

大井川水系榛原川流域における土砂供給過程の詳細把握
Geological and Geotechnical Research
on the Sediment Supply Process of the Haibara River in the Oi River System

鈴木志信¹, 藤井幸泰², 溝口敦子²

1 名城大学・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻・203433002@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

概要

大井川流域は脆弱な地質により土砂供給が活発で、ダム堆砂による有効貯水容量の減少等が問題となっている。そこで本研究では、大井川水系榛原川を対象に、土砂供給の量的・質的評価を行い、土砂供給特性の把握を試みた。量的評価として、標高差分を基に斜面崩壊による崩壊土量の算出を行った。この結果、榛原川流域内では深層崩壊による崩壊地が存在し、ホーキ薙だけで2000年代に $1.46 \times 10^6 \text{m}^3$ が崩壊したことが明らかとなった。質的評価では粒度分析・岩種比率測定を行った。これらの分析対象として、土砂供給域と考えられる砂岩泥岩互層崩壊地、堆積域である榛原川河床とした。供給土砂は、崩壊地から流下するにつれ、60%粒径が大きくなり、砂岩の割合が増加することが示された。この結果から、崩壊地から供給される土砂特性に空間的变化が存在することを示した。今後は、対象崩壊地を追加し、榛原川流域の全崩壊土量の算出を行い、岩種割合の変化との関連性を明らかにしていく。

キーワード：土砂供給，土砂生産，砂岩泥岩互層，土砂管理，粒度分析

1. はじめに

静岡県に位置する大井川は、中央構造線と糸魚川-静岡構造線に挟まれ、年間数ミリ程度の隆起速度を持つ赤石山地を流域に含んでいるため、非常に脆弱な地質を有する。加えて、大井川支川の流域内に崩壊地も多数有している。このような地形・地質的条件により、大井川流域では斜面崩壊による土砂供給が活発である。また、多雨地帯でもあるため、上流域には多数の水系ダム群が設置されており、各ダムでの堆砂が深刻化している。これらに伴い、土砂供給による有効貯水容量の低下や出水時の水位上昇等が問題となっている。これらには供給土砂の質・量の把握やそのメカニズム把握が必要不可欠である。

河川への土砂供給過程に関する研究は、砂防学や水工学の分野において行われている。山野井は土砂生産モデルを用いて、土砂流出量の推定を行っている¹⁾。また、地質別の土砂生産ポテンシャルを評価する研究も行われている²⁾。斜面崩壊過程に関する研究では、応用地質や地すべり学の分野で研究が行われている。大丸らは、ホーキ薙などの崩壊地を対象に、多時期の衛星写真の比較により斜面崩壊過程の把握を行っている³⁾。しかし、斜面崩壊を起因とする土砂供給過程に関する詳細把握は十分に行われていない。

そこで本研究では、流域内に崩壊地を多く有する大井川水系榛原川を対象に、斜面崩壊による土砂供給過程に関する量的ならびに質的な評価を行う。まず、地理情報システ

ム(Geographic Information System: 以下 GIS と記す)により、流域の地形・地質条件の把握を行う。次に多時期の衛星写真から作成した数値表層モデル(Digital Surface Model: 以下 DSM と記す)により、斜面崩壊の経年変化状況と崩壊土量の算出を行う。そして榛原川流域において現地調査を実施し、供給土砂の性質把握を行う。これら調査により、崩壊地～河床における供給土砂の材料特性の変化についても確認する。そして、崩壊土量算出や調査を踏まえ、榛原川流域における土砂供給過程に関する考察を試みる。

