

溪流における礫列の細部構造

STRUCTURE OF STEPS OF TRANSVERSE RIBS COMPOSED WITH COBBLES IN MOUNTAIN STREAMS

長谷川和義¹・田中航太²・川村信也³・渡邊康玄⁴・野上毅⁵

Kazuyoshi HASEGAWA, Kota TANAKA, Shinya KAWAMURA, Yasuharu WATANABE, Tsuyoshi NOGAMI

¹正員 北海道大学大学院工学研究科 工博 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²学生員 北海道大学大学院工学研究科 博士前期過程 (同上)

³学生員 北海道大学工学部土木工学科 (同上)

⁴正員 北海道開発土木研究所河川研究室 工博 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁵正員 北海道開発土木研究所環境研究室 (同上)

Transverse ribs are popular existences in a mountain river, those are composed of the transverse lines of large cobbles across a stream. For intension to apply the rib-step morphology to a fish-way, knowledge is desired on the configuration structures of rib-steps. Present paper describes results of field survey for the Gunbetsu River to clarify plan forms, rows of cobbles etc. of the ribs, and also deals with configuration features of experimentally formed ribs in a laboratory channel. From the both results, followings were found: Plan form of a transverse rib is not necessarily straight but curved line with S-shape or M-shape is more popular. The former transverse ribs are formed by comparatively large cobbles, while the latter transverse ribs are composed of the cobbles with various diameters. Correlation with respect to the diameters of adjacent cobbles is not strong, which shows the order of cobble diameters is rather random.

Key Words: mountain streams, step-pool systems, fish-way, field investigation

1. はじめに

急勾配山地河川には礫列・礫段と呼ばれる階段状河床形態が多く見られ、河川やその周辺に生息する生物にとって理想的な空間となっている。礫列・礫段の構造を理解することは、環境保全や周辺生物の生態把握の立場からも必要不可欠である。

竜澤・長谷川¹⁾は、これらの河床形態を魚道へ応用することを提案し、今までにない自然型魚道設計法の確立を目指している。これまでに、多くの現地調査や様々な条件下での水路実験が行われ、礫列河床の形成において重要な要素の一つが河床構成材料の粒度分布であり、Talbot粒度分布式がこの特性を非常によく表現していることを見出した。また、礫列河床の波長・波高に関する推定式を提案している(竜澤・長谷川²⁾、長谷川³⁾⁴⁾⁵⁾。彼らは、推定波長にあわせた間隔で人工ステップ部を設け、その間にTalbot型粒度分布を有する河床材料を敷き詰めて階段状河床形態

を再現する方法を自然型魚道の設計指針の軸として示している。しかし、人工的に敷設されるステップ形状に関する方針は示されておらず、細部設計への対応が必要となっている。

ステップ形状に関しては、これまでの研究においてステップ礫が水路横断方向一列に並ぶ礫列タイプ、円弧状もしくは楕円状に並ぶ礫段タイプ、あるいは砂礫堆前縁に対応する大波高礫列タイプなどが知られている。より自然な魚道の設計のためには、ステップ部の構造を把握し、魚道設計法に取り入れることが必要であるが、それらの細部構造に焦点を当てた報告は、藤田・道上・澤田⁶⁾や門田・鈴木ら⁷⁾による平面形態の計測例以外にはほとんど存在しないのが現状である。本論文は自然型魚道におけるステップ部細部設計法の確立を目指したものであり、前半において今回新たに実施した群別川の河床形態・河床材料の調査結果、とくに詳しい礫列形状結果を示し、後半において水路実験で得られた礫列河床に関する

