

混合砂れきの流送に伴う縦断的分級
Longitudinal sorting process in heterogeneous sediment transportation

筑波大学水理実験センター 正員 池 田 宏
筑波大学水理実験センター 伊勢屋ふじこ

1. はじめに

山間地河川の渓床における河床変動の観測によれば、洗掘区間と堆積区間とが縦断的に交互に発生する場合があるという¹⁾²⁾。この現象は、掃流砂量が縦断的（空間的）に変化すること、いいかえれば、一地点での土砂流出量が時間的に変動することを意味している。一方、れき床河川における土砂流出量の連続観測によって、砂れき堆のような河床形が形成されていないにもかかわらず、流送砂れき量や流送砂れきの粒度組成が流量変化とは直接的に対応せずに、時間的に変動することが近年明らかにされつつある^{3)~5)}。

われわれは、二種類の一様粒径砂れきを混合させた二粒径混合砂れきの運ばれ易さ（mobility）が、大小粒子の混合比率によってどのように変わるかを水路実験によって調べている^{6)~8)}が、その過程で洗掘・堆積の交互発生や掃流砂れきの時間的変動を説明し得ると思われる現象——すなわち混合砂れきの流送にともなう縦断的分級現象を観察したのでここに報告する。

本研究で行なわれた実験の特徴は、大小粒子が共に流送されている状態での混合砂れきの流送特性を調べた点にある。従来の混合砂れきの流送実験は、どちらかといえば、大きな粒子が停止している条件を対象として、たとえば大粒子による遮蔽効果の評価を目的にしてなされたものが多かったからである。

混合砂れきの流送に伴って、なぜ縦断的分級が生ずるのかを説明するために、その原因である混合砂れきの運ばれ易さとその Threshold について最初に述べる。

2. 混合砂れきの運ばれ易さにみられる Threshold

1) 実験方法

二粒径混合砂れきの運ばれ易さがその混合比率によってどのように変わるかを調べるためには、砂れきの混合比率と給水量と勾配を実験条件として与えて、水路下流端からの流出砂れき量の多少を測定するという一般的な実験方法より、給砂方式を用いて供給砂れきの混合比率と供給量を制御し、結果として形成される動的平衡勾配の大きさを求めることが適切である。いうまでもなく、他の条件が同じならば、動的平衡勾配が小さいほど混合砂れきが運ばれ易いことを意味する。なぜなら、給水量は一定であるから勾配はストリーム・パワーの大きさを表わし、また、水深は勾配によって多少変化するものの大きく変化しないから、勾配は掃流力の大きさをほぼ表わしているからである。

実験には筑波大学水理実験センターの大型水路（幅 4 m、長さ 160 m、最大給水量毎秒 1.5 m³）と小型の水路（幅 10 cm、長さ 4 m）を使用した。水型水路には、砂れきふるいわけ施設が付設されていて、砂れきを粒径別にふるい分けて、定量的に水路に供給できる。ふるいわけの粒径はふるいの目開きによって変えられるが、今回の実験では、5 - 10 mm の細れき（中央粒径 6.4 mm）と 2.5 mm 以下の砂（中央粒径 0.45 mm）を用いた（表 - 1）。実験条件としては、給水量は毎秒 0.86 m³ とし、また、砂とれきを合わせた供給率を毎秒 0.83 kg に一定に保った。そして、砂とれきの混合比率のみを各 Run 毎に段階的に変化させた。各 Run を開始するにあたっては、水路下流端の堰を低下させて水路に堆積している砂れきを一部排出し、以前の Run の影響が残らないようにした。

表 - 1 実験用砂れきの粒度組成と比重

	大型水路実験		小型水路実験	
	れき	砂	れき	砂
d ₅₀	6.4	0.45	2.6	0.37
d ₈₄	8.5	1.8	3.2	2.1
d ₁₆	4.8	0.25	2.1	2.6
σ/ρ	2.7	2.7	2.6	2.7

単位：mm

また、小型の水路による実験によって、二粒径混合砂れきの流送状態を詳しく観察した。その実験方法は大型水路による実験と基本的に変わらない。実験には2台の給砂装置を使用し、径2-4mmのグラニュール（中央粒径2.6mm）と中砂（中央粒径0.37mm）とを水路に供給し、その砂れきの混合物を流送するのに必要な動的平衡勾配を求めた。