2. 榛原川流域の地質・地形

大井川上流域から中流域にあたる赤石山地を構成する地質は四万十帯である(図1)。四万十帯は白亜紀から中期中新世に形成された付加体で構成される。四万十帯構成層はおおよそ北東-南西方向の走向を持ち、北部に比べ南部の地質年代が若い。特に榛原川では、上流部は砂岩泥岩互層主体の寸又川層群、中～下流部は混在岩を主体とした大居層群が分布している(図2)。また、空中写真を用いた崩壊地判読を行った結果、流域内には約150か所の崩壊地が存在することが明らかとなった。判読崩壊地の面積、並びに地質別面積を表1に示す。この結果、砂岩泥岩互層の領域に崩壊地が多く分布しており、砂岩泥岩互層が土砂供給に影響を及ぼす可能性が示された。また、2013年度の静岡河川事務所航空レーザ測量業務により得られた数値標高

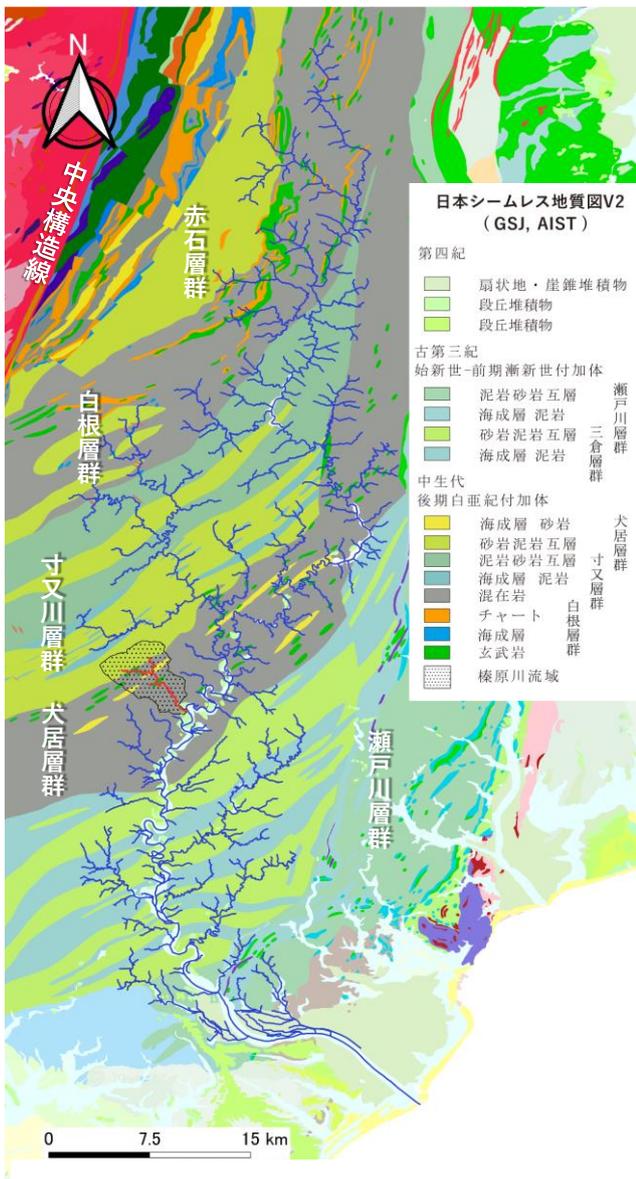


図 1 大井川流域の地質図

表 1 榛原川流域と崩壊地の地質別面積

	榛原川流域内		崩壊地内	
	面積(km ²)	比率	面積(km ²)	比率
砂岩泥岩互層	7.95	33.0%	0.39	68.8%
混在岩	14.39	59.8%	0.16	27.7%
玄武岩	0.66	2.7%	0.01	2.4%
砂岩	0.92	3.8%	0.01	1.2%
その他	0.16	0.7%	0.00	0.0%
合計	24.09	100.0%	0.57	100.0%

モデル (Digital Elevation Model : 以下 DEM と記す) を基に、地形の傾斜角の算出を行った (図 3)。流域内の傾斜角は最大 80 度程度であり、急傾斜地を多く有し、斜面勾配 30 度以上の崩壊地も多く存在する。