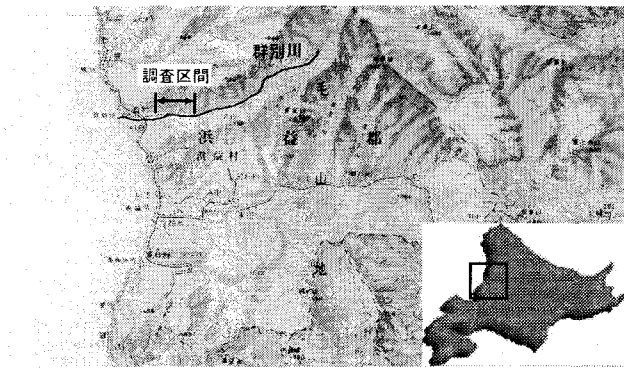


図-1 群別川的位置

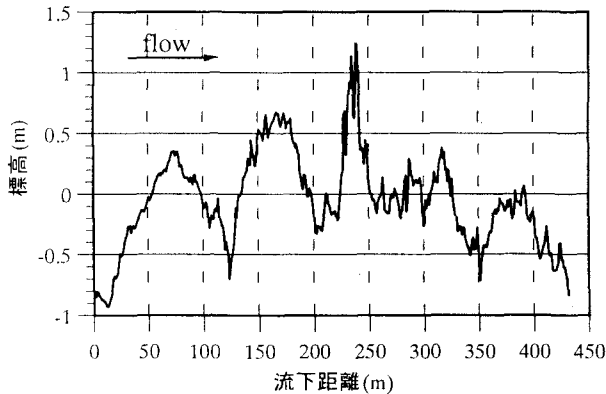


図-2 群別川縦断標高(河床平均勾配差し引き)

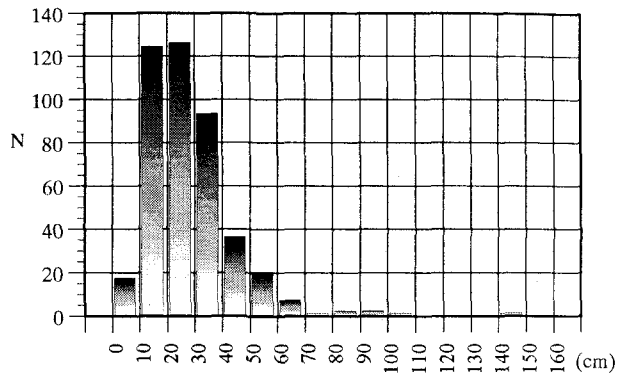


図-3 河床構成材料の粒径別個数分布

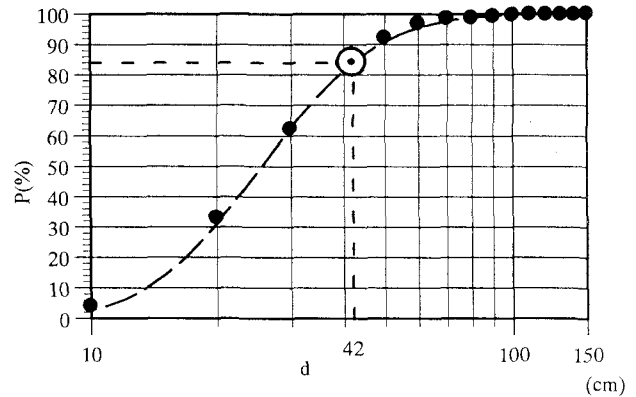


図-4 河床構成材料の粒径分布

解析を示した。両者の比較・検討により、おおよその設計指針を示している。

2. 群別川の河床形態

観測対象とした群別川は、北海道留萌市に位置し、流域面積33.9km²(山地流域面積31.5km², 平地流域面積2.4km²), 幹線流路長15.7kmを有する二級河川である。図-1に調査流域の地図を示す。この河川は比較的自然状態に近く急勾配(平均河床勾配1/44)であるため、数多くの明瞭に発達した礫列が形成されている。我々が観測した区間は河口から上流2km付近の約400m区間であるが、同区間は大きな分岐流路の片方側であり、観測地上流から280m付近に分岐流の合流部がある。一般調査として、河床の縦断形状や河床構成材料の粒径等を縦断方向1m, 横断方向1mの間隔で行った。

(1) 河床形態

図-2に河床縦断図を示す。ただし、平均河床勾配を差し引いて描いている。

図中の100m～400m区間で多く見られるのこぎり刃のような細かい波が礫列河床形態であり、区間内に40個の明瞭な礫列が確認できる。計測データから

求められた礫列の平均波長は7.55m, 平均波高は0.23mであった。これらの小規模河床波がいくつか集まり、波長80～100m規模の中規模波を形成している。小規模波の最大波高は0.80mであり、このような大波高ステップ部を有する礫列は小規模波と中規模波の波長が重なり合う流れの転向部に位置していることが多い。この現象は我々が行った水路実験でも確認されており、非常に興味深い。

