

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径の規定要因

SUB-SEGMENT DIVISION AND THE DETERMINANT FACTORS OF THE BED MATERIALS IN MOUNTAINOUS STREAM

三國谷隆伸¹・知花武佳²

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

The number of the engineering studies on mountainous rivers is limited, though it's quite important when we examine the sediment transportation in the whole basin scale. In this study, we focused on the relationship between the bed material size and various hydraulic parameters, and proposed the sub-segment classification of the mountainous stream.

Through the field measurements at 44 points in Kanto region, we found out riverbed slope 1/40 is clear boundary of that whether step-pool structure develops or point bars develop.

On the riverbed where the thickness of the active layer is very thin, the bed material and tractive force during flood has close relationship which was reported in previous studies. The riverbed with thick layer, however, bed configuration such as step-pool structure develops and its characteristics agrees with the theoretical features.

Key Words : Mountainous stream, Line sampling method, Sub-segment, micro scale bed Configuration, Meso-scale bed configuration

1. はじめに

流砂系一貫の土砂管理を考える上で、土砂の生産地である山地河川における土砂動態を把握することは不可欠となる。しかし、中・下流域と比較して山地河川の研究は不足しているのが現状である。例えば、山本によるセグメント論¹⁾においても、セグメント1以下の河川においては河床勾配、水深、河床構成材料などに具体的な値が言及されており、またより下位のサブセグメント区分も提示されているのに対し、セグメントM、すなわち本研究で対象とする山地河川に関してはほとんどの物理環境要素の特徴が“さまざま”という表記に留められている。

そこで、本研究では山地河川を、その河床構造に着目しながらサブセグメントに区分し、かつそのサブセグメントごとに河床構成材料と、地形・洪水流量といった諸水量との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 現地調査

(1) 対象河川

本研究では関東地方の利根川水系・荒川水系・多摩川水系・相模川水系を対象とし、それらの山地域計44地点で後述する調査を行った。対象河川は流域地質が堆積岩地質、火山岩地質、深成岩地質に大別され、それぞれ生産土砂の風化特性が異なることから、河床材料の粒度特性も異なることが予想される。

全対象地点の地図を図-1に示す。



図-1 対象地点一覧

表-1 観測データの一覧

グループ	サイトNo.	サイト名	川幅(m)	1/河床勾配	代表粒径(mm)	既往最大	平均年最大	2009年洪水
A	1	青藤沢橋(左支川)	9.1	5	351	-	-	-
	2	久度の沢(下流側)	14.5	6	400	-	-	-
	3	久度の沢(上流側)	14	6	350	-	-	-
	4	しだくら橋(右支川)	11	7	320	-	-	-
	5	神戸川	9	10	260	-	-	-
	6	山中入	6.6	12	270	-	-	-
	7	出川	6.2	13	230	-	-	-
	8	本谷	8	15	235	-	-	-
	9	瀬の入橋	11.5	19	210	-	-	-
	10	大吾沢	14	30	180	-	-	-
	11	南浅川(左支川)	8	40	160	-	-	-
B	12	本間橋	4.3	12	114	-	-	-
	13	塩の沢	7.5	16	78	-	-	-
	14	作業平橋	5.5	18	133	-	-	-
	15	藤熊川	15	19	120	-	-	-
	16	高麗川	10	21	75	-	-	-
	17	東沢	6.9	23	130	-	-	-
	18	南浅川(右支川)	3	25	110	-	-	-
	19	北秋川(右支川)	15	25	90	-	-	-
C	20	麦川橋	21	72	230	114	101	80
	21	小中	28	84	375	906	390	350
	22	二瀬ダム下	20.8	87	160	396	230	66
	23	川井堰下	24	180	47	1540	380	110
	24	北秋川(合流後)	26	40	64	-	-	-
D	25	橋ノ原小橋	14.5	50	64	1350	333	97
	26	南浅川(合流後)	7	50	78	-	-	-
	27	塩水川	18	50	74	-	-	-
	28	北秋川(上流側)	21	55	34	-	-	-
	29	さんじょう橋	6.4	58	93	-	-	-
	30	不動滝	20.3	59	93	767	306	106
	31	青藤沢橋	21.3	61	54	-	-	-
	32	しだくら橋	25	60	47	-	-	-
	33	御嶽小橋	28	70	100	1690	417	122
	34	足尾掛水	31	75	245	1221	496	340
	35	長瀬	30	80	26	-	-	-
	36	下俣ノ瀬橋	21	85	68	-	-	-
	37	千歳橋	19.5	85	82	-	-	-
	38	赤川	31	90	75	-	-	-
	39	袖の小橋	30	90	73	1640	404	118
	40	沢井	42	90	34	1758	433	127
	41	古里	28	100	42	1444	356	104
	42	神流川	42	110	36	-	-	-
	43	鶴の瀬橋	37	120	55	1716	423	124
	44	軍畑	33	150	42	1794	442	129

