

岩床河川における流砂移動モデルの構築と粒子の運動形態の解明

Research for construction of model for sediment transport on Bedrock River and explication of motion of sediment particles

北海道大学工学部 環境社会工学科社会基盤学コース	○学生員	後藤祐也	(Yuya Goto)
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門	准教授 正会員	木村一郎	(Ichiro Kimura)
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門	正会員	川村里実	(Satomi Kawamura)
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門	教授 正会員	清水康行	(Yasuyuki Shimizu)
寒地土木研究所寒地河川チーム 研究員	正会員	井上卓也	(Takuya Inoue)

1. はじめに

1.1 研究背景

従来の河床変動に関する流砂移動モデルの研究の多くは河床に十分な土砂粒子が存在することを前提としている。¹⁾その一方で、一部の構造物の影響や護岸整備による川幅縮小などの影響をうけて過度の河床低下が進む河川が全国的に増えてきている。これらの河川では河床低下に伴い岩盤層が露出しており、従来の流砂モデルは直接的に適用することはできない。本研究では、上述のような岩盤上における低濃度の土砂粒子の運動を記述する流砂モデルの構築を目的としている。上述のような河川において露出する軟岩層は摩耗、侵食が容易に起こることも明らかになっている。以下に北海道内の河川についての画像を掲載している。これらの河川では容易に侵食される軟岩層が露出しており、河川構造物に影響が及んでいる例として参考にして頂きたい。(図-1)



図-1 河床低下に伴う構造物への影響の様子

1.2 先行研究と本研究の目的

前述の通り、既存の流砂移動モデルでは岩床上の流砂移動を適切に再現できないということがこの研究の大きな理由になっている。ここでは既存の研究について紹介し、この研究の位置づけと目的について記述する。

特定の河床形状に限定しなければ数多くの研究者達が横断方向の流砂量式について研究を行ってきた。さらに、及川ら²⁾によって石膏を用いて再現した岩床における横断方向流砂量式が提唱されている。また、及川らは侵食速度の粒径依存度や岩盤強度依存性についても実験による検討を行っている。及川らによって岩床河川では長谷川の式をはじめとした既存の流砂量式では横断方向流砂量を適切に表現できないことが報告されている。ここで、及川らは特に岩床河川における横断方向流砂量について考察している。言うまでもなく、岩床河川については侵食の傾向や流れ方向の流砂量式の解明も重要であり、さらには岩床河川では砂礫が十分に存在する河川にて使用

されている限界掃流力の値や平衡状態を仮定した流下方向の既存の流砂量式の適用可能性など未知の部分が多く存在する。

総じて岩床河川においては未知の部分が多いのであるが、本研究においては特に横断方向流砂量と岩床上での粒子の運動形態について取り扱うものとした。これは及川らの実験データ²⁾が少ないことと、横断方向流砂量に関する実験を行うのに適度な環境が整っていることが理由である。

2. 横断方向流砂量に関する実験の実施

2.1 実験の概要

岩床上を流れる流下方向の流砂量と流れの横断方向の流砂量の比を求めるために以下のような実験水路を製作した。2012年11月現在では横断方向勾配 ω は 10° となっており、11月現在ではこの横断方向勾配に対して様々な流れ方向勾配、流量を設定して実験を行った。水路の長さは8mあり、水路幅は30cmである。また水平床部分が10cmとなっている。(図-2)

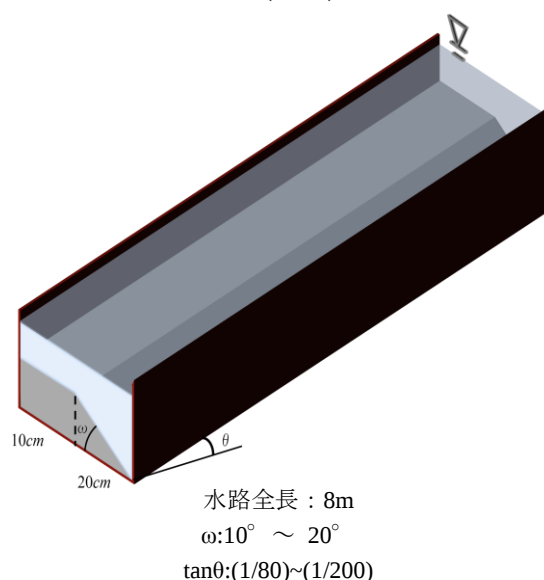


図-2 実験水路の概略図

河床材料はセメントを用いており、水路の両壁はガラスである。計測区間は上流端から3.5m、下流端から4.5mの付近の横断方向斜面の中腹としている。これは可能な限り上流端、下流端、側壁の影響を避けるためである。

