

急勾配流路における浮遊砂に関する研究

京都大学農学研究科 〇末安正英、里深好文、水山高久  
 京都大学防災研究所 澤田豊明

1. はじめに

近年、土砂移動による災害の防止、生態系・景観保全等の観点で土砂移動に関わる現象がクローズアップされている。しかし、様々な土砂移動の形態があるなかで、山地河川を想定した浮遊砂をとりあげた研究はあまり行われていなかった。山地河川には、相対水深が小さい、河床における浮上可能な砂の存在率が小さい、といった特徴があるので、浮上量と沈降量が異なる非平衡性の強い状態となっている。したがって、従来の緩勾配流域を対象とした浮遊砂のモデルでは山地河川における浮遊砂の動態を予測できず、この非平衡性を考慮にいれたモデルの構築が必要不可欠となるのである。

土砂の連続式として以下のようなものがある。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial qC}{\partial x} = f - \alpha Cw_0 \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

ただし、C:土砂濃度、h:水深、t:時間、q:流量、x:流下方向の距離、f:浮上量、w<sub>0</sub>:沈降速度、α:土砂濃度分布に関する係数である。式(1)を用いる際、水深・流量は測量から、沈降速度はRubeyの沈降速度式から求めることができるが、浮上量の算定には難しい問題がある。浮上不可能な河床の礫による遮蔽、河床上の礫間を縫うように流れる砂を考慮しなければならぬからである。本研究は、この2つを考慮にいれた浮上量算定について研究をすすめている。

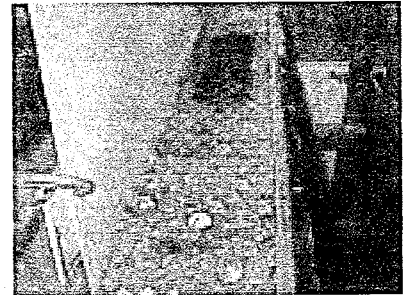


写真1 水路の様子

2. 水路実験の概要

浮遊砂の浮上量を様々な条件下で測定するため、京都大学宇治川水理実験所で水路実験を行った。用いた水路は水路長5m、幅20cmの可変勾配水路である。

直径3cmのビー玉を2段の六方最密充填で貼り付け、これを河床とした。つまり、ビー玉を河床の礫と見立てたのである。その様子を写真1に示す。上流端からの給砂は0とし、ビー玉の隙間に一様砂、もしくは混合砂を敷き詰め、それらが浮上する量の時間的変化を見た。このときの実験条件は表2(a)、(b)に示す。なお、混合砂を用いた実験は全て、流量2100cc/s、勾配4.47°で行った。

	勾配(°)	流量(cc/s)	敷き詰めた砂の粒径(cm)
A-1	4.47	1300	0.0745
A-2	4.47	1300	0.0442
A-3	4.47	1300	0.0311
A-4	4.47	1300	0.0146
B-1	6.54	1300	0.0745
B-2	6.54	1300	0.0442
B-3	6.54	1300	0.0311
B-4	6.54	1300	0.0146
C-1	4.47	2100	0.0745
C-2	4.47	2100	0.0442
C-3	4.47	2100	0.0311
C-4	4.47	2100	0.0146

表2(a) 水路実験条件(一様砂を用いた場合)

3. 水路実験結果と解析結果との比較

2で行った水路実験の結果と解析結果との比較を行った。解析に用いた式は浮上率の式(芦田・藤田の式)と急勾配における掃流砂量式(芦田・高橋・水山の式)である。前者は河床上で停止している砂が直接浮遊砂になるものを対象とし、後者は礫(ビー玉)の間を縫うように流れるものを対象とした。

	粒径0.745mm	粒径0.311mm
D-1	1180g	1170g
D-2	1400g	660g

表2(b) 水路実験条件(混合砂を用いた場合)

$$q_{su} = K P_f \cdot \frac{2}{3d} \sqrt{\frac{6\sigma}{\pi}} \int_G^\infty \sqrt{F_{L0} - G} \frac{1}{\sqrt{2\pi F'_{L0}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{F_{L0}^2}{F'_{L0}{}^2}\right) dF_{L0} \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{(S-1)gd_p^3}} = \frac{12-24\sqrt{I}}{\cos\theta} \tau_*^{(1.5-\sqrt{I})} \left(1 - \alpha^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

ただし、q<sub>su</sub>:浮上率、K:実験定数(=0.035)、P<sub>f</sub>:混合割合、d:砂粒子の粒径、σ:砂の密度、G:砂の水中重量、q<sub>B</sub>:掃流砂量、S:砂の水中密度、I:勾配、τ<sub>\*</sub>:掃流力、τ<sub>\*c</sub>:限界掃流力、g:重力加速度、α:定数(=0.92)

$F_{L0}$ : 揚圧力、 $F'_{L0}$ : 揚圧力の標準偏差で  $c$ : 揚圧力係数(=2.5)、 $k$ : 遮蔽係数、 $u$ : 摩擦速度とすると、 $F'_{L0} = ck^2pu^2d^2$  である。そして、式(2)のみを用いた場合と、式(2)、(3)の両方を用いた場合の解析を行った。それをグラフで表したものの一部が図3、4である。これにより、粒径が比較的大きい場合は、式(2)、(3)の両方を用いた方が良好な結果を得ることができ、粒径が比較的小さい場合は、式(2)のみでも良好な結果を得ることができることがわかった。