小型水路による実験では、水路の中を空にした状態で、それぞれのRunを開始した。水路起点で供給した砂れきはしばらくの間、滑面水路床を流送させて堆積させ、堆積の始まる地点に生ずる跳水の位置が変動しつつも安定している状態を動的平衡状態とみなして、水面勾配と砂床勾配、および水路下流端からの流出砂れき量を測定した。給水量は毎秒400ccと一定に保った。この流量では、砂れき堆などの河床形が形成されない条件であり、水路下流端からの流出砂れき量の変化に河床形の移動の影響が出ないように配慮した。

なお、小型水路による実験では、蛍光塗料で着色したトレーサー粒子を水路上流に投入して、その50%が水路下流端から流出するに要した時間を測定して、粒子の平均移動速度を求めた。

2) 二粒径混合砂れきの混合比率と運ばれ易さの関係

大型水路による実験の結果、砂にれきが混ざっても、この実験条件ではれきが40%も混合しても、砂とれきの混合物を運搬するのに必要な勾配は砂だけの場合とほとんど変わらないことが明らかになった(図-1b)。砂にれきを混ぜても、それを運ぶのに必要な勾配が変わらないということは、れき混じりの砂は砂と同じくらい運ばれ易いということ、いいかえれば、多量の砂と共に流送される場合、れき粒子は、見掛け上、砂粒子同様に運ばれ易くなることを示している。

とはいえ、れきの混合比率が大きくなると、ある比率を境にして(この実験条件の場合、れきが50%を占めると)、砂とれきの混合物は急に運ばれにくくなる。混合砂れきの運ばれ易さにThresholdが存在するのである。河床に生ずる砂堆の波高は、れきの混合比率を増すほど減少する(図-1c)から、河床形による形状抵抗の変化がThresholdの原因ではない。

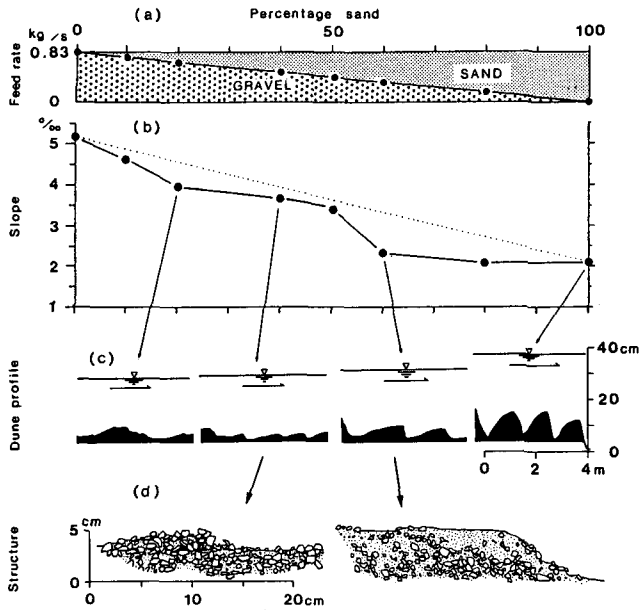


図-1 二粒径混合砂れきの混合比率と運ばれ易さの関係
大型水路における結果

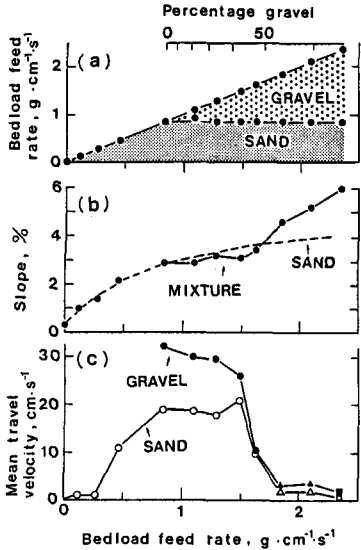


図-2 砂にれきを混合させた場合の運ばれ易さの変化
小型水路における結果
○:スムーズ △:部分的渋滞 □:全面的渋滞

3) 砂にれきを混ぜても運ばれにくならない理由

なぜ、砂にれきを混合させても混合物は運ばれにくならないのだろうか。一樣粒径の砂よりれき混じりの砂のほうがかえって運ばれ易くなる場合さえある。この理由について Gilbert ⁹⁾ が述べている。われわれの小型水路による実験結果は Gilbert の得た結果を支持している。

