

河床材料の粒度組成と落差工の有無が 土砂動態に及ぼす影響

—御勅使川と大武川を例として—

THE EFFECTS OF RIVER BED GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND
GROUND SILL ON SEDIMENT DYNAMICS
— A CASE STUDY OF MIDAIGAWA RIVER AND OOMUKAWA RIVER

Wenshin LIN¹・原田大輔²・知花武佳³
Wenshin LIN, Daisuke HARADA and Takeyoshi CHIBANA

¹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)

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 (同上)

³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 (同上)

Understanding to sediment dynamics, especially in upstream, is not sufficient to precisely estimate amount and component of bed load. In this paper, two tributaries - Midaigawa River and Oomukawa River - having the same scale in high-sediment-producing Fujikawa River basin are compared. Flume experiment is held to clarify characteristics of mixed sand and influences of continuous drop structures. Thereafter how alluvial procedure determines riverbed materials and results to differences in grain size distribution is identified.

Key Words : *Sediment dynamics, grain size distribution, mixed sand, ground sill*

1. はじめに

流域一貫の総合的土砂管理の重要性が指摘されており、土砂輸送量を粒径別に時系列で把握することが求められているものの、上流域での土砂動態への理解は未だ不足している。そのため、出水時の採砂による直接的な観測や、ハイドロフォン用いて掃流砂の衝突音を分析する間接的な観測が実施されており、徐々にデータが蓄積されつつある状況である。

その一方で、平水時に調査可能な河床材料の粒度組成を縦断的に調べていき、その状態を水路実験で再現することにより、洪水時の流砂形態をある程度推測することも可能ではないかと考えられる。そこで本研究では、規模が似ていても流域地質が異なる二つの川において、河床材料の粒度組成を縦断的に計測し、その粒度組成に基づいた混合粒径の材料を敷きならして水理実験を行う。そして、その結果と現地の状況を比較することにより、掃流砂の粒度組成が河床材料の粒度組成及び流砂量に与える影響について考察し、そこに落差工群が設置された

場合の影響を明らかにする。

2. 現地調査

調査対象としたのは土砂生産が盛んな富士川流域である。釜無川の右支川である御勅使川と大武川は南北20kmほどしか離れておらず、規模も表-1に示したように類似している。いずれの河川においても、山間部には砂防ダムが複数設置されており、扇状地部でも100～200m間隔の床固工群により河道が固定されている。

粒度組成の縦断変化を確かめるため、両川の山間部、扇頂部、扇中部、扇端部にてそれぞれ線格子法を用いて河床材料を調査した(図-1, 図-2)。線格子法では河原に50mのメジャーを二本、流路沿いと河原頂部に設置し、1m間隔で計102個の礫を採取しつつ、それらの中間径を計測した。ただし、対象地では粘性を持つ材料の割合は無視できる程度であると判断し、砂以下(2mm以下)の材料は全て1mmとして記録した。また、2014年最大流量になった台風18号前後(‘印が台風後)の調査結果を比

