

各粒径砂礫への掃流力と限界掃流力の補正を考慮した粒径別掃流砂量の推定

鈴木幸一¹・門田章宏²・山本裕規³

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

³正会員 工修 (株)復建調査設計

均一砂の流砂量公式であるMeyer-Peter & Müller式に修正を加えることにより、混合砂礫の各砂礫に対する粒径別流砂量の推定を行った。限界掃流力の補正を行う際には、移動限界状態として細粒子に対しては揚力と水中重量が釣り合っている状態を、粗粒子に対しては平均粒径砂礫上の河床に存在すると想定し摩擦角が減少した状態を考慮して行った。一方、掃流力については、細粒子に対しては、揚力によって一旦浮上した後に平均的な抗力を受けると考え、粗粒子に対しては対数則を用いて補正を行った。これらの補正を行うことで、二粒径および三粒径混合砂礫に関する実験結果との良好な一致を得た。

Key Words : sand-gravel mixture, bed load equation, critical shear stress of each grain size

1. 緒言

河川の中・上流域においては、河床を構成している砂礫は粒径分布が大きく、いわゆる混合砂礫となっている。混合砂礫河床においては、河床の掃流力が大きい場合は、各粒径毎の移動性の違いは顕著ではなく、掃流砂量は平均粒径の均一砂としてほぼ取り扱えることが知られている。一方、掃流力が河床砂礫の移動限界に近づくとき、各粒径毎の移動性の違いによる河床表面砂の粗粒化(Armoring)の様な混合砂礫河床特有の現象が現れる¹⁾。移動限界に近い混合砂礫河床においては、粒径の大きな砂礫は流れに突出し比較的動きやすくなっているが、細かい砂礫は空隙に沈み込み大きな砂礫に遮へいされて相対的に動きにくくなっている。均一砂の場合では、粒径の大きな砂礫ほど動きにくく限界掃流力はShields曲線に見られるようにほぼ粒径に比例して大きくなっているが、混合砂礫河床においても、上述の突出効果や遮へい効果によって粗・細砂礫の移動性は近づくものの、依然として細砂礫の方が動きやすい。粒径別限界掃流力に関するEgiazaroff²⁾を始め、1960年代後半からArmoring現象に関する平野³⁾、粒径別流砂量に関する芦田・道上⁴⁾や池田⁵⁾を始めとして、混合砂礫の流送に関して多くの研究がなされてい

る。ただ、これらの研究を通して粒径別流砂量の精度の良い計算手法が必ずしも確立されているわけではない。たとえば、Egiazaroff式による粒径別限界掃流力を用いて均一砂の流砂量式を補正した式では、平均粒径より小さい砂礫の流砂量は比較的精度良く推定できるものの、平均粒径より大きい粒径の砂礫の計算値はあまり実測値と合わない⁴⁾。また、大きな河床波を伴わない場合では粗砂礫の集中などに基づく流砂量の変動が生じることなども指摘されているが^{5),6)}、流砂量の変動の大きさの目安も明かではない。

計算機の発達で複雑な河床変動計算が可能になった現在、実河道での河床変動や流砂量の推定精度を高めるためには、混合砂礫の粒径別流砂量の推定精度を上げることが不可欠となっている。本研究ではこのような観点から、粒径別流砂量の推定方法をもう一度改めて考えてみたものである。

2. 粒径別限界掃流力

(1) 砂礫の移動限界の機構

砂礫の移動限界状態においては、周辺のほとんどの砂礫は移動していないから、移動限界状態にある砂礫

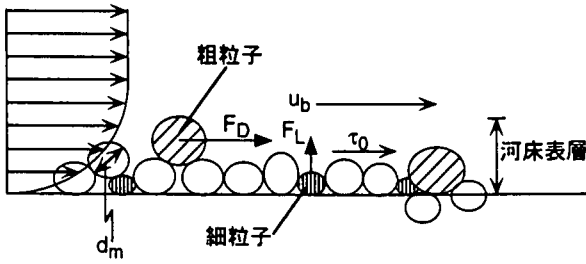


図-1 河床表層砂礫の模式図

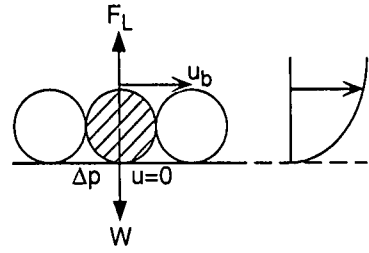


図-2 細粒子の限界掃流力の概念図

は周辺の砂礫からの作用力は考えなくてよい。その砂礫は流況によって抗力と揚力を受けて移動を開始する。河床においては、流速が遅い場合は一般に図-1に示すように粒径の大きな砂礫は流れに突出し、粒径の小さいものは空隙間に沈み込み表層の底部に位置している。

粒径別限界掃流力に関してはEgiazaroffの研究²⁾が有名であるが、これは完全粗面上の対数則流速分布に従って、粒径別に作用する流速が異なるために各粒径毎に抗力が違い、掃流力を河床での平均的なもので表したときの限界掃流力が次式(1)のように粒径毎に変化するということを示したものである。

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left[\frac{\log 19}{\log 19(d_i/d_m)} \right]^2 \quad (1)$$

ただし、 $\tau_{*cm} = 0.06$, $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / sg d_i$, $\tau_{*cm} = u_{*cm}^2 / sg d_m$, u_* : 河床の平均摩擦速度, u_{*ci} : 粒径 d_i 砂の移動限界時の摩擦速度, s : 水中比重 ($=\sigma/\rho$), σ : 砂礫の密度, ρ : 水の密度, g : 重力加速度である。

