

固定床と移動床が混在した場の流砂特性

久加朋子*・竹林洋史・藤田正治

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

ダム下流域など上流からの土砂供給量が減少した各地の河川では、河床低下に伴う岩盤露出が進行し、河道内に移動床部と固定床部が混在する場が形成されている。しかし、こうした移動床部と固定床部が混在する場における流砂の伝播特性に関する知見はこれまで殆ど得られていない。本研究では、固定床上を流れる流砂の伝播特性を把握することを目的に水理実験を行い、以下の成果を得た。(1) 固定床と移動床水路に同量・同質の給砂を与えた場合、固定床水路ほど流砂の伝播速度が速い。(2) 固定床水路に、総量を統一した上で単位時間あたりに与える給砂量を変化させた場合、堆積限界掃流砂量を境にして流砂の伝播速度が大きく変化した。

キーワード: 固定床, 移動床, 流砂の伝播特性, 置土, 非平衡流砂

1. はじめに

ダム下流域など上流からの土砂供給量が減少した全国各地の河川では、河床の一部に河床低下に伴う岩の露出した区間が多数認められる。例えば、関西近隣では、兵庫県武庫川や京都府の木津川等に岩露出域を有するが、こうした河川では河道に移動床部と固定床部が混在し、上流からの流砂が時空間的に変動する非平衡場が形成されている。移動床のみ、もしくは固定床のみの河床上の土砂の伝播特性については、多くの研究成果が存在する (Egashira and Ashida, 1992; 岡部ら, 1994; 江頭ら, 1996)。しかし、固定床と移動床が混在する場の流砂の輸送特性については十分な知見が得られておらず、岩盤露出の進行した河川における河床地形および堆積土砂の粒度の予測は非常に難しい現状がある。

本研究では、移動床部と固定床部が混在する河川における流砂動態に着目し、今後の河床変動解析モデルへと反映させることを目的に以下の2つの水理実験を実施した。はじめに、同質・同量の給砂を与えた固定床と移動床上の流砂の伝播特性を比較し、河床材料の違いに対する流砂動態の変化を検討した。つぎに、総給砂量を統一した上で固定床上へ与える単位時間あたりの供給砂量を変化させ、給砂方法の

違いに対応して固定床の一部に移動床部が形成されることによる流砂の伝播速度の変化についての検討を行った。

2. 実験方法

実験水路の概要をFig.1に示す。水路は全長21m、幅0.5m、勾配0.0012であり、水路下流端に水深を等流水深に調節するためのゲート、および流砂を捕捉するための採砂箱を設置した。水路底は、固定床実験では平均粒径0.53mmの一樣砂（珪砂5号）を張り付けたベニヤ板を敷き、移動床実験では同じ平均粒径0.53mmの一樣砂を敷き詰めた。給砂材料はフルイ1.0-1.2mm間の平均粒径1.08mmの均一砂とし、下流端から5.2m上流地点を流砂投入点とした。河床材料と給砂材料の粒度分布をFig.2に示す。

実験の水理条件をTable1に、実験条件をTable2に示す。水理条件は一定流量とし、下流端にて流砂量を測定しやすいように中規模河床波が形成されない水理領域（岸・黒木, 1984）とした。実際、本実験の移動床水路では砂州は形成されなかった。図中の実験ケースのうちFBおよびFは固定床実験、MBは移動床実験である。

CaseFBとCaseMBでは、流砂の伝播速度の違いを比

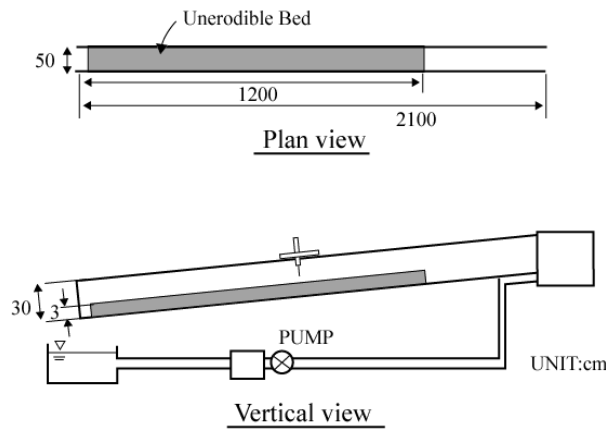


Fig.1 Experimental flume

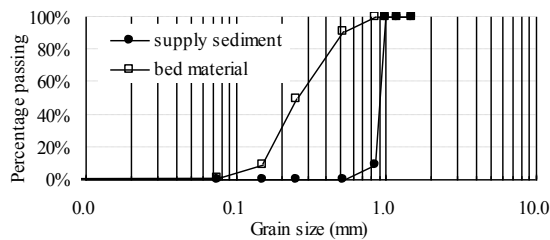


Fig.2 Grain size distribution of bed material and supplied sediment in the experiment