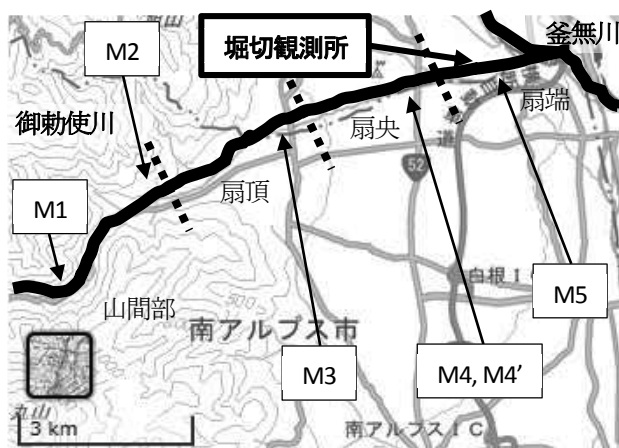


図-1 御勅使川調査地点

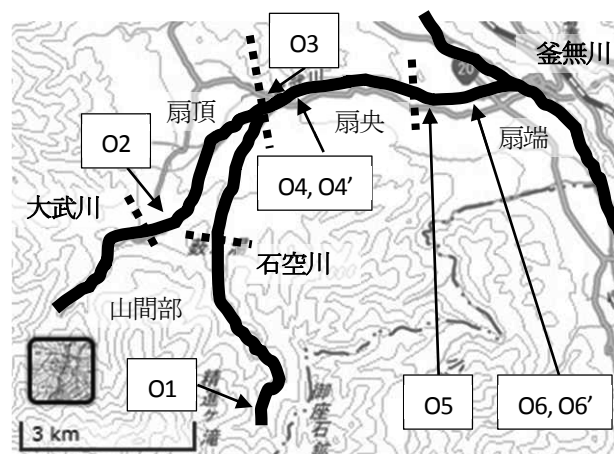


図-2 大武川調査地点

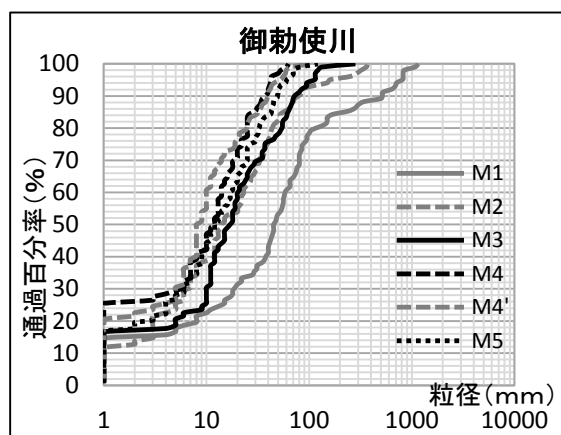


図-3 御勅使川粒径加積曲線

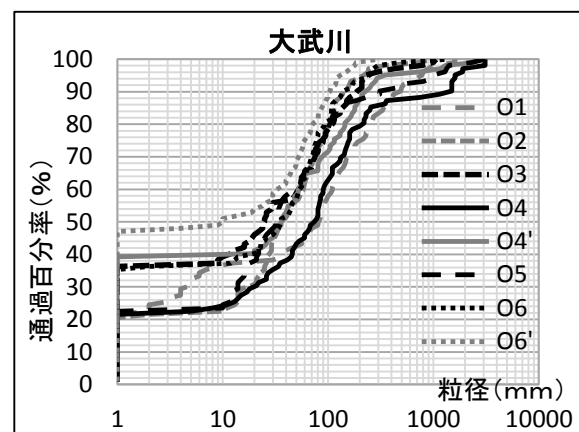


図-4 大武川粒径加積曲線

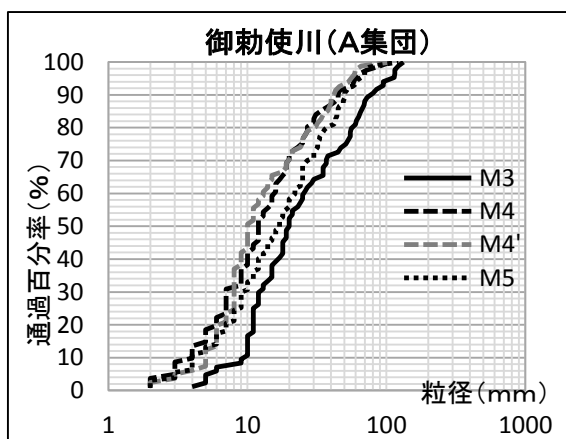


図-5 御勅使川主要材料粒径加積曲線

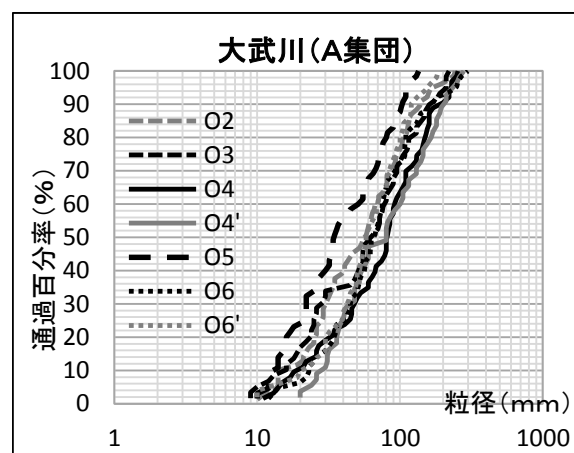


図-6 大武川主要材料粒径加積曲線

較することで、洪水による粒度組成の変化も把握した。

御勅使川は泥岩地質を源流域に有しており、土砂生産源付近及び、火成岩地質を流れる山間部M1地点付近には1m級の安山岩などの巨礫が点在しているものの、扇状地では256mm以上の河床材料がほとんど確認できなかった(図-3)。それに対し、大武川は花崗岩地質を流域に有しており、全域にかけて1m級の巨礫が確認されている。砂も各サイトにおいて20%以上を占めているが、その割合は一洪水で大きく変動した(図-4)。

なお、これらの粒径加積曲線に見られる違いは巨礫の有無と砂の割合に大きく影響されているため、山本¹⁾の手法に基づき、巨礫や砂分を除く主要材料A集団のみの粒径加積曲線を作成すると、扇状地では粒径加積曲線の形が揃い、サイト間の粒度分布の違いも倍半分に収まることになる(図-5、図-6)。御勅使川の粒度組成は下流に行くに連れ細粒化する傾向が見られるが、複断面のM4区間ではその下流より河床材料が細かい。一方、大武川ではA集団のみを見ても特別な規則性は見られない。

表-1 御勅使川と大武川諸元²⁾

		御勅使川	大武川
流域面積 (km ²)		75	74
長さ (km)		18.8	16.4
平均 勾配	扇頂	1/33	1/24