3. 供給土砂の量的評価

前章から、榛原川流域には多数の崩壊地が存在し、榛原

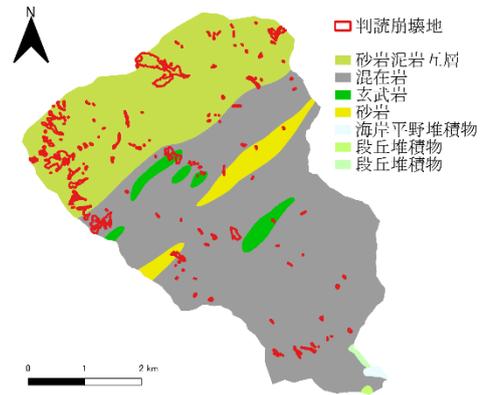


図 2 榛原川流域の地質図

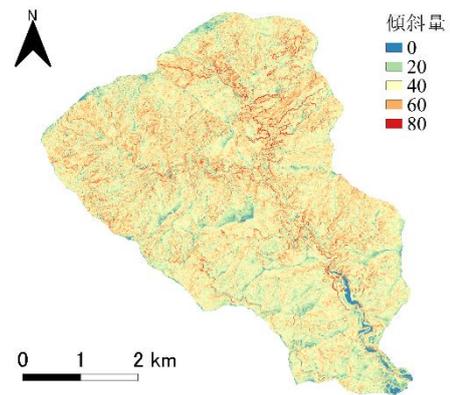


図 3 榛原川流域の傾斜量図

川における土砂供給に斜面崩壊が影響する可能性が示された。したがって、榛原川流域の斜面崩壊により供給された土砂量を把握する必要があると考えられる。そこで、写真測量や GIS を用いた斜面の崩壊土量の評価を行う。

3.1 多時期航空写真を用いた DSM の取得

既往研究において、源頭部に存在するホーキ薙で大規模な斜面崩壊が 2000~2006 年前後に発生したことが示されている³⁾。そこで、多時期の航空写真から榛原川流域内の DSM を取得し、斜面崩壊による供給土砂量を算出する。対象崩壊地は、源頭地のホーキ薙とする。これは流域内で最も大規模な崩壊地であり、投影面積も $1.54 \times 10^5 \text{m}^2$ と広く、土砂供給に対し強く影響し得ると考えられる。ここで空中写真から DSM を取得するため、写真測量ソフト Metashape を用いた。取得手順として、はじめに、空中写真を取り込んだ上で、焦点距離の設定などを行う。次に空中写真の位置推定を行い、写真中の特徴的な点を抽出する。そして写真上に位置情報を付与するため、地上基準点 (GCP : Ground Control Point) の位置座標を設定する。これらを基に、高密度な点群を作成し、三次元形状の復元を行う。最後に点群を基にメッシュを構築し、DSM が生成される。ところで、DEM は地盤高さのモデルとされ、DSM は建物や樹木を含んだ地球表面高さのモデルとされるが、供給土砂量推定をはじめとする地形解析には一般的に DEM が用いられている。しかし、2013 年度の DEM と空中写真から

