

流域地質構造が河床材料特性 の流下方向変化に及ぼす影響

EFFECTS OF GEOLOGICAL HETEROGENEITY IN WATERASHED AREA
ON TRIBUTARY SEDIMENT FLUX WITH SIZE AND ELEMENT
DISTRIBUTION OF SEDIMENT IN RIVER SYSTEM

田代 喬¹・登立公平²・辻本哲郎³

Takashi TASHIRO, Kohei NOBORITATE and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 三重県 県土整備部四日市建設事務所事業推進室
(〒510-0064 三重県四日市市新正4-21-5)

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

The present study is conducted for predicting tributary sediment flux in a river system with heterogenic topography, geology and lithology. Physicochemical characteristics of stream bed materials in the watershed area were clarified by analyzing field measurement of their topography and sediments and two kinds of laboratory experiments of these sediments by employing a concrete mixer and the X-ray fluorescence (XRF) spectrometer. We could relatively evaluate the amount of sediment supply from each tributary with the each size and element distribution of sediment (from sieving and XRF results) which was produced in its watershed contained various topography and geology in a river system.

Key Words: *Geology, topography, lithology, riverbed material, size and element distribution, X-ray Fluorescence Analysis (XRF), sediment flux ratio*

1. はじめに

山地の崩壊による土砂の産出形態は、表層地質や地形、土地利用状況によって異なり¹⁾、河道に供給される土砂の質的量的特性に影響を与えている。また、砂防・治山事業など流域管理の視点では、流域からの土砂生産量の見積が重要な意義をもつ場合も少なくない。既に著者らは、同程度の面積や地形特性を有する流域を流れる小河川の材料比較から、流域地質によってその粒度や景観が異なることを示したが、比生産土砂量との対応は不明であり、流下や支川流入を考慮した場合の縦断的な粒度変化のメカニズムの解明には至らなかった²⁾。

流域からの生産土砂に関する知見としては、ダム堆砂量の経年変化に着目した事例が多く³⁾⁵⁾、国単位の広い地域のデータを対象に検討した報告がある一方で³⁾⁵⁾、流域を流れる河川の河床材料の礫種構成の変化に着目するなど比較的狭い地域を対象とした例もある^{6) 7)}。が、いずれの事例においても、表層地質による影響に言及しているものの、系統的な記述がなされているとは言い難

いのが現状である。ところで、地球化学の分野では、表層地質や岩種によって河床材料の構成元素が異なることが知られているが⁸⁾、最近、島谷ら⁹⁾は、河床材料細粒分の元素構成比率を説明変数とする多変量解析により、海域への供給土砂の起源について考察している。

こうした経緯を踏まえ、本研究では複合的な地質構造を有する流域で生産され、上流から運搬されてきた土砂の本川下流域、海域への砂礫分供給機構の解明を目的とする。具体的には、流域における表層地質の構成と岩石の変態に着目し、河床材料を対象とした現地調査、破碎・磨耗試験、構成元素の分析に基づいて、河床材料の生産起源と流下過程の推定手法を考案するものである。

2. 対象流域と現地観測方法

(1) 研究対象流域の概要

三重県松阪市を流れ伊勢湾西岸に注ぐ一級河川・櫛田川を対象流域とした。櫛田川は河口干潟が発達し、流域からの土砂供給量が豊富な河川と認識されている¹⁰⁾。

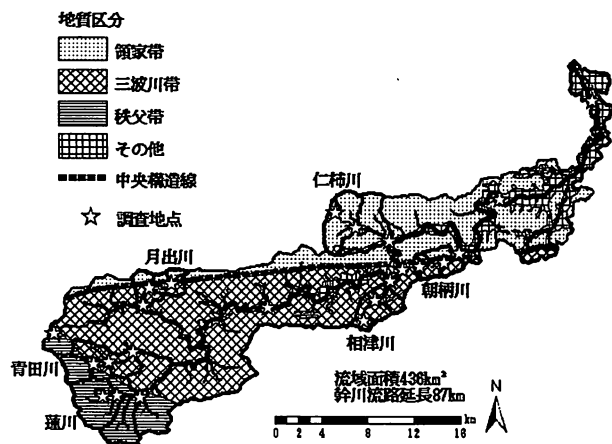


図-1 櫛田川流域の概要

流域の表層地質は、本川に沿うように東西に位置する中央構造線を境として、北側に領家帯（内帯）、南側に三波川帯・秩父帯（外帯）が分布している（図-1参照）。各表層地質の主構成岩は、領家帯が火成岩（主に花崗岩）、三波川帯が変成岩、秩父帯が堆積岩となっている。

