実験河川石礫床区間への土砂供給による 河床状態と流水抵抗の変化に関する実験的研究

STUDY ON CHANGES IN BED CONDITION AND FLOW RESISTANCE OF
GRAVEL BED CAUSED BY SAND SUPPLY IN THE EXPERIMENTAL RIVER

原田守啓¹・藤田裕一郎²・水上精栄³・萱場祐一⁴

Morihiro HARADA, Yuichiro FUJITA, Seiei MIZUKAMI, Yuichi KAYABA

¹正会員 工修 大日コンサルタント株式会社 環境・水工部 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

²フェロー 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

³正会員 工修 岐阜大学工学部 技術専門員 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

⁴正会員 工博 (独) 土木研究所自然共生研究センター (〒501-6021 各務原市川島笠田町無番地)

Changes in bed condition, flow resistance and sediment transport are discussed in gravel-cobble covered bed where sand is supplied artificially like as river reaches downstream of dam reservoirs, on the basis of experimental results obtained in a large scale flume called “the experimental river” in the Aqua Restoration Research Center, PWRI. Variations of the bed condition were clarified minutely by the use of a sophisticated system that enables automatic measurement of 1cm mesh intervals even under flowing conditions. Flow resistance and non-equilibrium process of sediment transport are confirmed to correspond closely to bed states under subcritical condition.

Key Words: *sediment supply, gravel riverbed, flow resistance, field observation method*

1. はじめに

山地から河口、海域に至る土砂生産・土砂移動のシステムを流砂系と捉え、その健全化に向けた「総合土砂管理」の概念¹⁾が提示されて、既に10年余りが経過している。その間に、流砂系スケールでの土砂移動の実態把握の調査やその技術開発と平行して、砂防堰堤や貯水ダムを対象とした「土砂を流す」施策が展開されてきた。特に、貯水ダムの土砂管理及び堆砂対策は、堆砂により低下した貯水容量を回復し、ダムの長寿命化を図る観点から重要であり、各種の堆砂対策²⁾の事例数の増加によって、知見の蓄積が進みつつある。

ダム堆砂対策のうち、サンドバイパス等の恒久対策施設の事例はまだ少なく、貯水池で浚渫した土砂をダム下流に還元する手法が日本各地の相当数のダムで試験的に実施されている。貯水池での浚渫自体は、従来から維持管理の一環として行われてきたものであり、この手法は、特別な施設を要しない土砂還元手法として注目され、平成20年には土木学会水理委員会環境水理部会主催で「置き土シンポジウム」が開催されるまでとなった。

置き土が流水によって浸食を受ける過程については、従来の流路変動研究の延長上にあることから、現地観測や模型実験、数値解析等の事例³⁾⁴⁾等が報告されており、置き土の浸食過程や下流河川に流出する土砂の量については、ある程度定量的な予測が可能となりつつある。

また、ダム下流の物理環境と生物・生態系との関係に関する既往の知見の蓄積⁵⁾は、土砂還元に対する下流河川の応答について、定性的な予測を可能としている。

しかしながら、還元した土砂が下流河川をどのように流下し、どのような場所に留まるのか、という基本的な点については未解明な点が多いと考えられる。

その要因の一つとして、現地において還元した土砂を追跡することが物理的に困難であることが挙げられる。例えば、置き土による土砂還元の先駆的事例である、天竜川の発電ダム群の事例⁶⁾では、還元量が河川規模に対して限定的な状況では、下流河床における変化を把握することは困難であることが指摘されている。

また、ダムの立地条件から、土砂が還元される区間は主に山地部であるから、還元された土砂の移動を予測するには、粒径オーダーが異なる河床材料で構成される河床における流砂量を表現しうるモデルが必要となる。

とくに、河川環境に対しては、大径の石礫が動かない程度の流況下での土砂の挙動の取り扱いが重要と考えられ、芦田・藤田ら⁷⁾⁸⁾によって提示された、礫による遮蔽効果や砂の存在割合を考慮した浮遊砂量算定式などが現象の分析に適用されている。藤田ら⁹⁾は、石礫床に細砂を供給する実験を1/100勾配に設定した大規模水路で行い、礫間の堆積状況と浮遊砂量との関係を調べて、土砂供給量の増加に伴い砂面高が上昇するという基本的な挙動を確認するとともに、それが流水抵抗特性に大きな変化を

