

混合砂礫河床の粗粒化と流砂量

Armoring and Sediment Discharge of Nonuniform Sand Bed

愛媛大学工学部 鈴木幸一 K. Suzuki

鳥取大学工学部 道上正規 M. Michiue

1. はじめに

山地河川の多くは混合砂礫河床よりなっており、通常の掃流力では大粒径の砂の移動はなく細砂のみのいわゆる選択輸送が起こっている。このように、細砂のみが動いているような低水時の河床表面層は粗粒化していて、表面下の砂の粒度とはかなり異なっていることはKellerhals¹⁾の報告でも明らかであるし、経験的にもよく知られている。ダム下流部のように上流から給砂がなく、河床低下がほぼ停止した河床の静的平衡に近い状態での河床表面層砂の粗粒化に関しては、Gessler²⁾、芦田³⁾、平野⁴⁾、中川⁵⁾が詳細な検討を加えているが、最近Parkerら⁶⁾⁷⁾は動的平衡河床においても河床表面層が粗粒化している可能性を指摘している。

実河川において、低水時に河床面にいわゆるArmor coatが形成されているとしたら、それは洪水時には破壊されるであろうし、また減水していくと再び形成されるはずである。各粒径別流砂量は、河床表面砂の粒度分布に強く規定されることが知られているから、Armor coatが形成されているときと破壊されているときとは流砂量は大きく異なることが予想される。

本研究は、動的平衡河床状態においても掃流力の変化に対応した河床砂粒度の変化があることを想定して、流量変化に伴う河床表面砂の粒度の変化特性と粒径別流砂量の推定方法について検討している。

2. 実験の概要

実験は長さ8m、幅40cmの可変勾配鋼製水路を用いて、混合砂河床において低水時に形成された河床表面層のArmor coatが洪水の増水期に破壊され、減水期に再び形成されるような状況を想定して行った。すなわち、図-1に示すような粒径加積曲線を有する平均粒径 d_m が4.15mm、最大粒径 d_{100} が約10mmで標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ が2.74の混合砂を用いて移動床を作り、上流からの給砂がない状態で実験を行う。実験方法は、まず水路勾配を調節して所定の河床勾配のもとに所定の流量を原則として約10分通水して止水する。止水直前に河床と水面の縦断形状を測定し、止水前の5分間水路下流端からの流出砂を採取する。河床表面層が変化しないように排水した後、河床表面層の砂を幅約5cm、厚さ約1cm(最大砂粒径)で水路横断方向全幅にわたってへらで削り取る。水路縦断方向には1m間隔で7ヶ所て採砂する。上流から給砂をしない状態での実験であるので、厳密な意味で平衡状態の流砂量を捉えることはできないが、通水時間が比較的短いので、上流での給砂のないことによる非平衡現象が下流に伝播しないまでの下流での平衡状態の問題として扱えるは

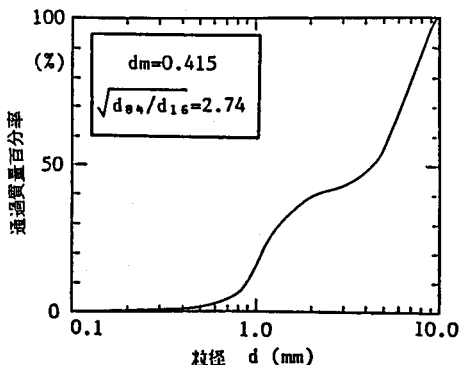


図-1 実験砂の粒度分布

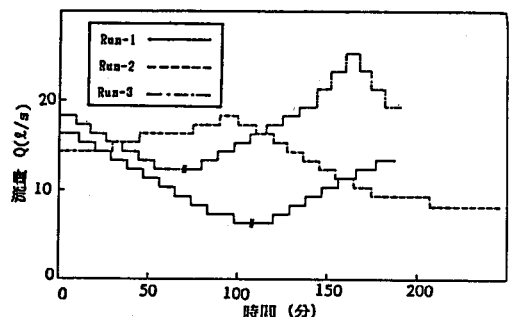


図-2 実験流量と通水時間

はずである。実験条件は、河床勾配 I を $1/80$ (Run 1)、 $1/100$ (Run 2) および $1/115$ (Run 3) の3通りについて、各勾配で流量 Q を図-2に示すように $6\text{ l/s} \sim 25\text{ l/s}$ の間で $15 \sim 20$ 段階変化させることによって、Armor coatが形成されたり、破壊されたりするような条件である。