式(1)の妥当性はある程度実験的にも認められてきた。しかし、移動限界状態の砂礫はその位置周辺の状況よっての動き易さや作用力が大きく異なるはずである。たとえば、平均河床高より流れに突出した粗粒子はEgiazaroffの指摘の通り大きな抗力を受けるが、それと同時に均一粒径のときより静止摩擦角も減っている。また、流速分布が河床のごく近くで変わることから、細粒子の上部と底部とでの相対的な流速差は、粗粒子のそれに比して大きく、より大きな揚力を受けている。砂礫の移動限界状態においては、粗粒子は主として抗力、細粒子は主として揚力を受けていると考えられる。もちろん、砂礫が移動を開始すれば細粒子は浮上しているので大きな流速場で抗力を受け、また、粗粒子もより大きな流速場で抗力によって下流に運ばれる。ここでは、河床表層砂の平均粒径 d_m より細かい粒子 d_i の移動開始は揚力によって、また d_m より粗い粒子 d_i の移動開始は抗力によって生じ砂礫の静止摩擦角が支配的であると考えて粒径別限界掃流力を検討

する。

(2) 細粒子($d/d_m < 1$)の限界掃流力

図-2のように上面で流速 u_b 、下面で流速0の状態にある粒子に作用する上面と下面とでの圧力差 Δp は速度水頭差に相当する ρu_b^2 に比例すると考えられる。すなわち、種々の補正を含んだ比例定数を α として、

$$\Delta p = \alpha \rho u_b^2 \quad (2)$$

である。流速 u_b は、Egiazaroffと同様に対数分布則

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \frac{30.2z}{k_s} \quad (3)$$

において、 $z=d$ での流速とする。また、相当粗度 k_s は平均粒径 d_m と仮定する。

砂礫の移動限界状態において、揚力 F_L と粒子の水中重量 w とが釣り合っていることから、

$$F_L = \Delta p k_2 d^2 = (\sigma - \rho) k_3 d^3 g \quad (4)$$

である。ここに、 k_2, k_3 はそれぞれ粒子の面積および体積に関する形状係数で $k_2 = \pi/4$, $k_3 = \pi/6$ である。

式(2), (3)を式(4)に代入し、 $u_* = u_*c$ とおくと、

$$\frac{u_{*ci}^2}{sg d} = \frac{(k_3/k_2)}{\alpha \cdot [5.75 \log(30.2d/d_m)]^2} = \tau_{*c} \quad (5)$$

である。式(2)の比例定数 α が不明であるが、平均粒径 $d=d_m$ に対しては、式(5)より、

$$\alpha = \frac{1}{\tau_{*cm}} \frac{(k_3/k_2)}{[5.75 \log(30.2d_m/d_m)]^2} \quad (6)$$

となり、 $k_3/k_2 = 2/3$, $\tau_{*cm} = 0.047$ とすると $\alpha = 0.20$ となる。いま、この α は平均粒径より小さい砂礫 ($d_i < d_m$) に対しても同じであるとする、式(5)において $d=d_i$ とおくことによって粒径 d_i の砂礫に対する限界掃流力 ρu_{*ci}^2 を求めることができる。すなわち、

$$\frac{u_{*ci}^2}{sg d_i} = \frac{\tau_{*cm} [\log(30.2)]^2}{[\log(30.2d_i/d_m)]^2}$$

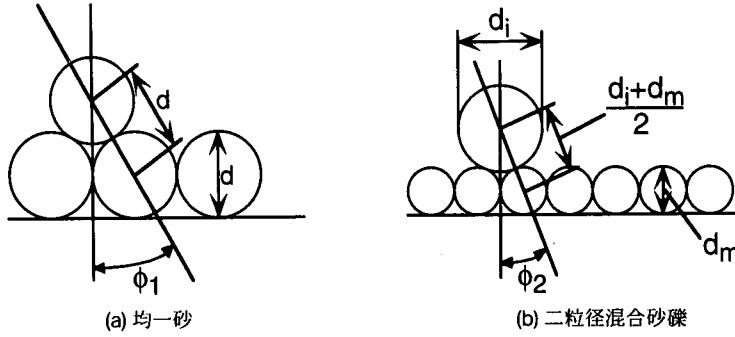


図-3 表層礫の静止摩擦角

$$\therefore \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left[\frac{\log(30.2)}{\log(30.2d_i/d_m)} \right]^2 \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(d_i/d_m + 1)^2 - 1}} \quad (9)$$

となり、Egiazaroffによる式(1)と同様な形となる。これは、作用力の考え方が異なっても抗力も揚力も当該粒子径に比例する高さでの流速によって決まるとしてゐるからである。