もたらさなかったことを報告し、目視結果と限界流に近い水理条件から、流送土砂量について既往の浮遊砂量算定式を適用して、計測値との差異について考察している。

本研究は、同様に、動かない石礫の間を砂が掃流状に流下する状況に対象を絞り、河床表層や土砂流送の状態について、①より実河川に近い条件で定量的に観測を行うこと、②水理量・流砂量の変化に対する河床面の応答を流水を遮断しないで連続的にとらえることを目的に、(独)土木研究所自然共生研究センターの実験河川において、石礫河床区間に連続的に給砂する実験を行い、土砂の挙動とともに、それに密接な関係を有する河床の流水抵抗特性について検討と考察を加えたものである。

2. 実験方法と実験条件

(1) 実験河川における給砂実験の概要

実験は、(独)土木研究所自然共生研究センター内の実験河川(岐阜県各務原市)の一部を利用して行った。実験河川は、一級河川木曽川北派川に人工的に流路を造成したものであり、木曽川支川新境川(流域面積42.6km²、流路延長13.6km)から流路上流の調節池に河川水を導水し、流量制御のための鋼製起伏ゲートを介して、河川水を自然流下させるもので、延長約800m、河幅約2～6m、河床勾配は1/200～800である。

本実験は、3本ある実験河川のうちB河川の上流側に、本実験のために新設した給砂区間(約60m)と、粒径100mm程度のほぼ一様な礫を敷き詰めた河床幅2m、河床勾配1/200の実験区間(約120m)を設定し、給砂区間に盛った土砂を実験区間に自然流下させる形で、土砂供給を行った。給砂区間は、区間下流端に固定堰(高さ0.5m、幅3.0m)を設け、固定堰天端から上流に向かって一定の縦断勾配で土砂を盛る構造とした。給砂区間及び実験区間の状況を図-1に示す。

給砂に用いた土砂は、調達可能な土砂の量、実河川に流入する実験河川の特徴等を考慮して、木曽川産の川砂とした。粒度試験の結果を表-1に示す。

なお、この実験系は、数週間に亘って水と土砂を定常的に流し続けられるよう設計されたものであり、本実験は、実験河川における給砂実験時の河床の基本的な応答、給砂区間からの土砂の流出特性を把握する目的も兼ねて実施した。

(2) 測定項目及び測定方法

a) 河床高の平面分布

流量及び流砂量に対する河床表層の状態、具体的には、礫間の空隙が流下土砂により閉塞している状態を、水が流れている状況下で詳細に計測するため、河床高を面的に計測する装置を構築して、実験区間上流端から20mの地点に設定して定点観測した。

装置は、約4m×2mのアルミフレーム製枠に、分解能50μmのレーザー変位計(KEYENCE製)を取り付けたX,Y

図-1 給砂区間、実験区間の状況

表-1 給砂した土砂の粒度分布諸元

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.64
礫分(2～75mm) [%]	21.20
砂分(0.075～2mm) [%]	69.40
シルト分(0.005～0.075mm) [%]	5.70
粘土分(0.005mm未満) [%]	3.70
最大粒径[mm]	9.50
中央粒径 D_{50} [mm]	0.4875
均等係数 U_c	8.16

写真-1 河床高計測装置の外観

2軸のアクチュエータ(THK製)を上載した架台を吊り下げた構造とし、1回の自動計測で、流下方向1m×横断方向0.5mの範囲にある1cmメッシュの河床高を計測可能とした。この架台を横断方向に0.5mずらすことにより、1m×1m(100×100点)の河床高を計測した。装置の外観を写真-1に示す。

レーザー変位計は、水面による乱反射を防ぐため、先端に透明アクリル板を固定した鞘状の部材の内部に収め、流量が最も少ない実験ケースの際に、先端のアクリル板が水面よりわずかに水没するようにセットした。各計測