(2) 現地観測地点の選定と方法

調査場所は、Arc View 9.2 (ESRI Japan製) を用いた GIS (Geographic Information System) により、流域の数値地図（国土地理院発行、数値地図25000空間データ基盤）、地質図（産業技術総合研究所地質調査総合センター提供）を解析して選定した。本川の流程に沿った6箇所に加え、これに合流する主要な支川のうち、単一地質3流域（蓮川、仁柿川、相津川）と混合地質3流域（月出川、青田川、朝柄川）の計6河川（流域面積が10km²程度以上）において、各河川の源頭部、合流前とその中間点の各3箇所である（本川、支川合計24箇所）。

現地では、瀬・淵のスケールや勾配といった河道特性を把握するために地形測量と、土砂の堆積量を把握するために測量点での検土杖試験を行った。また、河床材料は、瀬を構成する大礫成分（64mm～256mm）、淵に堆積した砂礫をそれぞれ複数地点（N=4）で定量採取した。

実験室に持ち帰った材料は、大礫は、そのサイズ・質量と岩種を、砂礫分は、粒度分布を調べた後、極細粒分（粒径0.075～0.85mm）については、コンクリートミキサーを用いた破碎・磨耗試験（後記）と非破壊で元素組成を把握できる蛍光X線分析（後記）を行った。

3. 流域河床材料の粒度分布

(1) 粒度分布特性

地質による粒度分布の違いを把握するため、支川の流程に沿った粒度分析の結果を図-2に示す。単一地質流域では、いずれの調査箇所においても、仁柿川（領家帯）で細粒分が多く、蓮川（秩父帯）で他の地質に比べ細粒分が少ない。また、相津川（三波川帯）は、領家帯に準じた粒度分布を示す。混合地質流域については、調査箇所の代表的な地質の特徴を表現した粒度分布となった。

(2) 流下に伴う材料特性

単一地質流域（蓮川、仁柿川、相津川）を対象として実施した地形測量から求めた河床勾配と粒度分析の結果から算出した代表粒径（D50）の関係を図-3に示す。なお、ここでの河床勾配は、地形測量で得られた各横断面における最深点河床高の流下方向変化率で示す。河床勾配は、全河川で流下過程において程度に差はあるものの低下している。また、流下過程でD50は、秩父帯で他の地質に比べ粒径が大きく、領家帯で小さく、かつ、一定に推移した。河床勾配とD50の関係からは、源頭部において、仁柿川（領家帯）と蓮川（秩父帯）の河床勾配は同等であるが、D50には明確な差が表れた。また、仁柿川と相津川（三波川帯）では、D50の流下による差は小さいが、河床勾配には顕著な違いが確認された。流下によって河床勾配は減少しているが、D50の変化には傾向がみられないことから、河床材料の粒径特性は、河道内地形に必ずしも依存していないことが示唆された。

