

大井川水系寸又川を対象とした岩相による土砂供給過程の研究 Geotechnical Research on Sediment Supply Processes of the Sumata River in the Oi River System

本郷太一¹，藤井幸泰²，齋藤杏菜³，棚橋舞大³，村上怜³

1 名城大学・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻・233433009@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻

3 元名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

概 要

急峻な地形を持つ寸又川流域は土砂生産が活発である。そのため、ダム堆砂が深刻化しており、適切な土砂管理方法の構築が求められている。本研究では、地質的特徴を考慮して供給土砂の量的・質的な詳細把握を行うことを目的とした。はじめに、土砂の量的な評価を行うため、地質毎の崩壊土砂量の算出を行い、砂泥互層から7割程度供給されていることが分かった。また、土砂の質的評価として岩石の強度試験ならびに流域の土砂試料に対する粒度試験を実施した。その結果、砂岩は流下に伴う強度変化が少なく選択的運搬作用が、泥岩は流下に伴って細片化する破砕摩耗作用が卓越していることが示唆された。

キーワード：点載荷試験，砂岩泥岩互層，総合土砂管理，斜面崩壊，土砂動態

1. はじめに

静岡県中央部を南北に貫流する大井川水系は、上中流域に日本有数の隆起速度を誇る赤石山脈をもち、急峻な地形が特徴である。また、流域の東縁には糸魚川-静岡構造線、西縁には中央構造線が存在し、2つの構造線に囲まれる大井川は複雑かつ脆弱な地質が広がっている。このような環境条件に加えて、上流部から中流部にかけて年降水量が非常に多く、斜面崩壊を誘発し、大量の土砂が河道に供給されている¹⁾。そのため、ダムが多数存在する本流域ではダムの堆砂が深刻化しており、土砂の連続性を確保する適切な土砂管理方法の構築が求められている。そのためには、河道に流入し、輸送されていく土砂供給過程における土砂の量的および質的評価をすることが必要不可欠である。

このような土砂供給に関する研究は、砂防学や水工学の分野で多く行われてきた。例えば、山野井ら²⁾は凍結融解やガリーといった土砂生産量の算出手法を示し、土砂供給・土砂輸送モデルと統合することで一連の土砂量の推定を行っている。また、村上ら³⁾は豪雨イベントで生産された土砂量とその粒度分布を整理し、土砂動態の推定を行っている。しかし、流域の河床構造に大きく影響を与える地質的観点から地質毎の土砂供給量やその土砂の岩質について詳細に実態を報告した研究は十分に行われていない。

そこで本研究では、土砂供給が活発な支川である大井川水系寸又川を対象地とし、斜面崩壊によって土砂が生産され、それが流下していく一連の過程について地質的特徴を考慮して検討する。はじめに、地理情報システム

(Geographic Information System : 以下 GIS と記す) を用いて寸又川流域の地形・地質的特徴の整理を行う。次に多時期の空中写真および衛星写真を用いて斜面崩壊地のトレースを行い、GIS を用いて崩壊地の経年変化を分析する。これにより、流域における地質的観点を含めた土砂供給の量的な評価を行う。さらに、現地調査を実施し、地山から河床の複数地点で岩石の点載荷試験ならびに粒度分析を行い、流下に伴う強度と粒径の変化から土砂の質的特性の変化を評価する。最後に、土砂の質と量の評価から寸又川流域における土砂供給過程について全体の考察を行う。

2. 寸又川流域の地質・地形

大井川水系は図1に示すように、複雑な地質を持つ。地層は四万十帯であり、中生代白亜紀から新生代第三紀にかけて形成された付加体で構成されている。四万十帯の構成層は北から南にかけて新しい地質年代となり、それらが帯状に配列している。対象とする寸又川流域では、上流部に混在岩を主体とする白根層群、中流部に砂泥互層(砂岩泥岩互層と泥岩砂岩互層の両方を指す、それぞれ先頭の岩種が優勢な互層を示す)を主体とする寸又川層群、下流部に混在岩を主体とする犬居層群が分布している。寸又川流域に分布する岩相の面積と割合を表1に示す。

