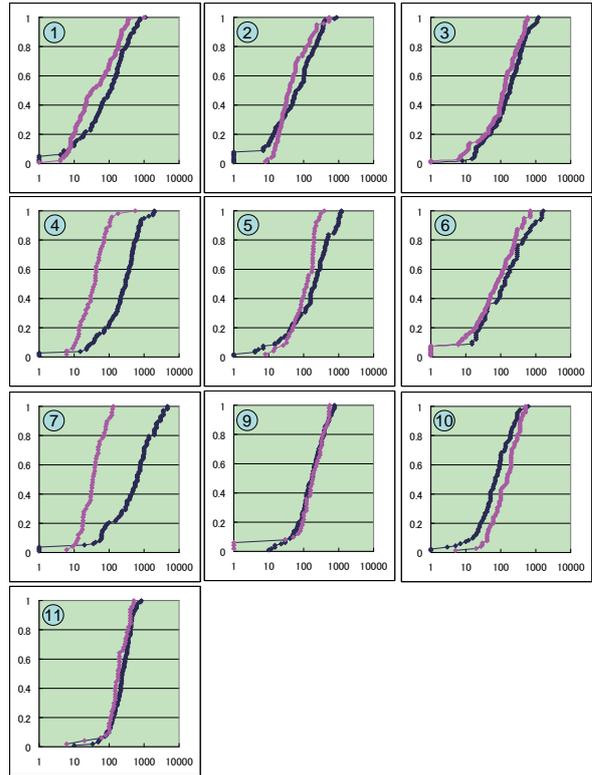


図-6 リーチとユニットの粒度分布の比較 (単位 (mm))

(青：リーチ，桃：ユニット)

川では大礫の割合が小さく細粒土砂の割合が非常に大きいため，中小洪水の際も大洪水の際も細粒土砂がまとまって輸送され，細粒土砂の塊が河川を縦断する疎密波の様相を呈しながら下流へ動く．そのため，場所によって細粒土砂の量が異なり，粒度分布が図-5のパラツキの範囲内で変動すると考えられる．

(2) ユニットスケール

まずユニットスケール (平瀬) の粒度分布を前述したリーチスケールの粒度分布と比較することにより，その関係性を明らかにする．また，平瀬において採取した16mm以下の細粒土砂の粒度分布について考察する．

a) ユニットスケールとリーチスケールの比較

図-6のように各サイトにおけるリーチスケールとユニットスケールの粒度分布を比較すると，両者の粒径加積曲線の位置関係から，渡良瀬川のサイトを3タイプに

表-1 各平瀬の均等係数と河床勾配

サイト名	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
均等係数Uc	10	3.4	13	3.8	5.4	20	3.1	4.8	5.0	2.0
1/(勾配)	35	52	260	51	31	142	18	51	64	258

均等係数が10以上
Armor化により均等係数が10未満

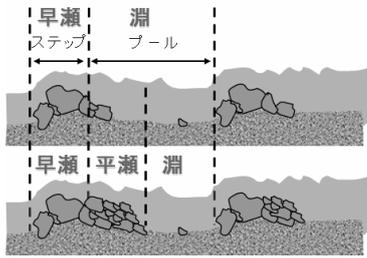


図-7 二種類のステップ・プール構造

分類することができる。なお、河原と滞筋の比高差が大きいサイト8は、ユニットスケールの調査が困難で、細粒土砂の採取のみができた。1つ目のタイプは、リーチとユニットの粒度分布がさほど変わらず、砂州上の適度な分級により、リーチの粒径加積曲線から粗粒分の割合をわずかに減じたものがユニットの粒径加積曲線になっているものである。サイト1, 3, 6がこれに該当する。2つ目のタイプは、顕著な分級が見られ、ユニットの粒度分布がリーチに比べ粒径の幅が著しく狭い（ユニットの加積曲線がリーチのそれより立っている）ものである。すなわち平瀬に存在する粒度の範囲はリーチ全体の一部に過ぎない。サイト2, 4, 5, 7, 10がこれに該当する。ただし、10のみ平瀬に粗粒分が集中し、その他は細粒分が集中している。そして3つ目のタイプは、ダムによるArmor化が顕著なため河床全体が均一な粗粒分で覆われて安定しており、リーチとユニットの粒度分布が完全に一致して、共に単調なものである。ダム下流のサイト9, 11がこれに該当する。表-1は各サイトにおけるユニットスケールの均等係数 $U_c (=d_{60}/d_{10})$ と、局所的な河床勾配の逆数を示したものである。1つ目のタイプに分類されたサイト1, 3, 6では均等係数が10を超え、2つ目と3つ目に分類されたその他のサイトでは10を大きく下回っている。前述のように、渡良瀬川ではリーチスケールの粒径加積曲線が、均等係数およそ10~20に収まる形状で一定であることから、ユニットスケールの粒径加積曲線がリーチスケールのそれと等しい1つ目のタイプではこれと同じ均等係数となり、2つ目と3つ目のタイプではこれよりも低い均等係数になる。

