

構成地質の異なる流域から産出される 河床材料の摩耗・破碎と それが流下に伴う細粒化に及ぼす影響

Abrasions of Riverbed Materials Yielded from the Watersheds with Different Geology
And Their Effects on Longitudinal Fining of Bed Material Composition

五島暢太¹・田代喬²・辻本哲郎³

Yota GOSHIMA, Takashi TASHIRO, Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 工修 (株)建設技術研究所 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町3-21-1 日本橋浜町Fタワー)

²正会員 博(工学) 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 准教授
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³フェロー 工博 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

Most grain-bed rivers show the longitudinal sorting on riverbed materials. This phenomenon is due to combination of the selective sorting and the abrasion. We developed the stochastic model of bed-load transport with the abrasion, and analyzed on 3 model rivers, which have the different tendency of the concavity. It was found that the relative importance of the selective transport and the abrasion on longitudinal sorting is related to the characteristics of abrasion and the grain distribution of watershed geology and lithology.

Key Words : longitudinal sorting, selective sorting, abrasion, watershed geology, lithology

1. 序論

河床材料の流下方向の細粒化は良く知られた現象であり、最も顕著な粒度特性の変化である。粒度は河川の流れ、地形解析における基本的な条件として重要であるし、砂州や瀬淵といった物理基盤が有する物質循環場、生息場としての機能を支持する要因にもなっている。

河床材料の細粒化は主に二つの原因によって発生する。一方は、下流ほど流れが緩やかになるため掃流力が低下し、上流には粗い礫が残り、下流には細かい砂が堆積するという分級作用である。他方は、土砂が河川を流下する際、河床などとの衝突によって物理的に摩耗・破碎し、砂礫粒子の粒径自体が小さくなるという摩耗作用である。

分級作用は礫河川では大きいですが、砂河川においては相対的に小さくなり、河床形状が凹型であるほど分級作用の影響は顕著に表れるとされている¹⁾。一方で摩耗作用は、礫の形状・岩石の種類によって異なることが室内実験などから分かっている¹⁾。このように、分級作用・摩耗作用の河床材料の細粒化への相対的な影響度は、河床を構成する主材料の粒径や縦断的な勾配変化、あるいは岩石の種類、形状、風化度合いといった河床材料特性に

よって異なる。

河川工学では流砂を扱う際、摩耗作用を無視することが多い中で、Parker^{2),3)}は分級作用・摩耗作用の両者を考慮したモデルを開発しており、岩石の種類によって粒度特性や勾配変化に違いが表れることを示した。ただし、摩耗作用を掃流砂礫の質量損失としてモデル化したため、摩耗現象によって発生する副産物(細粒分材料)については着目しておらず、大きく砕けるような破碎現象は考慮されていない。これに対し、小玉⁴⁾は従来の室内試験は摩耗作用を過少評価しているとし、実験条件を再考した上で、改良したコンクリートミキサーによる室内試験を行っており、岩石の種類によっては破碎により大きな粒径減少が発生することを見出した。

本研究では、(1)岩石の摩耗特性を定量的に評価し、河川工学で用いられている土砂移動モデルに組み込める形で摩耗作用をモデル化し、(2)摩耗作用を取り入れた土砂移動モデルによって河床材料の細粒化における分級作用、摩耗作用の相対的な影響度を評価することを目的とした。特に摩耗作用については、岩石の種類によって異なる摩耗・破碎メカニズムとその結果生ずる副産物の粒度に着目し、摩耗特性の定量的評価と流砂における摩耗作用のモデル化を行った。

2. 摩耗・破砕現象の実験的解析

ここでは、河床材料の磨耗・破砕特性を室内試験によって明らかにし、従来から河川工学で行われてきた数値解析に取り込める形で摩耗現象をモデル化する。摩耗・破砕特性は、岩石の種類、状態によって異なると考えられるが、本研究では単一の岩石を対象とせず、同所で得られる粒度の異なる材料を混合して用いることから、集水域地質ごとにそれらの特性を整理するものとした。