Table.1 Hydraulic condition in the experiment

Parameters			
Bed slope	0.0012	$Bi^{0.2}/H_0$	1.78
Water discharge (L/s)	15.24	τ_*	0.040
Normal depth H_0 (cm)	7.3	U_* (m/s)	0.026

較するため、固定床と移動床水路に同量および同質の給砂を行った。給砂は、初期に平均粒径1.08mmの均一砂800gを置土状に与え、その後、同じ均一砂を移動床河床の給砂投入点付近が低下しない程度（以下、平衡流砂量）に与え続けた。一定時間経過後、下流端に流出する土砂のうち、粒径1.00mm以上の砂礫の流砂量を測定した。一方、CaseF-1～F-4では、固

定床河川に与える給砂方法の違いによる流砂の伝播速度の違いを確認するため、給砂の総量を2400gに統一し、少量ずつ時間をかけて給砂するCaseF-1から、一度に置土状に与えるCaseF-4まで給砂方法を変化させた。

実験中は、下流端で流出土砂を採集し、実験終了後、河床地形の測定を行った。各実験で与えた均一砂給砂量は、CaseF-1、CaseFB、CaseMBでは移動床河床における本実験の水力条件での平衡流砂量、CaseF-2はその平衡流砂量の2倍に相当する。また、CaseF-3、CaseF-4では固定床河川における本条件での均一砂の堆積限界掃流砂量より多い給砂量を与えた。堆積限界掃流砂量は、以下の芦田・道上の平衡流砂量式に椿・土屋の研究成果による固定床上の流砂の限界摩擦速度 U_{*c} （芦田・道上，1972）を与えて求めた。

$$q_b = 17 \frac{\rho u_{*c}^3}{((\rho_s - \rho)gd_m)^{3/2}} \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2}\right) \sqrt{(\rho_s - \rho)gd_m^3} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 0.1063 \leq d \leq 8.26 \text{ cm} & : u_{*c} = 8.89d^{2/3} \\ 0.0100 \leq d \leq 0.1063 & : u_{*c} = 4.17d^{1/3} \\ d \leq 0.0100 & : u_{*c} = 90d \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 q_b は流砂量（ m^3/s ）、 ρ_s は砂礫の水中比重、 u_* 、 u_{*c} 、 u_{*e} はそれぞれ給砂材料に対する摩擦速度、限界摩擦速度、有効摩擦速度である。式(2)における u_{*c} と d の単位はそれぞれ $(\text{cm}/\text{s})^2$ および cm である。有効摩擦速度の算定には、芦田・道上(1972)による以下の砂礫の移動限界付近の流れの抵抗則を利用した。

$$\frac{U}{u_*} = Ar - \frac{1}{\kappa} + \frac{2.30}{\kappa} \log_{10} \frac{R}{d_m} \quad (3)$$

ここに、 Ar は実験定数で $Ar \doteq 8.5$ 、 κ はカルマン定数である。掃流砂のみを対象とした実験であるため、カルマン定数は一定値とした。

Table.2 Sediment supply conditions in the experiment

CASE	supply sediment at the first time(g)	supplied sediment discharge (g/30s)	Number of supplied sediment	measuring time (min.)
FB	800	40	20	1,5,10,20
MB	800	40	30	1,5,10,20,30
F-1	0	40	30	1,5,10,20,30,80
F-2	0	80	15	1,5,10,20,30,80
F-3	0	200	6	1,5,10,20,30,80
F-4	0	2400	0.5	1,5,10,20,30,80

3. 結果と考察

3.1 固定床と移動床の流砂の伝播速度の違い

固定床水路と移動床水路における水路下流端での単位時間あたりの流砂量をFig.3に示す。移動床実験では、給砂材料の伝播速度がわかるように、給砂材料よりも小さい1mm未満の土砂を河床に敷いている。そのため、ここでは1mm以上の砂礫に着目している。移動床水路において、給砂した砂礫が下流に輸送されることによる水路縦断方向の河床材料の粒度変化をFig.4に示す。測定は、水路中心線に沿って行っている。