この観測領域の河床には間隔1cmのグリッド線が引かれており、粒子が流れ方向、横断方向に正方形のグリッド上をどれだけ移動したかを測定する。下図にその計測例を示す。(図-3、4、5) 計測はハイスピード動画を解析することにより行う。ハイスピード動画は流速にもよるが240fpsから420fps程度の動画を利用して解析を行う。投入された比較的球形に近い粒子のうち計測領域に入ってきたものを無差別に100個以上について解析し、その流れ方向、横断方向に進んだ距離の比を求める。この時、240分の1秒または420分の1秒の動画を一定量ずつコマ送りすることにより粒子の移動量を測定する。以下がその例である。(図-3)

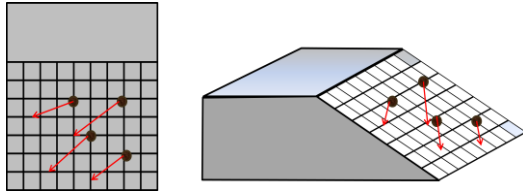


図-3 粒子の動きの測定例

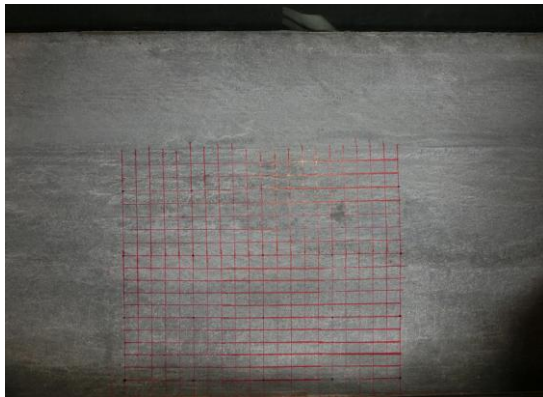


図-4 上方から見た実験水路の河床



図-5 横方向から見た実験水路の河床

このような水路において様々な流れ方向勾配、流量の下で実験を行った。

2.2 実験の条件とデータ

以下に2012年11月10日現在までに実施した実験の条件と結果を示す。(表-1)

ただし、

Q : 流量 (l/s)

τ^* : 無次元掃流力

q_{by}/q_{bx} : 横断方向流砂量に対する流れ方向流砂量の比

ω : 河床の横断方向の傾斜角

i : 河床の流れ方向勾配

であり、実験に用いた粒子の平均粒径は5mmとなっている。ここでは無次元掃流力の値について考える必要がある。通常5mmの粒子であれば、無次元限界掃流力の値は0.05とされており、通常の移動床においてはこの値を下回る掃流力における実験データは適当ではない可能性がある。しかし、固定床では0.05よりも遥かに小さい掃流力において掃流力が移動を開始することが明らかであるため、本実験においては0.05を下回るような無次元掃流力においても有効なデータとして取り扱っている。

表-1 実験データと結果

	流量	水平部分の水深	横断方向勾配	流れ方向勾配(傾き)	無次元掃流力	流砂量比
データ番号	Q(l/s)	H(cm)	ω	i	τ^*	q_{by}/q_{bx}
1	13.4	2.91	10°	0.01	0.051	0.049
2	9.22	1.9	10°	0.01	0.044	0.053
3	6.52	1.3	10°	0.01	0.036	0.07
4	4.95	0.89	10°	0.01	0.032	0.071
5	9.97	2.03	10°	0.01	0.047	0.052
6	10	2.98	10°	0.005	0.027	0.097
7	13.1	3.54	10°	0.005	0.033	0.078
8	7.13	2.26	10°	0.005	0.021	0.116
9	15.9	3.19	10°	0.125	0.063	0.035
10	12.8	2.62	10°	0.125	0.056	0.043