(1) 河床材料の磨耗・破砕試験

a) 試験方法

田代ら⁵⁾は櫛田川(図-1参照)において、河道特性に関する調査とともに、瀬を構成するこぶし~人頭大の石と淵に堆積した砂礫の定量採取を行い、その粒度特性を勾配・地質構成と関連付けて考察した。本研究ではできるだけ均質な材料を用いて磨耗作用を検証するため、田代ら⁵⁾の試料のうち、領家帯の仁柿川、三波川帯の相津川、秩父帯の蓮川といった単相地質区分によって構成される支川(山地河道)のそれを抽出した。

試料は付着している有機物を取り除いた後、こぶし大~人頭大の石と砂礫の重量比が概ね半々となるよう調整し(表-1参照)、小玉⁴⁾を参考にコンクリートミキサーにより磨耗・破砕試験に供した(180min, 各2回実施)。定めた測定間隔でふるいわけ試験を行いながら粒度構成の時間変化を観察した。

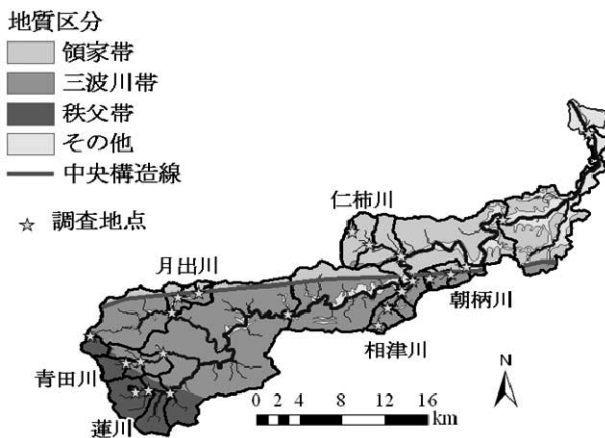


図-1 対象河川・流域の概要図(田代ら⁵⁾を引用)

表-1 試験に用いた材料一覧

	採取位置	地質区分	投入量
試験1-1	仁柿川下流	領家帯	約7.4 kg
試験1-2	"	"	約6.8 kg
試験2-1	相津川下流	三波川帯	約5.0 kg
試験2-2	"	"	約6.1 kg
試験3-1	蓮川中流	秩父帯	約6.1 kg
試験3-2	"	"	約8.4 kg

b) 試験結果

図-2, 図-3には、上に石の質量変化, 下に砂礫の粒度変化を示す。ただし、粒径 ϕ は次式により表記した。

$$\phi = -\log_2 D \quad (1)$$

ここで、 D : 材料粒径 (mm) である。

試験結果は大きく分けて二つのケースに分けられた。すなわち、石が破砕することにより、石の質量が段階的に減少するとともに、砂礫分の割合が増加するもの(図-2参照)、石の破砕が生じないために石の質量減少は非常に小さく、砂礫分の細粒化だけが確認されるもの(図-3参照)であった。

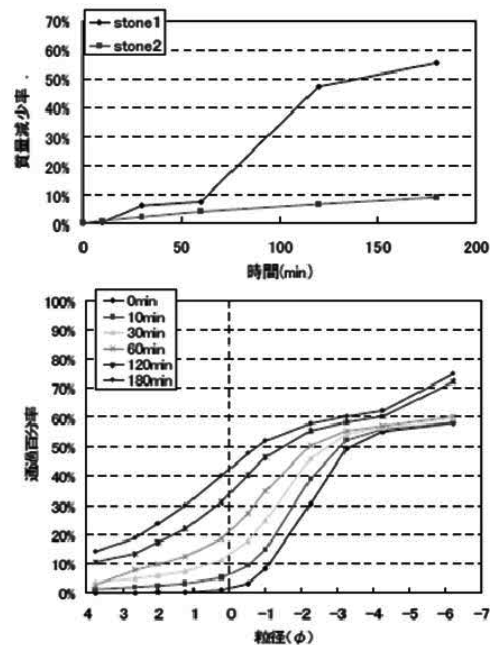


図-2 破砕した試験結果例(試験2)