(3) 粗粒子($d/d_m > 1$)の限界掃流力

粒径の大きな砂礫は流速の鉛直方向変化が小さい流れ場に突出するため、その移動に対しては揚力というよりは抗力が支配的となる。

仮に、平均粒径砂礫に作用する流速と粗砂礫に作用する流速に顕著な差がない場合を想定すると、静止摩擦角 ϕ の減少が粗砂礫の限界掃流力の変化を支配することになる。この減摩効果は池田⁵⁾が指摘しているように礫(粗砂)が移動しやすくなる現象であるが、ここでは図-3に示すような流下方向鉛直断面の二次元模式図(実際は水平面も考えると三次元的である)に基づいて減摩効果を考える。まず、(b)図のように平均粒径砂礫で形成されている河床に他の大きな粒径礫が存在する場合を考える。いま、(a)図のように均一砂における静止摩擦係数を $\tan \phi_1$ とすると $\tan \phi_1 (= 1/\sqrt{3})$ はほぼ一定とみなせる。混合砂礫における摩擦係数 $\tan \phi_2$ は河床面を形成する平均粒径 d_m とその上に乗っている粗砂の粒径 d_i の関数として

$$\tan \phi_2 \approx 1/\sqrt{(d_i/d_m + 1)^2 - 1} \quad (8)$$

のように一義的に決まる。砂の移動限界状態では $\rho u_{*c}^2 \sim \rho u_{*bc}^2 \sim (\sigma - \rho)(2/3)d \tan \phi$ であるから摩擦係数 $\tan \phi$ は限界掃流力($= \rho u_{*c}^2$)に対して線形関係があり、 $\tan \phi_2$ が小さくなれば限界掃流力は比例して小さくなる。したがって、摩擦角の補正は無次元限界掃流力 τ_{*c} を補正することになり、 τ_{*ci} と τ_{*c} の関係は τ_{*ci} と補正することになり、 $d/d_m > 1$ に対して次式で与えられる⁶⁾。

すなわち、 d/d_m が大きくなると限界掃流力はかなり小さくなるのがわかる。Chin⁹⁾も基底砂表面からの突出高 p と粒径 d_i の比 p/d_i と無次元限界掃流力 τ_{*c} (u_{*c} は突出礫に作用するものを使用)の関係を検討し $p/d_i = 0$ で $\tau_{*c} = 0.1$ 、 $p/d_i = 0.5$ で $\tau_{*c} = 0.04$ 、 $p/d_i = 0.7$ で $\tau_{*c} = 0.01$ のように p/d_i によって τ_{*c} は大きく変化することを示している。

図-4は τ_{*ci}/τ_{*cm} と d_i/d_m の関係を $d_i/d_m < 1$ については式(7)、 $d_i/d_m > 1$ については式(9)を用いて示したものである。合わせて式(1)で示されるEgiazaroffの式も示している。考え方は異なるが、本論文での粒径別限界掃流力は $d_i/d_m = 1$ より離れるにつれてEgiazaroffによるものより若干小さくなる傾向はあるもののほぼ同様な傾向にある。

3. 粒径別流砂量

(1) 均一砂流砂量式の補正

混合砂礫河床での粒径別掃流砂量は、従来均一砂の掃流砂量式の限界掃流力を粒径別のものに補正することによって推定されている^{3),4)}。ここでも、同様な考え方を踏襲するが、限界掃流力だけでなく粒径毎に作用する平均的な掃流力の補正も考慮する⁸⁾。

均一砂の掃流砂量式はこれまでにDu Boysに始まり種々のタイプのものが提案されているが、Einsteinの式のように複雑な式形のものから、比較的単純で使いやすいものまである。ここでは、式形が最も単純で芦田・道上の式等とほとんど同じ流砂量を与えるMeyer-Peter&Müllerの式¹¹⁾

$$q_{s*} = K(\mu \tau_* - \tau_{*c})^m \quad (10)$$

を用いることにする。ここに、 $q_{s*} = q_s / \sqrt{sgd^3}$ 、 q_s : 単位幅流砂量、 $K=8$ 、 $m=3/2$ 、 $\tau_{*c}=0.047$ 、 $\mu=(k/k')^{3/2}$ (ripple

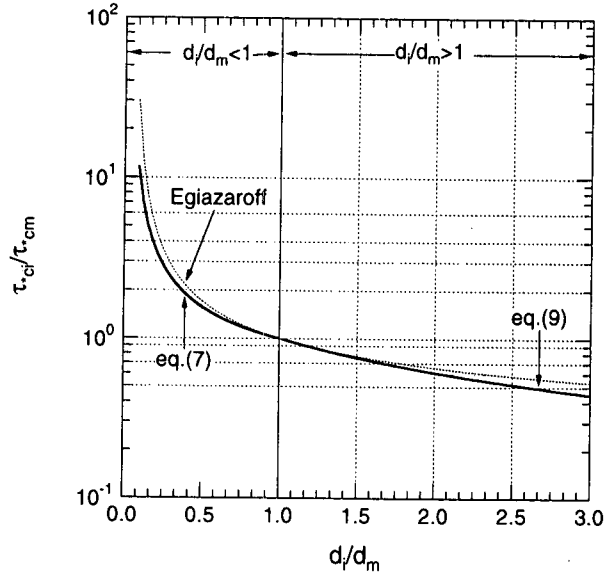


図-4 粒径比 d_i/d_m に対する限界掃流力 τ_{ci}/τ_{*cm}

factor), k : 河床粗度, $k' [= 26/d^{1/6}(\text{m}^{1/3}/\text{sec})]$: 平坦河床の粗度, $\mu\tau_*$: 有効無次元掃流力である。なお, $0.5 < k/k' < 1.0$ であり, 平坦河床のとき $k/k' = 1$, 河床波が大きいとき $k/k' = 0.5$ である。