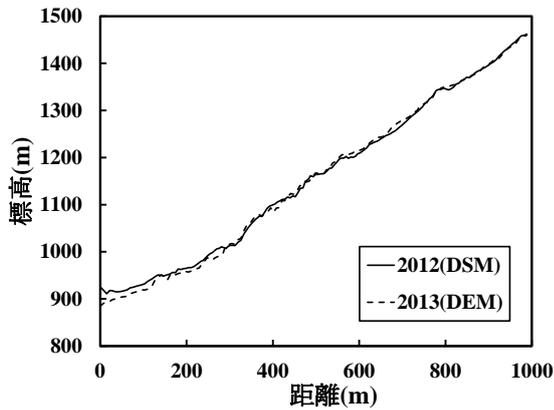


図 4 DSM と DEM の比較

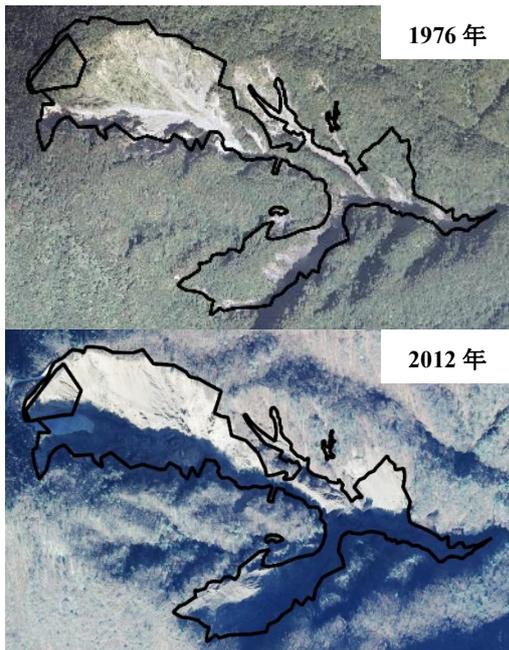


図 5 ホーキ薙における斜面崩壊の変化

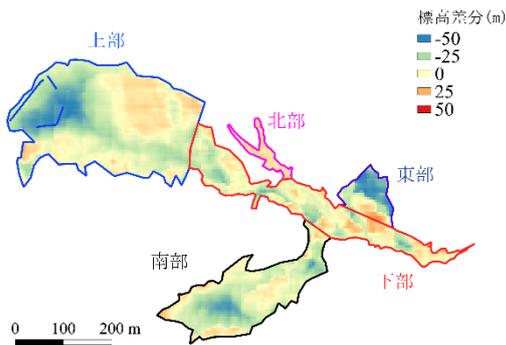


図 6 ホーキ薙の標高差分

表 2 ホーキ薙各領域の平均崩壊深と崩壊土量

領域	面積 $A(\text{m}^2)$	崩壊深 $h(\text{m})$	崩壊土量 $V(\text{m}^3)$
上部	75,267	10.6	800,565
下部	32,625	4.8	157,973
南部	34,208	10.6	361,078
東部	8,359	20.5	171,615
北部	3,514	-9.0	-31,560
合計	153,973	-	1,459,672

取得した 2012 年度の DSM を用いて、ホーキ薙の地形断面図を作成し、比較を行ったところ、崩壊地上部の誤差が 2m 未満であることが示された (図 4)。これは、2012 年のホーキ薙においては植生がなく、表層と地表面の標高差が極めて小さくなったためであると考えられる。加えて、過去の DEM は取得が困難であるといった点から、本研究では DSM を用いてホーキ薙の供給土砂量の推定を行う。

3.2 DSM による供給土砂量の算出

用いた空中写真は 1976 年、2012 年に撮影された 2 時期である (図 5)。差分の誤差を減少させるため、対象の崩壊斜面をそれぞれ、幅が 200m を超える上部、幅が 100m 程度下部、南部、東部、北部の領域に分割し、標高差分を抽出する (図 6)。これらの差分を斜面崩壊による崩壊深とし、以下の式で崩壊土量の算出を行う。

$$V = \sum A * h \quad (1)$$

ここで、 V は崩壊土量 (m^3)、 A は領域分割された崩壊地の面積 (m^2)、 h は領域の平均崩壊深 (m) である。崩壊土量の算出結果を表 2 に示す。合計の崩壊土量は、 $1.46 \times 10^6 \text{m}^3$ であった。崩壊深は北部を除く区域において、10m 以上が多く見られた。この結果は、ホーキ薙の地形変化過程を明らかにした既往研究との整合性が取れたと言える³⁾。区域ごとの土砂供給の特徴として、上部、南部での土砂供給が活発であることが示された。また、東部は 20m 程度の崩壊深であるが、区域面積が他区域に比べ少ないため、崩壊土量は下部と同程度である。加えて、下部は南部と同程度の区域面積であるが、崩壊土量は南部よりも少ない。これは、上部や南部、東部からの供給土砂が堆積したためだと考えられる。