(2) 礫列特性

a) 河床構成砂礫と波高

河川横断方向中央点の河床構成砂礫の粒径を上流から1m毎に計測し、合計431個のデータを得た。その粒径分布表を図-3に示す。平均粒径は28cmであった。この粒径個数データから粒径対数平均 μ , 対数分散 σ^2 , 粒径密度正規分布関数を計算し、粒径分布を導いた。その結果を図-4に示す。この図によると、粒径別個数は対数正規分布によく載っており、既往の知見と適合している。

長谷川³⁾は、礫列の代表波高 Δ は河床材料の84%粒径に等しいことを指摘している。この粒径分布曲線から84%粒径を求めると $d_{84}=42\text{cm}$ であり、図中に示した。次式(1)(2)で表される礫列の波高・波長推定式より理論波長を求めると $\lambda=7.74\text{m}$ となり、実測平均

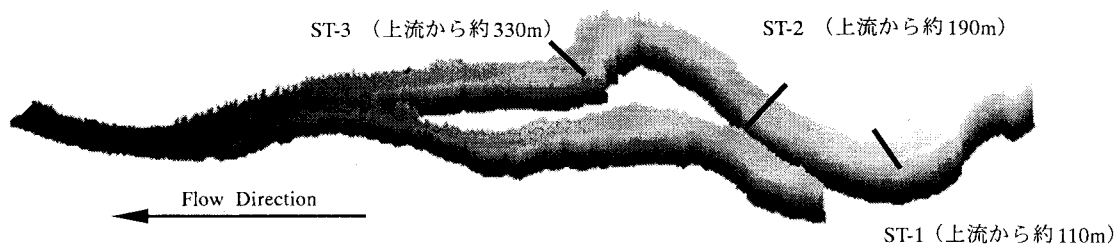


図-5 群別川標高図と計測対象礫列の位置

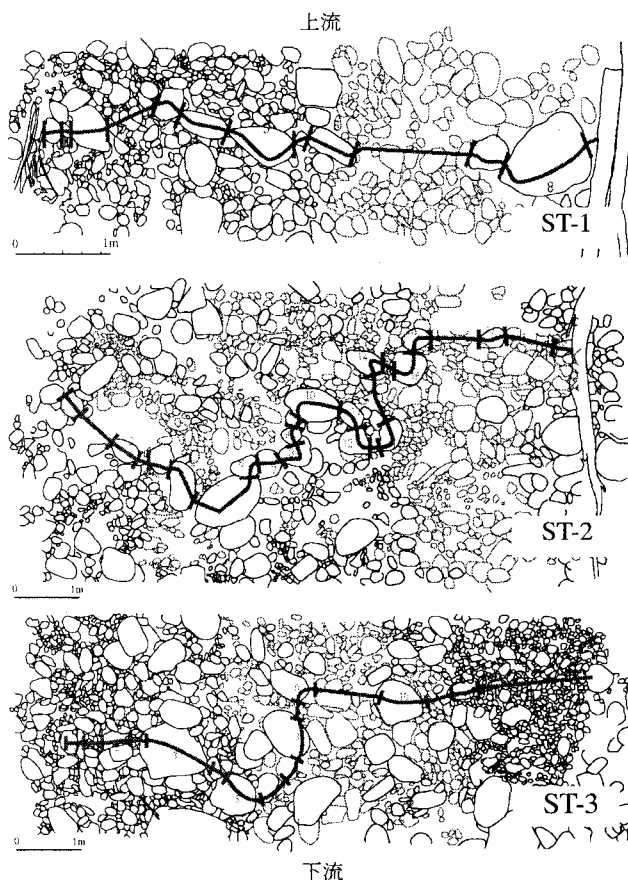


図-6 礫列平面スケッチ (上から ST-1, ST-2, ST-3)