図-2aに示すように砂の供給率を増すと、それを運搬するのに必要な勾配は図-2b中の破線のように増加する。ここで、図-2aのように途中から砂の供給率を一定として、れきを追加する。れき混じりの砂を運搬するのに必要な勾配は、れきの混合比率が50%以下では、同量の砂を運搬するのに必要な勾配より、むしろ小さい。砂が卓越している状態で流送されるれき粒子は見掛け上、砂粒子より運ばれ易いのである。

図-2cに示すように、この状態では、れき粒子の平均移動速度は砂粒子のそれより大きい。れき粒子の移動速度が砂粒子のそれより大きい理由は、砂粒子が転動・躍動している平滑な砂面上をれき粒子は個々ばらばらになって、きわめてスムーズに転動するためである(図-3)。砂は底面下の移動しないれき粒子の間隙を充填して底面を平滑にする。しかもその上に多数の砂粒子が転動・躍動して、あたかもローラー・コンベヤーのような状態になる。このため、移動するれき粒子と底面との粒子抵抗は、れき粒子ばかりが集まっている状態と比較して、著しく小さくなる。これを減摩効果 (Effect of Smoothing) とよぶ。同時に、れき粒子は底面上に突出し、また、流れに露出して、より強い流体力を受ける。これを露出効果 (Effect of Exposure) とよぶ。れき粒子がきわめて運ばれ易くなるのは、以上のふたつの混合効果によると考えられる。

一方、れき粒子が混合することによって砂粒子も運ばれ易くなると考えられる。れき粒子の存在によって、底面近くでの水流の乱れが増すことが一般的には考えられる。れき粒子が一時的にもせよ底面上で停止する場合には、確かにこのことは効果的であろう。しかし、れき粒子が停止することなく砂粒子より高速で転動している状態では、れき粒子が底面上の砂粒子と衝突することによって、れき粒子の運動量が砂粒子に伝達されるという効果が生ずると考えられる。この効果を衝突効果 (Effect of Collision) とよぶ。以上のような混合効果が共働して、れき混じりの砂はきわめて運ばれ易くなり、時には砂にれきが混じった方が砂より運ばれ易くなるのである。

4) 混合砂れきの運ばれ易さにみられる Threshold の原因

れきの混合比率を増して、れきの混合比率が50%を超えると、混合砂れきは急に運ばれにくくなる。この Threshold は図-2cに見られるように、粒子の移動速度の急減と対応している。粒子の移動速度が急に小さくなるのは、それまで砂面上をスムーズに転動していたれき粒子が渋滞を起こして、れきとれきとが噛み合うというように、れき粒子の移動状態が急変するためである(図-3)。れき粒子どうしが噛み合うと混合効果は働かず、れきを運搬するのに必要な、当然ながら砂を運搬するより大きな勾配をもつようになるのである。

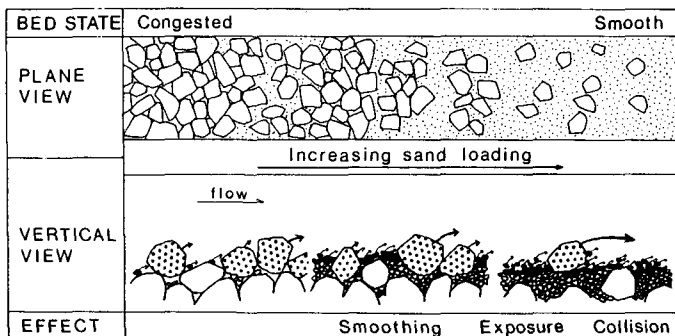


図-3 れきの流送状態にみられる急変——スムーズと渋滞

なお、混合砂れきの運ばれ易さにみられるThresholdは大小粒子を混合させれば常に生ずるというわけではない。粗砂と細砂を混合させた場合には、粗砂混じりの細砂は細砂だけの場合より運ばれ易くなるが、この場合にはThresholdは認められていない⁷⁾。