4. 供給土砂の質的評価

4.1 崩壊源の岩盤の材料特性

ホーキ薙周辺には砂岩泥岩互層が確認できる露頭が数か所存在する。そこで、ホーキ薙から供給される土砂の材料特性の把握を行った。ホーキ薙に隣接する露頭での層理面の走向・傾斜は $N50^\circ E35^\circ S$ であった。北東方向の走向であり、周辺域の四万十帯と一致する。そこで、ホーキ薙上部に位置する露頭を対象に、砂岩泥岩互層における砂岩と泥岩の比率を算出した。図 7 は対象露頭で観察された層理面に対しほぼ平行な方向からの正射投影図である。白色を呈する層が砂岩層、茶色を呈する層が泥岩層であり、砂岩層と泥岩層はリズムカルな互層を示す。このような複数の露頭を撮影し、正射投影図として解析すると、砂岩:泥岩=62.4%:37.6%の比率であった。このことから、泥岩以上に砂岩が多く供給される可能性が示された。また、この画像範囲から砂岩層厚(T)と砂岩層中の節理間隔(S)を測定した (図 9, 図 10)。この結果、層厚

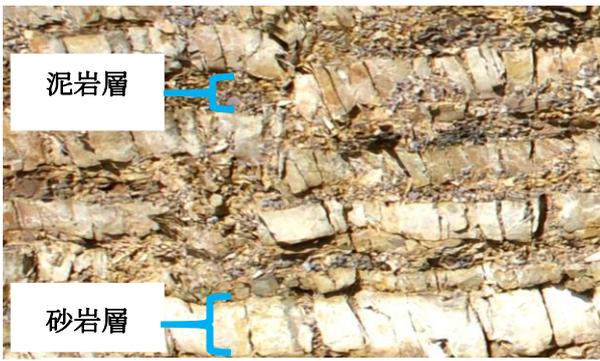


図 7 崩壊地周辺の露頭の正射投影図



図 8 榛原川の河床堆積土砂

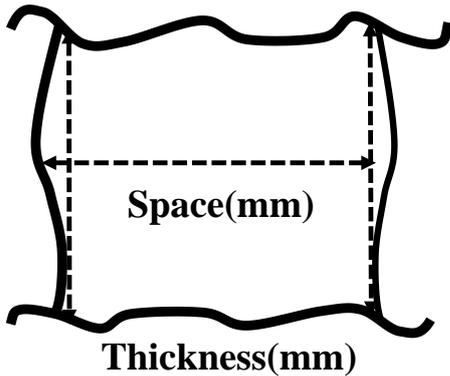


図 9 層厚 (Thickness) と破断間隔 (Space)