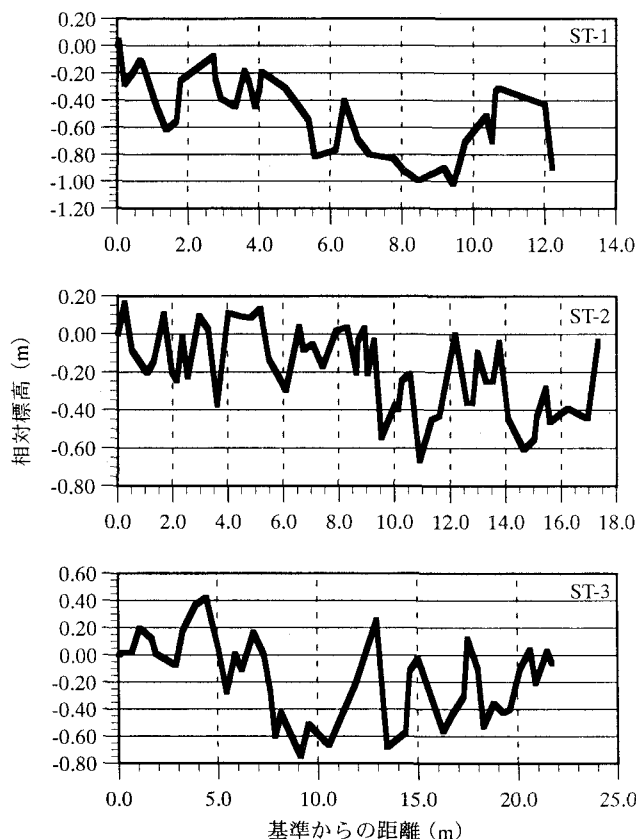


図-7 礫列の横断標高図(スケッチの測線上)

値 7.55m と非常によく一致する。波高の実測平均値 (28cm) が推定値 (42cm) よりも小さい理由としては、1m×1m 間隔で計測を行ったため、小規模波のステップ高を十分計測することができなかったことが考えられる。

$$\Delta = 6.43 I^{5/6} h_c \quad (1)$$

$$\lambda = 3.36 \sqrt{6.48 \sqrt{I} - 1/3} I^{-1/6} h_c \quad (2)$$

ここで、 h_c は限界水深、 I は河床平均勾配である。

なお、礫形状を球と仮定して重量粒度分布を求めると、図-4 と同じ目盛で下に凸の分布が得られ、Talbot 分布に近づく。

b) 礫列の平面的特徴

礫列の詳細な考察を行うため、3箇所の明瞭な礫列

の平面スケッチを行った。計測対象礫列の位置を図-5 に、スケッチを図-6 にそれぞれ示す。また、スケッチ図中の測線上の相対標高図を図-7 に示した。この標高図は最左岸の礫を基準として相対的に描かれている。

図-6 によると、ST-1 の場合、礫列は河川横断方向にほぼ一直線に砂礫が並んでおり、一般的なステップ部となっている。これとは対照的に、ST-2, 3 の場合では、礫列は複数の円弧状の配列が接続した曲線的な配列となっている。多くの高モードの礫段が隣接して一つの礫列を形成しているようである。現地では ST-1 のような礫列は少なく、ST-2, 3 のような複雑な形状をした礫列のほうが多く見受けられる。また、図-7 の横断標高によると、ST-2, 3 よりも ST-1 のほうが流心部の掘れ込みが大きい。しかし、ST-2,

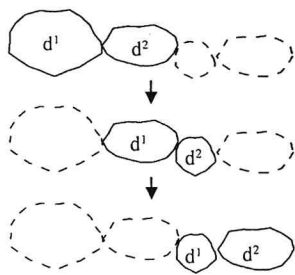


図-8 d^1, d^2 の定義

表-1 実験条件

	Q (l/s)	t (min.)	Q-t
TAD-1	5.0	30	
TAD-2	6.0	30	
TAD-3	7.0	30	
TAD-4	8.0	30	
TAD-5	9.0	15	
TAD-6	10.0	10	
TAD-7	11.0	5	
TAD-8	12.0	5	
TAD-9	13.0	5	

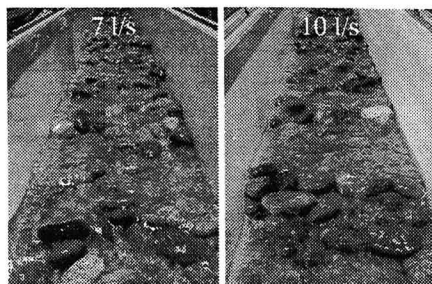
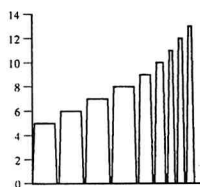