#### 4. 現地実験の概要

岐阜県高原側流域の京都大学砂防観測所付近で現地実験を行った。(図5) E地点に土砂を投入し、その約10m下流のZ1地点と約600m下流のZ2地点で採水し、浮遊砂量を測定した。なお、E地点の上流はプールになっている。また、浮遊砂量を測定する際、粒径0.01cm以下のものは、正確な検出ができなかったため無視した。勾配・川幅はレーザー距離計、水深・土砂の高さはポール、流速は木片を流すことで測定した。河床礫の大きさは、ロープを張り、それに接する礫の長径、短径を測り、その相乗平均を礫の粒径とした。ここで、河床礫の測定は短径が6cm以上のものを対象とした。

#### 5. 現地実験結果と解析結果との比較

4で行った現地実験結果と解析結果との比較を行った。現地実験結果については、Z2地点で採水したものは濁りがあるものの、粒径0.01cm以上の砂の量は0gであったので、現地実験結果にはZ1地点のもののみを用いた。解析は、3と同様、式(2)のみ用いた場合と式(2)と式(3)を用いた場合とを行い、採取した土砂を16の粒径階にわけて計算を行った。それによって得られた解析結果と現地実験結果との比較をグラフにした。図7、8はその一部である。図6より、3とは違って、式(2)+式(3)より式(2)のみのほうが妥当な結果となった。図7については6.で述べる。

#### 6. 考察と課題

3.では、比較的大きな粒径の場合には、式(2)+式(3)のほうが妥当な結果を得ることができたが、5.では式(2)のみのほうが妥当であった。これは、現地の河床上の礫は水路実験のビー玉のように規則正しくなっていないわけではないため、現地においては礫間を縫うように流れる流砂量が少ないことが原因であると考えられる。図7で途中から実験値が0になっているのは、比較的大きな砂粒子は河床底面付近を流れていて、河床礫にトラップされたためであると考えられる。

また、Z2地点での流砂量が0であったのは、川岸などのような流れの弱い箇所や、河床が粗粒化しているような箇所に砂が堆積し、Z2地点まで砂が届かなかったことが原因と思われる。この問題を解決するため、川幅方向の浮遊砂の動態、河床の粗粒化に伴う浮遊砂の動態の考慮が必要である。

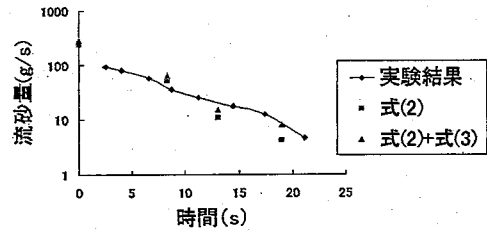


図3 水路実験結果と解析結果との比較 (実験条件 A-1)

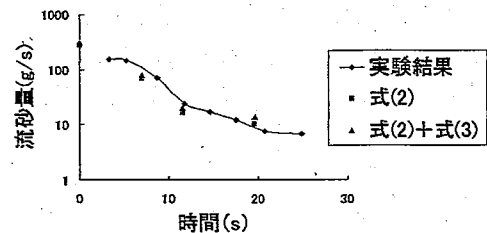


図4 水路実験結果と解析結果との比較 (実験条件 A-3)

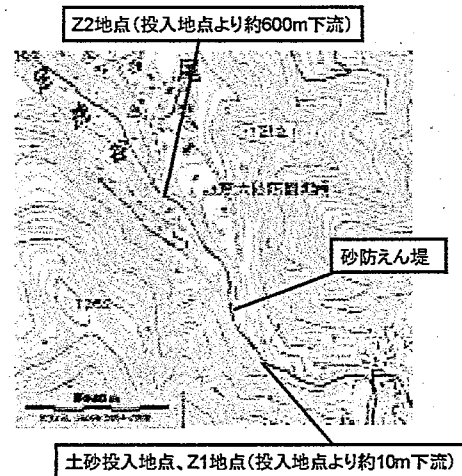


図5 投入地点とZ1地点、Z2地点

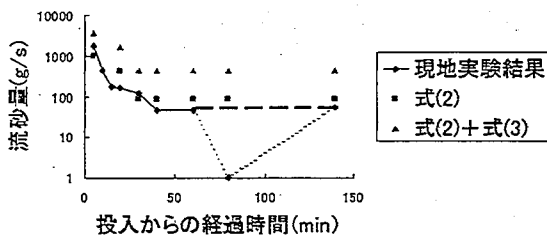


図6 現地実験結果と解析結果との比較 (粒径 0.085cm)

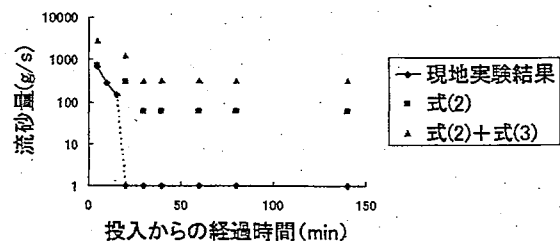


図7 現地実験結果と解析結果との比較 (粒径 0.355cm)