混合砂礫河床においては, 河床波のない平坦河床 ($\mu=1$) においても粒径毎に作用する掃流力が異なるが, 与えられる掃流力としては河床での平均的な掃流力 $\tau_b (= \rho u_*^2)$ である。したがって, 各粒径砂礫に作用する掃流力 τ_{bi} を $\epsilon_1 \tau_b$ のように平均掃流力 τ_b で表さなければならない。ここに, ϵ_1 は補正係数であって, 主に各粒径砂礫の流れへの突出の程度に関する関数である。一方, 限界掃流力 τ_{*c} は均一砂に対するもので一定であり, 各粒径の単一粒子にかかる τ_{*ci} は, 前節で示したように $\epsilon_2 \tau_{*c}$ と補正係数 ϵ_2 をかけて補正する。

このように補正を行うと, 均一砂の掃流砂量式(10)は, 平均粒径が d_m である混合砂礫河床の粒径 d_i 毎の掃流砂量 $q_{s,i}$ の推定式として次式のように補正される。

$$q_{s,i} = K(\epsilon_1 \mu \tau_{*i} - \epsilon_2 \tau_{*c})^m \quad (11)$$

ここに, $q_{s,i} (= q_{si}/i_b \sqrt{sgd_i^3})$, i_b は河床表層砂礫中で粒径 d_i の砂礫が占める割合である。粒径毎による移動性の違いから, 動的平衡河床であっても理論的には給砂, 流砂および河床材料の粒度分布は本来異なるものであり, 河床材料の i_b は平衡状態においても河床下層中の粒径 d_i の割合 i_0 と若干異なることが動的粗粒化現象として議論されている^{10,11)}が, ここでは便宜的に $i_b \approx i_0$ とする。

(2) 掃流力補正係数 ϵ_1

$d_i/d_m > 1$ の砂礫に対しては, 流速分布として Egiazaroff と同様に相当粗度を平均粒径 d_m とする対数

則を用い, 各粒径砂礫の高さに比例する $\alpha_* d$ ($\alpha_* = 0.63$) の点の流速が各粒径に作用すると考えると, ϵ_1 は式(1)の逆数となる。一方, $d_i/d_m < 1$ の砂礫では, 揚力によって平均的河床高に浮上した後流送されたと考え, 流送中受ける抗力は平均的な抗力となると考えると, $\epsilon_1 = 1$ となる。したがって次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{d_i}{d_m} \geq 1 : \epsilon_1 &= \left[\frac{\log_{10} 19 (d_i/d_m)}{\log_{10} 19} \right]^2 \\ \frac{d_i}{d_m} < 1 : \epsilon_1 &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

(3) 限界掃流力補正係数 ϵ_2

前節の結果から,

$$\begin{aligned} \frac{d_i}{d_m} \geq 1 : \epsilon_2 &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(d_i/d_m + 1)^2 - 1}} \\ \frac{d_i}{d_m} < 1 : \epsilon_2 &= \left[\frac{\log(30.2)}{\log(30.2 d_i/d_m)} \right]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

である。式(11)は, $\mu=1$ の場合 d_i/d_m をパラメータとして図-5の様に示される。

4. 粒径別掃流砂量に関する実験

(1) 実験の概要

混合砂礫河床での掃流砂量に関する上記の考察を実験的に検証するため, 平均粒径がそれぞれ $d_L = 1.48 \text{ cm}$

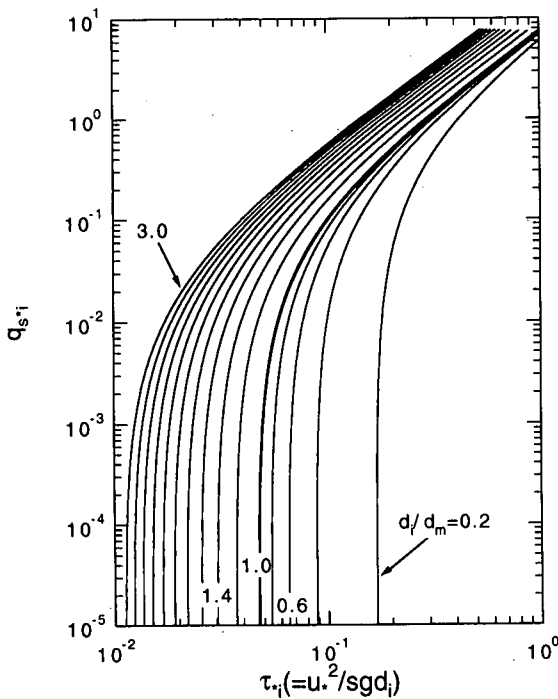


図-5 粒径比 d/d_m に対する粒径別掃流砂量 $q_{s,i}$

および $d_s=0.14\text{cm}$ のほぼ均一粒径の礫と砂を体積比1:1に混合した二粒径混合砂礫の実験と、平均粒径 $d_L=1.48\text{cm}$, $d_M=0.71\text{cm}$ および $d_s=0.14\text{cm}$ の砂礫を1:1:1に混合させた三粒径混合砂礫の実験を行った。なお、 d_L 砂, d_M 砂および d_s 砂は、それぞれメッシュ1.9cmと0.95cm, メッシュ0.95cmと0.475cm, およびメッシュ0.2cmと0.085cmのふるいでふるい分けたものであり、使用した混合砂礫の粒径加積曲線は図-6に示す通りである。

実験に使用した水路は幅15cm, 全長10mの循環式可変勾配水路であり, 上流端には手動による給砂装置, および下流端には捕砂装置が設けられている。また, 水路側壁は透明アクリル板でできており, 側壁を通して河床形状, 水面形および砂礫の移動状態が観測できる。