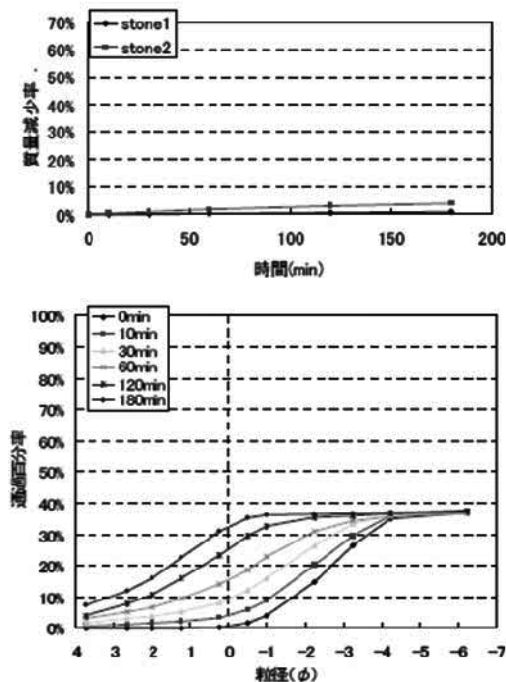


図-3 破砕しなかった試験結果例(試験3)

表-2 粒径集団

集団名	粒径(mm)	集団番号
石 cobble	75<	1
礫 pebble	19< <75	2
粗砂利 coarse gravel	4.75< <19	3
細砂利 fine gravel	2.00< <4.75	4
砂 sand	0.075< <2.00	5
シルト粘土 silt & clay	<0.075	6

(2) 摩耗・破砕現象のモデル化

前述したように、摩耗・破砕現象では材料自体が小さくなることに加えて、それらのメカニズムに応じた、異なる大きさの副産物が発生する。この過程を定量的、連続的に評価するため、本研究では摩耗作用による粒度分布変化を、粒径集団間の遷移として表現した。なお、ここでは、Wentworthの粒度階級⁶⁾を参考に、分級・摩耗による影響が顕著な石～砂利に着目して、表-2のような粒径集団を設定した。Wentworthの粒度階級は、例えば矢部⁷⁾などで河床材料の粒度区分に用いられている。以下、粒径集団間の遷移という考え方について説明する。

粒径の大きい集団を上位集団と定義し、上位から集団1, 集団2...として、ある上位集団からある下位集団*j*へ単位移動距離当たりに遷移する割合を遷移確率を*p_{ij}*とすると、 ΔX だけ流下した時の集団*i* (重量*W_i*) から集団*j*への遷移量は*p_{ij}W_iΔX*であることから、各集団の重量の変化量は次式で表される。

$$\Delta W_i = -\sum_{j=i+1}^n p_{ij} \Delta X \cdot W_i + \sum_{j=1}^{i-1} p_{ji} \Delta X \cdot W_j \quad (2)$$

ここで、右辺第一項は下位集団への遷移、右辺第二項は上位集団からの遷移を意味する。この式に2.(1)の試験結果を適用して解析解を得れば、遷移確率を地質区分ごとに求めることができる。

また、従来の研究^{4),8)}では摩耗特性の定量評価には次式で表されるStenbergの法則⁴⁾が用いられてきた。

$$W = W_0 \exp(-\alpha X) \quad (3)$$

ここで、*W*: 移動距離*X*における重量、*W₀*: 初期重量、 α : 摩耗係数である。本研究で定めた遷移確率と従来の研究で得られている摩耗係数を比較するため、次のように*p*を定義した。

$$p_i = \sum_{j=i+1}^n p_{ij} \quad (4)$$

ところで、実河川における摩耗・破砕作用⁹⁾が、砂礫の移動に伴う材料間の衝突によって生じるのは自明であるが、磨耗・破砕試験結果をモデルや実河川に適用するには試験時間*t*を移動距離に換算する必要がある。従来の研究⁹⁾では、ミキサーのドラム円周×回転数を便宜上、移動相当距離*X*としている。ミキサー内での砂礫の運動

はミキサーの回転によって持ち上がり、落下するものと、円周に沿って転動するものが存在し、必ずしも実河川での掃流砂の運動と一致するわけではなく、単純にドラム円周×回転数が移動距離に対応するわけではないが、多くの研究で用いられていることから、本研究ではこの方法に従って、試験時間を移動距離へ換算した。