Fig.3より、移動床水路（CaseMB）では30分経過後においても全く下流端から土砂が流出してこないが、固定床水路（CaseFB）ではわずか1分後から土砂が下流端から流出し始めた。移動床水路における流砂の伝播速度をもう少し詳しく見ると（Fig.4）、河床材料の水路縦断方向への粒度変化は非常に遅く、実験開始より50分経過後も上流から給砂した砂礫が下流端まで到達していないことがわかった。つまり、固定床と移動床では流砂の伝播速度が大きく異なり、固定床の方が砂礫は下流へ速やかに輸送されるようである。これは、固定床水路と異なり、移動床水路では給砂された砂礫が河床材料と混合しながらゆっくり下流に伝播するためであると考えられる。

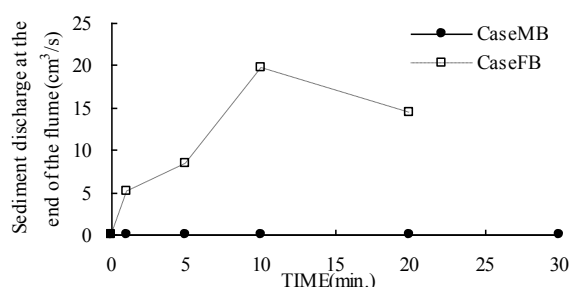


Fig.3 Sediment discharge at the end of the flume

3.2 固定床水路の流砂の伝播速度と河床地形の変化

総給砂量を統一した上で、給砂量を時間的に変化させた場合における水路下流端での流砂の累積流出量の時間変化をFig.5に示す。累積流出土砂量は、給砂量で無次元化されている。また、固定床上の河床地形の時間変化をFig.6に示す。

Fig.5より、流砂の伝播速度は、一度に多量の給砂を与えたCaseF-4で最も遅く、CaseF-3、平衡流砂量およびその2倍程度の給砂を継続的に与えたCaseF-1およびCaseF-2と速くなる結果が得られた。つまり、堆積限界掃流砂量より少ない給砂量を与えたCaseF-1

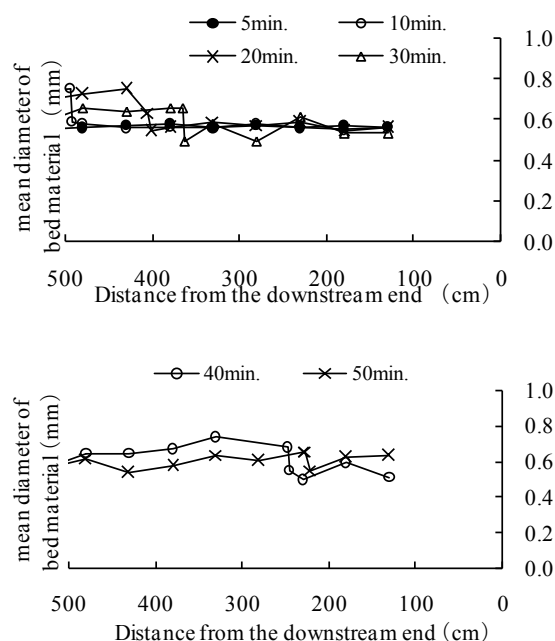


Fig.4 Temporal change of the mean diameter of the bed material in the longitudinal direction

およびCaseF-2の場合、給砂した砂礫は短時間で下流端まで到達するので流砂の伝播速度は大きく異ならないが、CaseF-3およびCaseF-4のように堆積限界掃流砂以上の給砂を一度に与えられた固定床上水路の場合

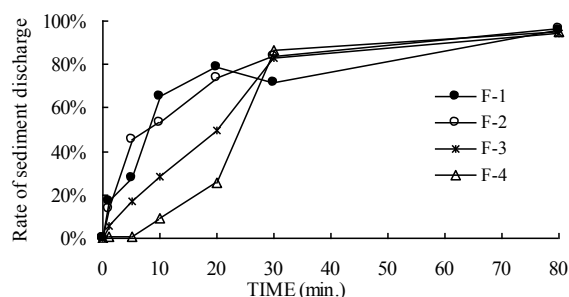


Fig.5 Ratio of sediment discharge: (total sediment discharge at the end of the flume) / (supplied sediment discharge)