写真-1, 2 通水停止後の河床

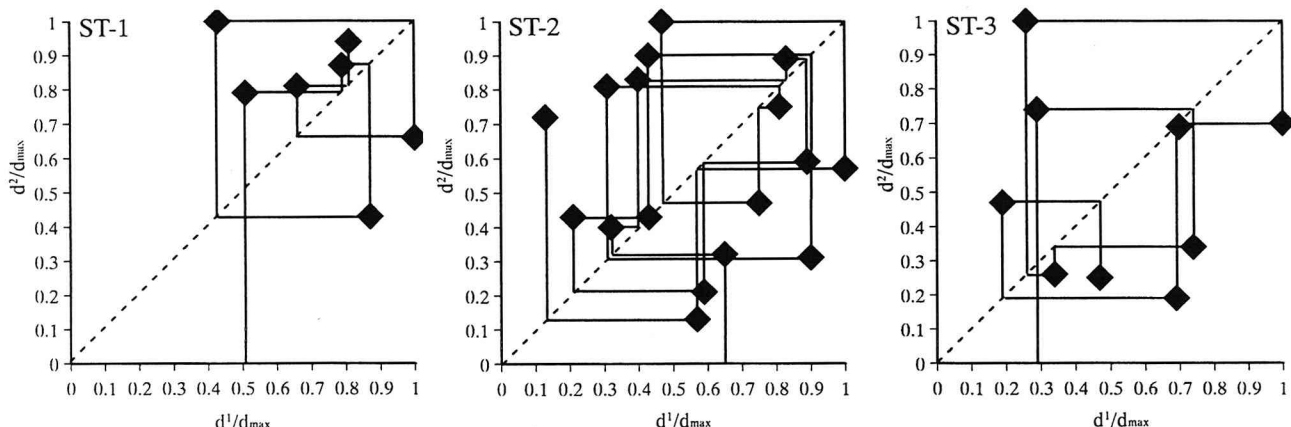


図-9 隣り合う礫列構成砂礫の関係(群別川)

3は多くの水脈を造っている。直下のプールについては前者で浅く、後者で深い。

隣り合う2個の礫列構成礫の関係について、標高データから各砂礫の粒径を読み取り、検討する。図-8のように、一番左岸に位置する礫の粒径を d^1 、その右隣の礫の粒径を d^2 として、横軸に $d^1/d_{\max}$ 、縦軸に $d^2/d_{\max}$ をとりプロットする。次に、ひとつ右側に移動して d^1, d^2 としてプロットする。図-9はこの方法で右岸まで繰り返してプロットし、隣り合う礫を折れ線で結んで表現した図である。 $d_{\max}$ は、そのステップ部の構成砂礫の最大粒径である。

ST-1では、描点は45度線上部付近に集まっているように見え、 $d^1/d_{\max}$ 値および $d^2/d_{\max}$ 値は全て0.4以上となっている。これに対し、ST-2, 3の場合では描点が無秩序にばらつき、線は円を大きく描くように回っている。これは、ST-1はほぼ均一粒径によって構成されているが、ST-2, 3は大小さまざまな粒径の礫がランダムに並んで構成されていることを意味している。サンプルデータが少ないため断定できないが、一直線状に礫が並ぶ礫列は比較的均一粒径で構成されており、小さな礫段が隣接して形成される礫列はさまざまな粒径の砂礫によって構成されているようである。