(2) 調査項目

a) 河道形状

山地河川の特徴は兩岸を基盤岩によって規定されていることであるため、その横断面形を矩形断面と近似することとする。こうした上で、重要な洪水時の川幅を把握するため岩盤の幅を測定した。また、その地点の河床勾配として上下流25mずつ、計50mの区間の局所的な河床勾配を測量した。

b) 河床材料

比較的粒度の均質な中流域においても、河床材料の粒度組成を正確に調査することは難しい作業である。まして、礫径が多様で分級の程度も大きい山地河川においては一般的な河床の粒度分布測定方法は確立されていない。例えば権田ら²⁾はステップ構成礫のみに着目して粒度を測定し、その60%通過粒径を代表粒径としているが、この方法は河床材料全体を対象とする本研究にはそぐわない。また、筆者ら³⁾は礫を砂・砂利・中礫・大礫の4段階に区分し、60cm四方の方形枠内に占めるそれぞれの面積割合を求めているが、この方法は定量性に欠ける上に、方形枠の設置の仕方による誤差が極めて大きい。

そこで、本研究では山本ら⁴⁾、河村ら⁵⁾にならい、線格子法を用いて、1地点で原則として100個程度の礫径を測定し、粒径加積曲線を作成した。全地点同じ基準を用いることで、少なくとも本研究内での粒度組成の比較が可能とした。そうして得られたデータから、60%通過粒径を代表粒径 D_r として、以降の考察に用いる。

c) 洪水流量

山地河川では基本的に流量データが入り手困難なため、最寄りの水位観測所の流量データ、および近傍のダムの流入量、流出量データ（水文水質データベース）に流域

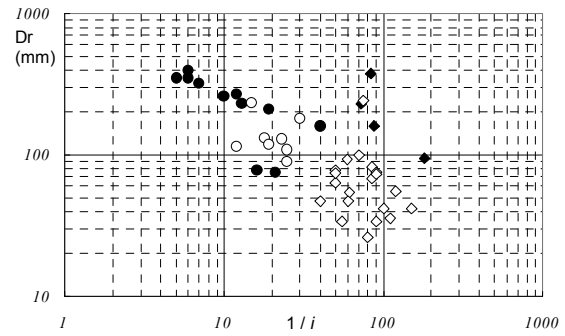


図-2 勾配と代表粒径

- : グループA (小規模河床波+薄い堆積層)
- : グループB (小規模河床波+厚い堆積層)
- ◆ : グループC (中規模河床波+薄い堆積層)
- ◇ : グループD (中規模河床波+厚い堆積層)

面積比を乗じた値で洪水流量を推定した。ただし、いずれも比較的下流側に位置する12地点のみでしかこの推定も用いることができなかった。

また、考察には入手したデータの範囲内での既往最大流量、平均年最大流量、および研究時の直近の洪水である2009年洪水の3種類を用いた。

観測点ごとに以上のデータをまとめたものが表-1である。なお、表中のグループは後述の分類に従っている。

(3) 河床構造による分類

源流部から谷口までの山地区間には、山地河川に特有の小規模河床波であるステッププール構造が卓越している部分と、兩岸を岩盤で挟まれた河道内に交互砂州や固定砂州と言った中規模河床波が卓越する部分が見られる。筆者ら³⁾は既往の研究において、その違いは比較的明瞭であり、境界部には支川の合流部があることが多いことを明らかにした。