合、給砂量が増えたにも関わらず、逆に砂礫が下流に輸送されにくくなるようである。これは、少しずつ給砂したCaseF-1およびCaseF-2の場合、流砂が流れに与える影響が小さく、ほぼ等流状態の流れ場の流体力を受けて砂礫が下流に流下されること、および本条件では固定床河床と砂礫との内部摩擦角が砂礫と砂礫との内部摩擦角より小さいため、流砂の伝播が速くなったものと考えられる。実際、Fig.6 (a-b)より、CaseF-1およびCaseF-2では、給砂を継続的に与え続けても実験中に固定床上に殆ど地形の堆積が形

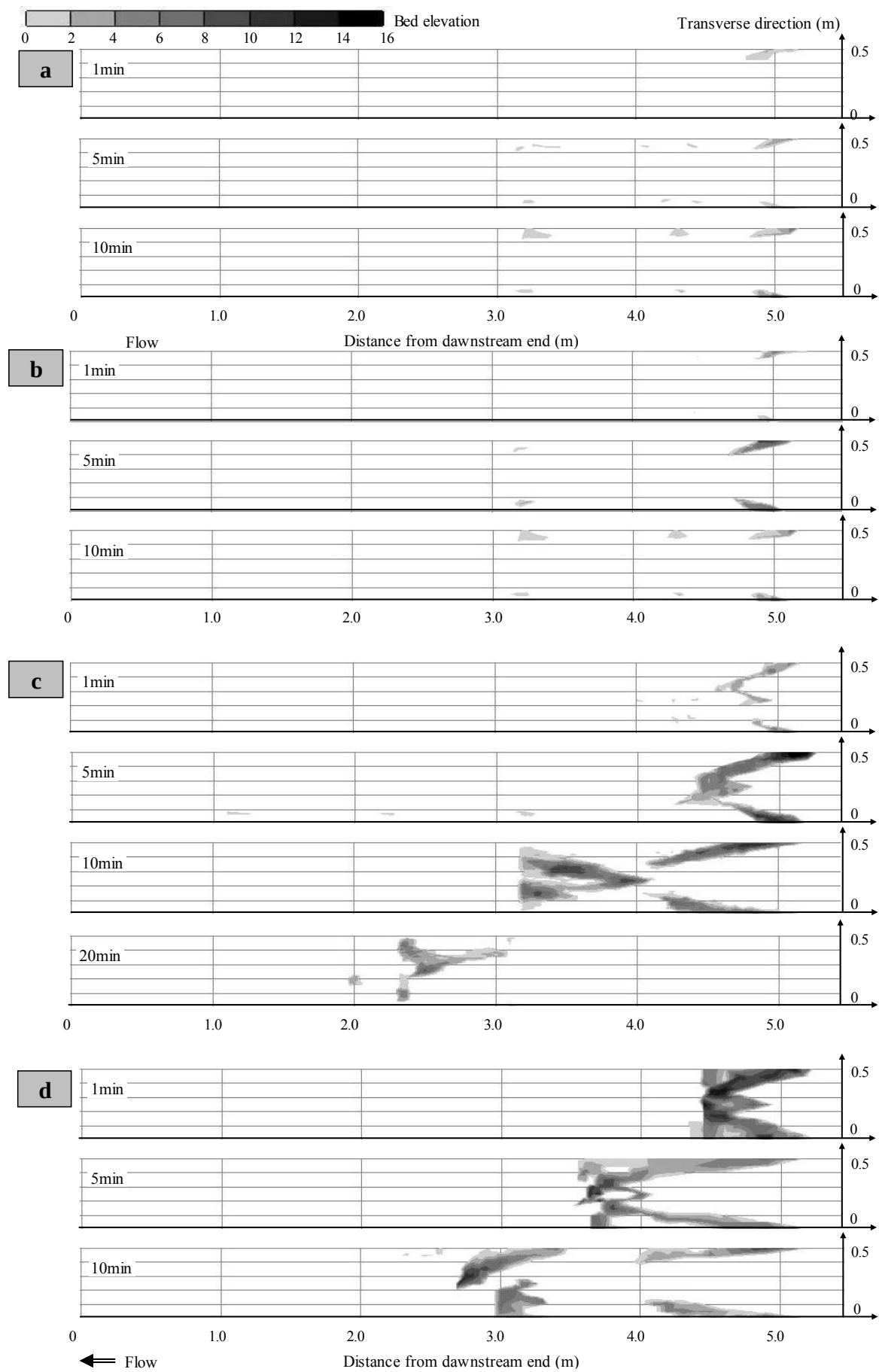


Fig.6 Bed elevation contours (a : CaseF-1, b : CaseF-2, c ; CaseF-2, d : CaseF-4)