3. 実験における礫列特性

比較する実験は昨年報告した実験⁸⁾であり、詳細は文献によるものとしてここでは概要を述べる。

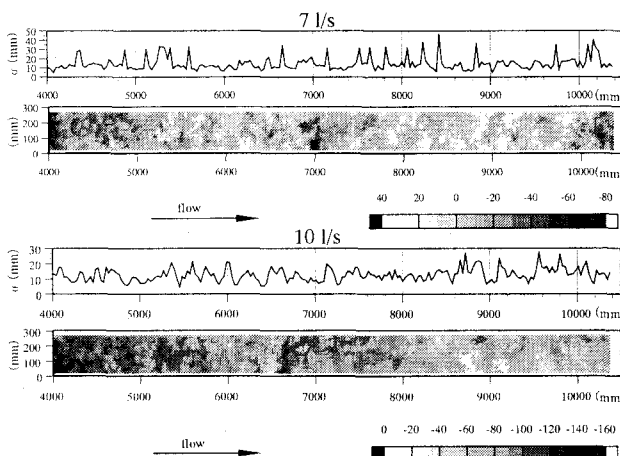
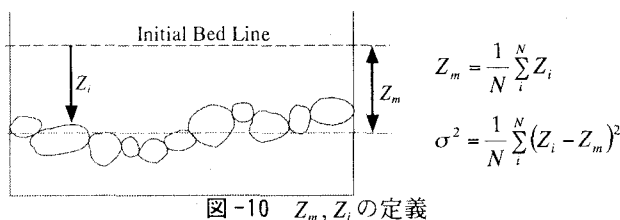
(1) 実験条件

使用水路は、長さ11m、水路幅30cm、深さ40cmの片面アクリル板製の直線水路であり、これによく混合したTalbot型粒度分布($n=1/2$)に従う混合砂礫を水路底面より25cm厚さに水平に敷き詰め、勾配1/10、無給砂の条件で流量5l/sから断続的に通水した。異流量の通水を重ねることによって現れる河床の変化について観察した。実験条件・通水パターン等を表-1に整理する。

(2) 礫列特性

この実験で、流量7l/s(TAD-3)の場合、円弧状の礫段が水路幅方向に二列に並ぶような河床が形成されたが、流量9~10l/s(TAD-6)の場合では、最大粒径礫が鱗状に集積する大波高ステップが形成されている。両者の構成砂礫材料の粒径分布や形成過程は全く異なるものであり、区別して考慮する必要がある。よって流量7l/s(TAD-3)と、流量10l/s(TAD-6)を例として、ステップ部に関する検討を行った。通水後の河床状況を写真-1, 2に示す。

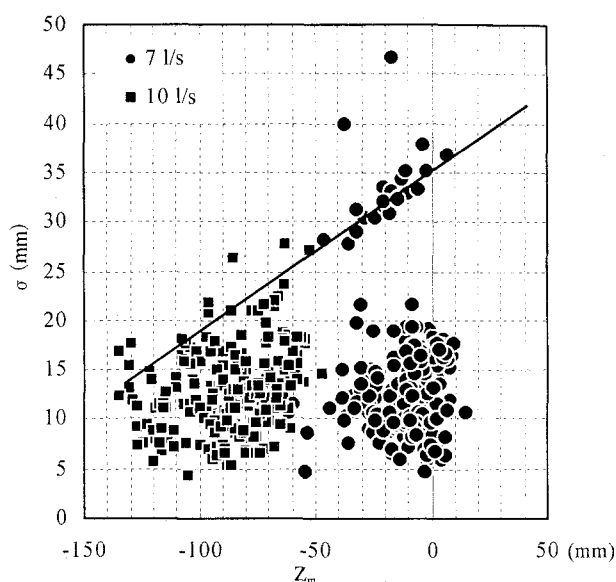
礫列は砂礫が水路横断方向にほぼ一列に並んで形



成されるものとし、図-10のように河床変位を平均化し、その分散 σ^2 を計算した。 Z_i は河床の初期河床からの掘れ深さであり、 Z_m はその平均値である。

横軸に流下距離、縦軸に標準偏差 σ をとった図を図-11に示す。礫段が形成される流量7l/sの場合、等間隔に大きな標準偏差値が現れ、そこに対応してステップ部が存在している。これは、ステップ部は水路横断方向に対して大小様々な礫で構成されるため凹凸が多く、対照的にプール（淵）部は比較的小さな礫が堆積しているためほぼ平坦な状態である事を意味している。よって、分散あるいは標準偏差は礫列の位置を確認する方法として良好な結果を示した。