大井川水系の上流部から中流部は、赤石山脈により急峻な地形を構成している。図2は基盤地図情報が提供する5mメッシュDEMデータを基に、GISを用いて寸又川の集水域における平均傾斜角度を算出したものである。図2を

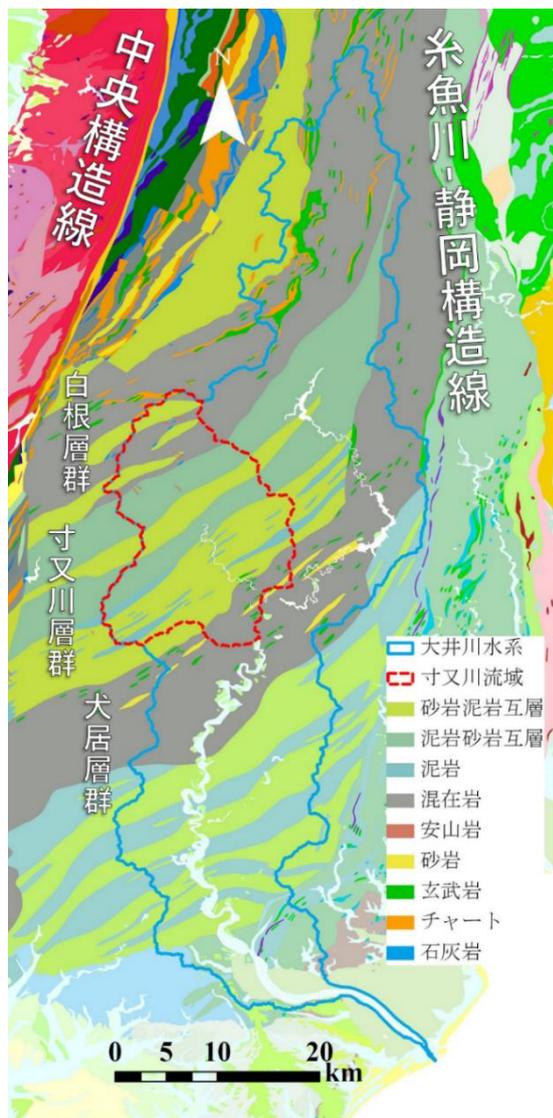


図1 大井川水系の地質図
(産総研の20万分の1シームレス地質図を使用)

表1 寸又川流域における岩相割合

岩相	流域内面積 (km ²)	流域内割合 (%)
砂岩泥岩互層	114.3	45.3
泥岩砂岩互層	66.2	26.2
混在岩	52.4	20.8
泥岩	15.8	6.3
玄武岩	1.2	0.5
砂岩	1.0	0.4
安山岩	0.6	0.2
チャート	0.5	0.2
石灰岩	0.4	0.1
合計	252.6	100

見ると、全ての集水域で平均傾斜角度が30°を上回っており、40°～42°の集水域も多数確認できる。このことから寸又川流域は急峻な地形を呈していることが示され、土砂供給のポテンシャルが高い寸又川の供給土砂量を把握することは、土砂管理において重要であることが分かる。