さらに、河床の交換層の厚さという観点から、出水時に土砂輸送が活発に起こっているか否かを判断した。具体的には、河床に岩盤が露出しているかどうか、ダムや堰といった人工構造物の影響で河床の粗粒化、アーマ化が進行しているか否かを判断基準とした。なお、後者に関しては、本研究の調査とは別にダム上下流の粒径比較を行っており、その結果から判断している。

河床の交換層が薄い区間は、土砂輸送が不活発であり、出水によって移動しえない大きさの礫を中心に河床が構成されていることが予想され、逆に堆積層が厚い区間は土砂生産の活発な山地河川ゆえに河床が細粒分を中心に構成されていることが予想される。

3. 観測結果の分析

(1) 勾配 - 代表粒径の関係



図-3 グループC、粗粒化した河床



図-4 グループD、自然河床

図-2は表-1中の、勾配 i と代表粒径 D_r との関係を示し、上記の河床構造に基づいて分類したものである。なお、横軸には勾配 i の逆数をとっている。

図-2中の分類は、それぞれ

- ：グループA（小規模河床波＋薄い堆積層）
 - ：グループB（小規模河床波＋厚い堆積層）
 - ◆：グループC（中規模河床波＋薄い堆積層）
 - ◇：グループD（中規模河床波＋厚い堆積層）
- を表している。

図-2をみると、勾配40分の1を境に、ステッププールが見られるかどうかの明瞭な違いがあることがわかる。既往研究では、河床勾配が2%以上の領域にステッププールが分布すると言われている²⁾が、本研究では実河川においてそれを確認したことになる。

ここで、この勾配1/40を境に、それより急な区間を小規模河床波が卓越するセグメントM-1、緩やかな区間を中規模河床波が卓越するセグメントM-2と定義する。

(2) セグメントM-2

a) セグメントM-2の特徴

セグメントM-2は中規模河床波が卓越するという点で中流域と似た景観といえる。しかし、河岸が基盤岩によって構成されているという点で、洪水時の水理量によって川幅がきまる中流域と決定的に異なる。また、側岸や支川から活発に土砂供給が行われるという点も中流

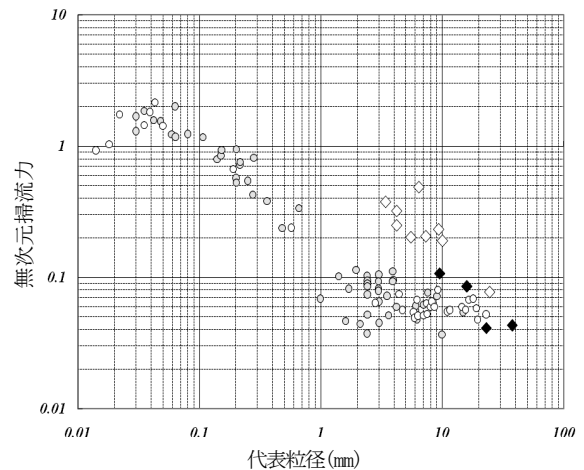


図-5 代表粒径と無次元掃流力（山本（1994）に加筆）

- ◆：人為的インパクトを受け堆積層が薄くなっている区間
- ◇：河床堆積層の厚い自然区間
- ：山本（1994）による沖積河川区間のデータ
（○と●の違いはもとの資料の違い）

域とは異なる。その中で、セグメントM-2には、図-3のように河床が粗粒化しているグループC、図-4のように細粒分におおわれているグループDなどの景観がみられる。

図-5は沖積河川の代表粒径と無次元掃流力との関係を表した山本のグラフ¹⁾に、本研究で新しく得たデータを加筆したものである。無次元掃流力の計算に当たっては、2 (2) a) で測定した川幅、勾配の矩形断面と仮定し、c) 示した洪水流量算定手法による平均年最大流量を用いて等流計算を行った。