3. Armor coatの形成・破壊に伴う掃流砂量の変化

図-3は、図-2の各段階における流量に対応する平衡状態(とみなす)の全流砂量 q_s と摩擦速度 u_* の実測による関係を示したものである。この図から、同じ摩擦速度であっても流砂量が大きく異なる領域が存在し、全流砂量と掃流力の関係にはループを描く領域が認められる。同じ掃流力で全流砂量が異なるという

ことは洪水の増水期と減水期とで河床砂の粒度構成 i_b が変化していなければならないことになる。すなわち、同一流量で流砂量が少ないときは河床表層砂は粗粒化していることが予想される。河床表層砂の粗粒化現象すなわちArmor coatの形成については、従来ダム下流部などで静的平衡に近い水理条件下で現れる現象として論じられてきた。河床表層砂の粗粒化機構がそのみであるとしたら、礫床河川や本実験のように平衡状態とみなせる場合で上流から細砂が流れているときにはどんなに掃流力が小さくても河床表層は粗粒化しないことになり、本実験の結果と矛盾する。また、Armor coatの形成は上流の給砂のない場所から下流へ伝播する現象となるから、その伝播速度が小さい場合には、細砂もわずかししか流れていない状態であるので、河床表層砂の粒度分布はその過程で場所的に大きく異なっているはずである。図-4は、河床表層砂の粒度が場所的に変化するかどうかを知るために、初期河床勾配 $1/87$ 、単位幅流量 q が $308\text{ cm}^2/\text{s}$ で上流から給砂をしないで通水し続けた実験 (Run A) を行った結果を示している。データにばらつきはあるが、河床表層砂の粒径が場所的に変化しているとは認められない。むしろ、粗粒化は河床面全体でほぼ同時に生じる現象のようである。一つの仮説であるが、粗粒化現象は従来考えられているように細砂が河床表層から抜け出して起こる現象ではなく、停止・揺動している粗砂の下部の空隙を埋めるように細砂が粗砂の底部に沈み込む現象が支配的なものではなからうか。実際、

A armor coatを最大砂粒径程度の厚さを取り除くと元河床の砂よりかなり細かい砂が集まっているのが認められた。この仮説を認めると掃流力が小さくなって一部の粗砂が停止した後、細砂がその粗砂の底部に落ち込むのに長時間は要しないであろうから、河床砂粒度特性 i_{b0} および各粒径砂の限界掃流力 τ_{ci} が与えられたら掃流力 τ だけで決まる粒度分布を有するArmor coatが、短時間に河道全体にわたって形成されることになる。このことは本実験の形成特性を非常によく説明している。

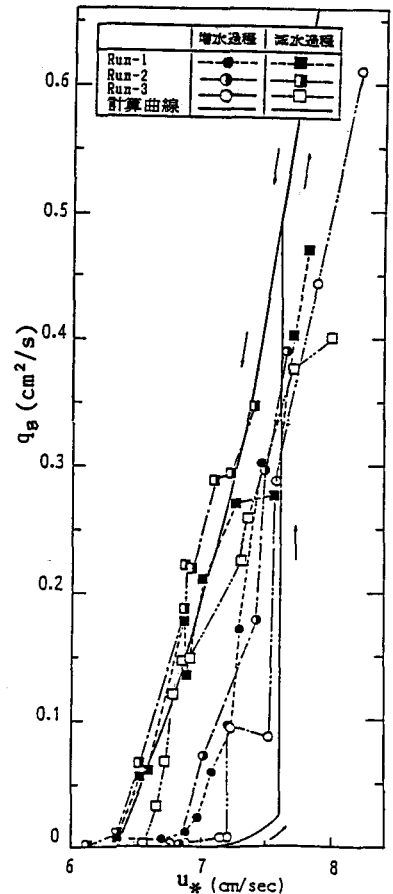


図-3 増水・減水時の流砂量の変化

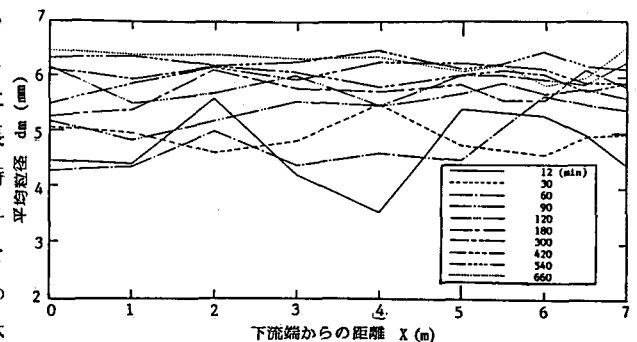


図-4 河床表層砂の平均粒径の場所的变化

4. 河床表層砂の粒度分布の推定

上に示した仮説に基づいて河床表層砂の粒度分布の推定を試みる。いま、 d_c 以上の粒径の砂が停止するような掃流力 τ が作用していると、停止・揺動している d_c 以上の粒径の砂の下に、 d_c 以下の粒径の砂の一部がその存在割合に比例して沈み込むものとする。