特定粒径が欠損して二峰性粒径分布をもつ河床材料をもつ実際河川では、ある地点で縦断勾配が急変することが知られている。それは、ここで明らかになった一様粒径のれきと砂の混合物（二粒径混合砂れき）の運ばれ易さにみられるThresholdによるのかもしれない。実際河川では、れきの比率が下流方向へ減少し、逆に砂の比率が増加する。河川勾配はそこを通過する砂れきの運ばれ易さにみあった大きさに調節されているならば、たとえ、れきと砂の混合比率が上流から下流へ連続的に変化しても、結果として形成される縦断勾配には急変が生じうるからである。

3. 混合砂れきの流送に伴う縦断的分級

1) 洗掘と堆積の交互発生

水路の上流端から砂とれきを定量供給し続ける時、砂の比率が小さくて、れきの間隙を充填しつくせない場合には、砂はれき粒子の間隙に貯留されてしまう。そのため、れきばかりが集積し、渋滞状態をなして流送される。間隙を砂で充填された一般的なれき層（matrix-filled gravel layer）に対して、れきの間隙が砂で充填されていないれき層を透かしれき層（open-work gravel layer）と呼ぶ¹⁰⁾。透かしれき層の区間では、上流から供給されるれきを渋滞状態で下流に流送し得る大きさの勾配になるまで堆積が進行する。勾配が十分大きくなって河床高が安定した後、れきの間隙は砂で充填しつくされる。れきの間隙が砂で充填され、河床表面にまで砂が露出すると、混合効果が働いて、れきの渋滞状態は解消し、れきは砂と共に一気に流送される。その際、れき粒子は砂粒子より移動速度が大きいため砂と分離し、砂は直下流のれきの間隙を埋める。そして、そのれきを流送させる。渋滞状態を形成しているれき粒子群は砂粒子群に追いやられつつ流下する。れきが砂と共に流送される区間では、渋滞区間と比較して勾配が著しく小さくなる（図-4）。砂とれきが流送されて緩勾配になると、その区間で再びれきは渋滞して堆積し、急勾配になる。これが繰り返される。

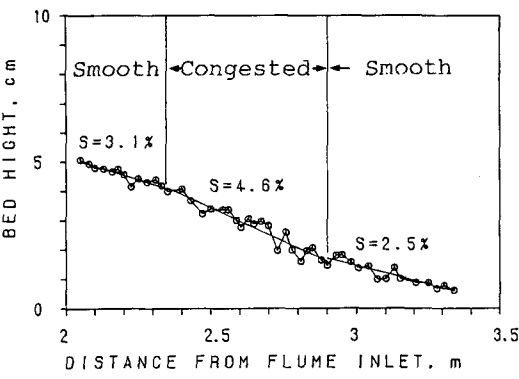


図-4 渋滞区間とスムーズな区間の勾配の違い
小型水路による実験結果
れきと砂の供給率はそれぞれ毎秒 3.0 g
と 1.4 g

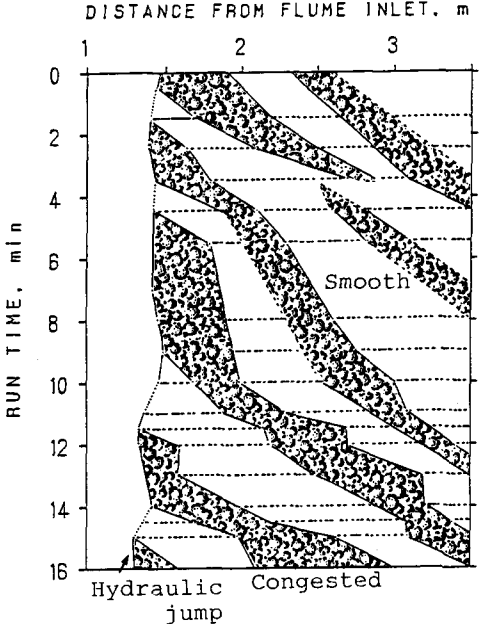


図-5 渋滞区間とスムーズな区間の
縦断的交互発生とその移動
実験条件は図-4 と同じ

砂の混合比率が小さい場合には、砂とれきの混合物の流送に際して上述したような縦断的分級が生ずる。その結果、れきが渋滞した透かしれき層の区間と砂れき層の区間とが縦断的に交互に配列する。しかも、その状態を保って砂れきは流送される（図-5）。このため、顕著な河床形が形成されていないにもかかわらず、一地点の河床高は平均河床高の周りを変動することになる。すなわち、勾配の急な透かしれき層の区間がその地点を通過する間は堆積期となり、一方、勾配の小さな砂れき層の区間が通過する間は洗掘期となる。