2.3 横断方向流砂量の分析と考察

横断方向流砂量の掃流力に対する傾向を分析するために次のような式変形を考える。流れの主流方向をx、それと直交する方向をyとすると、一般的に流砂量のx軸、y軸方向の流砂量の比は次のように表せる。厳密な導出方法については土砂水理学の参考書や論文を参照されたい。

$$\frac{q_{by}}{q_{bx}} = \frac{V_b}{U_b} - \beta \left(\frac{\tau_c^*}{\tau_*} \right)^m \frac{\partial z}{\partial y}$$

ただし、zを河床高、 V_b 、 U_b をそれぞれx方向、y方向の底面流速とする。一般に $U_b \gg V_b$ であり、 $\tan \omega = -(\partial z / \partial y)$ であるから上式は次のように書き換えられる。

$$\frac{q_{by}}{q_{bx}} = \beta \left(\frac{\tau_c^*}{\tau_*} \right)^m \tan \omega$$

β 、 m はモデル定数であり、先行研究によって様々な値が提唱されている。³⁾この β 、 m の適切な値と物理的意味合いを求めることが重要であると考えています。

本実験においては流量、水深が測定可能であり、等流条件が十分に満たされているという条件の下、Manning 則を用いることで各条件の τ^* を求めることが可能である。

Manning の粗度係数としては、本実験の測定値と同様の材質を用いた別実験の実測値の平均値をして 0.011 を採用することとする。以下のような式から τ^* を求める。

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho RgD} = u_* \cdot \frac{1}{RgD}$$

$$u_* = \sqrt{gR_h i_f}$$

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \tau^* = \frac{n^{\frac{3}{2}} \cdot v^{\frac{3}{2}} \cdot i^{\frac{1}{4}}}{RD}$$

τ_b : 河床せん断力

u_* : 摩擦速度

R_h : 径深

i_f : エネルギー勾配

i : 河床勾配

n : Manning の粗度係数

R : 水中比重 ($R=1.65$)

ここでは $i_f=i$ として計算を行う。

以上のような議論により実験を行い、本研究における実験の途中経過について対数グラフにプロットし、その累乗近似曲線を求めると以下ようになった。以下のグラフには既往の研究の結果についても示してある。