停止している砂がその下に作り得る空間 V_s は砂粒径 d_i によって異なるが、それを図-5の斜線で示す一辺 d_i の立方体から直径 d_i の球の体積を引いた体積に比例すると仮定する。 α を比例定数とすると、

$$V_s = \alpha (1 - \pi/6) d_i^3 \quad (1)$$

であるから、この V_s を粒子の体積 $(\pi/6) d_i^3$ で割れば1つの粒子 d_i がその底部につくる空間の粒子体積に対する割合が求まるから、この割合に粒径 d_i の砂の元河床での存在率 i_{bo} をかけたものが粒径 d_i の停止している砂全体の空間率 P_{vi} となる。すなわち、

$$P_{vi} = \alpha (6/\pi - 1) i_{bo} \quad (2)$$

したがって、 d_c より大きい粒径の砂全体についての空間率 P_v は、

$$P_v = \sum_{d_c}^{d_L} P_{vi} = \sum_{d_c}^{d_L} \{ \alpha (6/\pi - 1) i_{bo} \} \quad (3)$$

である。ここに、 d_L は元河床砂の最大粒径である。

このような空間に、粒径 d_c 以下の粒径 d_i の砂が元河床に存在する割合 i_{bo} に比例した量だけ沈み込むものとする。すなわち、粒径 d_i 砂で粒径 d_c より小さい粒径の砂だけの割合 P_{mi} は、 d_s を元河床砂の最小粒径とすると、

$$P_{mi} = i_{bo} / \sum_{d_s}^{d_c} i_{bo} \quad (4)$$

であるから、粒径 d_i の砂の沈み込む割合 P_{si} は、

$$P_{si} = P_{mi} \cdot P_v \quad (\text{ただし、} d_i \leq d_c) \quad (5)$$

で表される。したがって、河床表面に移動しながら残っている粒径 d_i の砂の割合 i_b' は $i_b' = i_{bo} - P_{si}$ であるから、 $d_i \leq d_c$ に対しては、

$$i_b' = i_{bo} \{ 1 - \Lambda_{ci} \} \quad (\Lambda_{ci} < 1) \quad (6)$$

$$i_b' = 0 \quad (\Lambda_{ci} \geq 1)$$

である。ここに、

$$\Lambda_{ci} = \alpha (6/\pi - 1) \left(\sum_{d_c}^{d_L} i_{bo} / \sum_{d_s} i_{bo} \right) \quad (7)$$

一方、停止している砂の割合は変わっていないから、 $d_i > d_c$ に対しては、

$$i_b' = i_{bo} \quad (8)$$

とする。したがって、粗粒化後の河床表層の各粒径 d_i 砂の存在率 i_b は、

$$i_b = i_b' / \sum i_b' \quad (9)$$

として求めることができる。

以上の議論は、減水時の河床表層砂の粗粒化過程についてのものであるが、一度Armor coatが完全に形成されると、若干の増水に対してはしゃへいされた細砂は動けないから河床表層砂の粒度はほとんど変化しない。大きく増水しArmor coatが破壊されると同時に河床表層砂の粒度は元河床砂のものに近いものとなる。