点において、レーザー変位計が出力する電圧値をPCに取り込み、あらかじめ作成しておいた検定式で、河床高に変換した。河床高平面分布の経時的な変化を可能な限り短い間隔で観測するため、アクチュエータの制御プログラムを調整し、自動計測1回（1m×0.5m）あたり6分程度で計測した。

b) 水位

河床高の計測を1セット行う毎に、河床高の計測範囲1m×1mの上下流計6点の水位を、護岸天端から水面までの比高差として鋼尺で計測した。また、縦断方向10mおきの水位を定期的に計測し、水位縦断図に整理した。

c) 実験区間への給砂量

実験区間への給砂量は、給砂区間下流端の固定堰において、本実験に合わせて製作したサーバーネット（HOGA社製、開口部500mm×100mm、目合い0.5mm）により、堰を越流する流砂を捕捉して計測した。計測は、河床高計測の前後に行った。

採取した土砂を、湿潤した状態のままメスシリンダーに入れ、清水を一定の体積まで満たして重量を計測し、清水のみでの計測値との差分から、砂の量を算出した。

固定堰を越流する流砂量は、流量の設定によっては、給砂区間に河床波が発生することによって、時間的・空間的に周期的に変化するため、河床波の移動速度の観測を踏まえ、一回あたりの計測時間を調整した。捕捉した試料は持ち帰り、粒度試験を行った。

河床高平面分布の計測箇所の直下流においても、河床にサーバーネットを固定して流砂量の計測を試みたが、河床面に密着して固定することが困難であったことから、流砂量については採用せず、流砂の粒度分布を確認するための参考試料とした。

(3) 実験ケース

実験条件は流量と給砂区間の縦断勾配によってコントロールするものとし、予備実験を踏まえ、給砂区間の縦断勾配は1/400、流量は100L/s、150L/s、200L/sの3ケースとした。実験河川は、より大きい流量の放流が可能であるが、予備実験の結果、流量の増加に伴って給砂区間に河床波が発達して流砂量が頭打ちになりはじめる200L/sを上限とし、給砂区間において移動限界程度となる100L/sを下限とした。実験条件を表-2に示す。

実験は平成22年7月17日～20日の4日間で、あらかじめ100L/sで通水し、流量を150L/s、200L/sと変化させて、各流量で河床が十分落ち着いたと判断される状態に達した状況と、流量を変化させた直後から河床が変化していく状況をそれぞれ複数回計測した。

なお、給砂量は実験区間上流端にあたる固定堰で複数回計測した平均値、水深は河床表層の変化に対応した変動が見られたため、実験区間における複数回計測の平均値を示す。

表-2 実験条件一覧

流量	単位幅 流量	給砂量 (平均値)	単位幅 給砂量	水深 (平均値)	通水 時間
L/s	m ³ /s/m	cm ³ /s	cm ³ /s/m	cm	hr
100	0.050	0.988	0.494	9.1	23
150	0.075	2.067	1.034	11.7	20
200	0.100	2.634	1.317	14.4	4

写真-2 河床高計測範囲の状況 (Q=100L/s)

図-2 河床高測定結果の例
(上からQ=100L/s、150L/s、200L/sの最終状態)

3. 実験結果及び考察

(1) 河床高計測結果

計測範囲(1m×1m)の状況を写真-2に、河床高計測結果の例を図-2に示す。なお、河床高の基準は水路兩岸の護岸天端高から-1.5mの高さとし、上方向を正とした。

測定結果は、砂面から突出している石礫の形状、肉眼

では把握できない砂面の凹凸を詳細に捉えることができ
ており、河床上の細砂量の変化を、河床高の差分から検
討することを可能としている。しかしながら、上面から
の河床観測手法の特性として、石礫の裏側やレーザー反
射光が遮蔽される石礫の影部の空隙状況については把握
することはできていない。また、レーザー変位計を納め
た角パイプの先端を水面下に十分挿入できなかった条件
下には、その下に空気が入り込んで、測定値が取得でき
ない場合があった。