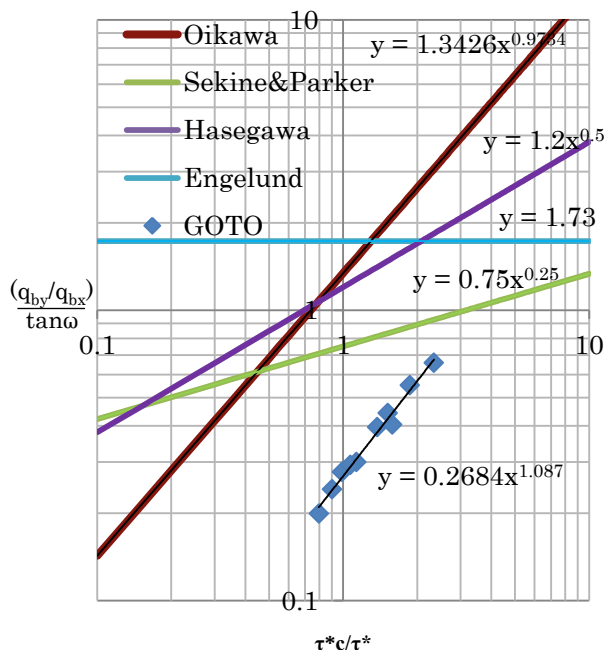


図-6 掃流力と流砂量比の関係

本研究においては $m=1.087$ 、 $\beta=0.2684$ となっている。また上記のグラフは既往の研究に合わせて岩垣の式、およびシールズ図表より無次元限界掃流力の値を一般的な値、0.05 とした。岩床河川において、特に短区間に流砂を上方より投入するような場合には無次元限界掃流力の値は 0.05 よりも小さいとされており、固定床河川では 0.03 程度を提唱する声も多い。しかしながら本実験のようなコテ仕上げを行ったモルタル河床では 0.03 よりもさらに小さい値となることも確認できている。本実験に関して確実に言えることとして、無次元掃流力が 0.05 の時には河床にとどまる流砂の存在は確認できなかった。また、本実験および同質材料を用いた別の実験から算定したモルタル上での無次元限界掃流力の概算値は 0.01 から 0.02 程度となった。このような事情により本実験においては無次元掃流力が 0.05 に満たない条件についてもデータを示してある。累乗近似関数を見ると、及川らの実験結果に勾配は類似しているが、砂礫河床を対称とした既往の研究者達の式とは異なった結果となっていることがわかる。仮に岩床河川上での適切な無次元掃流力を求めることができたと仮定し、今回の実験により算出された近似式と既往の研究によって求められた式を岩床上の限界掃流力の値を用いて表現し直したとしても、累乗近似関数の勾配を確認する限りこれらの流砂量式が一致することは無いことがわかる。しかし、掃流力が限界掃流力に近い領域や限界掃流力を大きく上回る領域については未知であり、議論の余地がある。すなわち、岩床河川における無次元限界掃流力(本実験により 0.01 から 0.02 程度と予想)を持つ流れにおいては、掃流砂のほとんどはサルテーションでは無く転動、滑動による動きをすると予想されるため、砂礫河床における運動と類似する可能性がある。そのような条件下では砂礫河床を想定した既存の流砂量式に近い結果が得られることも想定される。逆に、極度に掃流力が大きい条件下では既存の流砂量式に比べて累乗近似関数の勾配が大きくなることが予想される。これは全ての掃流砂の運動形態がサルテーションとなり、ステップレングスが大きくなることで斜面や重力から受ける横断方向への影響が非常に小さくなるからである。これらの考えから、岩床河川においては、掃流力に対する流砂量比の相関性は非線形性が見られる可能性がある。

3. 岩床上における粒子の運動形態の観測

3.1 意義と目的

粒子の運動の形態には滑動、転動、サルテーション等があり、岩床上においてもこのような運動形態をとることになる。この中でもサルテーションする粒子の岩床との衝突が軟岩洗掘に大きな影響を及ぼしている。そのため種々の条件における岩床河川上のサルテーション運動形態を解明することは河床変動の研究に寄与する部分があると考え、この研究を行うものとした。移動床、固定床を区別せずに考えたサルテーションモデルはすでに存在するが、本研究のような横断方向に傾きを持った岩床上においてそのようなモデルが有効であるかどうかの解明や、移動床におけるサルテーションとの相違点等を探

ることとする。Sklar&Dietrichによれば、既往の固定床、移動床の研究結果の両方を考慮した以下のようなモデル式⁴⁾が提唱されている。

$$\frac{L_s}{D_s} = 8.0 \left(\frac{\tau_c^*}{\tau_c} - 1 \right)^{0.88}$$

$$\frac{L_s}{D_s} = 8.0 \left(\frac{\tau_c^*}{\tau_c} - 1 \right)^{0.88} \cdot \frac{1}{\left(1 - (u^*/w_f)^2 \right)^{1/2}} \quad (u^*/w_f < 1 \text{ のとき})$$

$$\frac{H_s}{D_s} = 1.44 \left(\frac{\tau_c^*}{\tau_c} - 1 \right)^{0.50}$$

L_s : サルテーション運動における跳躍距離

H_s : サルテーション運動における跳躍高さ

w_f : 静水中における粒子の沈降速度

二つ目の式は掃流力が極端に大きい領域での非線形性を強く表す式として提唱されている。横断方向に勾配を持つ岩床上において上述の式が適応可能性を調べることとする。

3.2 実験の概要

サルテーションの観測に関してもハイスピードカメラによる動画を利用する。水路側面のガラス壁側から撮影した動画を画像に分割し、単位時間当たりの粒子の移動を画像にプロットすることによりサルテーションを観察する。

3.3 実験の実施

サルテーション観測を実施した結果の一部を以下の画像に示す。(図-7、8)

ただし、画像の上部分が粒子の運動を上方から撮影した画像、下部分が横方向から撮影した画像である。横方向からの画像は横断方向斜面を水平に撮影している。画像中の番号は上下の画像間において対応する斜面との衝突点を示している。