実験条件は表-1左半分に示されているが, 二粒径砂礫による実験シリーズRun Aと三粒径砂礫によるRun Bとに分け, それぞれ, 河床勾配1/20と1/60とし, 各勾配に対して流量を4通りずつ変化させた。なお, Run A-2およびRun B-2は実験の再現性をチェックするために, それぞれ対応するRun A-2とRun B-2と全く同一の水利条件で行っている。

実験においては, 混合砂礫を水路全長にわたり15cmの厚さで平坦に敷き詰め, 所定の水利条件で通水し, 捕砂箱によって1分間毎の流出砂量を各実験Run

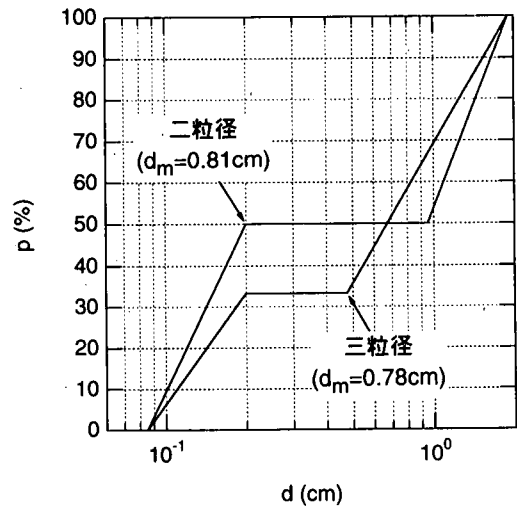


図-6 混合砂礫の粒径加積曲線

について15分から60分間測定した。また, 実験中は水路上流端より給砂を行っているが, 河床に敷き詰めた砂礫と同一の混合砂礫を用いて, 上流側の基準断面での河床高が常に一定になるように給砂量を手動で調整しながら行った。なお, 透明な側壁を通してビデオカメラによって下流端に近い1m区間の撮影を行い, 時間的に平均してこの区間の平均水深を求めた。

(2) 掃流砂量の時間変動

図-7(a)および(b)は, 一例として河床勾配1/20, 単位幅流量 $200\text{cm}^2/\text{s}$ の水利条件に対して, それぞれRun A-2(二粒径)およびRun B-2(三粒径)の各粒径別流砂量の1分間毎の変化を示している。全体の流砂量は時間的に大きく変動していることが認められる。粒径別に細かく見ると, 砂の掃流砂量変動が礫の変動よりやや大きいことなどが認められる。また, 明確ではないが砂と礫の掃流砂量変動の位相差も認められる。観察によれば, これらの流砂量の時間的変動は河床表面における礫集合部の形成とその破壊に基づいている^{14), 15)}。図-8(a)および(b)は, 次式(14)で表される各粒径砂礫の流砂量の変動の標準偏差 σ_i を平均流砂量 $\bar{q}_{s,i}$ で標準化したものと粒径別無次元掃流力 τ_{*i} との関係を各粒径別に示したものである。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_{s,i} - \bar{q}_{s,i})^2}{n}} \quad (14)$$

三粒径の方が変動が大きいが, 二粒径・三粒径とも粒径毎の変動の差は認められない。また, 標準偏差は平均流砂量の0.2から1.2倍の間にあり, 平均的には0.6倍程度である。この流砂量の変動特性とその内部機構に関する詳細な検討は別の機会に論じることとし, こ

表-1 実験条件と実験結果

Run No.	混合砂礫数	砂礫径 $d_L, d_M, d_S(\text{cm})$	混合体積比 i_L, i_M, i_S	河床勾配 i	単位幅流量 $q(\text{cm}^2/\text{s})$	平均水深 $h(\text{cm})$	平均掃流力 ($\tau_m = u^2/sgd_i$) $\tau_{Lm}, \tau_{Mm}, \tau_{Sm}$	粒径別平均流砂量 $q_{dL}, q_{dM}, q_{dS}(\text{cm}^2/\text{s})$
Run A-1	二粒径	0.14, 0.0, 1.48 ($d_m=0.81$)	1/2, -, 1/2	1/20	267	2.86	0.059, -, 0.618	3.004, -, 2.286
Run A-2					200	2.22	0.045, -, 0.480	2.042, -, 1.821
Run A-2'					200	2.31	0.047, -, 0.501	2.089, -, 1.806
Run A-3					133	1.73	0.035, -, 0.374	1.105, -, 1.389
Run A-4					67	1.77	0.037, -, 0.384	0.009, -, 0.165
Run A-5	二粒径	0.14, 0.0, 1.48 ($d_m=0.81$)	1/2, -, 1/2	1/60	667	6.47	0.044, -, 0.467	1.270, -, 0.976
Run A-6					533	5.42	0.037, -, 0.391	0.493, -, 0.426
Run A-7					400	4.42	0.030, -, 0.319	0.038, -, 0.171
Run A-8					267	3.19	0.022, -, 0.230	0.003, -, 0.132
Run B-1	三粒径	0.14, 0.71, 1.48 ($d_m=0.78$)	1/3, 1/3, 1/3	1/20	267	3.16	0.065, 0.135, 0.683	1.950, 1.570, 1.350
Run B-2					200	2.79	0.057, 0.119, 0.603	1.060, 1.105, 1.049
Run B-2'					200	2.27	0.047, 0.097, 0.492	0.930, 0.930, 0.810
Run B-3					133	2.33	0.048, 0.099, 0.504	0.320, 0.450, 0.490
Run B-4	67	1.01	0.021, 0.043, 0.219	0.0002, 0.0015, 0.0024				
Run B-5	三粒径	0.14, 0.71, 1.48 ($d_m=0.78$)	1/3, 1/3, 1/3	1/60	667	9.61	0.039, 0.081, 0.409	0.543, 0.510, 0.455
Run B-6					533	5.11	0.036, 0.074, 0.376	0.174, 0.195, 0.168
Run B-7					400	4.11	0.029, 0.060, 0.302	0.0397, 0.058, 0.065
Run B-8					267	3.23	0.022, 0.047, 0.238	0.001, 0.004, 0.017