(2) 流量と流砂量の変化に対する河床の応答の観測

礫床に土砂を供給すると、定性的には、礫間の窪みが
砂で埋塞されることによって、石礫床の形状抵抗が減少
し、流速は増加、水深は低下すると考えられる。水深の
低下は、全掃流力の減少につながるが、砂粒への有効掃
流力はさほど下がらないと考えられるので、河床表面に
占める砂粒の割合が増加すれば、それだけ流砂量も増加
し、上流からの供給土砂量に見合った動的平衡に至るも
のと考えられる。

本実験の経過に伴って、各流量段階について1m×1m
で測定された水位および河床高の変化を図-3に示す。

流量を増加させた直後から、最低河床高及び平均河床
高が一度上昇し、その後下がって、動的平衡に向かう変
化が確認された。この理由は次のように考察される。流
量の増加に伴って、局所的な流砂量の不均衡、すなわち、
100L/sに対して平衡状態にあると判断される最終時点の
高い砂粒被覆率の河床に150L/sの流量が供給されたこと
でpick-up rateが上昇し、その累積結果が反映される計測
位置では、上流からの流砂量が一時的に増加して、河床
が上昇したと考えられる。

ついで、上流区間から順次、供給される流量と土砂量
に釣り合った河床状態が下流に向けて伝搬していくと考
えられ、その釣り合った150L/sの平衡状態の砂面被覆率
が100L/sの場合よりも低いために、河床は低下したと判
断される。流量が150L/sから200L/sに増加した場合には、
上述の状況がより明確な形で繰り返されており、後述の
河床変動量の変化を見ると流量が大きい分、平衡状態に
より早く到達しているようである。

肉眼での観察では砂面の被覆状態の変化はほぼ追えた
ものの、砂面高さの一時的な上昇を明確に確認すること
は困難であったことを考慮すると、水を流しながら、河
床高を面的に計測可能であるという本計測法のメリット
が最大限発揮された観測結果であるといえる。

(3) 河床が流水に及ぼす抵抗の算定

流量を100L/sから150L/sに、また、150L/sから200L/sに
変化させた直後には、ともに、流量増に対応した水位の
上昇が観測されたが、その後、平均河床の上昇に追従し
て上昇したのち、平均河床が低下しているにもかかわらず
水位は上昇している。

このときの水理量の変化を表-3に、流速係数 ϕ の変化
を図-4に示す。なお水理量の整理では、簡単のため、流
れは等流状態と仮定して、エネルギー勾配は河床勾配に
等しい1/200としている。

図-3 計測ケース毎の河床高・水位

図-4 流速係数 ϕ 、 U^*/W_0

表-3 測定ケース毎の水理量一覧

No.	ケース名	流量	水位	河床高Z			平均水深	エネルギー勾配	平均流速	摩擦速度	流速係数	無次元掃流力	U^*/W_0
		Q[L/s]	WL[mm]	平均	最高	最低	H[mm]	le	U[cm/s]	U*[cm/s]	ϕ	τ^*	
1	100L/s計測1	100	531	440	475	419	91	0.005	55.0	6.7	8.24	0.46	0.94
2	150L/s計測1	150	554	443	472	420	111	0.005	67.6	7.4	9.17	0.56	1.04
3	150L/s計測2	150	559	443	470	420	115	0.005	65.2	7.5	8.69	0.58	1.06
4	150L/s計測3	150	551	442	479	419	108	0.005	69.2	7.3	9.50	0.55	1.03
5	150L/s計測4	150	564	431	470	414	132	0.005	56.7	8.1	7.04	0.67	1.14
6	200L/s計測1	200	582	435	470	420	147	0.005	67.8	8.5	7.98	0.75	1.20
7	200L/s計測2	200	585	437	470	420	148	0.005	67.5	8.5	7.92	0.75	1.20
8	200L/s計測3	200	580	435	470	416	145	0.005	68.9	8.4	8.18	0.74	1.19
9	200L/s計測4	200	574	433	470	415	141	0.005	70.9	8.3	8.53	0.72	1.17
10	200L/s計測5	200	573	432	471	414	140	0.005	71.4	8.3	8.62	0.71	1.17