1つ目と2つ目のタイプは、各サイトの河床勾配とほぼ対応している。1つ目のタイプは、勾配の緩いサイトであり、交互砂州による明瞭な平瀬が形成されるため、平瀬がリーチスケール全体の平均的な粒度分布から早瀬に集積するような大礫を除いたものと一致するからである。そのため、大礫や細粒分にやや違いが見られるものの、ユニットスケールの粒度分布はリーチスケールのそれに比較的近い。一方で2つ目のタイプは勾配の急なサイト

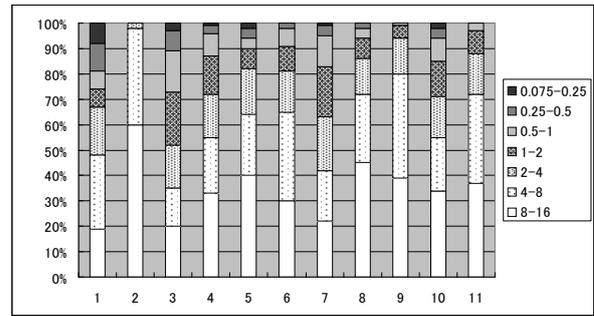


図-8 各サイト平瀬の16mm以下の粒度分布

であり、反砂堆が形成されることで巨礫の集積帯による早瀬と砂利が溜まった淵が交互に現れるステップ・プール構造ができあがる。丹波ら⁴⁾によれば、ステップ構成材料に比して十分小さな礫や砂利の割合が小さければ、巨礫の上には明瞭な平瀬ができず、それらが大きければステップ上流にそれらが集積し、細かい粒径の平瀬ができる（図-7）。そのため、観測時に平瀬として面積格子法を行なっている河床はこうした分級作用の影響を受けており、ステップの一部を平瀬と見なして観測しているか、砂利で均質になったステップ上流の平瀬を観測している可能性がある。実際、サイト10では平瀬らしい平瀬ではなく、ステップ構成材料の一部である比較的粗粒なもので均質な環境が計測されている。サイト2, 4, 5, 7では砂利で均質な平瀬となっている。いずれにせよ、勾配が急であればユニットスケールの粒度は幅の狭い均質なものになり、その分級するかしないかの河床勾配の境界は、表-1のデータよりおよそ1/100程度ではないかと推察される。

しかしサイト1は例外であり、その理由はここでも側岸からの土砂流入である。この影響は2つ可能性が考えられ、1つ目は近くからの土砂流入により生産土砂が一樣に河床に載り、リーチスケールとユニットスケールの粒度分布がそれほど変わらなくなったというもの、2つ目は河床の上に土砂の塊が載ったため本来の河床勾配を正確に測定できず、過大評価してしまったというものである。いずれにせよ、こうした土砂の流入が至近で起こっているサイトの評価は非常に難しい。

b) 細粒土砂の粒度分布

ユニットスケールの細粒土砂の粒度分布を図-8に示す。ここでは4-16mmの粒径集団が全体に占める割合と流域地質の関連性に着目した議論を行う。なぜ4-16mmかについては、第4章にて説明する。

16mm以下の細粒土砂は小出水であっても輸送され、まとまって流れるため、他の粒径集団よりも流れによる分級を受けにくい。そのため、ある地点の細粒土砂の粒度分布は、上流で生産された土砂における細粒土砂の粒度分布とあまり変わりは無いと考えられる。ただし、支流から合流してくる細粒土砂が混合する可能性はある。

さて図-8を見てみると、サイト2では4-16mmが全体の

98%, サイト9では80%と、非常に割合が大きい。まずサイト2は、他のサイトと異なり、上流域の地質がほぼ火山岩のみである。堆積岩と深成岩は砂以下の粒径を多く産出するのにに対し、火山岩はほとんど産出しないことから、サイト2ではこういったほとんど砂利で構成された細粒土砂が見られるのだと考えられる。サイト9は、ダム直下で上流からの土砂供給がほとんど無い。このような状況では、度重なる出水により細粒土砂そのものがかなり洗い流されてしまっており、Armor化していて動かない大礫の隙間に多少砂利が残っている程度となる。さらに平水時にも動くような微細な砂すら上流から供給されないため、このような結果が得られたのだと言える。