(注) i_L, i_M, i_S : それぞれ粒径 d_L, d_M, d_S 砂礫の河床での割合, q_{dL}, q_{dM}, q_{dS} : それぞれ粒径 d_L, d_M, d_S 砂礫の単位幅流砂量

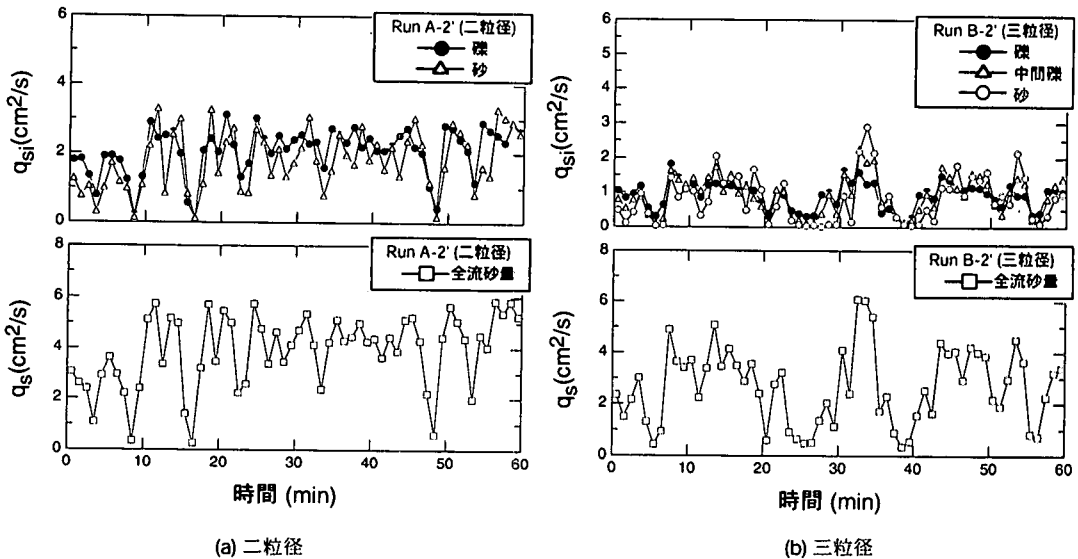


図-7 各砂礫流砂量および全流砂量の時間変動

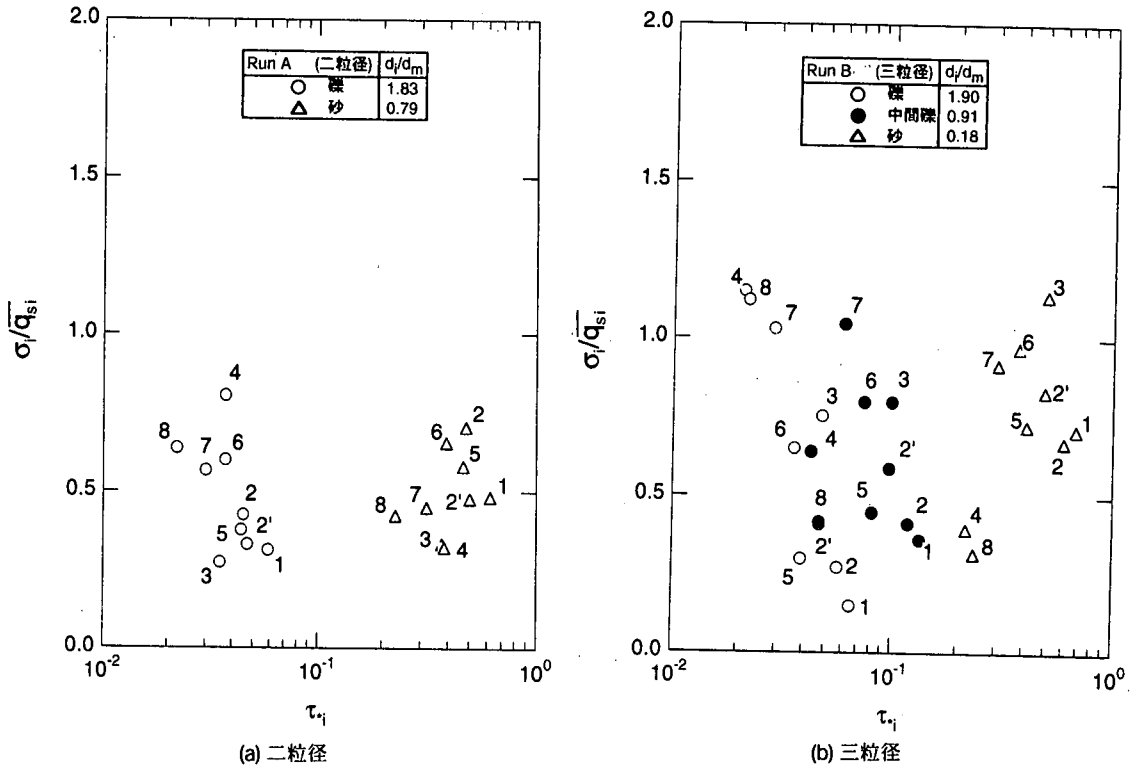


図-8 各砂礫流砂量の時間変動に関する標準偏差値

ここでは上記の粒径別流砂量式の検証が目的であるため、これらの流砂量を時間的に平均したものについてのみ以下に議論する。表-1の右半分には、測定された平均水深と粒径別平均流砂量の実測値がまとめられている。河床形状は時間的に変化し平坦になったり河床波が形成されたりで場所的にも時間的にも変化していたが、掃流力 τ_0 の計算では、平均水深 h の平坦河床(ripple factor $\mu=1$)として単純に $\tau_0 \equiv \rho u_*^2 = \rho g h i$ とする。