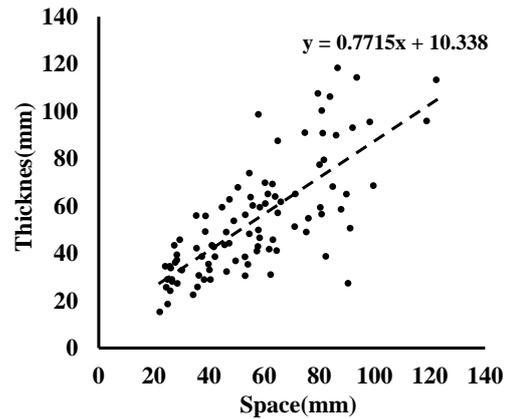


図 10 層厚と破断間隔の関係

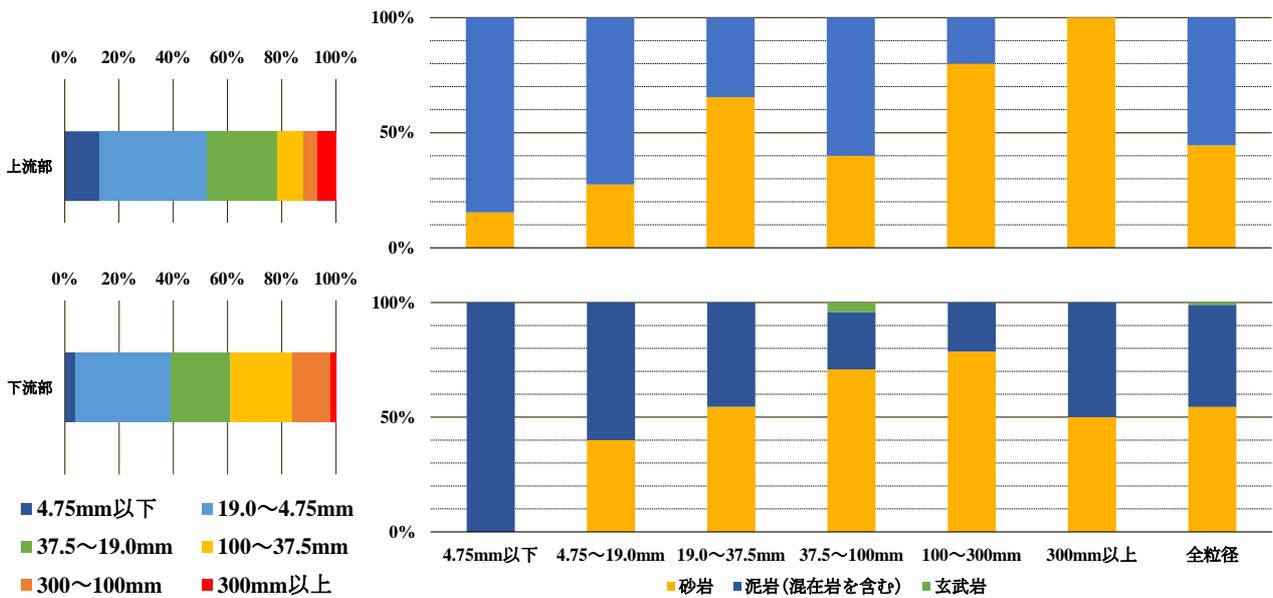


図 11 榛原川河床における粒度分布・岩種割合

と破断間隔はどちらも 20~120mm 程度であった。また、相関係数 $R=0.74$ であり、既往研究⁴⁾と同様、高い正の相関があることが示された

4.2 移送および堆積域の土砂の材料特性

榛原川河床の堆積土砂の粒度分布を、線格子法に基づき、榛原川上流部 (河口 10km 地点)、下流部 (河口 2km 地点) において測定した (図 8)。また、土粒子の色調や構成鉱物サイズを基にした、目視による岩種判定を行った (図 11)。ここで、混在岩の基質は泥岩であり、80~90%を含有

するため、37.5mm 以下では、泥岩と混在岩の判別が困難と考えられる。したがって、混在岩は泥岩として扱うものとする。その結果、河床堆積土砂の岩種は、主に砂岩と泥岩、混在岩が見られた。砂岩と泥岩の土粒子別比率は、下流部・上流部ともに、およそ 19.0~37.5mm で泥岩割合が砂岩割合よりも大きくなっている。また、上流部に堆積する土粒子の最大粒径は 450mm、下流部では 350mm であり、上流部と下流部で変化が見られた。また、粒度分布の変化を表すため 60%粒径 D_{60} を算出した。上流部で $D_{60}=22.1\text{mm}$ 、下流部で $D_{60}=37.1\text{mm}$ で、上流部に比べ下流部が大きい。