	扇央	1/31	1/38
	扇端	1/51	1/54

表-2 実験の条件

	落差工なし			落差工あり (前,後)		
	A1	A2	A3	B1,B1'	B2,B2'	B3,B3'
流量	0.025 m ³ /min					
水路勾配	1/17	1/20	1/25	1/17	1/20	1/25
平衡勾配	1/17	1/21	1/26	1/28	1/34	1/43
τ^*_R	0.23	0.18	0.15	0.14	0.11	0.09
Fr 数	1.45	1.30	1.16	1.12	1.01	0.90

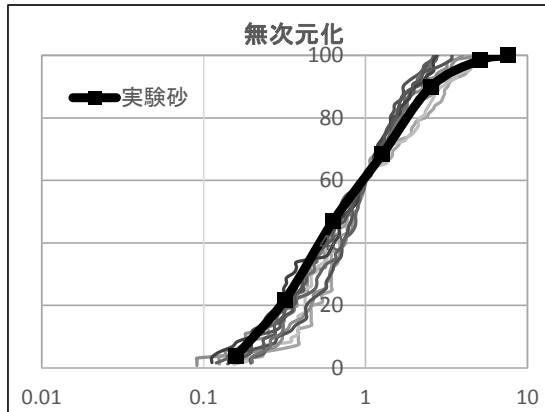


図-7 無次元粒径加積曲線

両川の代表粒径を平均すると、御勅使川が19mm、大武川が77mmと4倍もの差があり、粒度組成自体も大きく異なっていたにも関わらず、A集団のみの粒径加積曲線は比較的に似た形状に収束している。

3. 水理実験

河床材料の粒度組成が流砂の質（粒度組成）と量に与える影響を確かめるため、御勅使川と大武川のA集団の粒径加積曲線を d_{60} で基準化した無次元粒径加積曲線の形に添うように、6種類の砂を用いて代表粒径1.58mmに配合した（図-7）。それを全長5m、幅30cmの水路に5cm敷いて、現地の河床勾配よりやや急な、水路勾配1/17・1/20・1/25で流した。流量は、代表粒径以下の粒子がすべて十分掃流される0.025m³/m/minに固定した。そして、流砂量は通水約3分後に流れが安定してから、3分間下流端で砂を捕捉することにより計測した。なお、通水中は給砂していない（図-8）。

次に、落差工設置の影響を明らかにするため、御勅使川と大武川の床固工群を参考にし（落差工間隔：高さ：川幅≒100：1：30）、水路1m毎に高さ6cm、厚さ0.9cmの板を張った。そこに厚さ5cmの配合砂を敷いて給砂せずに通水し、落差工直上が砂で充満されてからの3分間とその続きの3分間（印）の流砂量を測った（図-9）。各実験の条件と通水後の河床平衡勾配を表-2に示す。