山本は、このグラフ中で代表粒径が1cm以上の、扇状地区間に当たるセグメント1では、概ね無次元掃流力が0.05～0.1の間に集まるという事を示している¹⁾。無次元掃流力が0.05というのは礫床河川における限界掃流力程度の値であり、この結果は、平均年最大流量程度の流量が流れている場合、河床材料は動くか動かないかの限界状態にありながら、輸送されていることを意味している⁶⁾。中流域では河岸が河床と同じ材料で構成されているため、側岸が浸食され、土砂輸送が起こらなくなるまで川幅が拡大するためと説明される。

b) 無次元掃流力と代表粒径

図-5中で、無次元掃流力が0.05付近にまとまっているのは◆で示される人為的インパクトを受けて、堆積層が薄くなっている区間である。この区間は、上流からの土砂供給が阻害されているために、細粒分は洪水によってほぼ抜け落ちてしまい、平均年最大流量程度では移動しえない大きさの礫だけが河床にとどまっていることになる。その結果限界無次元掃流力0.05付近に該当する大きさの代表粒径になっていると考えられる。

すなわち、中流域では供給される礫径が先にきまり、川幅が調整されて無次元掃流力が0.05付近に落ち着く河道ができるというプロセスであるのに対し、川幅が固定

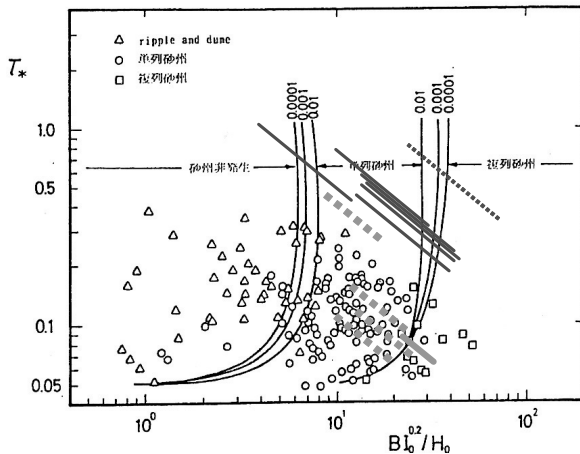


図-6 交互砂州形成条件（黒木ら1984に以下の線を加筆）

——砂州あり自然区間 砂州無し自然区間
——砂州ありアーマー化区間 砂州無しアーマー化区間

され、人為的な影響で上流からの土砂供給が限定されている山地河川では洪水流量に見合った礫径が残る，という全く別のメカニズムであるにも関わらず，結果として代表粒径と無次元掃流力の関係は図-5中で同じ位置にプロットされている．そして，逆にこういった河床の粗粒化が進行している区間では，洪水流量と河道形状からある程度の粒径予測が可能であることが分かる．

次に，◇で示される河床堆積層の厚い自然河床区間に着目する．この区間は無次元掃流力の値が0.05を大きく上回る点がほとんどで，平均年最大流量程度の洪水でも河床の土砂輸送が活発に起こっていることを示している．また，その点の並びに着目すると，図上で左上から右下にかけて概ね直線状に分布しており，その傾きはセグメント2以下の区間と類似していることが分かる．セグメント2は，粘着質河岸で削れにくく，平均年最大流量で河床にかかる摩擦速度の自乗が $200\text{cm}^2/\text{s}^2$ 程度となるくらいで安定するようである．このとき，河床の掃流力が限界掃流力をかなり上回るまで水深が深くなるために，土砂の交換が起こっていることが知られている．山地河川の自然河床区間も，河岸が岩盤で規定されているために大出水時には水深が極めて大きくなり，支川や側岸からの大量の供給土砂が活発に輸送されている，という点でその特性が類似しているといえる．この区間では，図からもわかるように掃流力に対して代表粒径が小さく，また一意に決まらないことと，摩擦速度もセグメント2のそれとは異なることから粒径の予測は困難であることが分かる．

c) 交互砂州の形成条件

次に交互砂州に着目すると，図-3，図-4のように土砂輸送が活発で細粒分の豊富なグループDのほうがよく発達していることが分かる．そこで，黒木らの交互砂州形成条件⁷⁾のグラフに今回の結果を加筆すると，図-6のようになる．図-6中で，薄い灰色の太線はアーマー化区間，