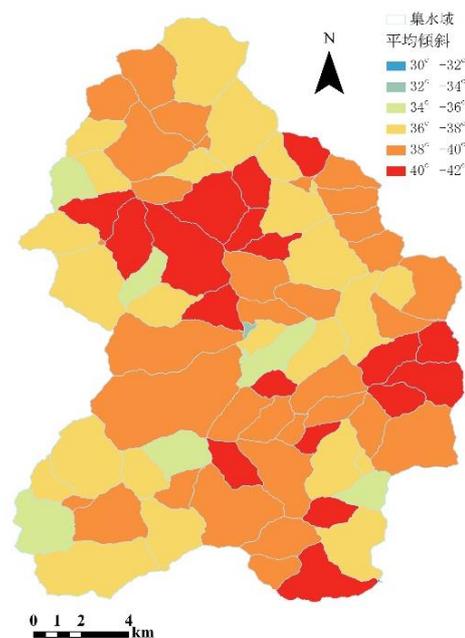


図2 寸又川流域の集水域における平均傾斜角度

3. 土砂生産量の評価

寸又川流域における土砂生産量を推算するため、多時期の空中写真と衛星写真を用いて崩壊地のトレースを行い、経年変化を分析した。使用した写真は、地理院地図で公開されている1976年、2013年の空中写真とGoogle Earth Proが公開している2015年の衛星写真である(図3)。トレース作業では解像度が最も低い1976年で正確に崩壊と確認できる最小の面積を1000m²と判断し、それ以上の崩壊面積を持つ崩壊地を各年代で抽出した(図4)。その後、崩壊実態調査⁴⁾の手法を用いて、時系列ごとに新規崩壊、崩壊地の拡大、継続、縮小、回復の5パターンに分け、崩壊地の個数集計を行った。また、産総研が提供する20万分の1シームレス地質図を基に、GISを用いて岩相と崩壊地の関係を分析した。結果を表2に示す。表に示される()内の数字は崩壊パターンの内、2つ以上の岩相をまたぐ崩壊地の個数である。

1976～2013年、2013～2015年どちらにおいても、砂泥互層、混在岩、泥岩で崩壊が活発に行われていることが明らかになった。安山岩やチャートは、表1の流域内面積に対して比較的多くの新規・拡大崩壊があるものの、実際に生産される土砂量としては僅かであると考えられる。

ここで、Guzzettiの経験式⁵⁾を用いて地質毎に生産された土砂量の推定を行った。Guzzettiの経験式を(1)に示す。 V は生産土砂量(m³)、 A は判読した崩壊面積(m²)である。

$$V = 0.074 \cdot A^{1.45} \quad (1)$$

トレースした崩壊地が2つ以上の岩相をまたぐ場合は、その崩壊地に占有する岩相の割合を算出し、土砂量に乗じて地質毎の土砂量を推算した。その結果を表3に示す。

流域全体の生産土砂量に対して約7割の土砂が砂泥互層から供給されていることが示された。このことより、砂岩・泥岩の質的特性の把握が重要であることが示唆された。

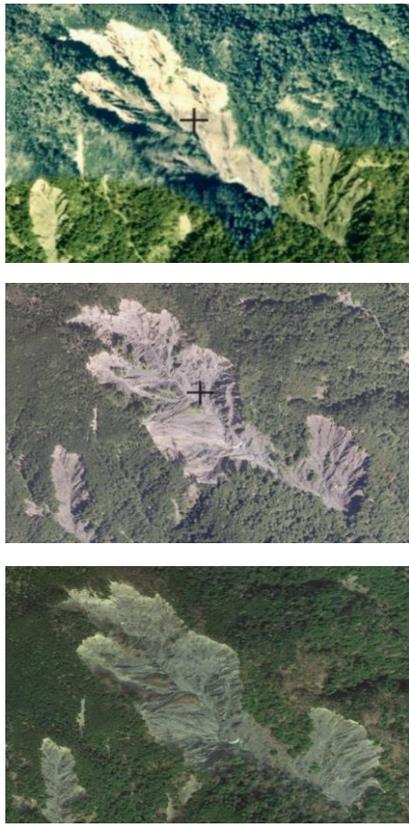


図 3 空中写真ならびに衛星写真
(上から 1976 年, 2013 年, 2015 年)