図-4には、2.(1)の試験結果から定めた遷移確率を示す。ここでは、*p_i*の内訳として*p_{ij}*を表示してある。最も顕著な違いが観察されたのは石集団であり、その特徴は次の通りであった(図-4左図参照)。

- ・ 領家帯は摩耗しにくく、細砂利・砂を生産している。
- ・ 三波川帯、秩父帯は同程度の質量減少率であるが、秩父帯が礫を生産しているのに対し、三波川帯は礫、粗砂利と広い粒径の副産物が発生している。

なお、ここでの石集団の*p_i*は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の範囲をとり、小玉⁴⁾の結果と良好な一致をみた。一方、礫～細砂利集団では 10^{-1} と相対的に高い数値を呈した(図-4中図参照)。これは石によって礫～細砂利集団を押しつぶす効果が本実験条件では大きく評価されたためだと考えられる。質量減少率、副産物の粒度については、地質区分による傾向は確認されなかった。また、砂集団についても地質区分による傾向は確認されなかった(図-4右図参照)。

3. 摩耗・破砕作用を考慮した掃流砂モデル

磨耗・破砕作用を組み込んだ流砂モデルとしては、従来、オイラー的な取り扱いをしたものが多く、Parker^{2),3)}もこの方法を用いている。しかし、ラグランジュ的な取り扱いによって、掃流砂礫の由来が明確で非平衡性が平易に解析でき、砂礫粒子の運動形態を記述するため、衝突によって発生する摩耗・破砕過程のモデル化が容易になる。そこで本研究では、中川ら⁹⁾の確率過程論的モデルを援用し、これに前述した摩耗・破砕過程を組み込み、掃流砂における分級作用、摩耗作用を表現する。

(1) 掃流砂の確率過程論的モデル

確率過程論的モデルは、掃流砂礫の挙動をラグランジュ的に取り扱い、河床からの単位時間当たりの砂礫の離脱確率 (pick-up rate) と移動を開始した砂礫が再び河床に停止するまでの距離 (step length) との組み合わせによって記述した掃流砂モデルであり、Einstein¹⁰⁾によって考案された。ここでは、掃流砂の挙動解析に必要な pick-up rate, step length, それぞれの算定方法をまとめる。

a) pick-up rate

pick-up rate (以下、*p_s*で表す) についてはいくつかの評価式が提案されているが、本研究では中川ら¹¹⁾が力学モデルと実験的検証から推定した次式を採用した。

$$p_{s^*i} = F_0 \tau_{*i} \left\{ 1 - \left(\tau_{*ci} / \tau_{*i} \right) \right\}^3 \quad (5)$$

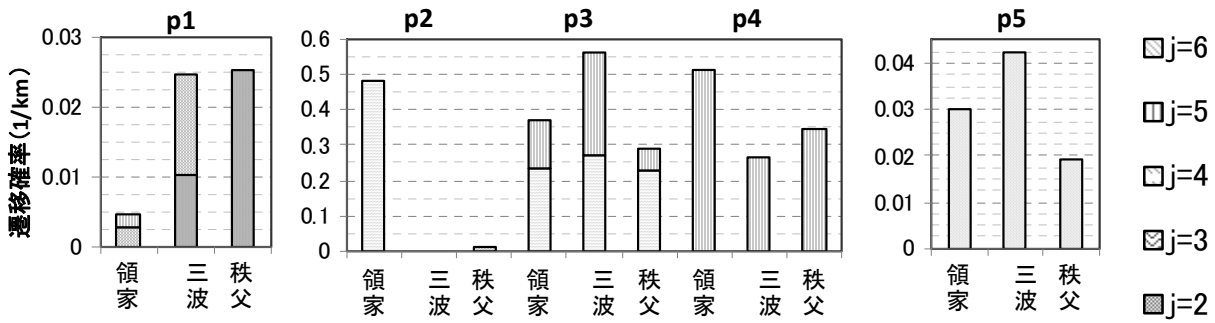


図-4 地質区分毎に異なる材料の摩耗・破砕特性（摩耗・破砕に伴う粒径集団間の遷移確率）

ここで、 p_{s^*} ：無次元pick-up rate， τ_* ：無次元掃流力， τ_{*c} ：無次元限界掃流力， F_c ， k_2 ， m は定数である．また，