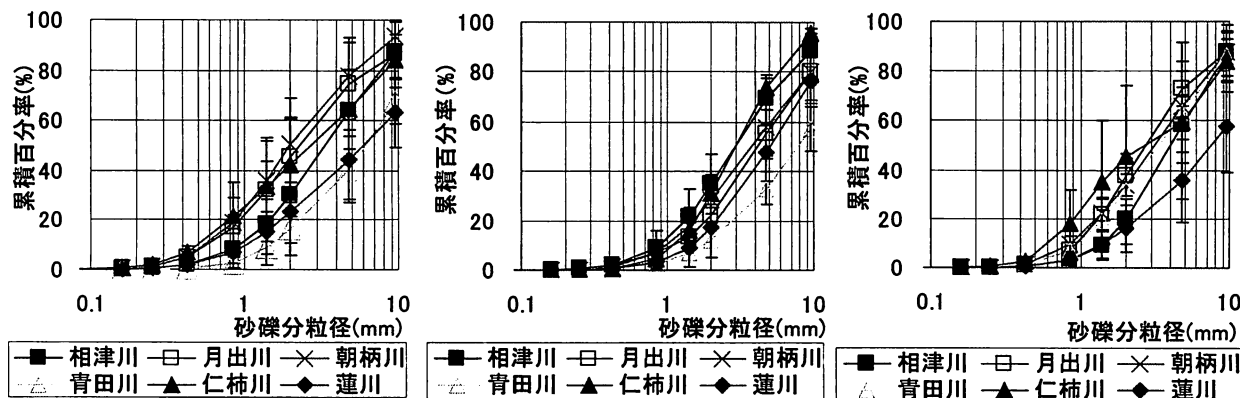


図-2 流域支川の粒度分布（左：源頭部，中：中間点，右：合流前）

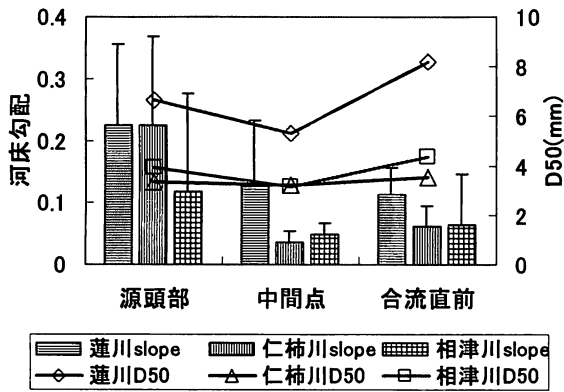


図-3 河床勾配と代表粒径 (D50)

次に、検土杖試験により淵に堆積した土砂と河床勾配の関係を図-4に示す、源頭部では、河床勾配によらず、堆積厚は15cm程度で土砂の堆積は少ないが、流下過程で河床勾配の減少とともに堆積厚は増加していく様子が確認された。また、合流前地点において、仁柿川(領家帯)は約90cmと他の河川に比べ、大量に堆積していた。以上から、地質構造や河道内地形によって流下形態が異なることで砂礫貯留量に差が生じたものと思われる。

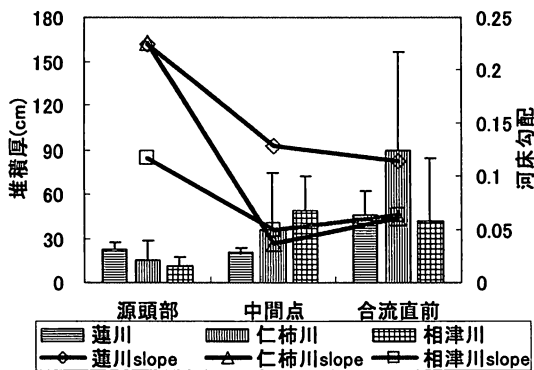


図-4 主要支川における堆積厚と河床勾配の流程変化

4. 流下過程での材料変態特性

(1) 試験方法

ドラム径が560mm、回転数が33回転/分のコンクリートミキサー(株式会社ナカトミ製MIX-500)に単一地質流域の源頭部で採取した大礫(64~256mm)と砂礫分を入れ、材料の破碎・磨耗試験を行い、回転させた時の時間経過における大礫の質量減少を計測した。さらに、試験後の試料について粒度分析を行った。本試験は、小菅・水山¹⁾の着想にヒントを得て高知県土木部海岸課²⁾を参考にしたものである。

(2) 結果及び考察

大礫の時間経過による質量減少率を図-5に示す。仁柿川(領家帯)の質量減少率は、ミキサーを約3時間回転(約10kmの流下に相当)させても30%程度であったのに対し、相津川(三波川帯)、蓮川(秩父帯)は、ほとんど大礫で50%以上であった。また、質量が減少している大礫は、早い段階で破碎し、その後、減少率は減速することが特徴的であったが、相津川は、他の2河川に比べ、質量減少が継続した。各河川の岩種は、必ずしも地