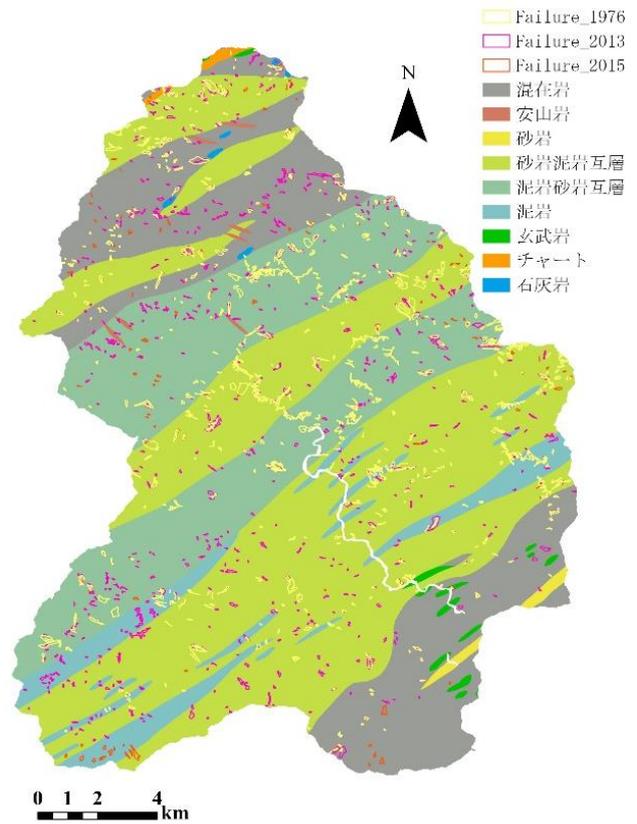


図 4 トレースした崩壊地
(1976 年, 2013 年, 2015 年)

表 2 2 時期における崩壊パターン (左1976年～2013年, 右2013年～2015)

	新規	拡大	継続	縮小	回復		新規	拡大	継続	縮小	回復
砂岩泥岩	190(30)	42(17)	59(8)	81(15)	154(30)	砂岩泥岩	33(5)	22(2)	294(65)	13(3)	12(0)
泥岩砂岩	155(12)	41(10)	24(2)	21(7)	98(12)	泥岩砂岩	24(1)	9(0)	220(27)	11(4)	1(0)
混在岩	96(10)	27(3)	21(2)	20(2)	39(4)	混在岩	26(4)	17(2)	122(12)	17(2)	8(1)
泥岩	60(20)	12(8)	8(4)	8(3)	29(19)	泥岩	10(3)	1(0)	86(35)	1(0)	0(0)
玄武岩	0(0)	2(1)	0(0)	0(0)	0(0)	玄武岩	0(0)	0(0)	1(0)	0(0)	1(1)
砂岩	1(1)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	砂岩	0(0)	0(0)	1(1)	0(0)	0(0)
安山岩	5(4)	2(2)	0(0)	0(0)	0(0)	安山岩	0(0)	0(0)	7(6)	0(0)	0(0)
チャート	3(3)	1(1)	1(0)	1(0)	1(0)	チャート	2(1)	0(0)	4(3)	2(1)	0(0)
石灰岩	2(0)	0(0)	0(0)	0(0)	2(2)	石灰岩	0(0)	0(0)	2(0)	0(0)	0(0)

表 3 2 時期における生産土砂量 (上1976～2013, 下2013～2015)

	砂岩泥岩	泥岩砂岩	混在岩	泥岩	その他	合計
生産土砂量 $V(m^3)$	5,010,354	4,076,755	2,169,482	1,515,659	55,044	12,827,295
割合(%)	39.1%	31.8%	16.9%	11.8%	0.4%	100%

	砂岩泥岩	泥岩砂岩	混在岩	泥岩	その他	合計
生産土砂量 $V(m^3)$	938,921	415,048	491,800	278,975	4,976	2,129,719
割合(%)	44.1%	19.5%	23.1%	13.1%	0.2%	100%

4. 岩石の強度試験

4.1 岩石の強度試験方法

斜面から供給され得る地山の岩石ならびに河床の複数地点で採取した河床礫の点載荷試験を行い、土砂の流下に伴う土砂の質的特性の変化を評価する。試料は、寸又川の林道（砂岩泥岩互層の分布域）で採取した砂岩ならびに泥岩の岩石試料と大井川との合流点から 2.2km, 9.2km, 11.5km, 20km 地点の河床で採取した砂岩ならびに泥岩の河床礫（土砂試料）を使用した（図 5）。試験方法は、地盤工学会で規定されている「岩石の点載荷試験方法」JGS3421-2012 に基づき実施した⁶⁾。岩石を規定のサイズに切断した後、約 240 個の岩石を点載荷し、採取場所と岩種ごとに分けて結果を整理した。結果の一例を図 6 に示す。