$$p_{s^*i} = p_{si} \sqrt{d_i / (\sigma / \rho - 1)g} \quad (6)$$

$$\tau_{*i} = u_*^2 / \{(\sigma / \rho - 1)gd_i\} \quad (7)$$

であり、 d ：代表粒径， σ ：砂礫の密度， ρ ：水の密度， g ：重力加速度， u_* ：摩擦速度，添え字 i ($i=1 \sim n$)は粒径集団を表す．摩擦速度の算定にはManning則を用い、無次元限界掃流力は混合粒径による影響を考慮して、Egiazaroffの式を改良した芦田・道上¹²⁾による以下の式を用いた．

$$\tau_{*i} = \left\{ \begin{array}{l} \tau_{*0} \{ \ln(30.1\alpha) / \ln(30.1\alpha d_i / d_m) \} \\ 0.85 \end{array} \right. \quad (8)$$

ここで、 $\alpha=0.63$ ， τ_{*0} ：一粒径に対する無次元限界掃流力（中川ら¹⁰⁾と同様に0.035とした）， d_m ：平均粒径である．

ところで、式(4)は同平面上に砂礫粒子の重心が存在する理想状態を仮定し定めたものであるが、実際の河川では河床は鉛直構造を持っている．特に本研究のようにオーダーの異なる混合粒径を対象とする場合、この理想状態の適用は難しい．澤井ら^{13),14)}は、礫の鉛直構造が与える影響について実験的研究を行い、pick-up rateへの礫存在高さの影響を明らかにし、礫存在高さ z_m を用いて、pick-up rateの算定式を次のように改良した．

$$p_{si}(z_m) = \hat{p}_{si} \cdot 100^{z_m/0.8L_a} \quad (-L_a + d_i/2 < z_m < L_a + d_i/2) \quad (9)$$

ここで、 L_a ：交換層厚， \hat{p}_{si} ：代表pick-up rateであり、式(4)で与えられる．本研究ではこれを採用し、混合粒径河床における鉛直構造の影響を取り入れた．ただし、 z_m の分布については澤井¹³⁾の研究と同様に、平均河床面から交換層最深まで一様とした．

b) step length

step lengthについて、中川ら¹¹⁾は粒径の100程度の平均値と確率密度関数から定めている．また数値計算時には、計算区間長 Δx を最大粒径よりは十分大きく、最小step

lengthより十分小さい必要がある¹¹⁾．しかしながら、本研究で対象とする粒径および平均step lengthに対して想定する河川延長が非常に長いため、この条件を設定するのは難しい．よって本研究では、区間長 Δx を1cm程度の礫の平均step lengthである1mとし、step lengthが粒径によらずこのstep lengthによって流下するとして簡略化した．

中川ら¹¹⁾は、pick-up rateにより河床から離脱する砂礫量を、step lengthによりある区間への落下する砂礫量を与えているが、本研究でもこれを採用し、掃流砂の移動を表現するものとした．なお、前述したように、step lengthを粒径によらず一定としていること、後述する数値解析（1次元不等流解析）において、 Δx を1mとしていることから、いったん離脱させられた砂礫は、結果的に隣接する下流区間へ全て落下することになっている．

(2) 浮遊限界判定

表2のようにオーダーが異なる粒径集団を取り扱うには、流れに応じて各集団の運搬形態（掃流砂or浮遊砂）を認識する必要がある．浮遊限界摩擦速度は、粒子の沈降速度とおおよそ等しいとみなせることから¹⁵⁾、本研究ではこれを採用し、掃流砂・浮遊砂の区別を行ったうえで、浮遊した土粒子は再び河床に堆積しないものとして解析から除外することとした．沈降速度の算定にはRubeyの式¹⁶⁾を用いた．