実際の溪流河床における洗掘域と堆積域の縦断の交互発生が、以上述べたような混合砂れきの縦断的分級作用によるならば、堆積域には透かしれき層が卓越し、反対に、洗掘域は間隙を砂（細粒物質）で充填された砂れき層が卓越するであろう。

2) 土砂流出量の時間的変動

れきと砂が共に流送されている状態で、しかも顕著な河床形が形成されない条件下であっても、上述した縦断的分級が生じている場合には、水路下流端から流出する砂れきの量と粒度組成とは時間的に大きく変動する（図-6）。水路下流端直上に渋滞状態がやって来て、それが後続してくる砂れきによって押し下げられ、渋滞状態が解消する、まさにその時に流出砂れき量は急増し始める。一方、砂れき層が流下してしまっ、その後渋滞区間の下流端がさしかかる時、流出砂れき量は極少となる。また、流出砂れき量を砂とれきに分けて、それぞれの流出量をみると、れきの流出量が極大となった後、やや遅れて砂の流出量のピークがある。

れき床河川において河床を横断するような構造物を設けて掃流砂れき量を観測すると、定常流下においても、掃流砂れき量にいくつものピークが生ずるということ、またその際に、砂れき量の増大時にれきの比率が高いという観測結果⁵⁾がある。これは単にアーマー・コートの破壊によるというのではなく、混合砂れきの流送に伴う縦断的分級による可能性が強いと考えられる。

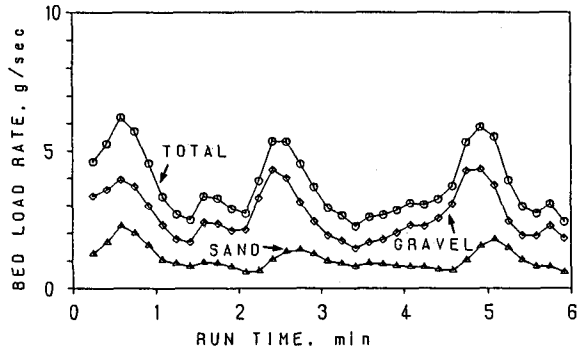


図-6 縦断的分級による流出砂れきの量と粒度組成の変動 条件は図-4と同じ

引用文献

- 1) 新谷 融(1971) 荒廃溪流における土石移動に関する基礎的研究. 北大演研報 28-2, 193-258.
- 2) 丸谷知巳・竹下敬司(1985) 急勾配溪流における洗掘・堆積作用の位置的交互発生. 地形, 6(2), 176-177.
- 3) Klingeman, P. C. and Emmett, W. W. (1982) Gravel bedload transport processes. in Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R. ed. (1982) *Gravel-bed rivers*. John Wiley, 141-179.
- 4) Reid, I., Frostick, L. B. and Layman, J. T. (1985) The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 33-44.
- 5) Billi, P. and Tacconi, P. (1985) Bedload transport processes from Virginio Creek measuring station, Italy. *Abstracts of Papers for the First International Conference on Geomorphology*, p. 40.
- 6) 池田 宏(1984) 二粒径混合砂れきの流送に関する水路実験. 筑波大学水理実験センター報告, 第8号, 1-15.

- 7) 池田 宏・伊勢屋ふじこ(1985) 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響. 筑波大学水理実験センター報告, 第9号, 43-47.
- 8) Ikeda, H. and Iseya F. (1986) Thresholds in the mobility of sediment mixtures. *Proc. First International Conference on Geomorphology*, (in preparation).
- 9) Gilbert, G.K. (1914) The transportation of debris by running water. *United States Geological Survey Professional Paper*, 86, 263p.
- 10) 池田 宏(1982) 透れき層の成因に関する実験. 地形, 3(1), 57-65.