点載荷試験では非成形の岩石試料を用いる。そのため、同種の岩石であっても、供試体の体積、あるいは載荷軸に直交する最小断面積によって異なる破壊強度を示す。そこで、サイズの異なる試料に試験を実施し、等価コア径と破壊荷重の近似曲線を求め（図 6）、相関係数 $R \geq 0.6$ の場合、直径 50mm のコアに対するコア試験（ $D_e=2500\text{mm}^2$ ）から求められる点載荷強さ $I_{s(50)}$ を点載荷強度指数とした。一方

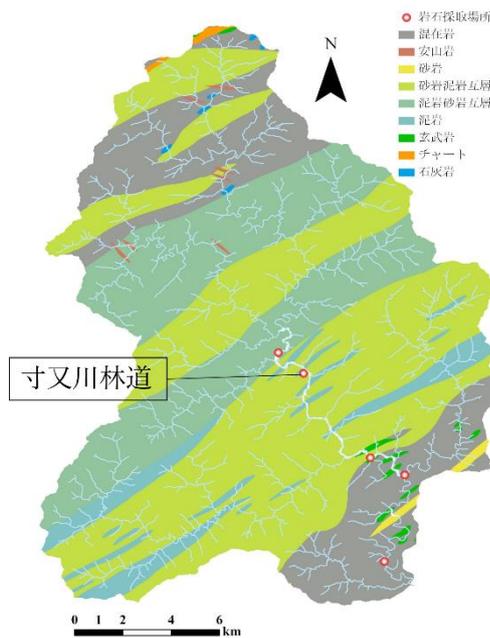


図 5 岩石の採取場所

で $R < 0.6$ と相関が弱い場合には補正係数 F を算出した後、補正係数 F とそれぞれの点載荷強さの積で補正を行い、全ての平均値をその岩石固有の点載荷強さとした。補正係数 F の算出式を式 (2) に示す。式中の D_e は試料の断面を円形に換算した際の直径である等価コア径を示す。

$$F = (D_e/50)^{0.45} \quad (2)$$

4.2 点載荷試験の結果

採取地点と岩種毎で整理した点載荷試験の結果を表 4 に示す。地山の土砂試料は砂岩、泥岩ともに相関係数 R が 0.6 を下回る結果となった。また、砂岩、砂岩礫と泥岩、泥岩礫を比較すると全ての地点において砂岩の土砂試料の方が大きい点載荷強度指数となった。

砂岩は、 $I_{s(50)}$ が 7.30~8.31(MN/m²) の強度を示し、最大と最小の差が 1.01(MN/m²) と流下に伴う大きな強度変化は見られなかった。一方で、泥岩は $I_{s(50)}$ が 4.45~7.78(MN/m²) と 3.33(MN/m²) の点載荷強度指数の幅をもっており、下流へ行くにしたがって強度が増加傾向にあることが見て取れる。

4.3 強度試験の考察

地山で採取した砂岩、泥岩において相関係数 R が低かった原因は、クラックを含んでいることが考えられる。地山では岩石が移動する機会は少なく、その場で風雨の影響を受けるため、河床礫より風化が進行した状態にあることが推測できる。また、全体の流下過程で考察すると、砂岩は強度の変化が少なく、大きな風化を受けることなく流下していると考えられる。一方、泥岩は粘土鉱物を多く含むため、流下過程でスレーキング等を引き起こしやすく、強度の高い部分のみが残され、強度増加していると推察できる。