さらに、横軸に横断方向平均値（原河床からの洗掘深）をとり、縦軸に標準偏差 σ をプロットしたものを図-12に示した。この図によると、流量7l/sの場合、礫列のステップ部と他の部分の分散値が明瞭に分かれている。興味深いことに、河床低下の大きい部分ほどステップ部分散値が低下している。これは、河床が堆積ぎみのところと低下気味のところで材料の分級程度が異なり、前者では大礫の占める割合が小さく、後者では大きくなっているためと考えられる。大礫の存在は分散を減少させるようである。流量10l/sで形成された礫列の標準偏差値は全体的に小さく、礫列の横断方向の凹凸が少ないことが分かる。これは、この実験が最大径礫に対する限界掃流力以上の流量のもとに行われたため、最大径礫が水路幅一杯により多く集まり、大きな河床せん断力に抵抗して礫列を形成しているためと考えられる。また、これらのステップ部は図中の直線付近に集中しており、流量7l/s



s実験におけるステップ部分散傾向の延長上にあることが注目される。

群別川の礫列調査と同様に、各3個の明瞭な礫列・礫段の構成材料について、隣り合う砂礫の粒径の関係をを用いて検討した（図-13）。その結果、流量7l/sの場合は描点のばらつきが大きい、流量10l/sの場合では図の右上に集中する結果となった。

4. 考察

群別川で計測されたST-1,2,3とTAD-3,6実験で得た礫列・礫段の構成砂礫と配列について検討する。

一直線に礫が並ぶ礫列タイプであるST-1とTAD-6の構成砂礫は、図-9,13からも明らかなように、かなり均一粒径に近い大礫が大部分を占めるという共通の特徴をもっている。これは、水流によって反砂堆が形成された後峰近傍で分級が進み、小・中礫は下流へ流送されて、大礫だけが残されて形状を保つという礫列の形成過程に大きく依存して生ずるものと考えられる。

一方、円弧状、曲線状に礫が並ぶ礫段タイプのST-2, 3とTAD-3は大小さまざまな粒径の砂礫を含んでおり、多くの小規模礫段が接続して一つのステップを形成していることが大きな要因となっている。

以上の結果をふまえると、魚道のための人工ステップとして前者のタイプの利用が簡便であると考えられる。すなわち、84%粒径に近い礫を直線状に設置するというものである。ただし、この場合に形成されるプールは比較的浅いものとなる可能性がある。後者のタイプを人工ステップとして設計・施工するのはかなり難しいであろう。異粒径の礫をランダム