(3) 摩耗・破砕過程

掃流砂礫の摩耗・破砕は河床や移動粒子同士の衝突によって発生すると考えられる．掃流砂は滑動、転動、跳躍によって輸送されるが、跳躍（落下）時の河床との衝突によってのみ摩耗・破砕すると仮定する．掃流砂モデルにおける落下砂礫については、式(1)を用いて落下量を算定し、砂礫の密度（2.65g/cm³）と体積（ $\pi d_i^3 / 6$ と仮定）を用いて落下砂礫の個数に変換し、新たな表面露出砂礫個数を推定する．

4．山地礫床河道を想定した数値解析

流下に伴う河床材料の細粒化現象における摩耗作用の影響を考察するに当たり、掃流力の縦断変化に着目する。掃流力縦断分布を河川形状の凹型傾向の強度によって制御するため、(1)凹型が顕著なケース (concave1)、(2)凹型が弱いケース (concave2)、(3)一定勾配 (uniform-gradient) を設定し、地質区分に応じた河床材料構成、磨耗・破砕特性との組み合わせによる9ケース (河川形状3パターン×河床材料構成、磨耗・破砕特性3パターン) を対象として、数値実験を行う。

(1) 解析条件

a) 水理・河道条件

本解析では、河道特性に支配的な洪水時 (中小規模の洪水を想定して単位幅流量 $q=1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ と仮定) における一次元不等流解析を実施する。対象河道は、試料を採取した、単相地質区分からなる仁柿川 (領家帯)、相津川 (三波川帯)、蓮川 (秩父帯) を想定した。数値地図50mメッシュを材料とするArc View 9.2 (ESRIジャパン) を用いた地理情報システムにより、河道の縦断形状を得た上で、各河道の縦断形状の凹型傾向を次式によって表現されるものとする、凹型傾向を表す係数 c は、仁柿川： 5.49×10^{-4} 、相津川： 4.93×10^{-4} 、蓮川： 3.22×10^{-4} と推定された。

$$z_b = z_{b0} \exp(-cx) \quad (10)$$

ここで、 x ：最上流測点からの距離、 z_{b0} ： $x=0$ における河床高である。これらの結果をもとに、モデル河道を(1)concave1: $c=5.5 \times 10^{-4}$ 、(2)concave2: $c=3.0 \times 10^{-4}$ 、(3)uniform-gradient: $c=0.0$ のように設定した。計算区間は、ある程度の摩耗作用が期待される流下距離および対象とした3支川の流路延長から10kmとした。図-5にはモデル河道の縦断図を、図-6には計算水深の縦断分布を示す。

b) 土砂供給条件・初期河床条件

上流端における土砂供給を確保するため、モデル河川の上流部に仮想的な一様勾配の1km区間長の河道を設け、この河道においても前述のモデルを適用する。ただし、この土砂供給区間の最上流は粒度不変とした。

計算開始時点の粒度分布は、田代ら (未発表) による対象3河道の現地調査の結果、最も地質による違いが顕著であった中流部のもの (図-7参照) を各河道の全域にわたる初期条件として与えるものとした。それぞれの地質区分の特徴としては、秩父帯の蓮川は石集団が多いのに対し、領家帯の仁柿川は細粒成分が多く、三波川帯の相津川はそれらの中間的な性質が見られた。

(2) 解析結果と考察

a) concave1

凹型傾向が顕著な河川形状の結果として、領家帯の平均粒径の縦断変化を図-8に示す。concave1では地質

帯間の粒度分布の違いが明確でなかったため、表層粒度分布と縦断分級が確認し易い平均粒径によって示した。

勾配の急変部 (3km地点前後、図-5参照) を過ぎた辺りから平均粒径の顕著な変化が確認されるようになり、6km地点より下流では顕著な細粒化が確認された。実河川でも遷移は急激で、勾配の変化に関係することが確認されており²⁾、この結果はそれを支持するものとなった。