図-7 岩盤の露出した河床



図-8 礫におおわれた河床

濃い灰色の細線は自然河床区間を示し，実線は現地で砂州が見られた箇所，点線は見られなかった箇所を示す．また，直線の右下端は平均年最大洪水時の，左上端は既往最大洪水の状況を表している．

このグラフを見ると，自然河床区間は単列砂州領域のものは実線に，砂州非発生領域のものは点線になっており，発生条件と現地の状況が対応している事が分かる．一方でアーマー化区間は全て概ね単列砂州発生領域に収まっているにもかかわらず，どこも砂州はあいまいであり，このグラフ上では中規模河床波の形成条件を表現していない事が分かる．すなわち，今回堆積層が厚く土砂輸送も活発だと判断したところでは，河床波が形成されるのに対し，堆積層が薄く土砂輸送が活発でないと判断される場所では，河床波が明瞭に形成されないという状況を確認することができた．

(3) セグメントM-1

セグメントM-1は山地河川に特有とされるステッププール構造が見られる区間である．

図-2では，この区間は，主として●（河床に岩盤が露出している区間）からなる直線と，主として○（河床が礫におおわれている区間）からなる，勾配1/20，代表粒径100mm付近を中心としたまとまりに分類することができる．それぞれの代表的な景観は図-7，図-8のように

表-2 ステッププール波長

河床	サイト名	観測波長		理論波長
		平均値	分散	
岩盤	青藤沢橋(支川)	6.67	20.6	3.71
	久度の沢	7.88	13.7	3.63
	山中入	7.38	18.3	3.33
	出川	3.85	5.44	3.29
	瀧の入橋	3.6	3.09	3.11
	南浅川(左)	4.43	4.32	2.73
礫床	本間橋	3.33	1.14	3.33
	本谷	3.75	1.39	3.22
	作業平	3.75	1.38	3.14
	東沢	5.7	2.25	3.02
	南浅川(右)	3.69	1.31	2.97

なっている。

a) 勾配と礫径

岩盤の露出したグループA (●) では、勾配は対数グラフ上で1本の直線状にのっており、すなわち勾配から礫径が予測可能であるが、河床が完全に礫におおわれたグループB (○) では勾配1/20、代表粒径100mm付近を中心に、同じ河床勾配でも礫径には幅があることが分かる。こうした特徴はセグメントM-2で述べたものと類似している。

さらに細かく見ると、図-2中で勾配が1/10よりも急な箇所ではすべて岩盤露出型の河床であり、直線状に乗っているのに対し、1/10～1/20の区間は双方が入り混じり、1/10より急な区間の結果から導かれた直線が礫径の最大値の包絡線になっていることが分かる。これに関してもセグメントM-2の議論と同様に、洪水時に移動しない大きな礫のみがとどまったのが岩盤露出型の河床では、礫径が水理量によって決定されているために勾配と礫径が有意な相関をもつ。そういった箇所に十分な土砂が供給されると、そこに存在する大きな礫のサイズによって規定される勾配は変化しないまま、ステッププール構造の構成材料としての細粒土砂の量が増加するため、代表粒径は直線よりも下の領域で幅を持って分布することになる。そして、このときのオーダーは、勾配が1/10～1/40であり、その時に安定できる礫径のオーダーが、10cm前後と言うことになる。勾配が極めて急な1/10以上の区間ではそもそも細粒分によって河床が完全に覆われ得ないため、すべての点が岩盤露出型になっていると考えられる。

b) ステッププール波長

次に、ステッププール波長に着目する。今回観測を行った地点のうち、表-2に示す11点では0.5m間隔の縦断面形測量を30mの長さで行っている。そこから得た、ステッププール波長と、既往研究に従ったステッププール波長とを比較したものを表-2中に示す。なお、縦断面形からのステッププール波長は丹波ら⁸⁾の手法を用いて、ステップの位置とプールの位置を特定し、その平均値を求めた。理論波長は長谷川らの式(1)に従い、流量は流域面積に比例するものと仮定した。実験水路内に形成されたステッププール波長が式(1)に合致することを確認