表 3 榛原川流域における岩種割合の変化

	砂岩	泥岩（混在岩含む）
崩壊地	42.9	53.5
上流部	44.6	55.5
下流部	54.5	44.6

4.3 材料特性の変化

3章からホーキ薙に露出する砂岩泥岩互層における砂岩層と泥岩層の比率が62.4%:37.6%であった。また2章から崩壊地の砂岩泥岩互層と混在岩の比率が68.8%:27.7%であった。これらを基に、崩壊地から上流部・下流部における砂岩と泥岩の岩種割合を表-3に示す。この表から上流部から下流部にかけて岩種割合が変化していることが示された（表3）。砂岩割合は崩壊地から下流に向かうにつれ増加している。対して泥岩割合は、崩壊地から上流部にかけてはやや上昇するものの、下流部には再度減少している。また、砂岩の粒径変化として、崩壊地の砂岩層からは20mm以上の粒径の土粒子が供給され、河床では19.0~37.5mmを境に砂岩の比率が減少している。

5. 土砂供給過程についての考察

これまでの地形解析や粒度分析、岩種判別を踏まえ、斜面崩壊による土砂供給過程を考察する。崩壊地に存在する土砂の粒径は、20~120mm程度の砂岩が存在する上、砂岩層未満の層厚である泥岩層も存在する。このため、砂岩に比べ小粒径の泥岩も供給されると考えられる。また、ホーキ薙周辺には250mmを超える巨礫も多く存在しており、上流部の河床にも同程度の巨礫が存在したため、大粒径の土砂も斜面崩壊により供給されていると考えられる。また、ホーキ薙の斜面崩壊形態は、深層崩壊であることが示されている。このため、崩壊地からの土砂移動形態として、斜面崩壊が発生した際、崩壊土塊は地すべり等に対し高速で斜面下部まで移動するものと考えられる。ここで、図6を見ると、崩壊深と比べ堆積厚が少ない。このため、斜面崩壊により生産された土塊は、崩壊地下部に堆積する以上に、榛原川河道に多く供給されるものと考えられる。ここで、堆積厚より崩壊深が大きい理由として、崩壊地周辺は急峻な地形であり、斜面末端部よりさらに下流側へ土砂が移動する可能性が考えられるためである（図12）。その後崩壊土砂は、河道をさらに流下し、堆積や流失が発生していると推察される。下流域の土砂供給の形態として、上流部崩壊地由来の砂岩・泥岩が流入するだけでなく、中~下流域に分布する崩壊地から混在岩も流入すると考えられる。このことから、河床堆積土砂の岩種割合は、流域内の砂岩泥岩互層・混在岩といった地質別の土砂供給量にも影響を受ける可能性があると考えられる。そして、粒度分布の特性として、下流部へ流下するにつれ D_{60} が増加することが示されている。理由として、小粒径の泥岩は流下するにつれスレーキングにより細粒化し、多くの土粒子を河川へ流失する一方、大粒径の砂岩は河床に堆積したためだと考えら

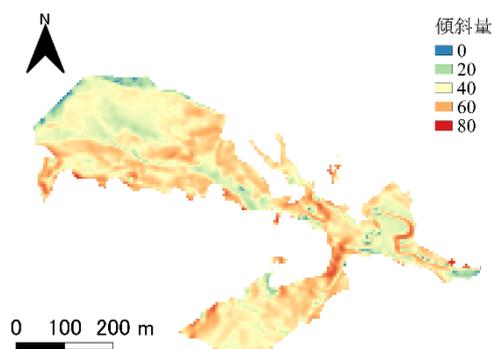


図 12 ホーキ薙の傾斜量図

れる。また、4章で示した粒度分布は、測定された土粒子の個数から作成したものであり、JISで規定される一般的な通過質量百分率を用いた粒度分析とは異なる。このため、土粒子体積と土粒子密度から、重量による粒度分布の作成を行い、粒度分布の精度向上を図る必要がある。下流部の土砂移動形態として、崩壊地から供給された土砂は、19.0mm以上の粒径の砂岩が堆積と移動を繰り返しながら緩慢に大井川へ流出するのに対し、泥岩は2mm以下に細粒化しながら榛原川に流され、砂岩に比べ急速に大井川へ流出するものだと考えられる。