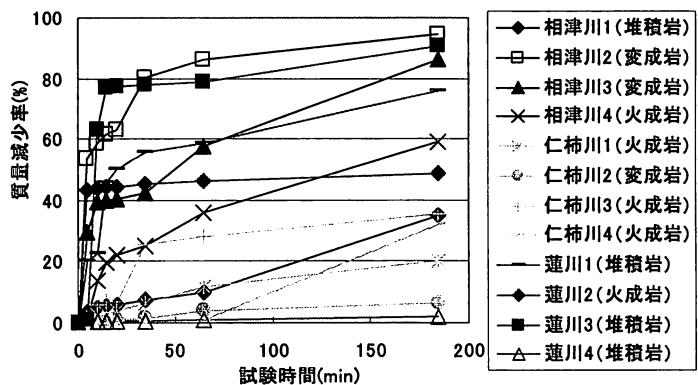


図-5 材料の破碎・磨耗試験による大礫の質量減少

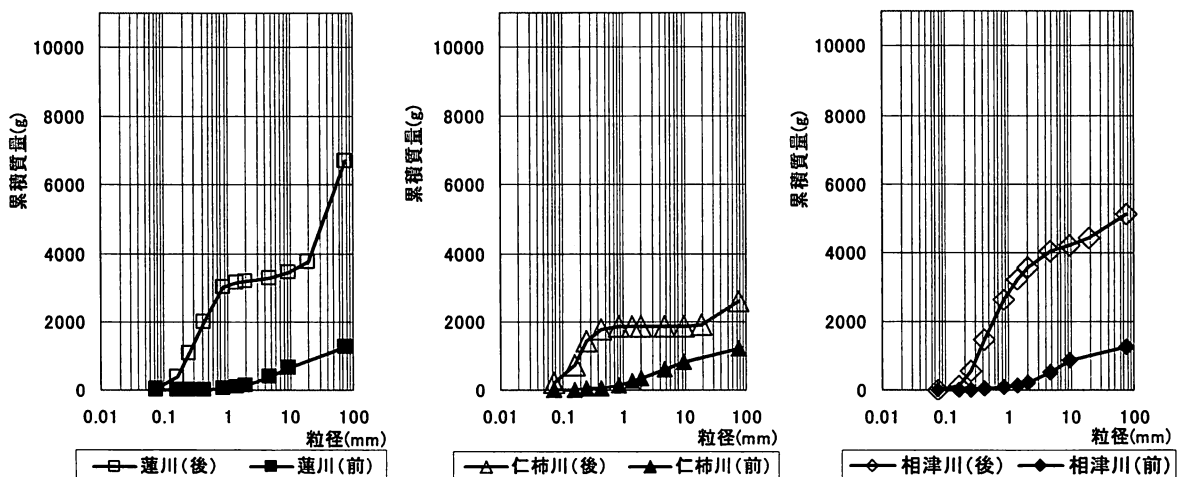


図-6 材料の破碎・磨耗試験による細粒分の分布特性変化

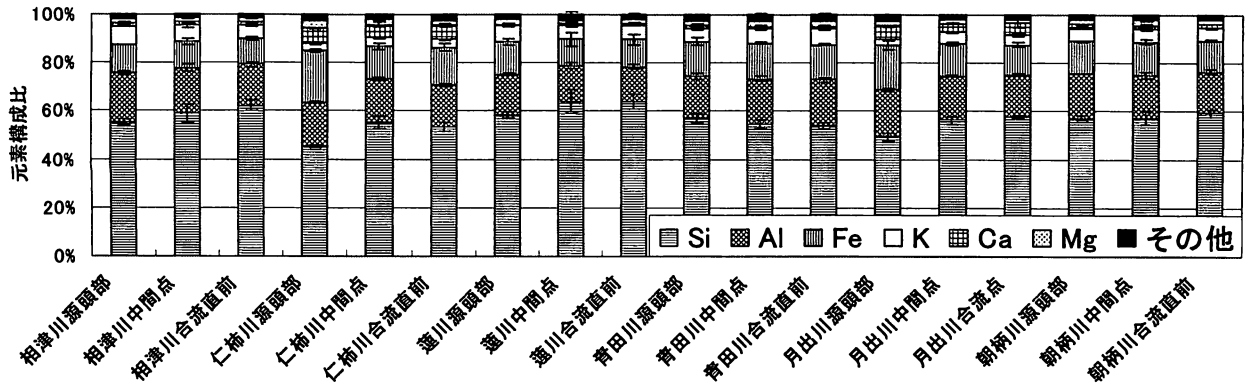


図-7 主要支川における河床材料の元素構成比

質構造の主構成岩と1:1に対応しないが、材料の形態変化は岩種による硬さ、もろさの違いに依存することが確認された。

図-6には、各河川の材料について試験前後の粒度分布変化を示す。試験後の粒度分布は、相津川（三波川帯）では、比較的なめらかな分布を示すが、蓮川（秩父帯）と仁柿川（領家帯）では、1mm以下と10mm以上の粒度区分が卓越しており、その間の材料はほとんど存在しなかった。各河川の材料変態特性について考察すると、相津川（三波川帯）は、早い段階から大礫が破碎・磨耗しており、時間の経過につれて収束することなく減少し、流下過程で比較的多様な粒度が派生したことから、大礫が継続的に破碎・磨耗を繰り返し、多様な粒径を含む材料を派生しながら運搬されるものと推察された。仁柿川（領家帯）は、他の2河川に比べ大礫は破碎・磨耗されにくかったが、これは、領家帯の主構成岩である花崗岩の風化部が崩れやすく細粒土砂を生産する一方で、未風化部は硬く崩れにくいといった特徴を有していることから¹⁾、未風化部である大礫は破碎されにくく、磨耗によって表面が少量剥離した結果、細粒分（1mm以下）を派生したと思われる。また、仁柿川（領家帯）のD50が流下過程で変化しなかった（図-3参照）のは、生産時に大礫と細粒分に二極化され、流下過程で変態しにくい材料特性が原因であることが再確認されたと考えられる。

5. 元素構成比を用いた砂礫の流出過程の分析

(1) 分析方法

河床材料の元素組成測定は、非破壊で分析可能な蛍光X線分析装置（島津製作所製エネルギー分散型蛍光X線分析装置RaynyシリーズEDX-700）を用いて分析した。試料は細粒径のものほど分析結果が安定することから⁹⁾¹³⁾¹⁴⁾、粒度分析により得られた極細粒分（粒径0.075～0.85mm）を分析した（計96サンプル）。

