

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656108

研究課題名（和文）

地質の異なる材料の分級・磨耗と水路の合流・分派を考慮した水系土砂動態モデルの開発

研究課題名（英文）

Modeling of Sediment Dynamics According to Geological Heterogeneity of River Basin with Particular References to Sorting, Abrasion and Confluence Processes

研究代表者

辻本 哲郎 (TSUJIMOTO TETSURO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20115885

研究成果の概要（和文）：本研究は、水流による砂礫の分級作用および砂礫の変態・磨耗作用が、山地河川の河床材料における縦断分級に及ぼす影響を明らかにしたものである。構成地質の異なる流域から生産・流出した砂礫を対象として、流砂の確率過程と磨耗・破碎機構を記述した土砂動態モデルを開発した。同モデルを適用した数値実験により、山地礫床河川の河床材料構成は、河床縦断形状、初期河床条件と材料の磨耗破碎特性に依存している可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：Most gravel-bed rivers show the longitudinal sorting on riverbed materials. This phenomenon is due to combination of the selective sorting and the abrasion in bed material transport processes. In order to clarify the mechanism of sediment dynamics in mountainous streams, we analyzed some gravel abrasion processes with laboratory experiments, and then developed the stochastic model of bed-load transport with gravel abrasion processes. Applying this model to some ideal rivers which have different concavities in their longitudinal profiles and different geologies in their watersheds, we examined that the longitudinal sorting of bed materials was dependent not only on the selective transport, but also on the abrasion processes characterized by the geology and lithology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	0	2,600,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,200,000	180,000	3,380,000

研究分野：河川工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：表層地質，材料の磨耗・破碎，土砂動態モデル，土砂の生産・流出，山地礫床河川，河床生息場所，地理情報システム

## 1. 研究開始当初の背景

流域に降り注ぐ降雨から始まり、地下水、河川、湖沼、海域へとつながる水・物質の流れは、人間を含めた流域圏の生態系を根幹から支えている。特に、水流と土砂によって形成される地形（物理基盤）、水・大気を介した移流・拡散と生産・呼吸などの生物活動による生元素の輸送・変換（物質循環）は生態

系の「両輪」といえる。持続可能で健全な流域圏の生態系を保持・修復するには、物質循環機能と関連付けて物理基盤を管理していくことが重要であるものの、これらを結び付ける因果関係の直接的な解明は難解であるため、生物の棲み処（生息場）として物理基盤を捉え、生態系を効果的に保持・修復することが現実的である。

山地で産出され、河道を経路として輸送される土砂は、水流を介して河床の生息場を形成し、河川・流域生態系の物理基盤を支持している。河床の生息場は、河川生態系の基盤となる一次・二次生産の主要な場であり (Allan and Castillo 2007)、表層の材料配分とその構成比により機能が異なるが (竹門ほか 1995)、これまでの水工学では、砂礫サイズは変化しない前提で河道内における流水による分級作用を重点的に取り扱ってきた。しかしながら、地質 (岩種) によって強度・脆さの異なる材料からなる河道への適用性は疑問が残るため (例えば、田代ほか 2008)、流域における地質構成や水路の合流・分派を加味した河床の生息場の形成・維持・更新機構の解明が必要と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、流域における土砂動態の総合的把握を目指したものであり、従来、取り扱ってきた河道内の流水による土砂の分級作用に加え、流下に伴う材料の変態・磨耗作用、流域内の水路の合流・分派による影響を明らかにし、生態系の基盤として重要な河床の生息場の形成・維持・更新機構の解明に資する知見を得るものである。

岩種構成や土砂の産出特性と関連付けるため、流域における表層の構成地質や地形特性から対象流域・河道を絞込み、現地観測と採取試料の分析から河床の生息場特性を調査する。取得した多層スケールの数値情報をもとに、地理情報システム (GIS) を援用した解析を行うことで、河床の材料構成の地理的変異とそこに成立する生態系の特異性を考察する。

## 3. 研究の方法

(1) 流域地質によって異なる磨耗・破碎現象  
従来の研究では岩種毎に磨耗破碎特性を検討しているが、流域スケールでの検討を想定していることから、本研究では地質帯によって区分した。

石礫の磨耗・破碎現象については、著者らが行ったコンクリートミキサーを用いた室内試験の過程を定量的、連続的に評価して記述した。すなわち、本研究では磨耗破碎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するものとした。ここでは、Wentworth の粒度階級を参考に、分級・磨耗による影響が顕著な石～砂利に着目して粒径集団を設定した。この粒径集団間の遷移という考え方により、各集団の重量の変化量は地質によって特徴づけられる。