6. まとめと今後の展望

本研究では、大井川水系榛原川における土砂供給過程に関する量的評価・質的評価を行った。はじめに、流域の地質条件として、混在岩・砂岩泥岩互層が広く分布することが示された。また、砂岩泥岩互層の崩壊地が混在岩に比べ、多く存在することが明らかとなった。供給土砂の量的評価として、流域内の大規模崩壊地であるホーキ薙を対象に、航空写真からDSMを取得した。これをDEMと比較したところ、植生の少ない崩壊地においては、DSMを用いた地形解析が可能であることが明らかとなった。そして、2000年代の大崩壊前後の標高差分を取得し、供給土砂量の評価を行った。この結果、崩壊量は $1.46 \times 10^6 \text{m}^3$ であり、領域別崩壊深の平均が11.63mであったことから、ホーキ薙では深層崩壊が発生し多量の土砂が榛原川に供給された可能性が示された。また、供給土砂の質的評価として、崩壊地で土砂供給源となる岩盤の性質把握を行った。20mm~120mm程度の層厚の砂岩層と、それより薄い泥岩層で構成されており、砂岩層における層厚と破断間隔に相関関係が見られた。したがって、これらと同程度の粒径の土粒子が榛原川へ供給される可能性が示された。また、河床において移送・堆積された土砂を対象に、線格子法による粒度分析・岩種判別を行った。この結果、粒径・岩種割合ともに、空間的な変化が見られた。岩種割合では、榛原川を流下するにつれ、砂岩の比率が増加し、泥岩・混在岩の比率が減少した。これは、泥岩の細粒化による影響と考えられるが、粒度分布の取得方法の再検討も行い、妥当性を確認する必要もあると考えられる。そして、これらの分析から、土砂供給過程の考察を行い、榛原川流域では、深

層崩壊による土砂供給が発生しており、急峻な地形から河道へ多量の土砂が流入することが推察された。また、砂岩と泥岩では、大井川への土砂流出の形態が異なることも推察された。

今後の展望として、量的評価では、榛原川流域内においてホーキ蘿以外に対象崩壊地を増やし、榛原川流域における斜面崩壊による全供給土砂量の算出を行っていく。さらに、混在岩・砂岩泥岩互層・砂岩など地質別でも算出を行い、地質の違いが土砂供給量に与える影響を推察する。また、傾斜角や起伏量により、地形が土砂供給量に与える影響の推察を行っていく。質的評価については、河床土砂の重量を算出した上で、重量を用いた粒度分布を作成する。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 中西隆之介, 三谷泰浩, 池見洋明: 地質による河川支流からの砂・細粒分の土砂流出比率の評価に関する研究, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.157-162, 2016.9
- 3) 大丸裕武, 黒川潮, 村上亘, 松浦純生: 多時期地理情報からみた千頭地域の深層崩壊発生斜面の地形的特徴, 日本地すべり学会誌, 50巻1号, 2013
- 4) Bai, T., D.D.Pollard, D., Gao, H.(2000), Explanation for fracture spacing in layered materials, nature, Vol.403, pp.753-756.

また、河床調査のデータを増やし、岩種割合と地質面積・土砂供給量の関係を明らかにしていく。地質を考慮した土砂供給特性を明らかにすることにより、大井川水系における地質や地形を考慮した効率的な土砂管理にも寄与できると考えられる。

謝辞

この研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野(河川)「大井川流砂系土砂管理に向けた支川土砂流入量評価方法の提案」(代表: 溝口敦子)の一部として行いました。