この画像は右手が上流側、左手が下流側となっている。上方から撮影した画像では河床は下側へ向かって 10° で傾斜している。

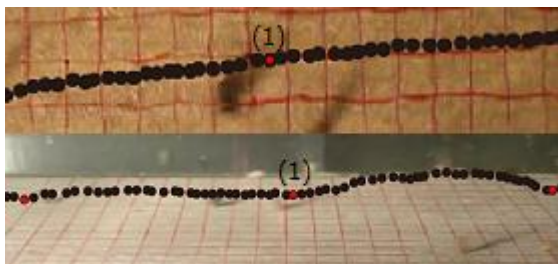


図-7 $\tau^*=0.0556$ でのサルテーションの様子($\omega=10^\circ$)

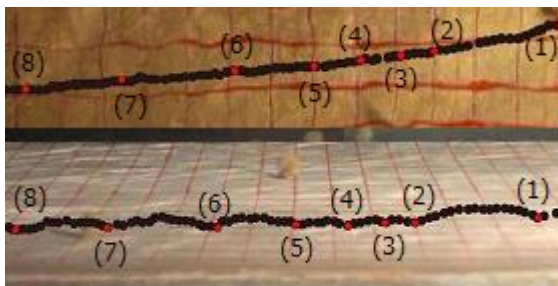


図-8 $\tau^*=0.0214$ でのサルテーションの様子($\omega=10^\circ$)

3.4 考察

前項に示した画像からわかるように、掃流力が小さいときは L_s も小さくなり、河床との衝突回数が増え、結果として横断方向移動量は大きくなる。しかし、この画像は衝突前後の様子が鮮明ではなく、各衝突による粒子の速度変化や移動方向の変化を定量的に明確化することは困難であった。

次に Sklar&Dietrich の式の適用性について考える。本実験では τ_c^* は 0.01 から 0.02 と推定されるため、ここでは $\tau_c^*=0.015$ として計算を行う。この条件の下では以下のようなデータが得られる。

$\tau^*=0.0556$ の時

算出方法	$L_s(\text{cm})$	$H_s(\text{cm})$
Sklar&Dietrich の式	1.89	0.470
実験値	1.66	0.267

$\tau^*=0.0214$ の時

算出方法	$L_s(\text{cm})$	$H_s(\text{cm})$
Sklar&Dietrich の式	9.61	1.18
実験値	10.4	0.564

上記のように、この τ_c^* の元では Sklar&Dietrich の式から L_s が凡そ適切に表現されていることがわかる。 H_s の値が大きく異なる要因としては、河床が横断方向に傾斜しているために水平床に比べて衝突後の上方向の速度成分が小さくなるためだと考えられる。このため、横断方向に傾斜した水路で H_s を求めるモデル式を考える際は横断方向勾配の影響を考慮したモデルを考える必要性がある。

4. おわりに

今後の課題として、実験の結果をより有効にするために、異なる条件におけるデータを多く収集することが必要であると考えている。特に横断方向勾配や粒径を変更する他、掃流力が極端に大きい場合や限界掃流力に近い場合についても横断方向流砂量や粒子の運動形態の観察を行うことは重要であると考え。また、単純にパラメータの値を実験から推定するだけではなく、3章で求めたパラメータ β 、 m を別の側面から捉えるという必要性も考えている。すなわち、 β 、 m が持つ物理的意味や既往の研究から考えられる推定値等についての研究を考えている。

参考文献

- 1) 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、土木学会報告論文集、pp.59-69、1972
- 2) 及川森、岩崎理樹、山口市実、清水康行、井上卓也：岩床における岩盤上の流砂の集中度合に関する実験的検討と数値シミュレーション、土木学会論文集 B1(水工学)Vol.68、No.4、I_949-I_954、2012
- 3) Masato Sekine、Associate Member、ASCE、and Gary Parker、Member、ASCE：BED-LOAD TRANSPORT ON TRANSVERSE SLOPE. I、pp.515-516、1992
- 4) SKLAR&DIETRICH：BEDROCK INCISION BY SALTATING BED LOAD、pp.7-9、2004