ところで、実河川における磨耗・破碎作用が、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・破碎試験結果をモデルや実河川に適用するには試験時

間を移動距離に換算する必要がある。従来の研究では、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したがって、試験時間を移動距離へ換算した。

(2) 磨耗・破碎作用を考慮した掃流砂モデル  
掃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用いられている。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陽に解析でき、また、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磨耗破碎過程のモデル化が容易になる。ここでは、中川・辻本 (1975) の確率過程論的モデルを援用し、これに前述した磨耗破碎過程を組み込んで構築した掃流砂モデルの概要を紹介する。

### 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る。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 については、いくつかの評価式が提案されており、本研究では中川ら (1977) の式を採用した。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 (1971) による式を用いた。中川ら (1977) の式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、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。そのため、澤井・小久保 (1984) が導入した礫存在高さを用いて、混合粒径河床における鉛直構造の影響を取り入れることにより改良した。

#### b) step length

中川・辻本 (1975) は、step length の平均値と確率密度関数を関連付けているが、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場合、本計算においては、離脱した掃流砂礫は全て下流の隣接区間に落下するとし

て簡略化した。

## ②浮遊限界判定

粒径差の大きな河床構成材料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、本研究ではこれを採用し、掃流砂・浮遊砂を区別し、浮遊砂は解析から除外することとした。

## ③摩耗破碎過程

掃流砂礫の摩耗・破碎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・破碎すると仮定した。掃流砂モデルにおける落下砂礫については、落下量を算定し、砂礫の密度と体積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した。

## (3) 縦断形状が河床材料構成に及ぼす影響

流下に伴う河床材料の細粒化現象において、掃流力の縦断変化は分級作用の強さを左右するため、凹型傾向による分級作用と摩耗破碎作用の相対的な影響度は掃流力縦断分布によって変化すると考えられる。本研究では、(2)で開発したモデルを用いて次元不等流解析を実施することにより、掃流力縦断分布を河川縦断形状の凹型傾向の強度によって制御し、凹型傾向に対する感度分析を行った。

河道の縦断形状については、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得られる形状を基本とし、地質区分（領家帯、三波川帯、秩父帯）ごとに特有の凹型傾向を変化させて与えた。

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。なお、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（領家帯・仁柿川、三波川帯・相津川、秩父帯・蓮川）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。それぞれの地質帯の特徴としては、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。

## 4. 研究成果

(1) 流域地質によって異なる摩耗・破碎現象  
石礫の摩耗・破碎現象において、流域地質

によ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。  
□ 領家帯（深成岩）は摩耗しにくく、粗砂利・砂を生産している。

□ 三波川帯（変成岩）、秩父帯（堆積岩）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、ここでの石集団の質量減少率は  $10^{-3}$  ~  $10^{-2}$  の範囲をとり、小玉（1990）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。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。この際、質量減少率、副産物の粒度については、地質帯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帯による傾向は確認されなかった。

## (2) 縦断形状が河床材料構成に及ぼす影響

### ①粒度分布の縦断変化への凹型傾向の影響

初期条件で広い粒径が存在し、遷移確率が比較的大きく、両作用による粒度変化が顕著だと考えられる領家帯の結果から、凹型傾向の影響について考察する。凹型傾向が強まると、縦断的な勾配の急変に伴って粒度変化がより急激になっており、総じて上流では粗粒化が顕著であった。上流域では局所勾配が大きくなって掃流力が増し、pick up された砂礫が移動するために石集団のみが残存することになる一方、下流域では、上流から運ばれてきた砂礫が移動する際に摩耗・破碎して生じた細粒分が局所勾配が小さいために堆積することによって細粒化が進行するものと考えられた。この際、流下に伴う粗粒化から細粒化への遷移は、勾配急変点で生じることが確認された。なお、この傾向は他地質帯でも同様であった。

### ②摩耗破碎作用の影響

対象河道で確認された各所における粒度変化が分級作用、摩耗破碎作用のどちらに起因しているかを考察するため、摩耗破碎過程がない場合の同条件の結果と比較した。

解析結果より、上流域の粗粒化区間では両者の結果が大きく異なり、摩耗破碎作用により粗粒化が顕著になることが明らかになった。また、細粒化区間における摩耗作用と分級作用の影響度を対比したところ、凹型傾向が強いほど分級作用が支配的になることが分かった。

さらに、地質区分による違いについては、初期粒度分布条件および摩耗破碎時の粒径集団間の遷移確率によって規定されることから、以下のように分析された。すなわち、領家帯では、初期条件として広い粒度が存在