(2) 結果及び考察

支川調査流域における元素構成比を各地点のサンプル

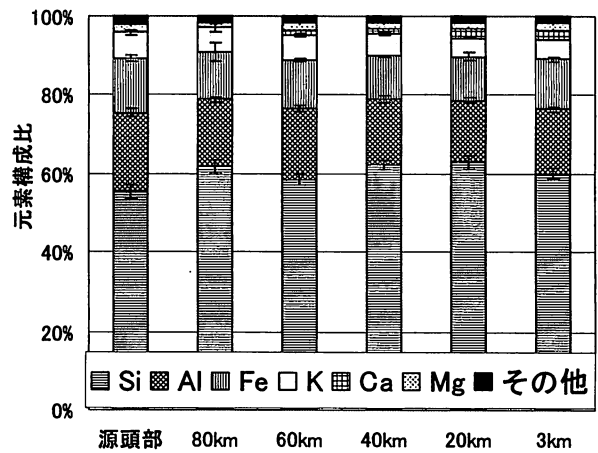


図-8 櫛田川本川における河床材料の元素構成比

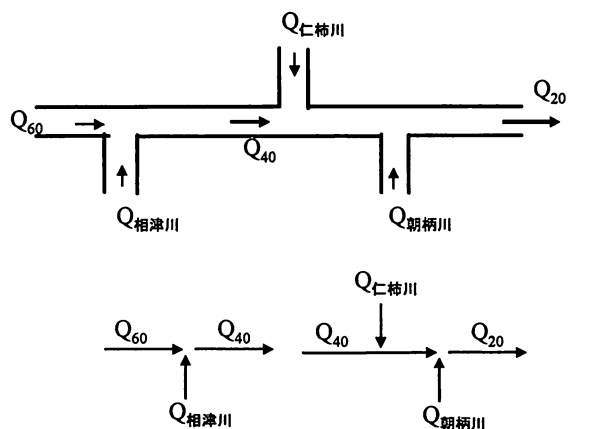
の平均値と標準偏差の形式で図-7に示す。どの地点もSi（ケイ素）、Al（アルミニウム）、Fe（鉄）の3元素で約9割を占めているが、単一地質で構成されている3河川（相津川、仁柿川、蓮川）の違いをみると、表層地質による特徴が確認された。すなわち、(1)秩父帯（蓮川）のSiは領家帯（仁柿川）のそれに比べ存在割合が多かった。これは、堆積岩流域の河床材料は、花崗岩流域のものに比べSiO₂に富むことによると考えられる¹³⁾¹⁴⁾。(2)地質構造によりCa（カルシウム）の存在割合に差異があり、花崗岩を主体とする領家帯は、Caが多く存在する¹³⁾¹⁴⁾が、櫛田川流域においても同様の結果が得られた。(3)本地域の領家帯は他の地質に比べ、K（カリウム）が少ないが、既往の資料¹³⁾に鑑みれば、櫛田川流域に分布する領家帯の特徴であると考えられた。また、流域が複数の地質構造からなる青田川、月出川、朝柄川では、同様に領家帯を含む河川（月出川）で他の河川（青田川）に比べCaが多く、Kが少なくなっていることが確認された。

このように、領家帯と三波川帯、秩父帯の間で違いが表れた元素組成の地質による特性をふまえ、本川流下による元素組成特性の変化を把握する。図-8に本川調査地点における元素組成を各地点でのサンプルの平均値と標準偏差の形式で示す。全体的には大きな変動はないが、

60km地点から下流においてはCa割合の増加が確認されるため、領家帯河川の流入が示唆される結果となった。

(3) 元素構成比に基づく砂礫流出比の推定方法

櫛田川流域の表層地質は、7割が領家帯と三波川帯で構成されている。そのため、下流域へ運搬される土砂は、これらの地質からの供給に大きく依存していると推測される。ここまでの、3では河道内地形に顕著な差異は見られないにも関わらず、領家帯（仁柿川）の貯留量が他の地質流域に比べはるかに多いことから、領家帯（仁柿川）は、土砂生産が盛んであると予想された。また、4では、三波川帯を構成している大礫は、流下によって破碎・磨耗を繰り返すことから、様々な粒径の土砂を下流へ供給する可能性が示唆された。そこでここでは、本川が三波川帯から領家帯に変化する河口から20km～60kmの区間を対象として、砂礫流出比の推定を行う。既往の研究では、構成岩種の組成を変数として砂礫流出比が推定されているが^{9,7)}、ここではそのアプローチを元素構成比に適用した。使用元素は、主要構成元素であるSi, Al, Fe, Ca, Kの5つの元素を対象とした。この5つの元素構成比を用いて砂礫流出比を推定するため、図-9の概念図のように、本川20km～40km区間と本川40km～60km区間に分けて、各元素の構成比と流出（流入）量を用いて流入・出の釣り合い式を立てた。ここで図中のQは流出量（流入量）、rは元素構成比を表しており、5つの元素からの組み合わせで式を選択し、それぞれ、20km地点と40km地点を基準とした砂礫流出比を求めた。その後、40km地点より上流の地点は、20km地点を基準とした比に置き換えた。本試算の前提として、合流により土砂は完全混合され、流入量と流出量は等しいものとした。また、釣り合い式を立てる際に選択する元素によっては、流出（流入）量がマイナスになる場合があるが、その場合は棄却するものとした。



