相対水深が小さい場における河床表層状態 および鉛直構造と粗度の評価

ESTIMATION OF FLOW RESISTANCE CONSIDERING BOTH BED SURFACE CONDITION AND VERTICAL STRUCTURE

溝口 敦子
Atsuko MIZOGUCHI

正会員 博(工) 名城大学准教授 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

These days, 2-dimensional numerical simulation of changing bed elevation would be useful for river management. However, it is difficult to predict sediment transport at the bed including the complex surface and the substrate structure in the river. There are still some problems to be solved in estimating flow resistance considering both bed surface and vertical condition, and it lead to difficulty to estimate sediment transport. Therefore, a series of flume experiments were conducted in order to examine flow resistance and velocity distribution near bed surface. These experiments indicated the importance of both surface and substrate structure of river bed for prediction of sediment transport.

Key Words : Surface roughness, velocity distribution, PIV, river materials

1. はじめに

解析技術の向上を受け、高解像度で流れと土砂移動の解析が行われるようになってきた。こうした解析を通じて、例えば、石礫河川など相対水深が小さな場で石の形状などを取り込むことの重要性などが改めて指摘されている¹⁾。一方で、高解像度になればなるほど、実河川の砂礫の形状、大きさ、それぞれの存在割合をどのように捉えた上でどの程度解析等に組み込む必要があるかを見極めていく必要がでてくる。また、礫の形状や大きさのばらつきの重要性は、相対水深が小さい場に限ったことでなく、相対水深が大きな場でも流砂特性等に少なからず何らかの影響を与える可能性を持っている。そのため、近年広く用いられている平面二次元解析においても現地への適用を踏まえると粗度の決め方、掃流力や流砂量の算定方法などいまだ多くの課題が残っている。

古くから行われている流速分布を取り扱った研究は、自然の河床材料を意識しながらも球形粗度を取り扱うことが多かった^{2)~5)}。流速分布が対数則に従うとする場合に原点の位置、等価粗度の評価が問題となるが、球を密に並べた場合などは、0点は粗度頂部より0.25*d*程度下方にとり、等価粗度は直径*D*で取り扱うのが良いと考えられてきた⁶⁾。しかし、自然の河床材料では粒子ごとに粒径や形状も異なり、河床表層の礫頂部位置もばらつきが

であるため河床基準面の決定すら難しい問題となる。そのため、等価粗度の評価は粒径を基準として0.5~4倍程度とするなど幅をもって評価されている。

こうしたことを踏まえると、河床材料の特徴によって粗度の取り扱い方法や流速分布は変化すると考えられ、当然ながらこれらは流砂量の算定にも密接にかかわってくる。ここで、例えば、数値解析等で広く使用されている芦田道上式⁷⁾について考える。この式は、掃流粒子の単位面積当たりの個数と運動中の砂粒子の平均速度の積で掃流砂量を表現しており、式(1)のように示される。

$$q_{b*} \equiv \frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = \frac{\beta_u \phi_d}{\mu_R} \tau_{*c}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{K_G \tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\beta_c \tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (1)$$

ここに、 q_{b*} ：無次元流砂量、 q_b ：流砂量、 d ：河床材料粒径、 g ：重力加速度、 σ ：砂の密度、 ρ ：水の密度、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 ϕ_d ：流送粒子中心部での流速と摩擦速度の比、 μ_R ：動摩擦係数、 β_c ：粒子速度が流送流速と同じになる掃流力と限界掃流力との比、 K_G ：河床底面で流れが受け持っているせん断力と限界掃流力との比とする。