本実験では、藤田⁹⁾の実験結果とは異なり、流量を増加させた直後のように、礫間を埋めて砂面高が上昇すると、流速係数 ϕ の値が上昇している。また、河床高に相対的な差のある、150L/sの計測1～3と200L/sの計測1～5とを比較すると、明らかに平均的に河床高の低い後者の流速係数値が小さくなっている。このような結果の相違は、既に指摘したように、常流下で実施された本実験とは異なり、藤田らの実験が限界流に近い条件であって、流砂形態も浮流となっていたために、石礫の形状抵抗に大きな差が現れなかったことが考えられる。

(4) 既往の流砂量算定式の適用性の検討

観測結果から整理した平均的な水理量を用いて、既往の流砂量式を適用した際に、観測した現象をどの程度説明しうるか、簡易な検討を行った。また、流砂量の算定は、河床高計測区間の下流で捕捉した流砂試料の粒度試験の結果より、代表粒径を0.6mmとして算出した。流砂量式は、 U^*/w_0 が最大でも1.2程度であり、この摩擦速度には石礫の形状抵抗が含まれていることと、観察に基づき、全量を掃流砂として算出することとした。

流砂量は、以下の4通りの方法で算出した。

一つ目は、(1)式に示す芦田・道上式¹⁰⁾であり、全掃流力により流砂量を求めた結果を、表-4②欄に示す。

$$q_{B*} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (1)$$

算出された値は、石礫の形状抵抗も含む全掃流力が砂粒で覆われた平坦河床に作用した場合の平衡流砂量であるから、当然過大な値となり、給砂量に対して2オーダーほど大きい。ここでは、表面積に占める移動可能な砂の割合を考慮していないが、値を砂被覆率等によって補正したとしても過大である。

次に、全掃流力から、移動しない石礫の形状抵抗分離を、(2)式に示す芦田・道上の有効掃流力¹⁰⁾によって試み、その結果を表-4③欄に示す。この式は砂堆河床等を対象として河床波背面で対数抵抗則が成立するとして導かれたものではあるが、ここでは、石礫を乗り越したりその側方を通過する砂粒について、同様の考えが成り立つと仮定して適用したものである。

$$\frac{U}{U_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{D(1+2\tau_*)} \quad (2)$$

表-4 実験区間への供砂量、既往の流砂量式の適用結果及び河床変化量の比較

No.	ケース名	①単位幅 給砂量	②芦田・道上式 (全掃流力)	③芦田・道上式 (有効掃流力)		④中川・辻本式 (全掃流力)				⑤中川・辻本式 (有効掃流力)		⑥河床変動量からの逆算			
		qB	qB	U*e	τ_{*e}	qB	Ps*	λ	Vb	qB	Ps*	qB	ΔV	ΔT	ΔqB
		[cm ³ /s/m]	[cm ³ /s/m]	[cm/s]	-	[cm ³ /s/m]	-	-	[cm ³]	[cm ³ /s/m]	-	[cm ³ /s/m]	[cm ³ /m ²]	[min]	[cm ³ /s/m]
1	100L/s 平衡	0.494	124.1	3.25	0.11	6.4	0.0109	200	0.031	67.5	0.0010	6.4	-	-	-
2	150L/s非平衡1	1.034	175.8	3.94	0.16	16.0	0.0139	200	0.031	86.0	0.0023	14.3	2852	105	0.453
3	150L/s非平衡2	1.034	187.2	3.79	0.15	13.4	0.0146	200	0.031	89.8	0.0020	12.4	374	35	0.178
4	150L/s非平衡3	1.034	168.9	4.04	0.17	17.8	0.0136	200	0.031	83.7	0.0025	15.6	-1028	43	-0.399
5	150L/s平衡	1.034	238.0	3.27	0.11	6.5	0.0172	200	0.031	105.9	0.0011	6.6	-11087	995	-0.186
6	200L/s非平衡1	1.317	286.1	3.88	0.16	14.9	0.0195	200	0.031	120.1	0.0022	13.5	3497	30	1.943
7	200L/s非平衡2	1.317	288.3	3.87	0.15	14.6	0.0196	200	0.031	120.7	0.0022	13.3	1659	34	0.813
8	200L/s非平衡3	1.317	278.3	3.95	0.16	16.1	0.0191	200	0.031	117.9	0.0023	14.4	-1594	36	-0.738
9	200L/s非平衡4	1.317	265.2	4.07	0.17	18.4	0.0185	200	0.031	114.1	0.0026	16.1	-1940	80	-0.404
10	200L/s 平衡	1.317	262.0	4.10	0.17	19.0	0.0183	200	0.031	113.1	0.0027	16.5	-495	115	-0.079