b) concave2およびuniform-gradient

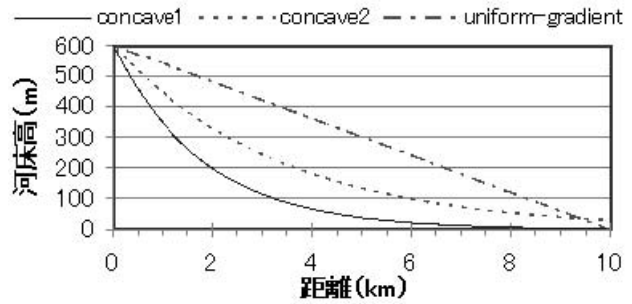


図-5 モデル河道の縦断図

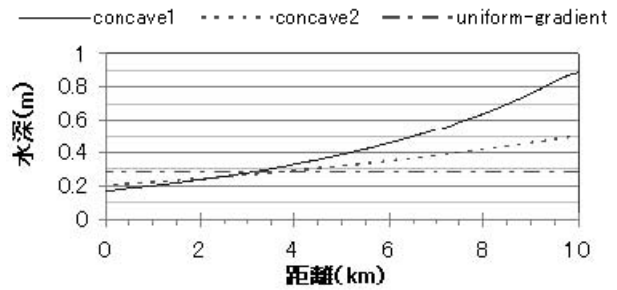


図-6 モデル河道における水深縦断分布

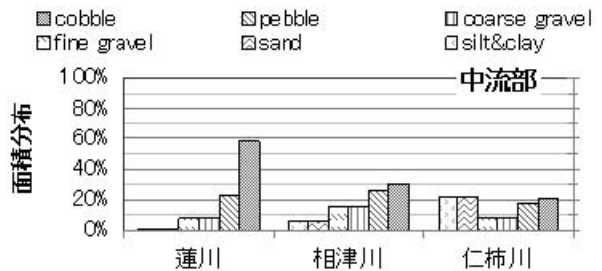


図-7 実河道における河床材料粒径集団の平面分布

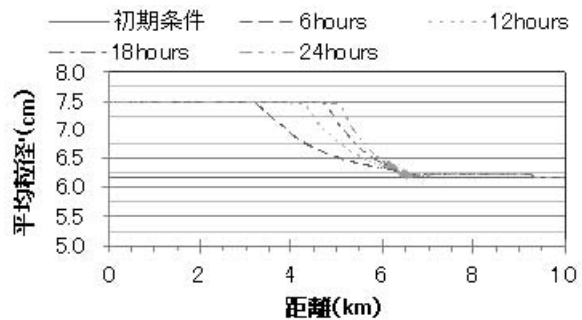


図-8 河床材料の平均粒径 (concave1, 領家帯)

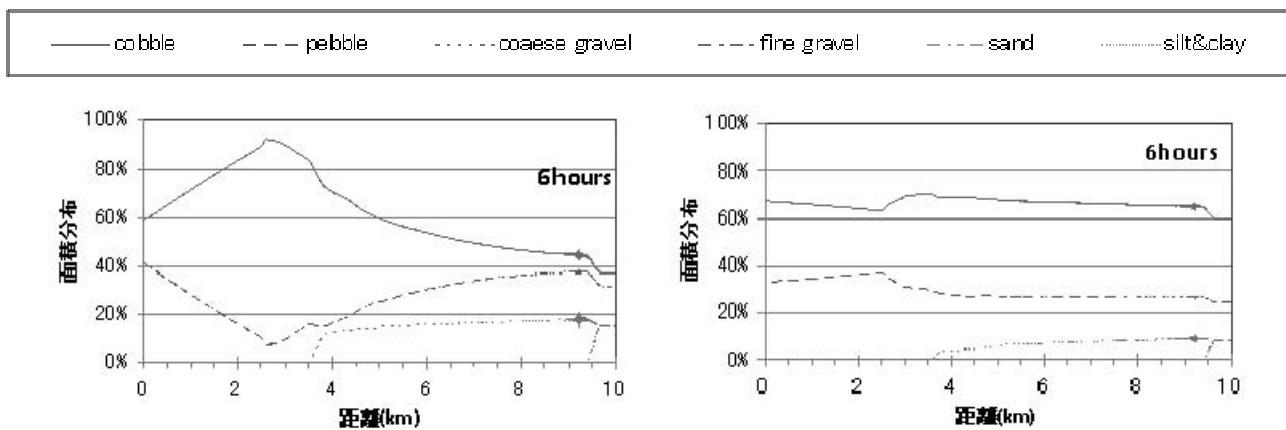


図-9 河床材料の表層面積分布 (concave2, 左:領家帯・右:秩父帯)