40から60km区間

$$r_{Ca40}Q_{40} + r_{Ca仁柿川}Q_{仁柿川} + r_{Ca朝柄川}Q_{朝柄川} = r_{Ca20}Q_{20}$$

⋮

20から40km区間

$$r_{Ca60}Q_{60} + r_{Ca相津川}Q_{相津川} = r_{Ca40}Q_{40}$$

⋮

図-9 砂礫流出比推定モデルの概要

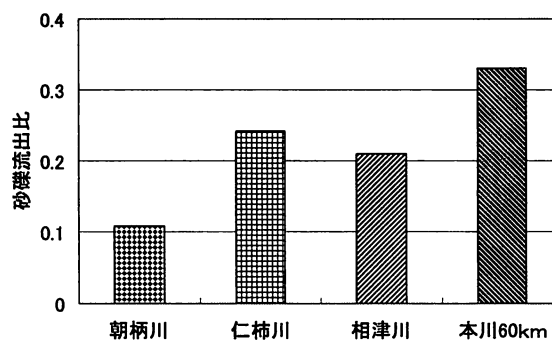


図-10 櫛田川流域における本・支川からの砂礫流出比

(4) 砂礫流出比の結果及び考察

河口から20km地点における供給砂礫量を「1」としたとき、それより上流で本川に流入する主要支川の供給砂礫への寄与率（砂礫流出比）を図-10に示す。図中の横軸の順序は、各支川が流入する本川の縦断距離と対応している（図-1参照）。本川60kmからの流出による寄与が大きく、流入する3つの支川では、顕著な違いはみられないが、仁柿川（領家帯）からの砂礫流出比が一番多くなっていた。次に、サイズ依存結果を除去するために、砂礫流出比を流域面積比率（各流域面積/本川20kmの流域面積）で割ったものを図-11に示す。図より、相津川（三波川帯）の寄与が大きく、次いで、領家帯と三波川帯で構成されている朝柄川の順となっており、仁柿川（領家帯）は小さかった。この結果と破碎・磨耗試験の結果を併せて考察するに、三波川帯は河床に堆積・貯留されている土砂がそれほど多くないが、上流で

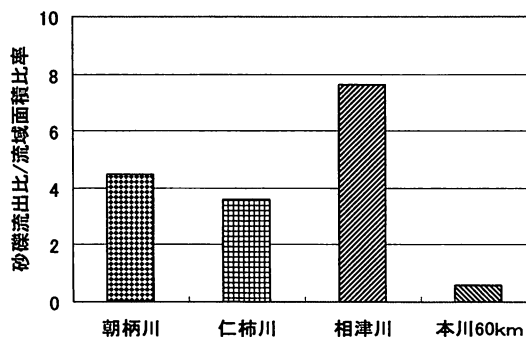


図-11 単位流域面積当たりの砂礫流出比（比生産土砂）

生産された大礫の多くも流下過程で破碎・磨耗を繰り返しながら細粒化して、本川下流域へ土砂を供給しており、下流域に現存する河床材料の構成に大きく寄与している

ものと考えられた。一方、領家帯は、産出材料が細かく、河床に貯留されている土砂が多いことから、流下によって下流へ運搬されやすいと推測されるものの、領家帯の大礫は、破碎・磨耗がしにくいことから、土砂生産時に細粒分が多量に生産されるが、流下過程での派生が少ないことで本川下流域に現存する河床材料に対する寄与はそれほど大きくならなかったと推察された。