しており、石集団が相対的に摩耗破碎しにくく、礫以小の摩耗破碎しやすく、副産物も細かいことにより、上流域では礫以小は堆積せず流下するとともに、摩耗破碎作用により細くなるため、粗い石が残存した結果、粗粒化が表れ、下流域になると細かい砂が堆積するために細粒化が生じたものと考えられる。三波川帯でも同様に上流域では粗粒化が確認できたが、石が領家帯に比べて摩耗しやすく、その副産物である礫は摩耗しにくいために顕在化しなかったものと考えられる。また、その下流域では領家帯と同様の傾向を示した。秩父帯は、三波川帯と同様に、石が摩耗しやすいため、上流での粗粒化が顕著ではないが、初期条件において石集団が大きいいため、石が全区間にわたって広く分布し、下流域における粗砂礫以小の存在量が少なくなった。これは石集団が初期河床において多かったためだと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 五島暢太, 田代 喬, 辻本哲郎 (2012) : 流域地質の異なる河川における石礫の磨耗・破碎現象のモデル化に基づく河床材料の縦断変化に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, Vol. 68, No. 4, I\_907-I\_912.
- ② 五島暢太, 田代 喬, 辻本哲郎 (2011) : 構成地質の異なる流域から産出される河床材料の磨耗・破碎とそれが流下に伴う細粒化に及ぼす影響, 河川技術論文集, 査読有, Vol. 17, pp. 65-70.
- ③ 田代 喬, 栃木宏之, 高岡広樹, 辻本哲郎 (2010) : 集水域特性からみたダム上流域における土砂生産の評価, 河川技術論文集, 査読有, Vol. 16, pp. 71-76.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 田代 喬, 白垣裕美子, 辻本哲郎 : 地すべり地形及び河川流況を考慮したダム流域における流出土砂量の推定法に関する研究, 日本陸水学会東海支部会第 14 回研究発表会, 浜松, 2012 年 2 月 19 日.
- ② 小川隆文, 田代 喬, 辻本哲郎 : 流域特性と河川の水文・水質情報が底生動物群集に及ぼす影響に関する研究, 日本陸水学会第 76 回大会, 松江, 2011 年 9 月 23 日.
- ③ 田代 喬, 小川隆文, 辻本哲郎 : 河川の水文・水質および流域の特性に着目した底生動物群集の成立要因に関する考察, 応用生態工学会第 15 回研究発表会, 金沢, 2011 年 9 月 15 日.

- ④ Tashiro, T. and Tsujimoto, T. : Effects of Geological Heterogeneity in Watershed Area on Stream Macro-invertebrate Community, Advances in River Restoration Research (Proceedings of the Ninth Joint Seminar Between Japan and Korea on River and River Basin Restoration by Ecosystem Approach), Kanazawa, Japan, September 15, 2011, pp. 29-33.
- ⑤ 田代 喬, 大橋慶介 : 集水域特性からみた土砂流出に関する一考察, 土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会 2011, 米子, 2011 年 7 月 9 日.
- ⑥ 小川隆文, 田代 喬, 辻本哲郎 : 流域特性と河川の水文・水質情報が底生動物群集に及ぼす影響に関する研究, 日本陸水学会東海支部会第 13 回研究発表会, 長野県阿南町, 2011 年 2 月 20 日.
- ⑦ 田代 喬, 辻本哲郎 : 異なる表層地質を流域にもつ河川における底生動物群集, 応用生態工学会第 14 回研究発表会, 札幌, 2010 年 9 月 22 日.
- ⑧ Tashiro, T. and Tsujimoto, T. : Effects of Geological Heterogeneity in Watershed Area on Sediment Distribution and Benthic Macroinvertebrate, Proc. Ninth International Conference on Hydro-science and Engineering, Chennai, India, August 2-5, 2010, pp. 1269-1278 (10p. on CD-ROM).

[その他]  
講演 2 件

- ① 田代 喬 : 矢作川の土砂流出の特徴, 河川の土砂流出と底生生物に関する談話会～矢作川をフィールドとして, 河川環境管理財団名古屋事務所, 2011 年 2 月 18 日.
- ② 田代 喬 : 流域の地質構造と河床材料構成の関係について : 砂礫の元素組成, 磨耗・破碎特性からみた流下方向変化と生態的影響, 「流域からの流出土砂が河川に及ぼす影響」セミナー, 独立行政法人土木研究所自然共生研究センター, 2010 年 11 月 15 日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

辻本 哲郎 (TSUJIMOTO TETSURO)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号 : 20115885

##### (2) 研究分担者

戸田 祐嗣 (TODA YUJI)  
名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60301173  
田代 喬 (TASHIRO TAKASHI)  
名古屋大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号：30391618

(3)連携研究者なし