また、通常、混合粒径砂礫の移動限界には、遮蔽効果が考慮されるが、本実験のように粒径が数オーダー異なる2群の材料で河床が構成される場合、既往の評価式で参照される平均粒径の物理的意味が希薄となり、やはり、砂粒の被覆率と遮蔽効果との関係を明確にすることが本質問題となるが、これについては今後の課題としたい。

(2)式を適用した流砂量は、給砂量の10倍程度であり、表面積に占める移動可能な砂の割合を考慮すれば、本実験に関しては計算値が給砂量に近い値となり、興味深い。

次に、表層の不均質性に起因して生じる非平衡状態を評価するため、その不均質性を流砂量に明示的に反映するモデルとして、中川・辻本¹¹⁾によるPick-up rate・Step length型の流砂量評価法を用いる。

無次元Pick-up rateを(3)式、無次元Step lengthを(4)式、単位面積に存在する移動可能な砂の体積を V_b として、流砂量は(5)式に表される。

$$P_s^* = P_s \sqrt{D/(Rg)} = 0.03 \times \tau_* \left(1 - \frac{0.035}{\tau_*} \right)^3 \quad (3)$$

$$\lambda \equiv \Lambda/D = 3.0 \times 10^3 \times \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (4)$$

$$q_B = V_b \times P_s \times \Lambda \quad (5)$$

本実験条件を(4)式に適用し、step lengthを算出したところ、粒径の2,000～3,000倍と算出されたが、本式の導出過程で用いられたデータは、 τ_* が0.3程度までの実験結果であって、step lengthの実測値は粒子径の200～300倍程度で頭打ちとなる傾向が知られている。一方、流砂量式との比較ではそこから漸増していくように予測されている。そこで、仮に $\lambda=200$ と置き、流砂量を求めた結果を表-4④欄に示す。その結果は、やはり過大評価となった。また、(2)式による有効掃流力を(3)式に適用した結果は、有効掃流力を用いた芦田・道上式とほぼ同様の値(表-4⑤欄)となった。

(5) 河床高の変化からみた流砂量の変動

実験中に観測した砂面高の上昇・下降を、流砂量と関係づけて検討するため、連続する2ケースの河床高測定結果の差分から、土砂体積の変化量 ΔV を求め、単位時間あたりの土砂収支を算出することを試みた。

土砂体積の変化量 ΔV は、計測範囲に流入する流砂量と流出する流砂量との差の時間積分値に等しいとし、

(6)式を定義して、簡単のため空隙率 λ を0.4と仮定して、単位時間あたりの流砂量の差分 Δq_B を算出した。結果を表-4⑥欄に示す。

$$\Delta V = \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{q_{Bin} - q_{Bout}}{\Delta x} \right) dt \cdot \frac{\Delta x}{1-\lambda} B = \Delta t \cdot \Delta q_B \cdot \frac{1}{1-\lambda} B \quad (6)$$

算出した Δq_B の絶対値は、実験区間に供給される流砂量に対して、0.6～1.5倍程度であり、流量が変化し直後や、同一流量を流し続ける中で、砂粒の平均的な堆積過程や離脱過程のゆらぎによって生じる流砂量の変動が平均流砂量程度であることを定量的に捉えていると考えられる。

4. 結論と課題

本研究は、(独)土木研究所の自然共生研究センターの実験河川において、石礫河床に砂を供給した際の河床表層の変化を、流水を遮断しないで観測する手法を試行し、観測結果に基づいて、礫間の土砂の挙動とともに、それに密接な関係を有する河床の流水抵抗特性について検討と考察を加えたものである。以下に主な結論を示す。