4. 底生動物が生息場として好む河床

(1) 既往研究に基づく指標の開発

底生動物の生息場という観点から河床を評価する試みは今まで数多く為されてきた。本研究で注目するような大型の底生動物にとって、産卵床として重要な役割を果たす載り石環境は、竹門ら⁵⁾により定義された「はまり石と浮き石の中間的な状態」であり、「石の下面が砂や泥の上に載った状態の石」である。例えばヨシノボリにとっては、体長に対応する5~20mmの砂利の上に100mm以上の載り石が存在する河床が好ましい⁶⁾とされている。また、成田ら⁷⁾はアユの産卵床としての河床を評価するため、貫入度という指標を用いた。これはアユが砂利を退けて潜り込むため、河床が柔らかい=貫入度が高いほど好ましいからである。逆に、ダム下流のArmor化した河床において、河床材料の攪乱が全く起こらないため糸状緑藻などの優占種の藻類が繁茂するが、それらは底生生物の餌にならないことはよく知られている。よって、好ましい載り石環境をつくるためにも、河床材料が適度に攪乱されるためにも、多様な粒径が存在し混ざり合っ動くという、池田⁸⁾による「混合効果」が発揮される条件が好ましい。

さて、本研究において平瀬を評価するにあたって想定している生物は「体長が大きく平瀬で優占しやすい底生動物種」である。河川の生態ピラミッドの下層を構成する底生動物の中にある大型の種は、総バイオマスを高めやすく、物質循環に大きく貢献すると考えたためである。このような底生動物の多くを想定すると、上記ヨシノボリ同様に、隠れ家や産卵床となる100mm以上の大礫が載り石として河床に存在し、全体の粒度分布としては多様な粒径を有し、なおかつ載り石の下にある砂利の貫入度が高いことが、一般的に良好な河床の条件であると考えた。斉藤ら⁹⁾は、こうした大礫の載り石環境を形成するには、供給される土砂の内大礫が25%以上をしめる必要があることを実験的に示した。また、粒度分布の多様性を示す指標としては、前述した均等係数Ucが有効であ

表-2 各サイト平瀬の評価 (基準を満たすものが網掛け)

サイト名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
大礫割合[%]	34	24	60	12	60	45	10	-	80	65	92
均等係数Uc	10	3.4	13	3.8	5.4	20	3.1	-	4.8	5.0	2.0
4-16mm割合[%]	48	98	35	55	64	65	42	72	80	55	72

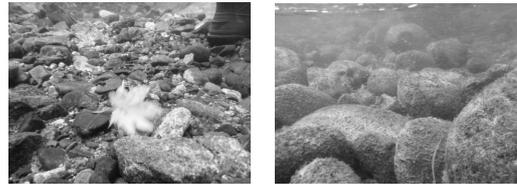


図-9 細粒分の多いサイト7の河床 (左) と粗粒分のみサイト11の河床 (右)



図-10 底生動物に最も好まれると考えられるサイト6の河床

る。日本地盤工学会基準による粒度分布の多様性の閾値として10が用いられるが、今回の調査結果からもこの値が妥当であると判断されたため、Ucが10より大きければ多様、小さければ均質とみなすこととする。また砂利の貫入度としては、第3章において議論した16mm以下の細粒土砂における4-16mmの粒径集団の割合を用いる。理由は2つある。1つ目は、本研究が対象とする種の一つでもあるヨシノボリは前述したとおり5-20mmの砂利を好んでおり、4-16mmというのはふるいの目の大きさのうち最もそれに近い値であるためである。2つ目は、竹林ら⁹⁾によると河床における貫入度と空隙率には1次的な比例関係があり、その空隙率は一般に材料の粒径が均質であればあるほど高いためである。よって、細かい砂利から砂に該当する16mm以下の材料のうち4-16mmの占める割合が大きいほど貫入度が高くなり、より細粒の材料で均質なものに比べ空隙が大きい。

以上より、本研究では以下の3つの基準によってユニットスケールの河床を評価することとする。

- i) 100mm以上の大礫が25%以上存在している。
- ii) 粒度分布が多様であり、均等係数が10より大きい。
- iii) 16mm以下の土砂に対する4-16mmの割合が大きい。

(2) 各サイトの生態場としての評価

ここでは前節の考察によって得られた指標をもとに、渡良瀬川各サイトの平瀬が底生動物の生息場としてどれだけ良好かを定量的に議論する。

表-2にここまで提案した指標の値を記した。前述のように、渡良瀬川では火山岩地質由来の大礫が多く産出されることから、多くのサイトにおいて載り石となりうる100mm以上の大礫を確認することができた。また、均等係数の値が大きいサイト1, 3, 6は、上述した通り