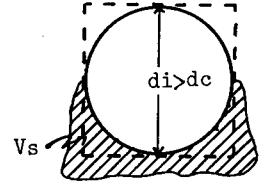


図-5 停止砂の作る下部空間

5. 各粒径砂の限界掃流力およびArmor coatの破壊条件

上に述べた河床表層砂の粒度分布推定法においては、混合砂中の各粒径砂の限界掃流力 τ_{ci} およびArmor coatの破壊条件を知っておく必要がある。

砂の限界掃流力について芦田⁸⁾は、砂を動かし始めるのに必要な最小の掃流力（移動限界掃流力）と、砂を停止させるのに必要な最小の掃流力（停止限界掃流力）との間には差異があることを実験的に示している。また、流れや砂の運動が確率的性格を持つため限界掃流力の状態の定義に主観が入りやすく明確でない。したがって、ここでは流砂量と掃流力の関係において、有意な流砂量がなくなる時の掃流力を限界掃流力とするいわば“流砂量限界掃流力”を考える。すなわち、図-6において粒径別無次元流砂量 q_{*1} （ $\equiv i_B q_B / i_B u_* d_i$ ）が 10^{-3} となる無次元掃流力 τ_{*1} （ $\equiv u_*^2 / sgdi$ ）を無次元限界掃流力と定義する。なお、 q_{*1} が 10^{-3} の近くにデータを有してない場合は、基準化された流砂量と掃流力の関係が各粒径の砂に対して相似性を保つというこを想定して、芦田・道上の流砂量式による曲線を頭に入れて外挿してきめた。その結果、各粒径 d_i の砂の限界掃流力 τ_{ci} と河床表層砂の平均粒径 d_m の砂の限界掃流力 τ_{cm} の関係は、図-7に見られるように、

$$\tau_{ci} / \tau_{cm} = (d_i / d_m)^{0.07} \quad (10)$$

で表される。なお、図-6中の曲線は、掃流砂量に関する芦田・道上式で各粒径の限界掃流力として(10)式で計算される τ_{ci} を用いた次式(11)で示されるものである。

$$q_{*1} = 17 \tau_{*1} (1 - \tau_{*ci} / \tau_{*1}) (1 - \sqrt{\tau_{*ci} / \tau_{*1}}) \quad (11)$$

図-8は、河床表層砂の平均粒径 d_m と元河床砂の平均粒径 d_{m0} の比 d_m / d_{m0} を縦軸にとり、各段階での掃流力 τ と河床表層砂の平均粒径の限界掃流力 τ_{cm} の比 τ / τ_{cm} を横軸にとって、掃流力の変化に対する河床表層砂の粗粒化の変化を示したものである。減水時には τ / τ_{cm} が小さくなるに従って連続的に d_m / d_{m0} が大きくなるようであるが、Armor coatが形成された後増水していく場合 τ / τ_{cm} が1.1になるまでは粒度の変化が全くないことがわかる。しかし、 τ / τ_{cm} が約1.1を越したところで、河床表層の平均粒径が急に小さくなりArmor coatが急激に破壊されたことがわかる。したがって、Armor coatの破壊条件は、