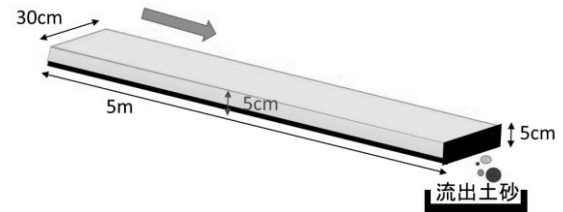


図-8 実験A（混合粒径）模式図

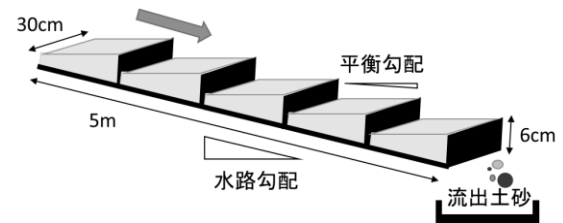


図-9 実験B（落差工設置）模式図

4. 実験結果

実験で捕捉した砂は乾燥させ、篩い分けして粒径別に重量を求めて、流砂量を測った（表-3）。また、実験条件を、式(1)に示す芦田・道上³⁾の粒径別掃流砂量式に代入し、流砂量を見積もっている。

$$\frac{q_{Bk}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)gd_k^3}} = 17p_{bk}\tau_{*ek}^{\frac{3}{2}}\left(1-\frac{u_{*ck}}{u_*}\right)\left(1-\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \quad (1)$$

ここで q_{Bk} ：粒径別単位幅掃流砂量(m³/m/s)、 σ ：砂粒子の密度、 ρ ：水の密度、 p_{bk} ：粒径階 k の河床において占める割合、 u_{*ck} ：粒径 d_k の移動限界摩擦速度(m/s)、 u_* ：摩擦速度(m/s)、 τ_{*k} ：粒径 d_k の無次元掃流力、 τ_{*ck} ：無次元限界掃流力、 τ_{*ek} ：無次元有効掃流力である。

また、 u_{*ck} は修正Egiazaroff式⁴⁾（式(2)、(3)）を用いて求めた。

$$\frac{d_k}{d_m} \geq 0.4 \quad , \quad \frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = \left(\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19 \frac{d_k}{d_m}} \right)^2 \frac{d_k}{d_m} \quad (2)$$

$$\frac{d_k}{d_m} < 0.4 \quad , \quad \frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = 0.85 \quad (3)$$

表-3 実測流砂量

d (mm)	配合 割合	q _{Bk} 実験 (m ³ /m/s)								
		A1	A2	A3	B1	B1'	B2	B2'	B3	B3'
12	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.08	4.89 x10 ⁻⁵	6.99 x10 ⁻⁶	0	1.40 x10 ⁻⁵	6.99 x10 ⁻⁶	0	0	0	0
4	0.22	8.81 x10 ⁻⁴	2.52 x10 ⁻⁴	1.26 x10 ⁻⁴	9.08 x10 ⁻⁴	5.10 x10 ⁻⁴	1.33 x10 ⁻⁴	1.68 x10 ⁻⁴	3.49 x10 ⁻⁵	1.40 x10 ⁻⁵
2	0.21	6.16 x10 ⁻³	2.40 x10 ⁻³	1.47 x10 ⁻³	5.02 x10 ⁻³	3.84 x10 ⁻³	1.54 x10 ⁻³	1.47 x10 ⁻³	3.28 x10 ⁻⁴	1.89 x10 ⁻⁴
1	0.25	5.56 x10 ⁻³	1.96 x10 ⁻³	1.55 x10 ⁻³	5.26 x10 ⁻³	4.84 x10 ⁻³	1.59 x10 ⁻³	1.87 x10 ⁻³	3.77 x10 ⁻⁴	2.31 x10 ⁻⁴
0.5	0.18	3.67 x10 ⁻³	1.35 x10 ⁻³	1.42 x10 ⁻³	4.84 x10 ⁻³	4.14 x10 ⁻³	1.53 x10 ⁻³	2.13 x10 ⁻³	4.89 x10 ⁻⁴	2.73 x10 ⁻⁴
0.25	0.04	3.14 x10 ⁻⁴	2.66 x10 ⁻⁴	3.84 x10 ⁻⁴	1.86 x10 ⁻³	1.38 x10 ⁻³	9.15 x10 ⁻⁴	1.18 x10 ⁻³	3.70 x10 ⁻⁴	2.73 x10 ⁻⁴
総流砂量		1.66 x10 ⁻²	6.23 x10 ⁻³	4.95 x10 ⁻³	1.79 x10 ⁻²	1.47 x10 ⁻²	5.71 x10 ⁻³	6.82 x10 ⁻³	1.60 x10 ⁻³	9.78 x10 ⁻⁴