- (1) レーザー変位計2次元とアクチュエータを用いた計測装置により、河床高の平面分布を、流水を遮断せず、精度良く計測することができた。
- (2) 石礫の空隙に砂が堆積もしくは流出することにより、河床の流水抵抗が変化することを確認した。
- (3) 移動しない石礫床を細粒の掃流砂が移動する状況について、既存の掃流砂量式を適用した結果、全掃流力を用いた場合、極端な過大評価となることを確認した。
- (4) 河床波のある場合を対象とした有効掃流力評価を既存の流砂量式に試行的に適用した結果、本実験については現象にかなり近い流砂量が算出された。
- (5) 河床高の平面分布の時間差分より、同一流量を流し続ける中で生じている、砂粒の平均的な堆積過程や離脱過程のゆらぎに伴う流砂量の変動の状態が平均流砂量と同程度であることを定量的に捉えることができた。

以上のように、本実験で用いたレーザー変位計による河床高の平面分布の計測では、水を流したまま河床高の微細な変化を、比較的短い時間で繰り返し計測することにより、計測対象範囲の河床変動を定量的に把握することができたが、小水深の場合には水面から空気が回り込んだり、砂床面に影響を与える可能性もあったので、形状を改良するとともに適用限界を明らかにして石礫周辺の砂の挙動のより仔細な把握を進め、その機構の考察に生かしていくつもりである。

また、本計測方法の根本的な課題である以下の点についても検討していきたい。

流砂量が非常に多い場合、浮遊砂濃度が高い場合は、

レーザー計測は困難であると考えられるが、得られた信号が何を示しているかは検討の価値があるであろう。

さらに、上面からの観測手法では、当然石礫の裏側やレーザー反射光が遮蔽される石礫の影部の空隙状況については把握できない。この点に関しては、礫の形状を幾何学モデル化し、観測可能な上面から裏面の状況を推定する方法等が考えられる。

また、本計測手法の発展として、河床高の平面分布を計測すると同時に、計測した点が、砂面か石礫の表面であるのか、判別できることが望ましい。河床表層の状況を判別する手法を開発もしくは別手法として本手法に組み合わせることによって、石礫と砂が混在する河床表層における流水抵抗と流砂のメカニズムの解明に資する計測手法となりうるものと考えている。

謝辞： 猛暑の中、野外での実験に粘り強く取り組んでいただいた、岐阜大学河川工学研究室の学生諸氏に、深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河川審議会 総合政策委員会 総合土砂管理小委員会：「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」報告，pp.1-12，1998.
- 2) ダム水源環境整備センター研究第1部：ダムの堆砂対策技術ノート：ダム機能向上と環境改善に向けて，pp.33-55，2008.
- 3) 重枝未玲，秋山壽一郎，小牧貴大，高須賀真哉：河道への置き砂還元プロセスの平面2次元数値シミュレーション，水工学論文集，第50巻，pp.1015-1020，2006.
- 4) 佐々木崇憲，櫻井寿之，箱石憲昭：三春ダム直下流における置土侵食の平面2次元河床変動解析，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集Ⅱ，pp.253-254，2008.
- 5) ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方-下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて-：国土技術政策総合研究書資料No.521/土木研究所資料No.4140，2009.
- 6) 岡野眞久，菊井幹男，石田裕哉，角 哲也：ダム貯水池堆砂とそのダム下流河川還元についての研究，河川技術論文集，第10巻，pp.191-196，2004.
- 7) 芦田和男，藤田正治：河床粒子の浮遊機構とそのモデル化，土木学会論文集，第375号/Ⅱ-6，pp.79-88，1986.
- 8) 芦田和男，藤田正治：平衡および非平衡流砂量算定の確率モデル，土木学会論文集，第375号/Ⅱ-6，pp.107-116，1986.
- 9) 藤田光一・山原康嗣・富田陽子・伊藤嘉奈子・小路剛志：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究，水工学論文集，第52巻，pp.547-552，2008.
- 10) 土木学会：水理公式集平成11年版，pp.162-166，1999.
- 11) 中川博次，辻本哲郎：新体系土木工学23移動床流れの水理，技報堂出版，pp.49-98，1986.

(2010. 9. 30受付)