成されていない。つまり、与えた砂礫の大部分は留まることなく下流端まで輸送されているようである。

一方、一度に堆積限界掃流砂量以上の給砂を行なった場合、Fig.6 (c-d) に示す通り、土砂が固定床上に堆積し、固定床上の一部に移動床部が形成された。つまり、CaseF-4では、固定床上に存在する移動床部において、河床と粒子との間の内部摩擦角が固定床と粒子との間の内部摩擦角よりも大きくなり、流砂と河床材料の交換が生じるため、CaseF-3よりも流砂の伝播速度が遅くなったと考えられる。この他、堆積した地形の下流側では、流れの剥離によって流砂が剥離域に取り込まれながら下流に伝播する様子が確認された。ただし、固定床上に形成された堆積地形（移動床部）は、Fig.6 (d) に示すように地形上流端から横断方向に周期性がある堆積地形を形成しながら浸食され、実験開始より30分経過後はいずれのCaseでも固定床上に堆積地形は殆ど存在しなかった。このような横断方向の周期性は、固定床上に形成される強い縦渦の影響の可能性が考えられる。地形の上流側から始まった浸食は、地形下流端まで到達し、地形が縦断的に分割されるほど加速されるようであった。つまり、固定床上に置土のように多量の土砂を一度に与えたとしても、河床全体が砂礫で構成される移動床水路と異なり、固定床部に囲まれた移動床部の浸食速度は地形規模が小さいほど速いようである。

4. おわりに

本研究では、河道に移動床部と固定床部が混在する河川における流砂現象を明らかにすることを目的として、水理実験から固定床上を流れる流砂の伝播速度の特性の把握を試みた。得られた成果を以下に示す。

- (1) 固定床と移動床水路に同量・同質の給砂を与えた場合、固定床水路ほど流砂の伝播速度が速くなる。これは、移動床では、流砂が河床材料と

交換しながら輸送されるため、固定床水路に比べて非常に遅い流砂の伝播速度を示したものと考えられる。

- (2) 固定床水路に、総量を統一した上で単位時間あたりに与える給砂量を変化させた場合、堆積限界掃流砂量を境にして流砂の下流への伝播特性が異なることが示された。固定床水路へ与える流砂量が堆積限界掃流砂量より少ない場合、与えた砂礫は給砂量に関係なく短時間で下流端まで輸送されるようである。一方、一度に固定床上に多くの給砂を行った場合、固定床の一部に移動床部が形成され、流砂の伝播速度が遅くなった。しかし、この堆積地形は上流側からの浸食によって短時間で崩壊しやすく、その崩壊に伴って流砂の伝播速度が速くなり、次第に固定床上を流れる流砂の特性に近づくことが明らかとなった。

参考文献

- 芦田和男・道上正規（1972）：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集報告集，No.206，pp.59-69
- 江頭進治・吉栖雅人・伊藤隆郭（1966）：固定床開水路における砂礫の輸送形態と輸送能力，水工学論文集，40，pp. 971-976
- 岡部健士・穴瀬康雄・山下秀基（1994）：滑面固定床上における堆積限界掃流輸送量，水工学論文集，38，pp.633-640
- 岸 力・黒木幹雄（1978）：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗，北海道大学工学部研究報告，67，pp. 1－23
- Egashira,S. and Ashida,K. (1992) : Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials,(Edited by H.H.Shen et al.)Elsevier,pp.391-400

Sediment Transport Characteristics on the Bed Composed of both Rigid and Movable Regions

Tomoko KYUKA*, Hiroshi TAKEBAYASHI, and Masaharu FUJITA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

There are lots of rivers where have beds composed of both rigid and movable regions in Japan. However the sediment transport characteristics on bed composed of both rigid and movable regions have not been studied well. In this study, two kind of experimental flume tests were conducted and discussed the sediment transport characteristics on bed composed of both rigid and movable regions. (1) The transport velocity of the supplied sediment on the fixed bed is faster than that on the movable bed, when the same sediment discharge is supplied. (2) Although the total sediment supply is the same, when the different sediment discharge is supplied to the fixed bed, the transport velocities of the supplied sediment are varied.

Keywords: fixed bed, movable bed, sediment transport, transport velocity of sediment, non-equilibrium characteristics of sediment transport