芦田らがこの式を導出するにあたり、砂礫の移動速度

を見積もる際の等価砂粗度や砂礫の存在高さ、また、河床付近での全せん断応力のうち限界掃流力をわずかに上回る程度が流体に受け持たれているなどの仮定が入っており、様々な研究者による研究成果および実験値と照らし合わせながら、最終的にパラメータを決定している。ただし、こうしたパラメータは砂礫の特徴などによりある程度修正が必要と考えられ、ほぼ同じ粒径であっても形状等の違いにより砂礫の表層構造や流送砂礫の平均的な高さや等価砂粗度の評価方法は一樣な値ではなく、若干の違いが現れると考えられる。さらに、河床構成材料により流速分布が異なれば限界掃流力の評価にも影響が現れる可能性がある。ちなみに、著者が以前行った研究において流砂量式の適用性を検討したところ、通常17とされている $\beta_0\phi_0/\mu_R$ の値は材料によって変化することが確認されている⁸⁾。また、辻本ら⁹⁾は様々な流砂量式をベースに勾配が急な場で適用を検討し、芦田道上式がベースの式として優位であると結論付けている。ただし、ここでは材料特性の違いについてはまったく言及していないが、勾配による重力の効果や相対水深の小さな場での流速分布が異なる効果を考慮し、限界掃流力の評価や芦田道上式の係数を修正する必要があることを示している。

上記のような流砂量算定時の問題を意識しながら、まず、粒径のみでとらえがちな河床材料と粗度の関係について単純な実験を行い検討する。特に、粒径のみで評価されがちな等価粗度について天然の大礫を用いて表層の凹凸を変えた場合や底層の礫間に砂で充填された場合を対象に粗度係数の評価について考察する。あわせて、比較的容易に実施できるようになったPIV解析を水路実験に援用し、河床付近の流れを詳しく調べ、河床底層が及ぼす流速分布への影響を検討することにした。今回の検討は、将来的に流砂の問題に発展させることを視野にいられており、例えば、実河川や混合粒径で構成された河床で粗度のとらえ方などにつなげていきたいと考えている。なお、本研究で用いる天然の大礫は、ホームセンターで購入できる天然白玉砂利を用いており、球形と異なりある程度大きさがそろっているが、それぞれ異なる形状を持つ材料として使用している。

2. 実験で用いる河床材料の特徴

(1) 大礫の形状特性

まず、本研究で用いる主材料について、形状の特徴を調べた結果を示す。実験で用いる大礫群から50個をピックアップして、平坦な面に置いた状態で上から見た際の長径、短径に加え、高さを計測した。その結果、長径の平均値は、36.15mm、長径、短径、高さの平均値は、27.65mmとなった。本材料の代表粒径は長径の平均値を用いて、36.1mmとした。また、各個の短径、高さを長径で除した値をグラフにまとめると図-1のようになり、短径も礫高さもほぼ長径の5割以上ある比較的小丸みのある材料とであることがわかる。

(2) 表層凹凸と間隙特性

流水により堆積した河床材料は覆瓦状構造等特有の配列を作ることが予測されるが、本研究で用いた河床材料が丸みを帯びていることもあり、ここでは、人為的であっても密に敷き均せば内部骨格構造はある程度のばらつきをもちつつも均一になると考え、鉛直方向の間隙特性等を調べることにした。まず、幅32.5cm、長さ42.5cmのコンテナに礫をできるだけ均一に敷均し、20cm四方枠の領域でポイントゲージを用いて表層に出ている礫頂部を計測し、そのばらつきを把握した。その後、コンテナに少量の水を加え、マノメータを用いて内部の水位を計測することで、流入水量に対する水位上昇を計算し、鉛直方向の間隙率の変化を調べた。引き続き、図-2に示したパターンで表面の第一層に礫を加えることで表層状態を変え、同様な計測を実施した。なお、この実験は複数回行い、その結果の一部を図-3、図-4に示す。これらの図より、密に敷いた河床の礫数をNとして、1/4N、1/2N加えていくと、礫頂部高さのばらつきは、密に敷いた河床の二倍になっていることが分かり、それに応じて、間隙比の鉛直分布も変化することがわかる。

図-1 河床材料の形状特性

Pattern①	礫を3層密に上層まで敷き詰める (このときの表層礫数をNとする)
Pattern②	Pattern①の表層に 1/4N の礫を乗せる
Pattern③	Pattern①の表層に 1/2N の礫を乗せる

図-2 河床構造パターン

図-3 礫頂高さの平均、最大、最小の関係

図-4 間隙率の鉛直分布

図-5 流速係数と相対水深の関係

図-6 流速係数と相対水深の関係
(水深および等価砂粗度を補正)

3. 河床構造と粗度特性

(1) 河床表層パターンによる粗度特性の変化

ここでは2章で示した特徴を持つ大礫を幅30cmの水路に長さ7mにわたり敷均した河床上に通水し、流量と水

位の関係を調べた結果を示す。実験では、勾配を1/60, 1/80, 1/100に変化させ、流量とともに、水路中央部の4m区間を25cmおきに、水位、河床高を計測し平衡状態を確認しながら実験した。また、水位および河床高は、礫頂部の平均値を基準としてポイントゲージで計測し、それぞれ平均値を算出した。

この結果を整理し、2章(2)に示した材料の配置パターンごとに、断面平均流速 U と摩擦速度 u_* の比である流速係数 U/u_* と相対水深の関係調べると、図-5の結果が得られた。なお、摩擦速度 u_* は、重力加速度 g 、水深 h 、河床勾配 I_b を用いて $(ghI_b)^{0.5}$ とし、この図の平均流速は平均礫頂部からの水面位置を水深として用いて算出している。また、ここでは、粗面乱流の対数分布則から導かれる式(2)においてカルマン定数 $\kappa=0.4$ 、 $Br=8.5$ としたKeulegan式を併せて示している。

$$\sqrt{\frac{8}{f}} \equiv \frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) + Br - \frac{1}{\kappa} \quad (4)$$

ここに、 f : 摩擦抵抗係数、 k_s : 等価粗度、 $Br: y=ks$ となる U/u_* の値である。

これまでの流速分布からの河床位置の補正の議論を考えると、平均礫頂部は河床の0点として妥当でない可能性があるし、等価粗度も変化させる必要が考えられる。そこで、等価砂粗度については、表層パターンによって礫頂部高さの最大値、最小値の差が異なり表層パターン①に対し、②、③では2倍となっていたことを踏まえ、表層パターン①では河床材料粒径 D を、表層パターン②、③では河床材料粒径 D の二倍を用いることとした。また、河床高の補正については、以下の考えのもとに実施する。まず、既往の研究より球形粗度のとき0.25D程度下がった位置で0点を取るが、図-4より0.25D下がった高さの間隙率が平均間隙率となる0.35程度の値を示すことがわかる。このことと、実験で用いた材料の間隙率が平均礫頂部(河床の0点)から0.15D下方で0.3~0.35程度に収束していることを踏まえ、河床高を0.15D下方へ修正し水深の補正を行うことにした。その結果、図-6のようになり、表層Pattern②、③については、Keuleganの式により近づくことが分かった。ちなみに、表層Pattern①については、Keulegan式より U/u_* の値が下回りばらつきが大きな結果となっている。これは、辻本ら⁹⁾によって流速分布を詳しく調べたうえで同様な検討を行った結果と類似している。つまり、相対水深が小さい今回のケースは、式(4)中の Br がNikuradseの実験より減少するためにKeulegan式より U/u_* の値が下回る結果となった可能性がある。この理由については、4章で検討する。

(2) 河床底層に砂が存在した場合の粗度特性の変化

次に、幅20cmの可変急こう配水路を用いて下層の礫間を砂で埋め、河床鉛直構造を変化させた実験について述べる。ここでは、勾配は、1/50, 1/100, 1/200に設定した。また、以前実験で検討した経験を踏まえ、大礫間

に砂を流した場合に礫の露出率が変化し現象が複雑になることを避け、今回は、河床下層の礫間に三河珪砂4号（平均粒径0.88mm程度）を入れて流砂が存在しない条件で実験を行うことにした。下層の礫間への砂の挿入は、表層大礫を除いて礫間隙に砂を入れた後、大礫を戻すことで実施した。また、実験前に勾配を急にした状態で大流量を通水し表層近くの砂を排除した。結果として平均礫頂部高さに対し18mmほど平均的に砂面を低く設定することとなり、全実験を通じて砂の流送はない状態にしている。なお、砂面位置は大礫径を $D=3.61\text{cm}$ とすると、 $0.5D$ 程度下に設定したことになる。

ここでは、前節と同様に ks を粒径 D 、河床高を $0.15D$ 低くして整理した結果を図-7に示す。これによると、どのケースも相対水深 h/D が1周辺になるとKeulegan式より下方へずれることがわかる。また、ごくわずかではあるが、ほとんどのケースで U/u_* の値が砂を挿入した河床の値のほうが上にある。ただし、それほど大きな差にはならず、粗度抵抗としては下層の状況をほとんど考慮しないでも良いと言える。

4. 表層状態が同様で鉛直構造が異なる河床の流れ構造の違い

(1) PIVを用いた流速分布の計測

本章では、3章の結果について詳しく調べるため、特に(2)節の条件で、底面付近に着目した流速分布の計測を行う。相対水深が小さい場で流速分布を計測するにあたり、水中に計測機器を入れず、かつ、面的に計測できるPIV解析を採用する。実験では、図-8のように水路内に鏡を入れることで、レーザーを壁面から5cmの位置に流下方向へ平行になるように入れ、水路壁外側から高速カメラを用いて流下するダイヤイオンをトレーサー粒子として撮影し、PIV解析を行う。解析用画像として、カトウ光研製高速カメラK5を用い、シャッタースピード1/2000、撮影速度2000fpsで13秒程度のものを用意した。撮影範囲は、画素数640×480の画面に水深スケール程度と河床付近1cm程度の範囲をそれぞれおさめた。取得画像はカトウ光研製Flow-Expertを用いて処理している。また、レーザー光源としてカトウ光研製PIV Laser Gシリーズ・200Mwレーザーを使用している。

本実験での計測ケースは、表-1に示すとおりである。

PIV解析は高解像度で瞬間値が求まり、その値を用いて各計測点の時間平均値やレイノルズ応力を求めている。さらにこれを計測断面で平均し、代表値を求めることにした。なお、空間的に流速分布は多少変化しているが、時間平均した値に対し、計測断面における各計測点での流速のばらつきは図-9に示す程度で微小である。特に、解析をまとめた例の図-9における面的な解析事例を図-10に示すと、瞬間的には、同一断面でもばらつきが大きいし、底面付近は特に礫の存在により変化する。しかし、

詳細な礫間以外は断面位置を多少変化させても計測の時間および断面平均値にそれほど変化がないため、ここでは一断面で平均した値を代表として議論することとした。

PIV解析用の画像は、ケースごとに水深が異なるため高さ方向にぎりぎり河床から水面がおさまるように設定し、取得している。そのため、各ケースで異なるスケールのメッシュを用いて直接相互相関法により解析を行っている。また、底面付近の流れの詳細を別途計測しており、こちらは画像高さが5mm程度になるような撮影を行っている。また、解析時の相関係数はほとんどのケースでおおよそ0.8程度を保っているが、ごくたまに相関が低いものもあるため0.5以下を示す数値は除去し、周辺解析値から補間を行うこととした。なお、水表面付近については、波打ってしまう関係からノイズが入りやすく、解析精度が確保されないためあらかじめ解析領域か

図-7 流速係数と相対水深の関係
(礫のみの場合と礫間に砂がある場合)

図-8 PIVのための撮影

表-1 PIV実験ケース

勾配	h (m)	h/D	u_*	流量 (m^3/s)	断面平均流速 U (m/s)	U/u_*	
1/50	0.0222	0.6161	0.0660	0.0013	0.2992	1.433	砂あり
1/50	0.0360	0.9962	0.0840	0.0042	0.5827	2.195	砂あり
1/50	0.0486	1.3458	0.0976	0.0075	0.7680	2.489	砂あり
1/50	0.0215	0.5962	0.0649	0.0012	0.2902	1.413	礫のみ
1/50	0.0389	1.0765	0.0873	0.0044	0.5704	2.067	礫のみ
1/50	0.0514	1.4231	0.1003	0.0079	0.7713	2.431	礫のみ
1/100	0.0207	0.5735	0.0450	0.0009	0.2164	4.805	砂あり
1/100	0.0382	1.0586	0.0612	0.0032	0.4144	6.771	砂あり
1/100	0.0508	1.4076	0.0706	0.0059	0.5757	8.158	砂あり
1/100	0.0587	1.6262	0.0758	0.0075	0.6407	8.447	砂あり
1/100	0.0222	0.6142	0.0466	0.0010	0.2304	4.944	礫のみ
1/100	0.0396	1.0975	0.0623	0.0031	0.3937	6.318	礫のみ
1/100	0.0504	1.3949	0.0702	0.0052	0.5145	7.324	礫のみ
1/100	0.0616	1.7059	0.0777	0.0077	0.6228	8.017	礫のみ
1/200	0.0212	0.5868	0.0322	0.0006	0.1515	4.702	砂あり
1/200	0.0379	1.0503	0.0431	0.0022	0.2887	6.699	砂あり
1/200	0.0516	1.4300	0.0503	0.0042	0.4046	8.045	砂あり
1/200	0.0687	1.9017	0.0580	0.0072	0.5254	9.058	砂あり
1/200	0.0220	0.6101	0.0329	0.0008	0.1809	5.505	礫のみ
1/200	0.0341	0.9450	0.0409	0.0018	0.2688	6.574	礫のみ
1/200	0.0514	1.4234	0.0502	0.0040	0.3893	7.758	礫のみ

ら外すことにした。

解析結果をまとめた例を図-9に示すとともに、面的な解析事例を図-10に示す。なお、図-9には、解析結果をプロペラ流速計の測定値や断面平均値と比較した例を示しているが、プロペラ流速計での計測値を参考にPIV解析の精度を検証したうえで、この後の検討を行っている。

(2) 底面付近の流速分布の特徴

PIV解析より得られた各勾配における底面付近の流速分布とレイノルズ応力を図-11に示す。これによると、どのケースも相対水深1以下のところで、対数則の傾きに沿った流れが現れており、対数則が下方まで成立していることがわかる。また、wake-regionにしては減衰が大きいようにも思われ要因等の判断が難しいが、水表面付近で減速領域が確認される結果となった。

ここで、河床表層付近の流れについて確認すると、 y/D の値が0.1になると、礫間が砂で埋まっている場合に $u(y)/u_*$ の値が各ケースともに一定値周辺に落ち着き、礫のみの河床の場合はそれぞれ異なる値に収束することがわかる。特に、 $u(y)/u_*$ の一定となる値は、 u_* の値が同じでも下層に砂がある場合のほうが大きく、 y/D の値も大きくなる。これは、礫のみの場合間隙が大きく、底面付近の流速に対し浸透流が無視できない大きさとなるためと考えられる。特に、浸透流が表流水の流れに及ぼす影響は、これまで、中川ら¹⁰⁾や山田ら^{11)、12)}などにより検討されているように、浸透流と水塊のやり取りがあるため、減速する領域が広がると考えられる。また、このことを裏付けるように下層の間隙を砂で充填した河床より礫のみの河床で明らかにレイノルズ応力が底層付近で大きいことも確認できるし、礫のみの河床条件では解析画像において粗度付近で生じる渦が上方へ運ばれていくことが確認できる。こうした状況により河床下層の間隙の充填が流れ構造に影響を及ぼすと言える。

なお、本結果より、礫間の砂の有無にかかわらず、勾配にもかかわらず、 $y/D=1$ のときの u/u_* の値、つまり、式(4)の B_s の値がどのケースもほとんど変わらないことも確認できる。図-11とあわせて、勾配1/200の流速分布を図-12に示すが、底面付近の流速分布形状が異なるのが見てとれる。

図-9 PIVおよびプロペラ流速計による流速分布
(1/100, 水深0.050mのケース)

図-10 流速分布の例 (上図: 平均値, 下図: 瞬間値)

5. おわりに

本研究では、天然礫を対象に河床表層状態と下層の間隙状態を変化させた河床で水深と流速を調べた実験の結果を整理し、粗度の取り扱いについて検討した。また、あわせてPIV解析を用いて底面付近の流速分布を調べた。これらの結果を検討し、以下のことが分かった。

- ・河床材料の粒径情報だけでなく表層構造の違いによる凹凸情報により、粗度の大きさを変化させる必要がある。
- ・河床下層における砂の充填の有無は、粗度係数の評価にそれほど影響しない。ただし、底面付近の詳細な流速分布については違いが現れる。
- ・河床構造に間隙が存在し浸透流が存在する場合、従来の研究成果と同様に河床間隙の流れが表流水流れに影響を与えることが確認できた。つまり、底層の流速の評価には、河床の凹凸だけでなく、河床間隙状態の把握が必要となる。

今回の結果を踏まえると、混合粒径構成河床の課題が見えてくる。表層が礫でおおわれているとき、下層の材料にかかわらず、粗度としては表層の礫構造で考えてもよい。ただし、河床付近の流速は、下層の状態で大きく変化するため、細砂の流入等があった際にはその影響は

図-11 勾配別流速分布およびレイノルズ応力分布

図-12 PIVによる流速分布 (1/200のケース)

異なってくる。

なお、今回の検討ではPIVによる底面流れの計測結果を示し、有用なツールとしての可能性が見えてきた。今後、流砂量算定、特に、混合粒径における掃流力等の正しい見積りのためにも、PIV解析を利用して河床内部構造～表層凹凸～粗度の関係を検討していくことを考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、PIV計測等でカトウ光研(株)の藤村氏に多大なる助言をいただいた。また、様々な実験は、2014年度の4年生をはじめこれまで名城大学河川工学研究室に所属した学生の補助があり実現している。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 田所弾, 福田朝生, 福岡捷二: 等価な粒度分布を有する球と石礫で構成される二つの数値移動床上の粒子運動の比較検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, I 961-I 966, 2014.
- 2) 芦田和男, 大同淳之, 高橋保, 水山高久: 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究, 京都防災研究所年報第16号, pp.481-496, 1973.
- 3) 神田徹, 土井和吉: 粗面開水路における浅い流れの抵抗則, 第25回水理講演会論文集, pp.105-112, 1981.
- 4) 神田徹, 鈴木勝士: 球形粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第357号, II-3, pp.65-74, 1985.
- 5) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦: 相対水深の小さな流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第423号, II-14, pp.73-81, 1990.
- 6) 中川博次・辻本哲郎: 移動床流れの水理, 第三章, 技法堂出版, 1986.
- 7) 芦田和男, 道上直規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 8) 溝口敦子: 大礫間を流れる砂の流砂量算定に向けた相対水深が小さい場での粗度抵抗・有効掃流力の評価に関する実験的検討, 応用力学論文集, 第13巻, 土木学会, pp. 869-876, 2010 .
- 9) 辻本哲郎, 細川迭男: 急勾配水路における礫の限界掃流力と流砂量, 土木学会論文集第 411 号, II-12, pp.127-134, 1989.
- 10) 中川博次, 祢津 家久: 透水性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用, 土木学会論文報告集, pp.81-89, No.244, 1969.
- 11) 山田 正, 川端 規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究, 土木学会論文集, 325号, pp. 69-80, 1982.
- 12) 山田 正, 川端 規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究, 土木学会論文集, 325号, pp. 81-91, 1982.

(2014. 12. 20受付)