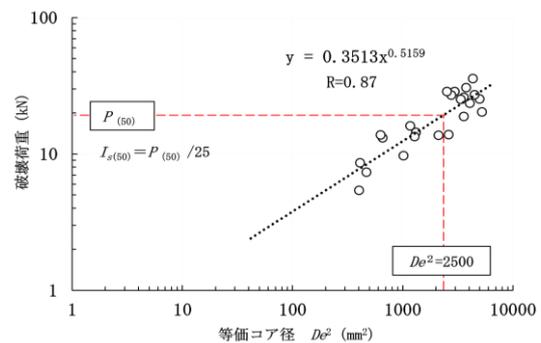


図 6 点載荷試験結果の一例
(砂岩 9.2km の結果)

表 4 点載荷強度指数 $I_{s(50)}$ の結果

岩種	地山砂岩	砂岩（河床礫）			
	採取場所	20km	11.5km	9.2km	2.2km
$I_{s(50)}$ (MN/m ²)	7.73	7.30	7.44	7.96	8.31
R	0.51	0.86	0.88	0.87	0.86
測定数	19	15	17	23	19

岩種	地山泥岩	泥岩（河床礫）			
	採取場所	20km	11.5km	9.2km	2.2km
$I_{s(50)}$ (MN/m ²)	4.45	5.46	4.89	7.01	7.78
R	0.25	0.92	0.72	0.86	0.79
測定数	53	16	19	29	31

5. 供給土砂の粒度分析

5.1 砂泥互層の露頭における土砂サイズの計測手法

2章と3章では、砂泥互層が流域に広く分布し、土砂供給量が多い岩相であることが明らかになった。ここでは、斜面崩壊が起こり得る砂泥互層の露頭を対象に、砂岩層部分の不連続面の計測を実施する。

図7は、砂泥互層の露頭を示している。図から、灰褐色の砂岩層と黒色の泥岩層が交互に堆積していることが確認でき、砂岩層部分は褶曲を受けて節理が明瞭に発達していることが確認できる。これら節理と層理面の不連続面により、砂岩層がブロック状に分離され、崩壊とともに砂岩礫に転じると推測できる。そこで、砂岩ブロックの節理間隔 (J) と層厚 (L) の計測を行い、ブロックサイズの把握を試みた (図8)。ここでは、寸又川の林道で確認できた4か所の砂泥互層の露頭を対象に計測を行った。

はじめに、現地調査でそれぞれの露頭を異なる角度から複数枚写真撮影し、SfM/MVS解析ソフトであるAgisoft Metashapeを用いて露頭の3次元モデルを作成した。次に、砂岩層の層理面に対して平行な角度から露頭を投影できるように設定を行い、正射投影したオルソ画像を作成した。最後に、画像解析ソフトImageJを用いて砂岩ブロックのJとLの計測を行った。この際、Jは上下、Lは左右のそれぞれ両端を測定し平均を算出した。



図7 砂泥互層の露頭の一部

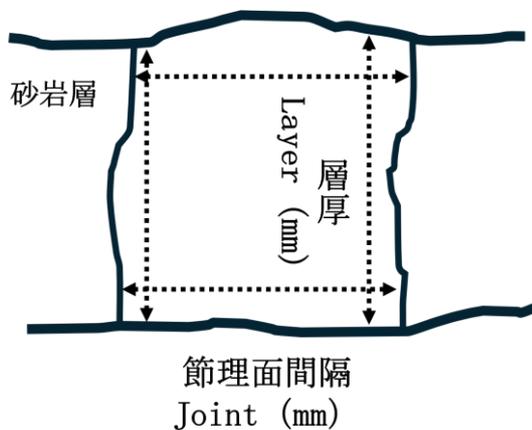


図8 節理間隔 (J) と層厚 (L)

5.2 土砂サイズの結果

測定結果より、J-Lの結果を図9に示す。既往研究⁷⁾と同様に節理面間隔と層理面間隔には相関係数 $R=0.89$ と高い正の相関がある。これは、砂岩の層厚の大きさに依存して節理面間隔が決定されることを示唆する。つまり、砂岩層の層厚程度の粒径を持つ砂岩ブロックが供給され得ることを示している。今回測定した露頭では、節理面間隔が約7~655mmの範囲で分布しており、層理面間隔は約6.7~515mmの幅を持っていることが示された。また、グラフを注目すると10~100mm程度のサイズに分布が集中していることが明らかである。