表-4 q_{Bk}実験 / q_{Bk}計算

d (mm)	A1	A2	A3	B1	B1'	B2	B2'	B3	B3'	
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00~
8	0.04	0.01	0.00	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
4	0.20	0.10	0.10	0.90	0.50	0.26	0.33	0.20	0.08	~1.99
2	0.95	0.64	0.70	2.88	2.20	1.54	1.47	0.72	0.41	0.50
1	0.46	0.27	0.38	1.54	1.41	0.78	0.92	0.37	0.22	~0.99
0.5	0.26	0.17	0.31	1.28	1.10	0.69	0.96	0.44	0.24	0.01
0.25	0.06	0.10	0.25	1.45	1.08	1.23	1.59	1.01	0.74	~0.49
総流砂量	0.38	0.25	0.36	1.57	1.29	0.87	1.04	0.51	0.31	

表-5 落差工あり(B)となし(A)の流砂量比

d (mm)	B1/A1	B1'/A1	B2/A2	B2'/A2
4	1.03	0.58	0.53	0.67
2	0.82	0.62	0.64	0.61
1	0.95	0.87	0.81	0.96
0.5	1.32	1.13	1.13	1.58
0.25	5.91	4.38	3.45	4.45
総流砂量	1.08	0.88	0.92	1.10

さらに、 u_{*cm} は岩垣式⁵⁾ (式(4)) により、有効摩擦速度は式(5)にて求めている。

$$u_{*cm}^2 = 134.6d_m^{31/22}, \quad 0.1180 \leq d_m \leq 0.3030 \text{ (cm)} \quad (4)$$

$$\frac{U}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d_m(1+2\tau_*)} \quad (5)$$

Rは径深であり、流速Uは Manning式を用い、粗度係数は0.025s/m^{1/3}を代入した。なお、水深粒径比が小さいため、各実験において、水深は数箇所の平均値10mmを用いている。また、勾配は実験Aの場合は、通水終了後に水路上流端の侵食の激しい区間と下流端の平坦化した部

分を避けて測ったもの、実験Bの場合は、通水終了後に下流の4つの区間で落差工直下の淵を避けて測ったものの平均値を用いている。こうして得られた実測値と計算値を比較した結果を表-4に示す。北川⁶⁾の報告では、流砂量が1.0x10⁻⁵m³/m/s以上であれば、実験値と計算値の比は0.5~2倍に収まるとされている。そこで、実測流砂量と計算流砂量の比を0.01~0.49, 0.50~0.99, 1.00~1.99, 2.00~の四段階に分類し色分けして同表に示している。なお、これからの議論では、そもそも流砂量が少なく、結果が不安定となっている大粒径8mmと12mmを省いて考える。

(1) 混合粒径の影響

実験Aでは通水後分級し始め、砂州も形成しかけていたが、流砂量の計測が終了するまでに浮州までは発生しておらず、計算には最初の混合粒径の配合を代入し、その後の変化を考慮していない。ただし、これは分級を考慮しない概算値であることに注意が必要である。

表-4を見ると、実験Aでの実測流砂量は全体的に計算よりも少ないのが分かる。特に注目すべき点は、代表粒径より小さい1mm以下は十分掃流されているにも関わらず、計算値を大きく下回っていることである。さらに、粒径が小さいほど実測流砂量が分級を考慮しない計算値を大きく下回るという特徴も見られる。これは、細粒分が流