$$\tau / \tau_{cm} = 1.1 \quad (12)$$

となる。ただし、 τ_{cm} はArmor coatの平均粒径砂の限界掃流力である。

6. 実測値による検証

図-9は4.で述べた河床表層砂の粒度分布推定法に基づいて(1)式の α を1として計算した粒度分布曲

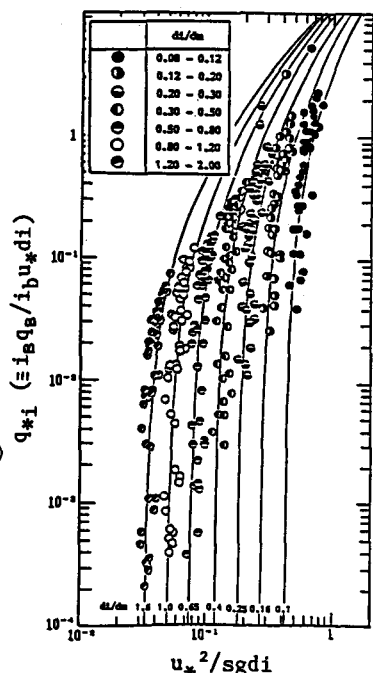


図-6 粒径別流砂量と掃流力

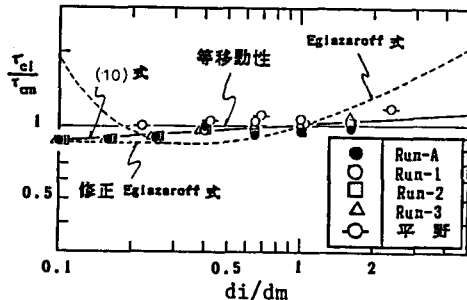


図-7 τ_{ci} / τ_{cm} と d_i / d_m の関係

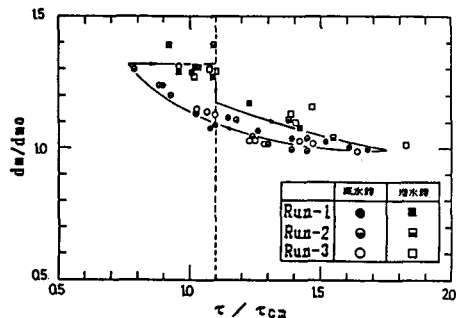


図-8 河床表層砂の平均粒径と掃流力

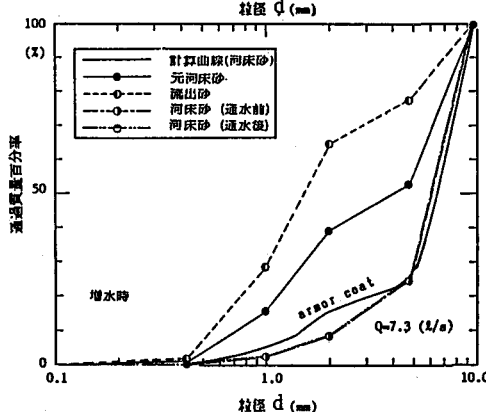
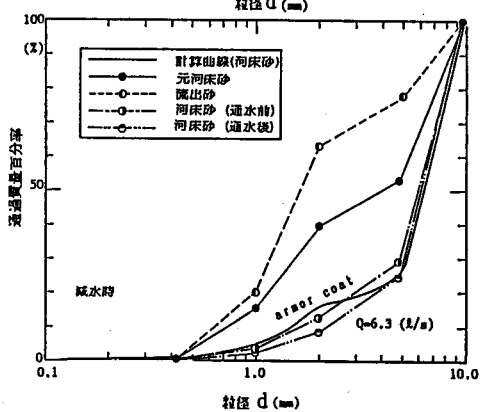
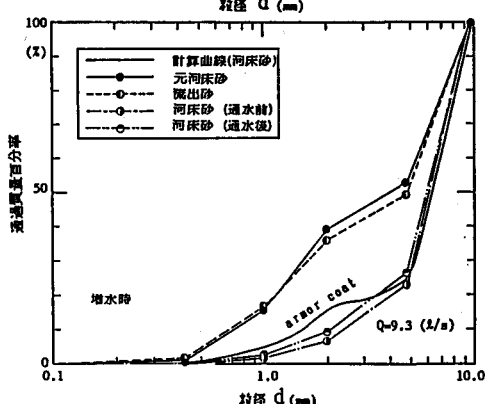
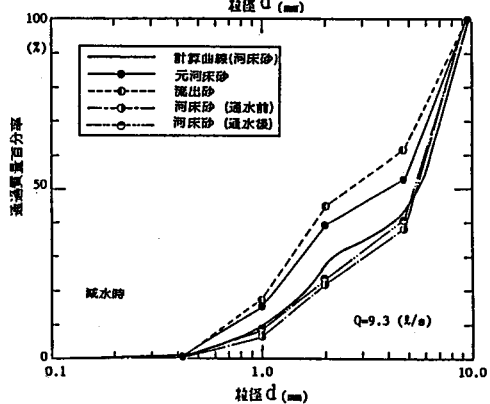
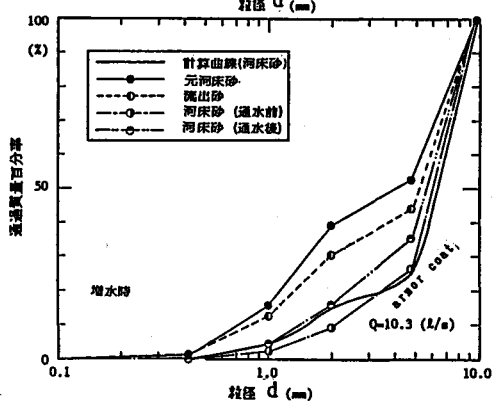
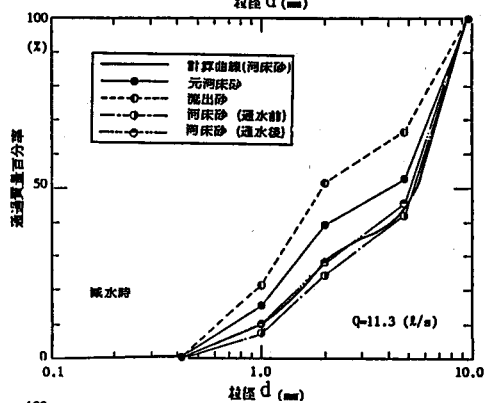
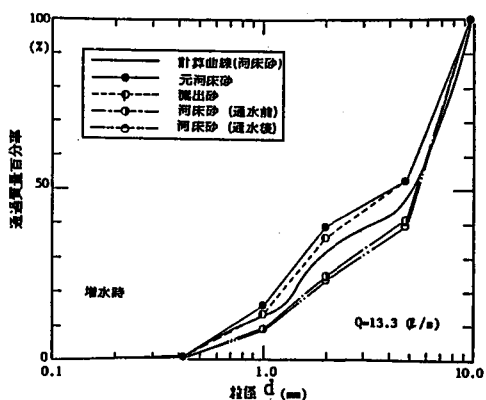
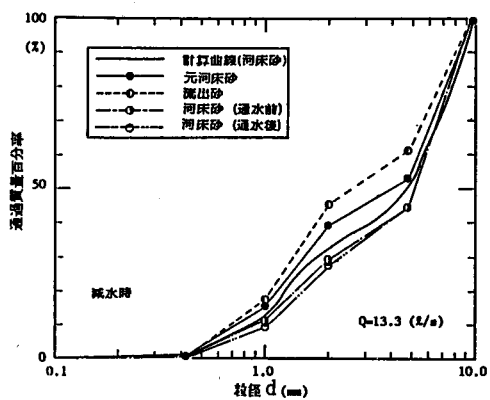