6. おわりに

本研究により得られた主たる知見を以下に示す。

- 1) 河床材料は、領家帯（仁柿川）で細粒分が多く、秩父帯（蓮川）では粗粒分が多く産出され、流下過程でも同様の傾向を示した。また、領家帯（仁柿川）は、流下過程で細粒分粒度に変化が認められなかった。
- 2) 河床材料の堆積厚は、相対的に緩やかな勾配を呈する地形である合流前地点では各河川で堆積厚が増加した。とりわけ、仁柿川（領家帯）は極端に堆積していた。
- 3) 材料の変態特性として、秩父帯（蓮川）と三波川帯（相津川）で大礫の破碎が激しいが、領家帯（仁柿川）では、破碎されにくかった。また、秩父帯（蓮川）と領家帯（仁柿川）の粒度分布は細粒分と礫とに二極化するのに対し、三波川帯（相津川）は様々な粒度が派生した。
- 4) 河床材料の元素構成比は、領家帯で他の地質に比べ、Caが多く、Kが少なかった。
- 5) 元素構成比を用いた砂礫流出比推定の結果から、三波川帯（相津川）の比生産土砂が多いことが明らかとなった。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発（代表：名古屋大学辻本哲郎教授）」プロジェクトの一環として行われた。名古屋大学エコトピア科学研究所の鈴木憲司教授には、蛍光X線分析装置の使用に際して便宜を図っていただいた。同大学大学院環境学研究科地球環境化学専攻のSimon R. Wallis 准教授には、岩種の鑑定に関してご指導いただいた。同大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の佐藤圭輔研究員には、地理情報の整理に関する助言をいただいた。また、表層地質データは、産業技術総合研究所地質調査総合センターに提供いただいた。ここに記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) 例えば、相澤泰造：三重の地質と斜面リスクマネジメント、(財)三重県建設技術センター、120p, 2005.
- 2) 田代喬, 佐藤圭輔, 中村直斗, 登立公平, 辻本哲郎：流域の地質構造・地形特性に着目した河川景観の階層性の分析, 河川技術論文集, Vol.13, pp.279-284, 2007.

- 3) 井上大榮, 角田隆彦, 河村和夫, 友利方彦：わが国における地質別の崩壊特性と貯水池堆砂（その1）—地質から見た崩壊特性—, 応用地質, Vol.33, No.3, pp.1-10, 1992.
- 4) 岡野真久, 高柳淳二, 藤井隆弘, 安藤明宏：ダム貯水池流入土砂量に基づく堆砂管理についての考察—土砂生産量強度マップ開発の事例—, ダム工学, Vol.14, No.3, pp.167-176, 2004.
- 5) 長谷川浩一, 若松加寿江, 松岡昌志：ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布, 自然災害科学, Vol.24, No.3, pp.287-301, 2005.
- 6) 榎本政雄, 佐藤昭夫, 山本兼次, 岡田勝彦：神通川流域における河床堆積砂礫岩種別分類（第1報）—砂礫流出比計算の一方法—, 新砂防, Vol.20, No.3, pp.9-20, 1967.
- 7) 平林桂：河床材料の岩質組成の縦断変化に着目した笛吹川の小流域別土砂供給量の推定, 水工学論文集, Vol.44, 2000.
- 8) 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴（氏家）真澄, 岡井貴司, 立花好子, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃, 谷口政碩：日本の地球化学図—元素の分布から何が分かるか?—, (独)産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.
- 9) 島谷幸宏, 埜村和孝, 河口洋一：北川流域における堆積土砂成分の縦断分布, 河川技術論文集, Vol.12, pp.305-310, 2006.
- 10) 中条武司：伊勢湾南西部櫛田川河口干潟における微地形と堆積作用, 大阪市立自然史博物館研究報告, No.58, pp.69-78, 2004.
- 11) 小菅尉多, 水山高久：河床砂礫の流下に伴う粒径の減少に関する考察, 砂防学会誌, Vol.54, No.1, pp.39-47, 2001.
- 12) 高知県土木部海岸課：トンネルズリを河床材料として利用する取り組みについて, 総合的土砂管理システム, <http://www.pref.kochi.jp/~kaigan/dosyakanri/tonneruzuri.pdf>, 2007.
- 13) 山本鋼志, 田中剛, 川邊岩夫, 岩森光, 平原靖大, 浅原良浩, 金奎漢, Chris Richardson, 伊藤貴盛, Christian Dragusanu, 三浦典子, 青木浩, 太田充恒, 榊原智康, 谷水雅治, 水谷嘉一, 宮永直澄, 村山正樹, 仙田量子, 高柳幸央, 井上裕介, 川崎啓介, 高木真理, 根布悟志, 稲吉正実：愛知県豊田市北東部の領家帯花崗岩地域の地球化学図, 地質学雑誌, Vol.104, No.10, pp.688-704, 1988.
- 14) Ortiz E. and Roser B.: Geochemistry of stream sediments from the Hino River, SW Japan: source rock signatures, downstream compositional variations, and influence of sorting and weathering, 地球科学, Vol.60, pp.131-146, 2006.

(2008. 4. 3受付)