表-6 堀切観測所 最高水位⁷⁾

年	月	日	時間	水位(m)	水深(m)
2014	10	6	9:40	0.51	1.07
2009	10	8	8:00	0.72	1.28
2008	8	28	18:00	0.08	0.64
2007	7	15	8:00	1.04	1.60
2006	7	19	13:00	0.63	1.19
平均				0.60	1.16

表-8 御勅使川扇状地粒径⁸⁾

	扇頂	扇央	扇端
施工前 d ₅₀ (mm)	400	300	300
施工後 d ₅₀ (mm)	300	200	100
施工前 d ₁₀₀ (mm)	800	600	600
施工後 d ₁₀₀ (mm)	500	400	300

下する途中で、河床の凹凸に捕捉されてしまい、流砂量が掃流力で計算したものより少なくなっているのが原因である。また、粒径が小さいほど、相対的に凹凸が大きくなるため、混合粒径の噛み合い効果に影響されやすいと考えられる。

(2) 落差工の影響

B実験では、通水後落差工直下に淵ができ安定し、次の落差工の上流端を埋め始める。各落差工の上流端が流されてきた細粒分に充填されてから流砂量の計測を始めるが、それから横断方向に様な流れが続いていた。

ここでは最初の混合粒径配合と通水後の平衡勾配を芦田・道上式に代入し計算する。実験B3では、流砂量計測開始の基準になる、落差工直上が砂に充填される状態に達するほどの流砂量が生じなかったため、計算値を下回る結果になっている。それに対し、実験B1・B2では分級を考慮しない計算値でも再現性がよく、粒径に従う比率の増減も見られない。

これは、先ほどの落差工を設置していない実験とは異なり、細粒分のトラップが起きていないのが原因である。すなわち、流砂量計測前に落差工上流は運搬されてきた細砂に埋められており、もとの河床より凹凸が小さくなり、後から流下してくる材料もここでとどめられることはない。

また、落差工設置前後の流砂量の比は表-5に示した。落差工の設置により、河床勾配は元の半分近くに緩められ、確かに流砂量は少し減っているものの、全体として顕著な減少が見られない。これは、2～4mmの流砂量が減少する一方で、0.25～0.5mmの流砂量が逆に増えていることが原因である。

表-7 現地への換算

	実験	M5	O6
川幅 (m)	0.3	95	70
代表粒径 (mm)	1.58	19	77
勾配	1/34	1/55	1/65
水深 (m)	0.01	0.19	0.93
粒径(mm)	4	48	195
	2	24	97
	1	12	49
	0.5	6	24
	0.25	3	12

5. 考察

水理実験では、御勅使川・大武川の粒径加積曲線の形を基準とした混合粒径を用いて、落差工のある場合とない場合での土砂動態の特徴を明らかにした。ここでは、実河川のスケールに戻し、河床材料の堆積過程を明らかにする。

水理条件の検討には、御勅使川下流にある堀切観測所の水位データを用いた(表-6)。ここで、既存のデータより各年度の最高水位を読み取り、平水時の水位-0.56mを引いた結果、平均年最高水深1.16mが求まり、これを用いて計算する。次に、水位観測所の約500m上流にあり、堀切観測所と同様の川幅、横断面を有するM5サイト(第4, 5床固間)床固め間隔内河床勾配1/55を限界掃流力の次式(6)に代入し、移動限界粒径を求めた。

$$\tau_{*R} = \frac{RI}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d_R} = 0.05 \quad (6)$$

これより、最高水位で動きうる粒径は256mmだと求まる。また、大武川のデータは入手できなかったものの、御勅使川とは流域形状や面積が類似しており、位置も近いことから、同じ洪水パターンだと仮定する。すると、大武川でも平均年最大流量時、256mm以下の砂礫が掃流されると想定できる。

ここで、実験で見た土砂動態が、それぞれの川にとってどの程度の洪水に該当するのかを検証するため、御勅使川はM5サイト、大武川は同じく扇端に位置するO6サイトの勾配を用いて、両川の平均代表粒径、現地の水深を次式(7)に代入して対応関係を検討した。

$$\tau_{*R} = \frac{R_{\text{実験}} I_{\text{実験}}}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d_{R\text{実験}}} = \frac{R_{\text{現地}} I_{\text{現地}}}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d_{R\text{現地}}} \quad (7)$$