凹型傾向が弱い河川形状の結果として、河床材料の表層面積分布に大きな違いが現れた領家帯、秩父帯についての結果を図-9に示す。単純な細粒化を示したconcave1とは異なり、地質によって異なる縦断変化が確認された。前述の通り、領家帯は石集団が摩耗しにくく礫が摩耗しやすい一方で、秩父帯はその逆であったため、各流程における粒度分布に顕著な差が現れたものと考えられた。

以上の結果から、concave2では摩耗・破碎特性および初期粒度分布の違いが、縦断方向の粒度組成に影響し易いものと推察された。凹型傾向の弱い河川においては、摩耗・破碎作用の影響が河床材料構成に色濃く反映される可能性が示されたものと思われる。なお、これらの傾向は、本解析では水理学的分級の生じない、一定勾配河道においても同様に確認されたことを付記する。

5. 結論

本研究では、地質構成の異なる河床材料の摩耗・破碎特性について定量的評価を行い、確率過程論型の掃流砂モデルに組み込むことによって、河床材料の摩耗・破碎作用を考慮した掃流砂モデルを構築した。摩耗・破碎作用を粒径集団間の遷移確率に換算することにより、副産物の発生を含めて河床材料の粒度構成変化を記述できた。

開発したモデルを凹型縦断形状を呈するモデル河道に適用することにより、分級作用と摩耗作用の相対的な影響度が河川の縦断形状によって異なることを明らかにし、河床材料の縦断分級現象を考察した。実現象との比較には至らなかったが、地質構成や岩石の種類によって河床材料の粒度組成が顕著に異なる可能性を明示した。

参考文献

- 1) Frings, R.M.: Downstream fining in large sand-bed rivers, *Earth-Science Reviews*, Vol.87, pp.39-60, 2008.
- 2) Parker, G.: Selective sorting and abrasion of river gravel. 1: Theory, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.117, No.2, pp.131-149, 1991.

- 3) Parker, G.: Selective sorting and abrasion of river gravel. 2: Applications, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.117, No.2, pp.150-171, 1991.
- 4) 小玉芳敬: ERC - ABRASION - MIXERによる渡良瀬川の河床礫の破碎・摩耗実験, 筑波大学水理実験センター報告, No.14, pp.115-130, 1990.
- 5) 田代喬, 登立公平, 辻本哲郎: 流域地質構造が河床材料粒径性の流下方向変化に及ぼす影響, 河川技術論文集, Vol.14, pp.121-126, 2008.
- 6) Wentworth, C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, *Journal of Geology*, Vol.30, pp.377-392, 1922.
- 7) 矢部浩規: 河床内堆積有機物と河道物野環境の関係, 第61回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.419-420, 2006.
- 8) Bradley, W.C.: Effect of weathering on abrasion of granitic gravel, Colorado River (Texas), *Geological Society of America Bulletin*, Vol.81, pp.61-80, 1970.
- 9) 中川博次, 辻本哲郎: 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第244号, pp.71-80, 1975.
- 10) Einstein, H. A.: The bed load transport as probability problem, *Mitteilung der Versuchsanstalt fuer Wasserbau und Erdgenossischen Technischen Hochschule, Zürich, Switzerland*, 1937.
- 11) 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, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, pp.355-370, 1977.
- 12) 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, 1971.
- 13) 澤井健二: 掃流礫の分散過程に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第26号B-2, pp.395-408, 1983.
- 14) 澤井健二, 小久保鉄也: 掃流礫の分散過程に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, pp.455-466, 1984.
- 15) 例えば, 関根正人: 移動床流れの水理学, 共立出版, 東京, 2005.
- 16) Rubey, W.W.: Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, *American Journal of Science*, Vol.25, pp.325-338, 1933.

(2011.5.19受付)