5.3 粒度分布に関する考察

図10は8地点の河床で線格子法を行った結果⁸⁾と砂岩ブロックの不連続面間隔を粒度分布に変換して示したものである。図9で分布が集中する10~100mmの範囲で粒径加積曲線はほとんど一致していることが分かる。このことから、砂岩は土砂供給の過程で大きく粒径を変えることなく存在していることが推測できる。

一方で泥岩層部分はスレーキングによる風化が進行しており、画像を用いた不連続面解析は行えなかった。しかしながら、泥岩層の層厚を計測すると、30~40mm程度のものが多く、調査した最大の層厚は100mmであった。したがって、泥岩は泥岩層以下の粒径で供給される可能性も示唆された。

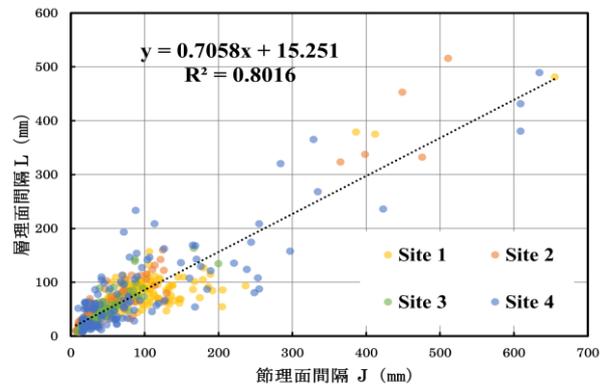


図9 J-Lの関係

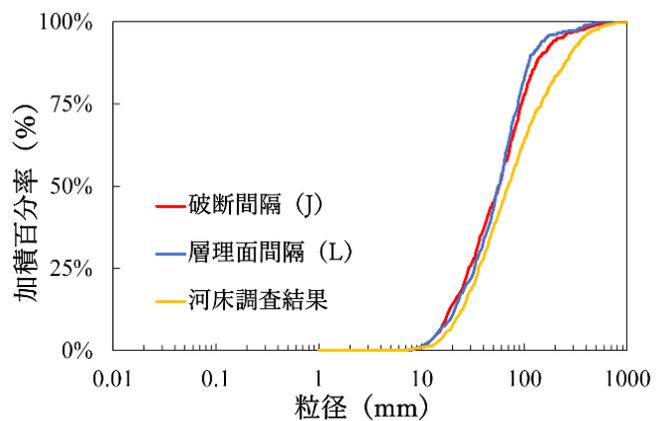


図10 砂岩の河床材料と砂岩ブロックの粒度分布の比較

6. まとめ

本研究では大井川水系寸又川を対象に地質的特徴を考慮した供給土砂の量的および質的評価を試みた。はじめに、流域の地形・地質に関して整理を行った。寸又川の集水域における平均傾斜角度を算出したところ、全ての集水域で 30° を上回っていることが示された。このことから、急峻で斜面崩壊を引き起こしやすい地形条件であることが分かった。地質に関して、GISを用いて分布面積の整理をしたところ、砂泥互層が流域全体の約7割を占めていることが分かった。また、Guzzettiの経験式も用いて供給土砂の量的評価をしたところ、流域における生産土砂の約8割が砂泥互層であることが明らかになった。このことから、砂岩および泥岩に注目し、土砂の質的特性の把握を行った。

土砂の質的特性の把握では、岩石の強度試験ならびに土砂の粒度分析を行った。岩石の強度試験では、地山と河床の複数地点で採取した岩石を対象に点載荷試験を行った。その結果、砂岩は地山から河床まで点載荷強度指数はおおよそ一定の値を示し、流下に伴う風化の影響は少なかった。一方で泥岩は地山から河床への流下に伴い、 3.3 (MN/m^2)程度の強度上昇を示した。これは、流下とともに岩石の弱い部分が破碎・細粒化し、強い部分が摩耗されて流下しているためだと推測できる。