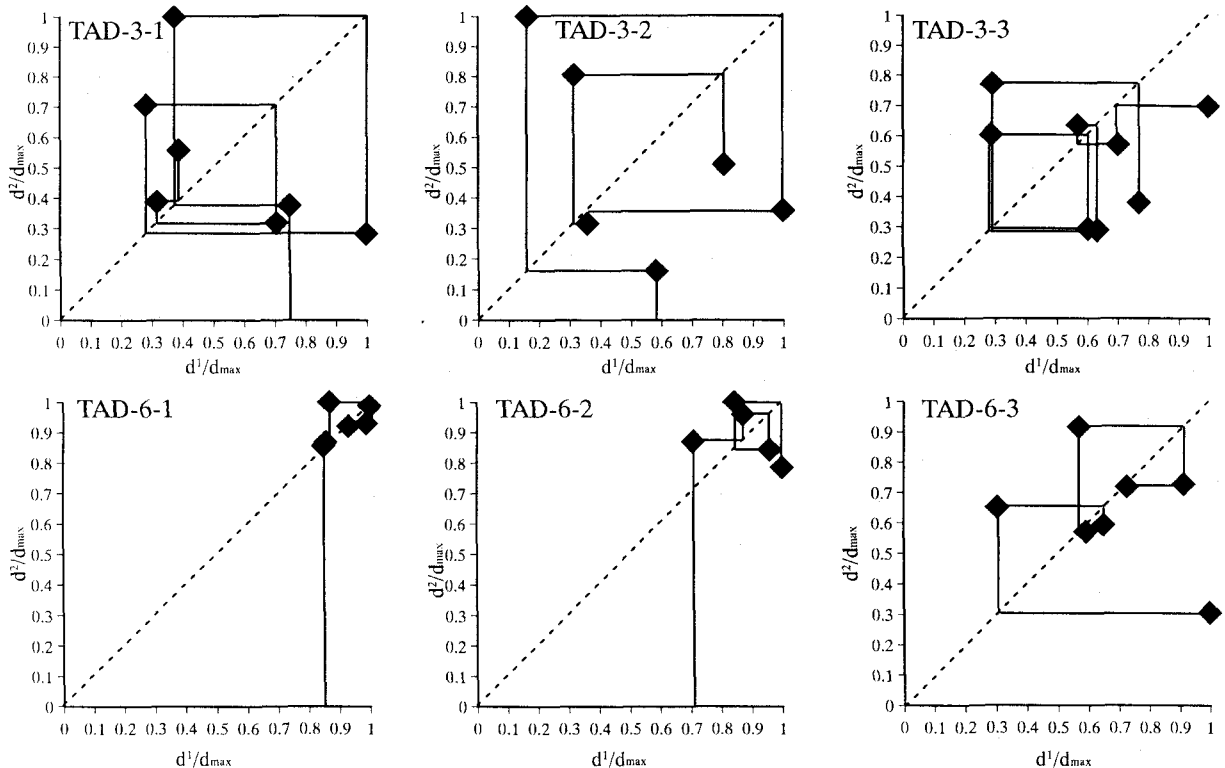


図-13 隣り合う礫列構成砂礫の関係(TAD-3 実験と TAD-6 実験)

に弧状に並べ、互いの礫のかみ合わせを強固にする必要がある。しかし、この場合に形成されるプール部が深く起伏に富んでいるので、生物の生息場としての多様性は勝るものと考えられる。

魚道への応用を図る場合、対象とする河川と調和を保つために、自然形成された礫列の形成流量を調べ、対応した間隔(現地観測及び式(2)より推定)で礫列模型を配置することが重要であろう。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- [1] 河床構成材料の粒径別個数は対数正規分布に一致している；礫列の平均波長、平均波高は従来の推定式に一致するなど、群別川の一般的河床形態はこれまでの知識によく合っている。
- [2] 現地では礫列と礫段が混在している。さらに小規模多列モードの礫段から成る礫列が確認された。
- [3] 大波高ステップを有する礫列は小規模波と中規模波の波長が重なる水流転向部で確認できた。
- [4] 河川横断方向に対して一直線に並ぶ礫段の構成砂礫は均一粒径に近いが、円弧状のプール部を有する礫段の構成砂礫は大小さまざまで隣り合う粒径の大きさもランダムである。
- [5] 河床標高の分散値は、礫列・礫段の性質をよく表現しており、分散値の大小は大礫がステップを占

める割合と大きく関わっている。

- [6] 魚道のための人工ステップ設置法として、84%粒径に近い礫を直線状に並べる方法が簡便な方法として推奨される。

謝辞：本研究は、平成13年度科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(課題番号:13555139, 研究代表者:長谷川和義)の助成を受けて行われた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：渓流河川における河床砂礫の混合特性と階段状河床形の形状特性，水工学論文集，第42巻，pp.1075-1080, 1998。
- 2) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：渓流の小規模河床形態に関する研究，土木学会論文集，No.656/II-52, pp.83-101, 2000。
- 3) 長谷川和義：山地河川の形態と流れ，水工学シリーズ88-A-8, pp.1-22, 1988。
- 4) 長谷川和義：渓流の淵・瀬の水理とその応用，1997年度(第33回)水工学に関する夏期研修会テキスト，pp.A-9-1～A-9-20, 1997。
- 5) 長谷川和義，上林悟：渓流における淵・瀬(ステップ・プール)の形成機構とその設計指針，水工論文集，第40巻，pp.893-900, 1996。
- 6) 藤田正治・道上正規・澤田豊明：階段状河床の洪水による変形に関する現地調査，水工学論文集，第43巻，725-730, 1999。
- 7) 門田章宏・鈴木幸一・渡辺誠司・森一庸：重信川山地部における河床形態に関する測量調査，水工学論文集，第44巻，pp.741-746, 2000。
- 8) 田中航太・竜澤宏昌・長谷川和義：最大粒径移動限界を超える流量による大波高礫列・礫段の形成，水工学論文集，第45巻，pp.745-750, 2001。

(2001. 10. 1受付)