すると、実験で再現した土砂動態は、御勅使川にとって、僅か0.19mの小出水あるいは減水期に過ぎず、大武川では平均年最大流量に近い洪水であることが分かった。また、実験で水流に運搬された粒径を、現地における礫の大きさに換算したものを表-7にまとめた。

この結果から再び河床材料の粒度分布を検討する。御勅使川では、平均年最大流量にて256mm以下の礫が掃流されるが、減水期やそれより小さい洪水でも、実験で見たように河床材料全体が移動している。図-3の粒径加積曲線を見ると、山間部のM1サイトでも100mm以上の礫は少ないが、扇状地に流路工が設置される前の粒径調査結果（表-8）を見ると、最大粒径が現在河床表面に出ているものよりもかなり大きいことに加え、平均粒径ですら今より1オーダー大きいことが分かる。また、山間部の出口にある源堰堤が竣工して以来、1m以上の巨礫がそこまで来て留まったという記録⁹⁾もあるが、扇状地にあった巨礫が消えたのは、堰堤ができたことによって、巨礫の流量が減少すると共に砂礫の流量が増大し、河床に残った巨礫を埋めたものと考えられる。すなわち、現状の御勅使川の河床材料を規定するのは平均年最大流量でなく、それより小さい洪水であり、脆い泥岩地質によって大量生産される砂礫が頻繁に運搬されることで、河床の粒度分布が決まっている。

一方、大武川では、実験で再現されたものは平均年最大流量時より少し小さい洪水での土砂動態である。そのため、実際には洪水減水期や中小出水時には、実験で見たよりも細粒分のみが移動するということになる。しかしながら、この細粒分の土砂生産が盛んな大武川において、どうして御勅使川同様に細粒分が扇状地を覆うことがないかという点、花崗岩地質を流れる大武川及びその支流の石空川は、その風化不連続性により、成分は巨礫と砂に両極化しており、いずれも実験で扱ったA集団とはオーダーの違うサイズである（図-6）。過去の大洪水で輸送されてきた巨礫は、普段の洪水で頻繁に動くことはなく、一方の砂は藤田⁹⁾により報告されているとおり、その材料を捉える粒径50倍以内の材料が量的に限られているため、礫の隙間を通過するだけである。故に、台風前後の調査で砂の割合が倍半分近く違い、変動しているのも理解できる。

6. まとめ

本研究では、地質以外の地理条件に近い御勅使川と大武川の土砂動態、及びそれに落差工が及ぼす影響を水路実験によって捉えた。落差工の設置によって、河床勾配は半減し、大きい粒径の流出量は減るが、小さい粒径は堆砂によって河床凹凸が減るため、逆に流れやすくなった。河床の主要材料は無次元化したら同じように見えても、実際の大きさと礫径の揃いによって、河床材料の堆積過程が決められる。

この結果を踏まえ、輸送土砂が堆積する質と量を明らかにすることで、平水時の河床材料調査によって、洪水時の土砂輸送形態を予測することができるものと期待される。

謝辞：この研究では、科学研究費補助金若手研究B（課題名：河床材料特性の縦断変化とその規定要因に関する基礎研究、研究代表者：知花武佳）の助成を受けて研究を行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山本晃一：沖積河川—構造と動態—，技報堂出版，2010.
- 2) 国土交通省 関東地方整備局 富士川砂防事務所
<http://www.ktr.mlit.go.jp/fujikawa/>
- 3) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972.
- 4) Egiazaroff, I. V. : Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Pro. ASCE, Vol.91, No.HY4, pp.225-247, 1965.
- 5) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21，1956.
- 6) 北川善廣：掃流砂量公式の比較検討，国土館大学工学部紀要，第10号，pp.26-34，1977.
- 7) 国土交通省 水文水質データベース
<http://www1.river.go.jp/>
- 8) 日本砂防史，社団法人全国治水砂防協会，1981.
- 9) 藤田光一：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望，第36回水工学に関する夏期研修会講義集，pp.B-4-1-B-4-15，2000.

(2015. 4. 3受付)