粒度分析では、現地の露頭で撮影した砂泥互層の写真からオルソ画像を作成して砂岩層部分のブロック径を測定した。その結果、砂岩ブロックを構成する節理面間隔と層理面間隔の間に相関係数 $R=0.89$ の高い正の相関があることが分かった。これは、砂岩の層厚程度の粒径を持つ土砂が河道に供給され得ることを示唆している。さらに、河床材料の粒度分布との比較も行った。その結果 $10\sim 100\text{mm}$ で粒径加積曲線がほとんど一致していることが確認できた。これらの結果から、土砂供給過程において砂岩は粒径を保ったまま土砂輸送が行われる選択的運搬作用が卓越していることが推察できた。

謝辞

現地調査に当たっては、静岡森林管理署ならびに川根本町建設課より、林道通行などの許可や各種情報を頂いた。中部電力静岡水力センターの栗田晃男様からは、管轄されるダム周辺への立入や、ダム放流情報などを頂き、いろいろと便宜をはかって頂いた。名城大学理工学部教授の溝口敦子博士からは研究推進にあたって様々な討論を頂いた。紙面を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 藤田光一, 富田陽子, 大沼克弘, 小路剛志, 伊藤嘉奈子, 山原康嗣: 日本におけるダムと下流河川の物理環境との関係についての整理・分析, 国土技術総合研究所資料, 第445号, 2008.
- 2) 山野井一輝, 藤田正治: 土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用, 土木学会論文集 B1, Vol.70, No.4, pp.925-930, 2014
- 3) 村上泰啓, 中津川誠, 高田賢一: 豪雨による斜面崩壊で生産された土砂量の推定と河道における動態, 水工学論文集, 第49巻, pp.1081-1086, 2005
- 4) 柵木敏仁: 生産土砂調査としての崩壊実態調査, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 1, pp.62-66, 2004.
- 5) Guzzetti F, Ardzzone F., Cardinali M., Rossi M. and Valigi D.: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 279, pp. 222-229, 2009.
- 6) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会: 地盤調査の方法と解説, 公益財団法人地盤工学会, pp.448-459, 2013.
- 7) Bai, T., D.D.Pollard, D., Gao, H., Explanation for fracture spacing in layered materials, nature, Vol.403, pp.753-756, 2000.
- 8) 本郷太一, 藤井幸泰: 大井川水系寸又川の表層河床材料を対象とした土砂の流下特徴の把握, 令和4年度土木学会中部支部研究発表会, 2023.

Geotechnical Research on Sediment Supply Processes of the Sumata River in the Oi River System

Taichi HONDA¹, Yukiyasu FUJII², Anna SAITO³, Mahiro TANAHASHI³, Ryo MURAKAMI³

1 Graduate School of Science and Technology, Meijo University, 233433009@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 Graduate School of Science and Technology, Meijo University

3 Former undergraduate student of Meijo University

Abstract

The Sumata River basin, which is characterized by steep terrain, has active sediment production. Sediment accumulation in dams is a serious problem, and it's necessary to develop an appropriate sediment management strategies. This study aims to comprehensively understand the quality and quantity of supplied sediment, considering geological characteristics. Firstly, to evaluate the quantity of sediment supply, we calculate the amount of landslide-generated sediment supply for each geologic area. The results reveal that approximately 70% of the sediment supply originates from interbedded sandstone and mudstone layers. For the qualitative assessment of sediment, we conducted rock strength tests on sediment samples from the slope and river basin. In addition, particle size analysis has been done on sediment samples of river basin. As a results, sandstone has similar rock strength from the slope to river basin of downstream, it indicates that selective transport processes largely effect on sandstone sediment. On the other hand, the strength of mudstone has been increased from the slope to river basin of downstream. Therefore, breaking and abrasion mechanisms mainly effect on mudstone sediment.

Key words: Point load test, Alternating Layers of Sandstone and Mudstone, Sediment management,
Slope failure, Sediment dynamics