リーチスケールとユニットスケールで、粒度分布とほとんど変わらず多様な粒径が確認できた。一方でこの値が小さいサイト2, 4, 5, 7, 9, 10, 11においてはいずれも均質な河床材料が見られ、藻類の繁茂が確認されることが多い。大礫の割合が比較的小さいサイト2, 4, 5, 7は、ステップ上流に均質な細かい粒径が堆積したものであるため大型の底生動物にとっての隠れ家はほとんど存在しない。サイト5のみやや粗粒であるが傾向は同じである。逆にステップ上流に細粒分が堆積しなかったサイト10とArmour化したサイト9, 11では大礫の割合は大きいものこれらで均質化し、底生生物が好む砂利の上に礫が載っているような環境は見られない。さらに、ここまでの指標で良い河床とされるサイト1, 3, 6の中でも、細粒土砂における4-16mm粒径の割合が大きいサイト6が、本研究で対象とする底生生物種にとって最も好まれやすい河床だと思われる(図-9, 10)。

5. まとめ

本研究を通して、100mm以上の大礫が25%以上存在して載り石をつくること、均等係数が10より大きい多様な粒度分布を有すること、16mm以下の細粒土砂における4-16mmの存在割合が大きいという3つの条件がよりよい平瀬河床の評価指標であると判断した。

こうした環境をつくるための、流域・河道特性の必要条件は以下のとおりである。

- ・ 破碎帯のように細粒土砂に偏った土砂が多量に供給されることなく、火山岩のように大礫の割合が大きい岩質を有しつつ、それ以外の粒径も産出する多様な地質からなる流域。
- ・ そのサイトにおける局所的な河床勾配が1/100よりも緩く中規模河床波が形成される。

以上の条件を満たした上で、平瀬河床の粒度分布を、次の順序で検討することができる(図-11)。

- ①山本¹⁾の図における関係性よりリーチスケールの代表粒径は、横断面形状・平均年最大流量・河床勾配によって決まる摩擦速度でおおよそ決まる。摩擦速度が30cm/sあれば代表粒径100mm程度となる。
- ②上述した地質条件を満たせばどの場所でも粒径が多様なので、リーチスケールの粒度分布はおおよそ一つに決まる。このとき均等係数は10~20となる。
- ③勾配が1/100程度より緩ければ砂州が形成され、大礫がやや少ないものの、上記リーチスケールの粒度分布同様に均等係数が10を上回るような多様な粒度がユニットスケール(平瀬)においても見られる。
- ④16mm以下の細粒土砂の粒度分布全体に占める4mm以下の砂利や砂の割合が小さくなるような流域・河道条件であれば、河床は軟らかくなる。ただし、こ

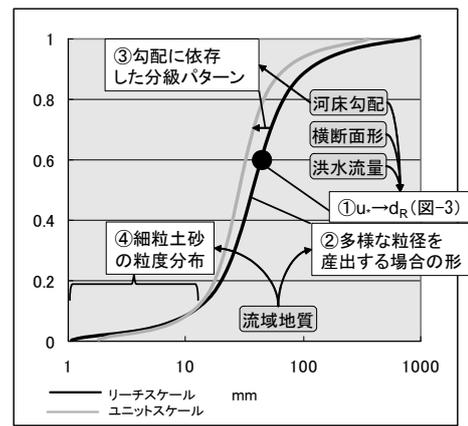


図-11 粒度分布の決定順序

の条件の解明は今後の課題である。

以上により、上述の箇条書きの条件を満たせば生息場として良好な河床が形成されると考えられる。

謝辞: 本研究は、科研費基盤研究(B)(一般)「出水後の河道植生の回復とマイクロハビタットの関係」(代表: 明治大学 倉本宣)の一貫として実施されたものである。また、東京大学大学院農学生命科学研究科の加賀谷隆博士には貴重なご助言を頂いた。記して心より謝意を表す。

参考文献

- 1) 山本晃一: 沖積河川学 堆積環境の視点から, 山海堂, 1994.
- 2) 三國谷隆伸, 知花武佳: 河床構造に着目した山地河川のサブセグメント区分と河床材料粒形の規定要因, 河川技術論文集第17巻, pp.131-136, 2011.
- 3) 小出博: 日本の国土 —自然と開発— (上), 東京大学出版会, 1973.
- 4) 丹波聖泰, 知花武佳, 片山英美恵: 山地河道に見られるステップ・プール構造の形態とその規定要因に関する研究, 河川技術論文集第17巻, pp.179-184, 2011.
- 5) 竹門康弘, 谷田一三, 玉置昭夫, 向井宏, 川端善一郎: 棲み場所の生態学, 平凡社, 1995.
- 6) 斉藤思温, 知花武佳, 原田大輔, 伊藤悠: 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, 河川技術論文集第18巻, pp.95-100, 2012.
- 7) 成田正喜, 土田恒年, 今野清文, 堀田井孝正, 笹本誠, 堺茂樹: 米代川におけるアユの産卵床と河道特性の関係, 河川技術論文集第12巻, pp.359-364, 2006.
- 8) 池田宏: 二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験, 筑波大学水理実験センター報告8, 1984.
- 9) 竹林洋史, 上戸亮典: 実河川における河床強度及び空隙率の空間分布特性, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.

(2013.4.4受付)