図-9 減水時および増水時の河床表層砂の粒度分布

線と実測値とを比較したものである。Run 1, Run 2およびRun 3を通して減水あるいは増水の各段階で同じ水理条件下では河床表層砂および流出砂の粒度分布はほぼ同じであったので、Run 1の結果を代表として示している。減水時には、流量が減るに従って徐々に河床表層砂は粗くなり、流出砂は細かくなっていくが、掃流力 τ が河床表層砂の平均粒径の限界掃流力 τ_{cm} に近いような状態で急激に河床表層砂の粗粒化が進むようである。Run 1では $Q=8.3\sim 6.3 \text{ l/s}$ がこの場合である。実測の粒度分布と推定した粒度分布は比較的良好に一致していることが認められる。増水時には、Armor coatが破壊されるまで($Q=9.3 \text{ l/s}$ まで)は河床表層砂は粗いままほとんど変化していない。掃流力 τ がArmor coatの平均粒径の限界掃流力 τ_{cm} にほぼ等しくなるとArmor coatが破壊されるが増水期についても計算曲線は実測値を説明し得ていると考える。

以上のように推定した河床表層砂の粒度分布および(11)式を用いて、増水期・減水期の流砂量の変化を求めたものを図-3の実線で示しているのが、実測データの変化特性をかなりよく説明している。

7. あとがき

本研究は、混合砂礫河床の表層砂の粒度分布が掃流力によって変化することを実験的に見出し、粗粒化は、停止・揺動している粗砂のつくる下部空間に細砂が沈み込んで生じる現象であるという仮定のもとに、粒度分布の推定法およびそれに基づく増水期・減水期の流砂量の変化の推定法を示し、実験データによって検証したものである。

最後に、本研究の実験・資料整理に際し、当時鳥取大学学生であった勝部浩志氏および宮本善和氏に多大な援助を受けたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kellerhals, R. & Bray, D. R.: Sampling procedures for coarse fluvial sediments, Proc. ASCE, Vol. 97, HY8, pp. 1165-1180, 1971.
- 2) Gessler, J.: Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, Proc. ASCE, Vol. 96, WW2, pp. 235-249, 1970.
- 3) Ashida, K. & Michiue, M.: An investigation of river bed degradation downstream of a dam, Proc. IAHR, 14th Congress, Vol. 3, pp. 247-255, 1971.
- 4) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について、土木学会論文報告集、第195号、pp. 55-65, 1971
- 5) 中川博次、辻本哲郎、原 稔明: 混合砂れき床面の粗粒化過程について、京大防災研究所年報、第20号B-2、pp. 355-370, 1977.
- 6) Parker, G., Klingeman, P. C. & Mclean, D. G.: Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams, Proc. ASCE, Vol. 108, HY4, pp. 544-571, 1982.
- 7) パーカー・ゲーリー: 粗粒化について、土木学会論文集、第375号、II-6、pp. 17-21, 1986.
- 8) 芦田和男、高橋保、水山高久: 山地河川の掃流砂量に関する研究、新砂防、107、pp. 9-17, 1978.