しているが、現地のステッププール波長や波高はいずれも対数正規分布に従う広がりをもった値を示しつつも、理論と合致することが確認されている。

$$\lambda \approx 2\pi H \sqrt{Fr^2 - \frac{1}{3}} \approx 3.36 \sqrt{6.48\sqrt{I} - \frac{1}{3}} I^{-\frac{1}{6}} \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 λ :ステッププール波長、 H :平均年最大流量下での水深、 I :河床勾配、 q :単位幅流量、である。

表-2をみると、礫床河床区間では理論値に近く分散も小さくなっていることが分かる。これは、細粒分が活発に輸送されるためにステッププール形成の初期段階である、反砂堆が明瞭に形成されるためと考えられる。

一方で岩盤河床区間ではステップ波長の観測値が理論値と大きく乖離し、かつ分散も大きい。これは、そもそも土砂輸送が不活発なためにステッププール構造が明瞭に発達しない、あるいは形成後に細粒分が抜け落ちて破壊されてしまっているためである。

すなわち、これらの結果もセグメントM-2の交互砂州の発生の有無と同様の結果であり、勾配でほぼ河床材料が決まってしまうような、静的な状況下におかれた河川では河床形状は曖昧であり、時に岩盤も露出するが、そうした粒径よりも細かい材料が大きな礫に混じりながら輸送されているような、動的な状況下におかれた河川では、ステッププール構造や、砂州と言った地形が明瞭に形成されることになる。

4. まとめ

以下に本研究をまとめる。

まず勾配1/40に、小規模河床波が卓越するか中規模河床波が卓越するかの境界が見られることを見出し、それより急な区間をセグメントM-1、緩やかな区間をセグメントM-2と定義した。

次に、セグメントM-2では人為的インパクトによって河床が粗粒化している区間、セグメントM-1では河床に岩盤が露出している区間を、河床の堆積層が薄く、土砂輸送が不活発な区間と判断した。すると、両サブセグメントに共通して、河床堆積層の薄い区間では水理量と礫径の間に優位な相関がみられ、すなわち地形や流量から礫径がある程度予測可能であることを示した。しかし、こういった区間では小規模・中規模河床波は、明瞭に発達せず、その形成条件や波長を既存の理論から予測することはできない。

逆に、河床の堆積層が厚い区間では礫径の予測は困難だが、河床波は既存の理論とよく合致することを確認した。

謝辞：本研究を実施する上で、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部部長藤田光一氏には、多くのご助言を頂いた。また、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。関係者の皆様に、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) 権田豊, 岡崎達也, 西井洋平, 川邊洋: 山地河川における Step-Pool 構造の形状及び分布特性, 新潟大学農学部研究報告第61巻1号, pp. 67-93, 2008.
- 3) 三國谷隆伸, 知花武佳, 丹波聖泰: 山地河川合流部における河床構造の分析, 河川技術論文集第15巻, pp. 237-242, 2009.
- 4) 山本晃一: 礫河床のサンプリングと統計的处理, 土木技術資料13-7, pp. 354-358, 1971.
- 5) 河村三郎, 小沢功一: 山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布, 土木学会誌55-12, pp. 53-58, 1970.
- 6) Parker, G.: Self-Formed Straight Rivers with Equilibrium Banks and Mobile Bed. Part 2. The Gravel River, J. Fluid Mech., 89, pp. 127-146, 1978.
- 7) 黒木幹雄, 岸力: 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, 1984.
- 8) 丹波聖泰, 知花武佳, 片山芙美恵: 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, 印刷中, 2011.
- 9) 長谷川和義, 河川上流域の河道地形, ながれ24, pp. 15-26, 2005.

(2011. 5. 19受付)