(3) 粒径別平均流砂量の検証

図-9(a)および(b)は、それぞれ二粒径混合砂礫および三粒径混合砂礫について、無次元粒径別流砂量 $q_{si} / i_b \sqrt{sgd_i^3}$ と無次元掃流力 u_*^2 / sgd_i の関係を d_i/d_m をパラメータとして図示したものである。図中の曲線は式(12)および式(13)の補正係数を用いて式(11)で示されるものである。なお、図中のデータの添付数はRun No.を示している。

実験の再現性についてのRun 2とRun 2'の結果を見ると二粒径(Run A)では両者の値はほぼ一致しており再現性はよいが、三粒径(Run B)では再現性は必ずしもよくない。混合砂礫の流砂量が大きく変動することや流砂量の測定精度を考えると実測データのかなりのばらつきは避けられない。図-9では実測値にかなりのばら

つきはあるものの計算曲線と比較的よく一致していることが分かる。すなわち、二粒径・三粒径ともに、パラメータ d_i/d_m を基準として、各砂礫にかかる力を区別し、式(11)のように掃流力・限界掃流力を補正することによって、各粒径の掃流砂量を推定できると考えられる。従来の補正では実測値が計算値よりかなり小さくなっていた $d_i/d_m > 1$ の粒径に対しても実測と計算の流砂量はかなり近い値を示している。ただ、三粒径の実験値が、若干予測値よりも少ない流砂量を示しているのは、通水時間中に形成される河床形態が、二粒径と三粒径とは異なるためであると考えられる。三粒径の場合、中間礫の存在によって、二粒径で観察されるような礫集合部の形成による洗掘孔の形成や崩壊等の河床形態の変化が若干異なっていた。ここではその詳細について議論できないが、平坦河床($\mu=1$)としての解析の限界であろう。今後、式(11)中にあるパラメータ μ について、このような河床形態の効果も取り入れる必要がある。

図-10は各粒径に関して、実測値と計算値との比較を行ったものである。図中の点線は芦田・道上⁴⁾の掃流力補正係数 e_1 のみを流砂量公式に導入したものである。図-9との対応から考慮すると、砂・礫ともに、実測値がやや小さめになっているものの流量が大きく掃

