

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

AN EVALUATION OF THE SEDIMENT DISCHARGE RATIO OF SAND AND
FINE-GRAIN FRACTION FROM TRIBUTARY CONSIDERING GEOLOGY

中西 隆之介¹・三谷 泰浩²・池見 洋明³

Ryunosuke NAKANISHI, