

# 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

Experimental study on hydraulic resistance and shear stress with small relative submergence  
for estimating discharge of sands which move through cobbles

溝口敦子  
Atsuko MIZOGUCHI

博(工) 名城大学助教, 理工学部建設システム工学科  
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

Estimating sediment discharge through mountainous region is very important for sediment control along river because sediment discharge from mountainous region become inlet boundary condition of the downstream area. However, hydraulic and sediment condition in mountainous regions are very complicated because of the characteristics of bed roughness conditions.

As the first step of estimating discharge of sands which move through cobbles during low water stage in the mountainous rivers, some series of flume experiments had conducted in order to investigate the characteristics of hydraulic resistance and flow velocity profile, effective shear stress, and so on. Especially, the characteristics of flow over rough beds which are composed of natural gravels with small relative submergence were focused on. As results, I indicated the estimating method of water depth and effective shear stress, and so on.

**Key Words:** Mountainous river, sediment discharge, small relative submergence, hydraulics resistance

キーワード: 山地河道, 流砂量, 小さい相対水深, 粗度抵抗

## 1. はじめに



図-1 阿木川上流部における河床の様子

ダム建設による下流河道への土砂供給の減少など流砂の連続性にかかわる問題が、多くの河川で取りざたされている。こうしたなかで、自然復元や環境改善など様々な観点から実河川における流砂量の予測が必要となっている。これまで、掃流砂、浮遊砂を対象として流砂にかかわる様々な研究が行われてきたが、実河川で実際に存在する場

では十分な成果が得られているとは言えない。例えば、相対水深が小さく粒径比が大きな河床材料が存在する場における流砂量の推算に関しては、十分な知見があるとは言いがたい。また、ダム下流に還元した土砂の挙動などは不明であり、流砂現象の解明には、河川上流部における土砂生産量、流砂動態の予測を含め各河道区間で様々な現象の解明、流砂量の予測が一部課題として残されている。

本研究では、河道区間のうち、特に、相対水深が小さく河床材料の粒径分布が多様な山地河道を対象として、これまであまり取り扱われていない平水時の流砂に着目する。

図-1 に示す阿木川など地質条件から土砂生産が高い山地区間などの河道では、平水時にも砂が活発に動いている。こういった河道の平水時の流砂が流砂系に果たす役割は無視できない可能性が高い一方、大礫表面の藻類の剥離や底生昆虫の生息環境創出など生態系に対しても重要な役割を担っている<sup>1), 2)</sup>。これらを踏まえ、著者は、山地河道における平水時の流砂量の算定を目指す。

山地河道は急勾配である上に、巨礫、大礫が散在してお

り、さらに砂がたくさん存在するような場では、礫の散在状況と砂面の高さによって、粗度抵抗が大きく変化するなど水理的に取り扱いが難しい。また、大礫間の砂にかかる有効掃流力および流砂量の評価も難しい。

そこで、本研究では、山地河道における平水時の流砂動態を調べる一環として、まず、水面下にある礫が密に敷かれている場合の礫間流砂量を調べることを最初の目的として、下記について実験で検討する。

- ① 自然石を密に敷き形成した礫河床の間隙構造
- ② 礫が密に敷かれている場での粗度抵抗の評価
- ③ 礫間に砂が存在する場合の粗度の評価
- ④ 礫間の砂の有効掃流力の評価

上記項目の①は、礫間に入りうる砂の量や礫で構成された河床間隙の特徴を調べるために検討する。間隙の空間分布は、自然石の形状特性、立体構造によって特徴が異なるが、ここでは、実験に用いた密に敷いた自然石と既往の研究で数多く用いられた球形粗度の特徴との比較のみを言及する。②、③は、評価が確立されていない相対水深が小さい場での粗度評価を確認することを目的としており、この結果により、河床の状態による流量と水深の関係を明確にする。④では、流砂量算定のための河床間隙にある砂にかかる有効掃流力を検討する。つまり、①で密に敷かれた礫間に存在する砂面高さ、砂の専有面積がわかれば、③の結果より粗度抵抗の取り扱いにより流量に対する水深が予測でき、さらに④の結果を用いて有効掃流力が算定され、流砂量が計算可能となる。

## 2. 密に敷いた自然石で構成された河床の特徴



図-2 自然石で形成された礫河床の様子

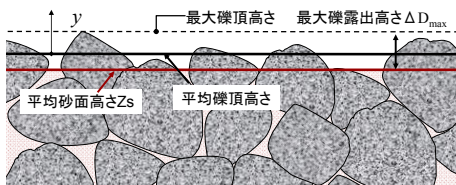


図-3 礫河床と記号の定義

### 2.1 実験の意義、言葉の定義

既往の研究では、相対水深の小さい場での粗度抵抗を検討する場合に球形粗度を用いることが多い<sup>3)~6)</sup>。自然石は球体とは形状が異なるため、河床の間隙構造も凹凸の状況も異なる。相対水深が小さい流れ場は河床材料の形状の影響が大きい可能性があるため、本研究では、3章以下の

実験を自然石で構成された河床を対象に行う。

そこで、まず、本研究で用いる粒径 3cm 程度の自然石で構成された礫河床(図-2)の間隙構造など物理的特徴を把握することを目的とし、以下の実験を行う。

なお、図-3に礫河床の模式図を立面図で示し、用語を整理する。各礫の最高点を礫頂部とし、一番高い礫頂部の高さを最大礫頂高さ、各礫頂部高さの平均値を平均礫頂高さ、礫間隙に砂がある場合の平均砂面高さからの最大・平均礫頂部高さまでの距離を最大・平均露出高さとした。

### 2.2 実験方法

実験は、次の手順で行う。なお、同じように礫を敷き詰めても、その構造にばらつきが生じることが予想されたため、以下の作業を複数回繰り返し行った。

まず、できるだけ密に、かつ、表面に凹凸ができないように、幅 32.5cm×長さ 42.5cm の箱に礫を敷き詰める。次に、1辺 20cm の正方形で検査領域を設置し、領域内の一層目の礫頂部の高さを全てポイントゲージで把握し、そのばらつきを調べる。続いて、礫が詰まった箱に少しずつ水を入れていき、傾斜マンオメーターを用いて箱の中の水位を調べ、入れた水の量に対する水位上昇を計算し、各高さの間隙率を調べる。

### 2.3 礫頂高さのばらつきと礫の間隙構造

実験から得た平均礫頂高さを基準とした礫頂高さのばらつきの例をヒストグラムで図-4に示す。また、例に挙げたそれぞれの試行回(A, B)における間隙率を図-5に示す。これらの図から、自然石を密に敷き詰めた場合、礫高さの分布にばらつきがあるもの高さ方向の間隙率の変化は、ほぼ同様な傾向を示すことが分かる。これらの結果を踏まえると、河床鉛直方向の間隙率の変化は、例えば式(1)のように近似できる。

$$p\left(\frac{y}{D}\right) = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{y}{D}\right) + A_3 \quad (1)$$

ただし、 $p(y/D)$  : 無次元高さ  $y/D$  における間隙率、 $y$  : 平均礫頂高さを基準とした高さ ( $y < 1.409$ )、 $D$  : 礫の平均粒径であり、 $A_1, A_2, A_3$  は、礫の形状によって決まる係数で、本自然石では、0.14, 4.22, 0.33 である。

なお、図-5には、均一な球形粗度を用い六方細密構造となるように充填した場合の、間隙率の深さ方向変化を計算し、あわせて示している。これにより、球形粗度と自然石とは間隙構造が大きくことなることがわかり、相対水深が小さい場での流れの特性は、河床構成材料の特性と間隙構造によって球形粗度を用いた河床と自然石河床で大きく異なることが予測される。

## 3. 相対水深が小さい場での自然石構成河床における粗度抵抗特性

ここでは、第2章で特性を述べた“自然石を敷き詰めた礫床河床”上の粗度抵抗を調べるために実施した実験について述べる。

### 3.1 実験概要

実験は、長さ 8m 幅 30cm の範囲に礫を敷き詰めた可変勾配水路を用いて、勾配を 1/100, 1/80, 1/60 に変化させ、実施した。実験では、礫が動くぎりぎりまで、水位が約 1cm 間隔で刻まれるよう流量を上げていき、流量の計測と、ポイントゲージを用いた水位（平均礫頂高さを基準とする）の計測を行った。なお、各勾配で、この実験を 3 セット程度繰り返し行った。

また、一部のケースのみ、図-6 のようにレーザーシートと高速カメラを用いた動画の撮影を行い、PIV による流速分布の計測を試みた。なお、PIV の結果の確認のため、同時に浮子による表面流速の計測も行った。

### 3.2 粗度係数の評価

相対水深が小さい場での粗度係数の評価のため、Darcy-Weisbach の式に準じて式(2)で粗度係数  $f$  を算出し、レイノルズ数  $Uh/\nu$  との関係性を調べた。

$$f = 8 \left( \frac{U}{u_*} \right)^{-2} = \frac{8glh}{U^2} = \frac{8glh^3}{q^2} \quad (2)$$

ここに、 $U$ : 平均流速、 $u_*$ : 摩擦速度、加速度 ( $9.8\text{m/s}^2$ )、 $R$ : 径深 ( $=hB/(2h+B)$ )、 $h$ : 水深、 $l$ : 水路勾配、 $q$ : 単位幅流量である。この際、平均礫頂高さを基準とした水位を水深  $h$  とした場合（補正なし）と、それより  $0.15D$  低い位置を基準とした水位を水深  $h'$  とした場合（補正あり）の二通りの水深を用いて検討を行った。ここでは、相対水深が低い流れ場における球形粗度の河床基準位置の評価を、平均河床高や流速分布の特徴を踏まえ平均礫頂部から  $0.15D$ ,  $0.2D$  だけ下方に置いたりすること<sup>3), 6)</sup>を考慮し、同様に補正を行う。ただし、自然石の平均河床高を算出するのは困難であるため、球形粗度の値を参考に  $0.15D$  下方の補正することとした。この結果を図-7 に示す。

既往の研究によると、レイノルズ数が小さい場では、粗度係数はレイノルズ数の逆数に比例するとされているが、図からわかるように、実験領域は粗面乱流であり、相対

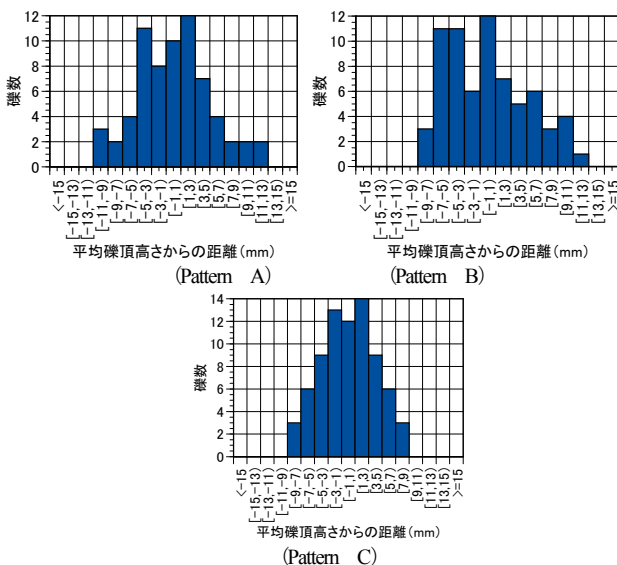


図-4 礫頂高さのばらつき

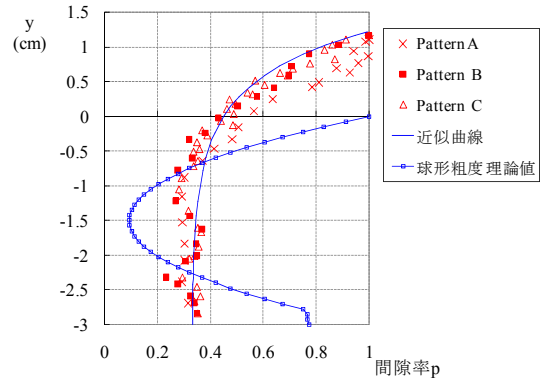


図-5 平均礫頂高さからの間隙率

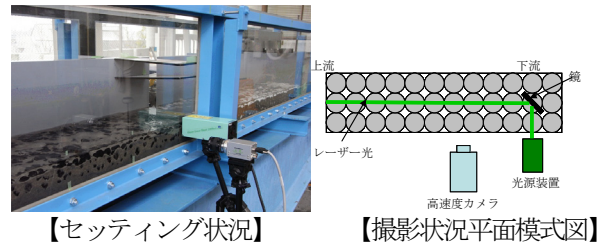


図-6 PIV のための画像撮影のイメージ

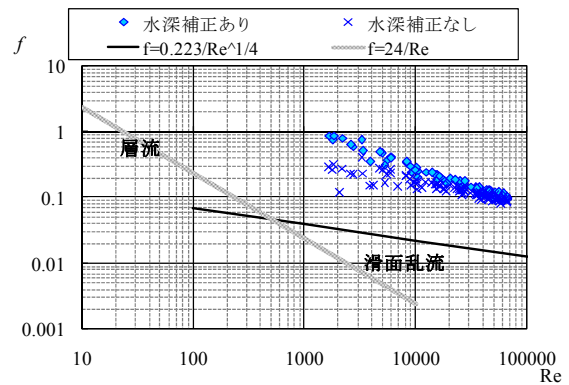


図-7 粗度係数とレイノルズ数の関係

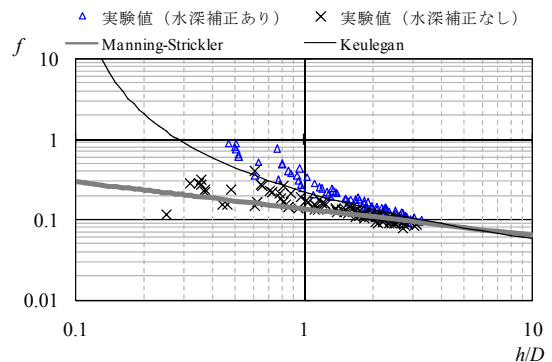


図-8 相対水深  $h/D$  と粗度係数の関係

水深が変化し、かつ、レイノルズ数が大きな場では、評価が難しい。そこで、図-8 に示すように、相対水深と粗度係数の関係を調べるとともに、Manning-Strickler の式および等価粗度を粒径程度にした Keulegan の式での評価を検討した。その結果、相対水深が小さく、Manning-Strickler の

式と Keulegan の式がずれ領域で、水深補正前の実験値が Manning-Strickler の式に、水深補正を行った実験値が Keulegan の式に、比較的従っていることが分かった。なお、式からの実験値のばらつきは、前者のほうが大きいので、後者が有効であると考えられる。

### 3.3 相対水深が小さい場での流れの特徴

前節で、相対水深がおおよそ3以下にある本実験条件でも、抵抗則が水深の定義の仕方によるが既往の式で表現できることを示した。その一つの Keulegan 式は、流速分布が対数則に従うとして求められた抵抗則（平均流速公式）であるため、本実験条件のような相対水深が小さい領域でも流速分布はほぼ対数則に従うことが予測される。そこで、PIV の結果を用いて流速分布の特徴を確認する。なお、PIV で用いる画像の撮影は、frame rate が 200fps または 600fps、シャッタースピードは 1/1000s で行った。

図-9 に結果の一部を示す。例に示すように、ほとんどのケースで流速分布は、流速分布がほぼ一様化された底面近傍の領域（roughness sublayer）より上に、対数則に従う領域が存在した。また、辻本ら<sup>6)</sup>の結果と同様に、相対水深が小さいケース以外では、水面付近に Coles の伴流領域（wake region）が存在する場合もあった。

相対水深がある程度大きくなると、対数則に従う領域がほとんどを占めていることから、Keulegan 式の適用性を確認できる。しかし、図-9 に示すように相対水深  $h/D$  が 0.4 より小さい条件（図中の  $h^*=0.026m$  の条件など）になると、流速分布がほぼ一様化された領域がほとんどを占め対数則に従うとは言い難い。そのため、相対水深が 1 より小さくなるにつれ、図-8 では Keulegan 式より実験値が徐々に離れる傾向になったと考えられる。

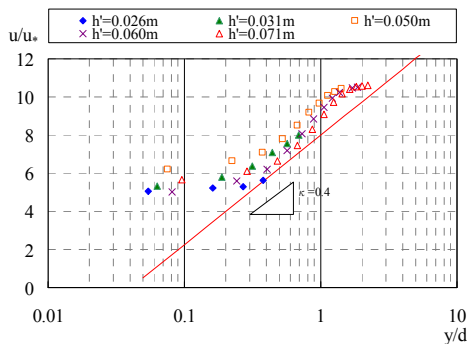


図-9 勾配 1/60 における流速分布（補正水深  $h^*$  毎に）

## 4. 礫間流砂量算定に向けた砂混じり礫河床の粗度抵抗の評価

本章では、2, 3 章で検討した礫（自然石）を密に敷き詰め、河床の間隙を平均粒径 0.55mm の 5 号珪砂で埋めた砂混じり礫河床を対象として、実験を行い、粗度抵抗の評価を行う。

### 4.1 礫混じり砂河床の取り扱いについて

河床材料粒径が様々な混合粒径構成河床の粗度の評価

は、表層の各粒径の体積占有率を用いて平均粒径  $d_m$ 、35% 粒径  $d_{35}$  と 65% 粒径  $d_{65}$  などを参考に等価粗度を決め Keulegan の式などで評価されることが多い<sup>7)</sup>。一方で、粒径比が大きい大礫と砂の混合河床や河床から突出した礫がある場合の粗度抵抗は、式 (3) のように礫にかかる流体力（式 (3) 二段目以降の第一項）と砂にかかる有効せん断力  $\tau_s$ （第二項）とで底面せん断力  $\tau_b$  を考え、球形粗度を用いた実験等により礫抗力の評価法を検討し<sup>5), 8)~10)</sup>、評価を行うものが多い。なお、文献によっては、礫にかかる抗力の評価に平均流速を用いており、礫の配置や礫の水没状況による抵抗係数の評価の検討を行っている<sup>5), 9)</sup>。

$$\begin{aligned} \tau_b &= \rho g h l \\ &= \sum_{N_0} \frac{1}{2} \rho C_{Di} A_{Di} U_{Di}^2 + \tau_s p_{sa} (1 - p_{aross}) \\ &= \frac{1}{2} \rho C_{Dm} A_{Dm} U_{Dm}^2 N_0 + \tau_s p_{sa} (1 - p_{aross}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\tau_b$ ：河床に働く平均底面せん断応力、 $\rho$ ：水の密度、 $C_D$ ：抵抗係数、 $U_D$ ：礫頂における流速、 $A_D$ ：礫要素の遮蔽面積、 $N_0$ ：単位面積あたりの礫の個数、 $\tau_s$ ：砂にかかるせん断力、 $p_{sa}$ ：砂の面積占有率、 $p_{aross}$ ：砂面における止水域の占有率である。なお、添え字  $i$  は礫要素  $i$  における値、添え字  $m$  は平均的な値または代表値を示す。

本実験のように、河床材料が二粒径に大きく分けられ、かつ、粒径比が大きい場合、砂面と礫頂高さにより粗度の評価が大きく異なるため、式 (3) のように礫にかかる抗力と砂にかかる力を分けて考える必要がある。しかし、本研究では、既往の研究と異なり球形粗度を用いず自然石を用いており礫の高さもばらつくため、礫の遮蔽面積や抵抗係数の評価が難しいことが予測される。このことを踏まえ、密に敷いた礫間を砂で埋め、流砂量を変化させることで砂の占有率を変化させる実験を行い、河床全体の粗度抵抗の取り扱いおよび砂にかかる有効せん断応力について検討する。

### 4.2 砂の流砂量公式の確認

まず、実際に用いる 5 号珪砂（平均粒径 0.55mm 程度）の掃流力と流砂量の関係を確認するため、勾配を 1/60, 1/80, 1/100 に設定した幅 30cm の可変勾配水路に対象砂を敷き詰め実験を行った。実験では、水深と流砂量を計測する。

ここでは、式 (4) に示す芦田・道上式と実験値との関係を検討した。

$$q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d^3}} = \alpha \tau_*^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (4)$$

ここに、 $q_{b*}$ ：無次元流砂量、 $q_b$ ：流砂量、 $\sigma$ ：砂の密度、 $\rho$ ：水の密度、 $d$ ：粒径、 $\tau_*$ ：無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ ：無次元限界掃流力である。

芦田・道上式の係数  $\alpha$  は通常 17 が用いられているが、これは砂の形状等様々な要素が含まれ決定すべき数であり、多数の実験データをもとに 17 が良くあうとされている。また、急勾配水路では勾配によって限界掃流力の修正

や係数 $\alpha$ の修正が必要とされている<sup>11)</sup>。実験で限界掃流力は0.05程度であることを確認したため、ここでは、限界掃流力の修正は行わず、係数 $\alpha$ についてのみ、流砂量式の適合性とともに検討した。その結果、対象とする砂は、芦田・道上式の係数 $\alpha$ が8程度であることを確認した(図-10)。

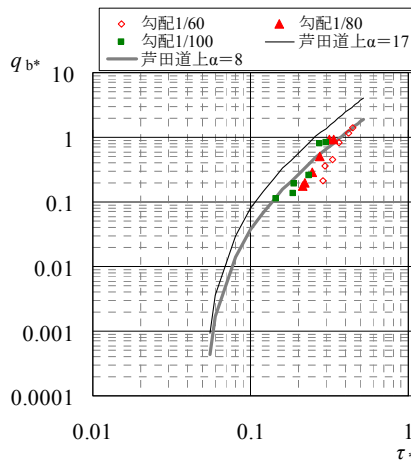


図-10 流砂量式の確認

表-1 実験条件

	流量 ( $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ )	土砂供給量 (g/min)
case1-1	1.0	0
case1-2		90
case1-3		135
case1-4		180
case1-5		360
case1-6		540
case2-1	1.5	0
case2-2		150
case2-3		300
case2-4		450
case2-5		600
case2-6		900
case3-1	2.0	0
case3-2		190
case3-3		380
case3-4		760
case3-5		1140
case4-1	3.0	0
case4-2		475
case4-3		705
case4-4		940
case4-5		1880



図-11 土砂供給装置

### 4.3 砂混じり礫河床の流砂量算定に向けた実験

#### (1) 実験装置概要

実験は、勾配を1/60に設定した幅30cmの変可勾配水路に、長さ7m程度で礫間を砂で埋めた河床を設置し、図-11に示す給砂装置を上流に、採砂箱を下流に設置して行った。図-11に示す給砂装置は、中川・辻本<sup>12)</sup>が使用したものを参考に製作し、ベルトコンベアで運ばれる土砂の厚みをベルトコンベアからのホッパーの出口位置を調節することで変化させ、かつ、ベルトコンベアの手数を調節することで長時間一定量の土砂供給を可能としている。

#### (2) 実験方法

実験は、次の手順で行った。

- ① 礫間を砂で埋めた状態で河床を設置し、礫がすべてかくれるように砂を敷き詰め、平坦砂河床を形成する。
- ② 通水を開始し、5分程度経過して流量が安定したとこ

ろで、平衡流砂量を測定する。流砂量は、採砂箱を用いて採取時間を計測しながら砂を採取し、後で乾燥重量を測ることで測定する。

- ③ 次に、実験流量を通水したまま、長時間放置し、砂の動きがなくなったところで、各種計測を行う。

- ④ ②で確認した流砂量を1として、1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 1程度の量の土砂供給を行い、実験区間が平衡状態になったところで各種計測を行う。なお、平衡状態は、実験区間が上下流の状態を確認することと、水中重量の計測により下流端からの土砂流出量を確認し、給砂量と同値であるか否かで、判断する。

なお、本実験では、流量、流砂量をともに変えており、表-1の条件で実験を行っている。

#### (3) 計測事項

各条件における計測は、砂面・礫面高さ、および水位を縦・横断面でポイントゲージを用いて行っている。また、河床の状態を確認するために、ガラス壁面から鉛直面の写真・ビデオ撮影、水路上方から河床の状態を写真撮影した。

縦断面河床計測は、4m区間にわたり水路中心位置で25cm毎に露出している礫高さとして計測した。あわせて、横断面河床計測は、水路10cm毎に5断面で露出している礫高さを計測するとともにそれぞれ礫下河床の高さを砂面・礫面の判断とともに計測した。なお、水位、河床高はそれぞれ平均礫頂部位置を基準としている。ここで、計測結果の一部を例として図-12, 13に示す。

#### (4) 砂面高さと砂占有率の関係

横断面詳細計測を元に、各実験ケースにおける平均砂面高さを求める。あわせて、上方から撮影した河床の状態写真を元に画像解析を行い、礫および砂の占有率を調べた。礫の直径 $D$ で無次元化した砂面高さ $Z_s/D$ と砂の面積占有率 $p_{sa}$ を、2章の間隙率の結果例とともに図-14に示す。これから、間隙構造が予測できる場合、砂面高さは凹凸があるものの、平均砂面高さで取り扱えば、面積占有率が予測できると言える。逆に、間隙構造が予測でき面積占有率が分かれば、平均砂面高さが算出されるとも言える。

#### (5) 礫間に砂がある場合の粗度抵抗の評価

実験結果の水位、河床高等をもとに、礫間に砂があり砂面が変化した場合の粗度抵抗を検討する。図-15に無次元流砂量と粗度係数 $f$ および砂面高さ $Z_s$ の変化例を示す。この図から、流砂量が増加に伴い砂面は上昇し、かつ、粗度係数は減少することがわかる。これは、砂面が低く礫の凹凸が露出しているときは、礫が粗度要素として働くが、砂面が高くなると砂が占有し礫の凹凸がなくなることが要因である。

そこで、砂面高さの変化に応じた粗度抵抗を評価するために、等価粗度を次の4通りで評価し、水深を等価粗度で除した相対水深と粗度係数 $f$ の関係を調べ、Keulegan式およびManning-strickler式の適合性を検討した。

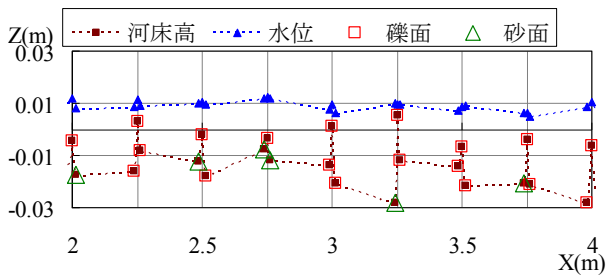


図-12 縦断面計測結果 (Case1-1 : Q=1.0/s, 給砂なし)

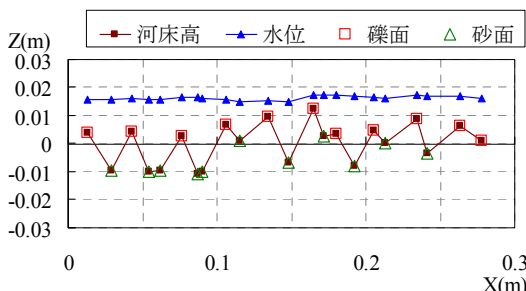


図-13 横断面計測結果 (Case1-1 : Q=1.0/s, 給砂なし)

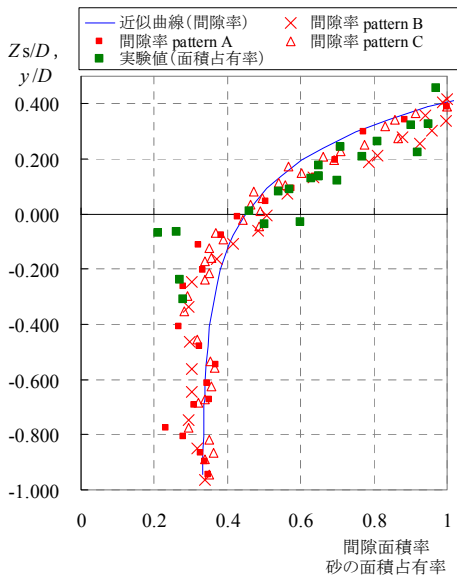


図-14 砂面高さ  $Z_s$  と砂の面積占有率の関係

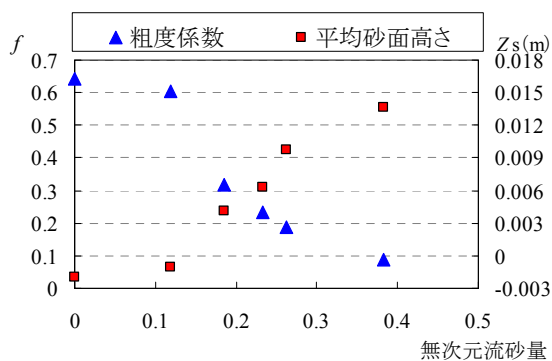


図-15  $Q=2.0/s$  における流砂量に応じた粗度係数  $f$  と砂面高さ  $Z_s$  の変化

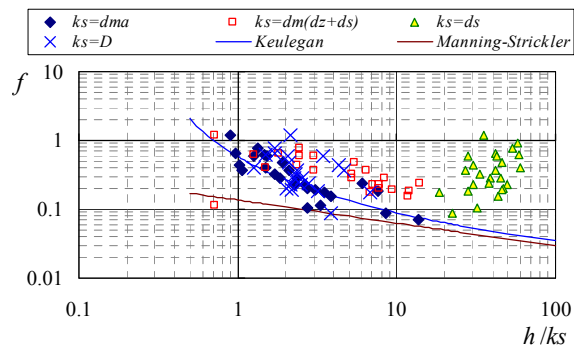


図-16 等価粗度の評価の検討

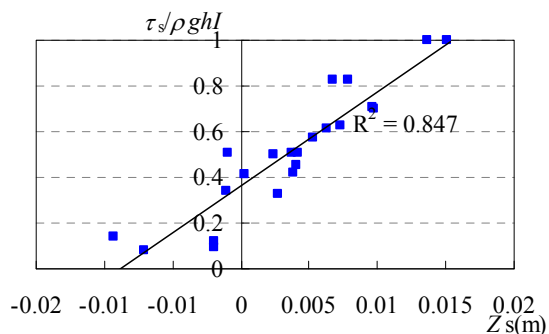


図-17 砂面高さ と砂の有効掃流力との関係

- ① 礫の粒径と砂の粒径およびそれぞれの面積占有率から算出した平均粒径： $d_{ma}$
- ② 礫の平均露出高さと砂の粒径およびそれぞれの面積占有率から算出した平均粒径： $d_m(dz+ds)$
- ③ 砂の粒径： $ds$
- ④ 礫の粒径： $D$

その結果が、図-16 になり、礫と砂の面積占有率から算出した平均粒径  $d_{ma}$  を等価粗度とすると Keulegan 式で粗度抵抗が評価できることが分かった。なお、水深を補正したり各値を数倍して等価粗度としたりすれば、他の等価粗度の評価法でも適合する可能性があるが、今回は行っていない。

#### (6) 礫間の砂の有効掃流力、礫にかかる抵抗力

ここでは、砂面高さの変化に伴う砂の有効掃流力について調べる。本実験では、礫後部の死水域がそれほど大きくないため考慮せず、 $p_{aross}=0$  とした式 (3) をもとに考える。ここでは、砂の有効掃流力が平均値で評価でき、砂が占有している領域では平均有効掃流力分の流砂量が平均的に流れていると仮定する。あわせて、有効掃流力と流砂量間には、芦田・道上の流砂量公式 (4) が成り立つと仮定し、実験で実際に供給した流砂量を砂の面積占有率で除した流砂量を流すのに必要な有効無次元掃流力を  $\alpha=8$  とした流砂量公式 (4) を用いて算出する。これを有効掃流力  $\tau_s$  に直し、底面せん断応力 ( $\rho g h l$ ) で除した値と砂面高さの関係を図-17 に示す。この図より、多少ばらつきはあるが、砂面が下がると砂の有効掃流力が下がり、砂が抵抗に果たす役割が小さくなっていることが分かる。また、ばらつきがあるものの線形近似でその低減を表現できることがわかる。

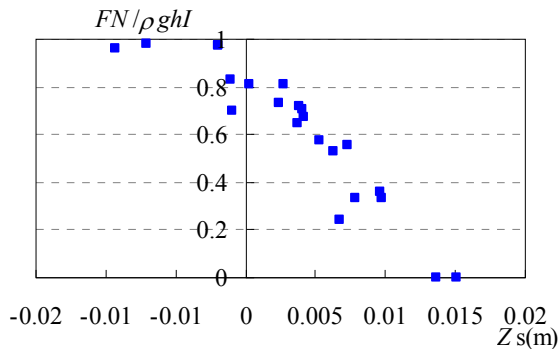


図-18 砂面高さと礫抗力との関係

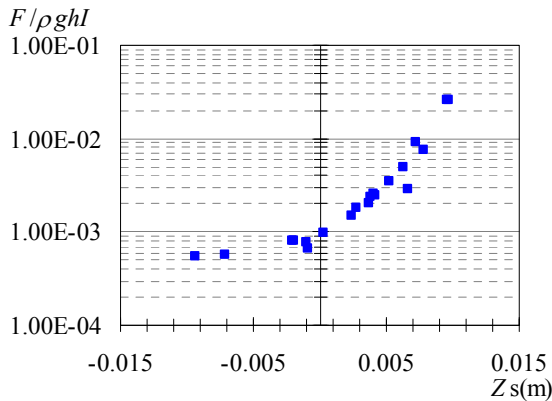


図-19 礫一個あたりの無次元抗力

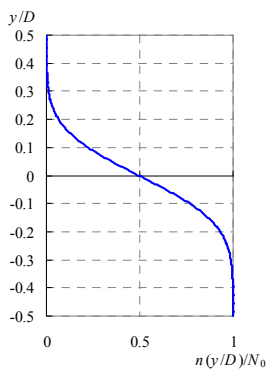


図-20 礫頂高さによる無次元礫数の累積密度関数

砂面高さが変化し、礫の露出が変化すると、砂にかかる有効掃流力とともに礫の抗力の役割も変化することがわかる(図-18)。図-18中の $FN$ は、式(3)中の二行目第一項にあたる。ここで、礫抗力 $F(=FN/N_0)$ の評価を試みる。ただし、礫の個数は一定でなく、砂面高さで変化するため、2章で調べた礫の高さのばらつきと個数を参考に砂面高さごとの露出礫の個数を調べ、一個あたりの礫にかかる平均無次元抗力 $F/\rho g h l$ を調べた(図-19)。その後、礫抗力と底面速度から抗力係数や遮蔽面積の算出を試みたが、露出する礫の遮蔽面積や高さはばらつきがあるため、平均値で議論するのは難しいことがわかった。

## 5. 礫間流砂量算定モデル構築の試み

ここでは、本研究の一連の実験成果を用いて、密に敷か

れた自然石の礫間流砂量算定モデルの構築を試みた。ただし、実験で用いた自然石と同じ形状的な特徴を持つ礫が密に敷かれた河床に限定されており、今後、適用性の確認とともに河床間隙構造の変化への対応が必要である。

### 5.1 モデル河床の設定

本モデルは、実験で用いた自然石と同じ形状特性を持つ礫が密に敷かれている河床を想定している。図-3のように平均礫頂高さを基準として砂面高さ $Z_s$ などを考える。基準からの高さを $y$ としたとき、 $y$ における礫の存在確率を、2章の実験結果にある礫頂部高さのばらつきを利用すると標準偏差0.133程度の正規確率分布を用いて表すことができる。そのため、図-20のように累積個数 $n(y/D)$ を書くことができる。ここに、単位面積あたりの礫数を $N_0$ とする。

なお、最大礫突出高さ $\Delta D_{max}$ は、礫の存在高さ分布により変化する。ただし、2章の実験の結果では、だいたい $0.45D$ までに礫が存在していたため、最大礫突出率は、仮に下記であると想定できる。

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{0.45D - Z_s}{D} \quad (5)$$

### 5.2. 流砂量の算定

5.1のような自然石を密に敷いた礫河床に砂が供給されている場合、供給されている砂の流砂量により、砂面の高さおよび礫の露出状況が決まる。ここでは、露出高さ、流量が決まっているときの流砂量の予測方法をこれまでの成果をもとに記述する。ただし、これはあくまで試みの段階であり、特に、4.3節(6)の成果にあたる③、④については、限られた実験成果を用いているため他の条件での適用性を検討する必要がある。

#### ①砂の面積占有率の算定

平均砂面高さ $Z_s$ または最大露出高さ $\Delta D_{max}$ が決まれば、図-4、13の関係をj用いて砂の面積占有率 $p_{sa}$ が決まる。近似曲線は、式(1)より次のようになる。

$$p_{sa} \left( \frac{Z_s}{D} \right) = 0.12 \exp \left( 4.2 \frac{Z_s}{D} \right) + 0.33 \quad (6)$$

ただし、おおよそ $Z_s/D \leq 0.4$ の範囲で適用される。

#### ②平均粒径の算定と水深の予測

式(7)により面積占有率を用いて平均粒径 $d_{ma}$ を計算し、これを等価粗度 $ks$ として式(8)のKeulegan式により水深を算出する。

$$d_{ma} = p_{sa} \left( \frac{Z_s}{D} \right) d_s + \left( 1 - p_{sa} \left( \frac{Z_s}{D} \right) \right) D \quad (7)$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{Q/Bh}{\sqrt{ghl}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{11.0h}{ks} \right) \quad (8)$$

ここに、 $U$ :平均流速、 $Q$ :流量、 $B$ :川幅、 $\kappa$ :カルマン定数(0.4)である。

#### ③砂の有効掃流力の算定

砂の有効掃流力は、図-16 の関係をもとに次のように決めることができる。

$$\left(\frac{u_{*s}}{u_*}\right)^2 = k_1 \frac{Zs}{D} + k_2 \quad (9)$$

$$\tau_{*s} = \frac{u_{*s}^2}{\sqrt{1.65gd_s}} \quad (10)$$

ここに、本実験では係数  $k_1$ ,  $k_2$  は、1.4056, 0.3675 とでき、礫の間隙特性等により変化すると考えられる。

#### ⑤ 流砂量の算定

砂の有効掃流力より、式 (11) を用いて砂の流砂量  $q_{bs}$  を算定できる。なお、従来の粒径別流砂量式は、乗じる割合  $p$  に砂の体積占有率を用いているが、粒径比が大きな河床の場合は、表面の面積占有率  $p_{sa}$  を乗じる必要がある。

$$q_{bs} = p_{sa} \sqrt{1.65gd_s^3} \left\{ \alpha \left( 1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \right\} \quad (11)$$

## 6. 結論

本研究では、山地河道における礫間流砂量の算定の構築を目指し、その第一段階として、様々な実験を行った。その結果、以下のことが分かった。

#### (1) 自然石河床の特徴

- ・自然石を密に敷いて形成した礫河床は、一定のばらつきはあるものの、鉛直方向の間隙率の変化を近似的に表すことができる。また、球形粗度とは大きく異なる特徴を持つ。

#### (2) 自然石で形成された河床の粗度の取り扱い

- ・相対水深が小さい場での平均礫径  $D$  の自然石で形成された河床の粗度抵抗は、平均礫頂高さから 0.15D 低い位置を基準とした水深を用い、Keulegan 式で粗度抵抗を表すことができる。

#### (3) 礫間に砂が存在する場合の粗度の取り扱い

- ・礫径と砂の粒径比が大きいとき、砂面と礫面の評価が必要となり、砂面高さにより、粗度抵抗が変化する。
- ・等価粗度に砂の面積占有率から求めた平均河床材料粒径を用いれば、粗度抵抗は、Keulegan 式で評価できる。

#### (4) 礫間の砂の掃流力、流砂量の評価

- ・礫間の砂面高さが低くなればなるほど、砂の有効掃流力は減少する。

- ・今回の実験ケースでは、礫間の砂の有効摩擦速度、掃流力は、式 (8), (9) を用いて算出でき、流砂量は式 (10) で算出できる。

なお、結論 (4) における砂の有効掃流力の砂面高さによる変化は、本実験ケースのみで見られた傾向のため、さらに実験を行い、一般化できる関係を求める必要がある。

また、今回は、特定の自然石を密に敷いた状態に限定した場を対象としている。実際の山地河道は、例えば、河床状態を水面から突出して存在する巨礫と水面下に存在する礫、礫間を流れる砂面で構成されていると捉えることができる。これを踏まえると、今回対象とした場はかなり限

定されていることがわかる。今後、地質に関する自然石の形状等の特徴および配列 (敷き方) によってそれぞれの結果がどう異なるかを検討する必要がある。あわせて、実河川に適用を踏まえ、実河川の状況についても知見収集を行い、一般的に使用できるモデルを構築する必要がある。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人土木研究所自然共生研究センター 上席研究員の萱場祐一氏に、阿木川の状況等の説明を含め様々な面でご協力いただいた。ここに謝意を記す。

## 参考文献

- 1) 萱場祐一, 野崎健太郎, 川口洋一, 皆川智子: 標津川の再蛇行化が一次生産過程に及ぼす影響, 応用生態工学 12 (1), pp. 37-47, 2007.
- 2) A. Takao, Y. Kawaguchi, T. Minagawa, Y. Kayaba, Y. Morimoto: The Relationships between Benthic Macro-invertebrates and Biotic and Abiotic Environmental Characteristics Downstream of the Yahagi Dam, *River Research and Applications*, Vol. 24 Issue.5, pp.580-597, 2008.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 中川博次, 辻本哲郎, 中野晋: 混合砂れき床の粗度と粒径別移動限界, 第 25 回水理講演会論文集, pp.67-72, 1981.
- 8) 土屋昭彦, 山本晃一: 混合粒径河床の土砂移動 (二礫混合の場合), 第 15 回, 水理講演会講演集, pp.25-30, 1971.
- 9) D.S.L.Lawrence: Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observation and modeling, *Water resources research*, Vol.36, pp.2381-2393, 2000.
- 10) 村本嘉雄, 河田恵昭, 布村明彦: 砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究, 京大防災研年報第 20 号 B-2, pp.451-474, 1977.
- 11) 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.
- 12) 中川博次, 辻本哲郎: 河床波の統計モデルに関する研究, 土木学会論文集第 290 号, pp.79-87, 1979.

(2010年3月9日 受付)