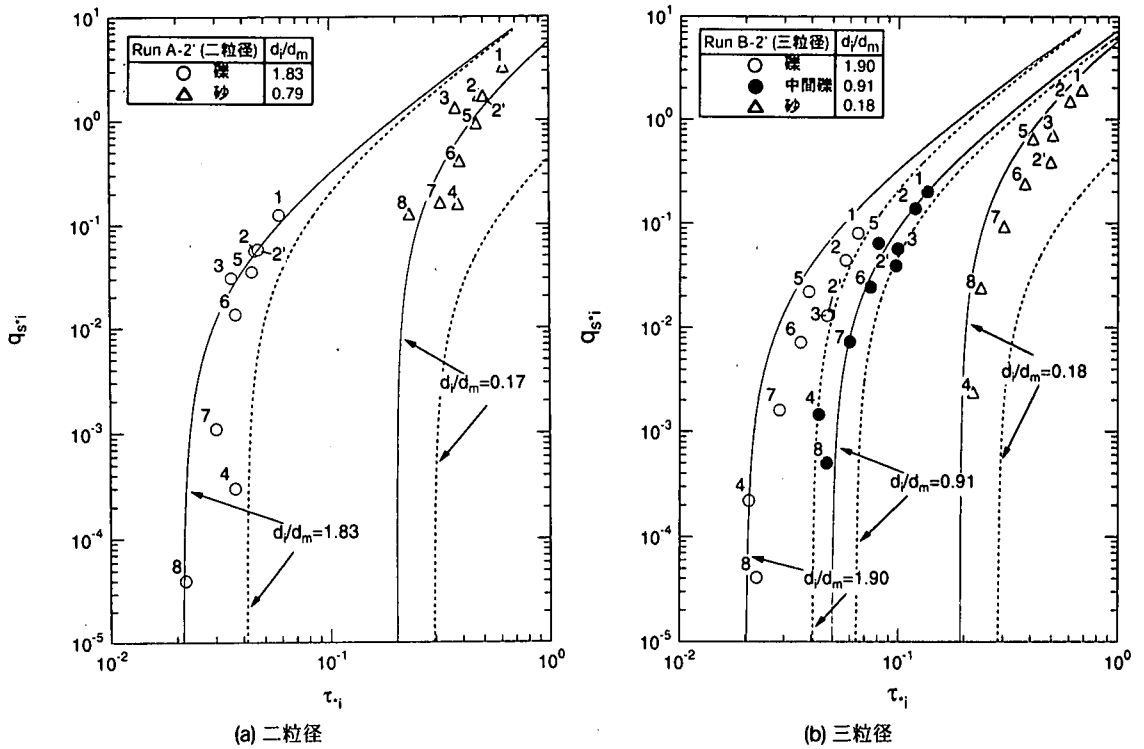


図-9 砂礫の平均流砂量と掃流力との関係

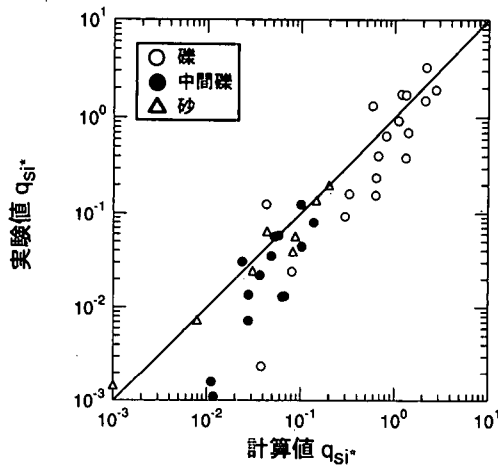


図-10 掃流砂量の実測値と計算値との比較

流砂量が大きな範囲において両者はよく一致している。ただ流量が小さくなると、流砂量そのものが極端に少ないため、相対的誤差は大きくなっている。

5. 結 語

本研究の内容を要約すれば以下の通りである。

- 1) 流れに突出している礫は静止摩擦角の減少、礫間に沈み込んでいる砂はそれにかかる揚力の変化によって均一砂河床での限界掃流力を補正することによって、混合砂礫河床表層における砂と礫の粒径別限界掃流力が、それぞれ式(7)および式(9)で表されることを示した。
- 2) 流送状態における礫は流れに突出した場の抗力を受け、砂は揚力によって河床から浮上した後に平

均河床高の流れの抗力を受けるとして、各粒径砂礫への掃流力の補正は、式(12)のように礫のみに必要であることを示した。

- 3) 粒径の大きく異なる二粒径および三粒径の混合砂礫を用いて、粒径別流砂量の測定実験を行い、従来提案されている均一砂掃流砂量式で、上記1)および2)の限界掃流力および掃流力の両方を補正することによって、平均的粒径別流砂量をかなりの精度で推定できることを検証した。
- 4) 混合砂礫河床での流砂量変動は本実験条件では粒径別に差はなく、平均流砂量の0.2から1.2倍の間で、平均的には0.6倍程度であった。

なお、ここでは流砂量の時間的変動や河床波の存在による流砂量への影響や礫集合部の形成破壊などに伴う等の細かい現象は無視して平均的な流砂量に議論を限定した。今後、掃流砂量の時間的変化などの検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) Gessler, J. : Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, J. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol. 96, No. WW2, pp.235-249, 1970.
- 2) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. ASCE, Vol.91, No. HY4, pp.225-247, 1965.
- 3) 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.
- 4) 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, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69,

1972.

- 5) 池田宏, 伊勢屋ふじこ : 混合砂れきの流送に伴う縦断的分級, 第30回水理講演会論文集, pp.217-222, 1986.
- 6) 辻本哲郎, 本橋健 : 混合砂礫における縦断方向の交互分級とその卓越波長, 第33回水理講演会論文集, pp.409-414, 1989.
- 7) 池田宏 : 二粒径混合砂礫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, No.8, pp.1-15, 1984.
- 8) 鈴木幸一, 栗原崇, 山本裕規 : 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討, 水工学論文集, 第38巻, pp.627-632, 1994.
- 9) Chin, C. O. and Chiew, Y. M. : Effect of bed surface structure on spherical particle stability, Proc. ASCE, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, No.3, pp.231-242, 1993.
- 10) 鈴木幸一, 羽野敦之 : 平衡流砂場での混合砂河床表層砂の粒度変化と流砂量, 水工学論文集, 第35巻, pp.411-416, 1991.
- 11) Meyer-Peter & Müller : Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp.39-64, 1948.
- 12) パーカー・ゲイリー : 粗粒化について, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.17-27, 1986.
- 13) Jain, S. C. : Armor of pavement, Proc. ASCE, Jour. of Hydraulic Engineering, Vol.116, No. 3, pp.436-440, 1990.
- 14) Whittaker, J. G. and Jaeggi, N. R. : Origin of step-pool systems in mountain streams, Proc. ASCE, Vol.108, No. HY6, pp.758-773, 1982.
- 15) Kunle, R. A. and Southand, J. B. : Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel, Water Resources Research, Vol.24, No.2, pp.247-260, 1988.

(1998. 5. 25 受付)

ESTIMATION FOR THE BED LOAD OF THE EACH GRAIN SIZE OF SAND-GRAVEL MIXTURES BY MODIFYING BOTH TRACTIVE AND CRITICAL TRACTIVE FORCES

Koichi SUZUKI, Akihiro KADOTA and Hironori YAMAMOTO

A sediment transport formula is proposed for the each grain size of the bed load with sand-gravel mixtures, modifying the Meyer-Peter & Müller's formula proposed for the uniform size sand. Both tractive force and the critical tractive force of the each grain size are modified in the formula. Particles smaller than the mean grain size are assumed to be transported by the mean drag force after being lifted by the lift force to the top of the mean grain size level, whereas particles larger than the mean grain size are moved and transported by the drag force of the velocity at the relevant height to the larger grain size. The modified formula is experimentally acceptable for the estimation of sediment transport rate for both larger and smaller grain size than the mean grain size.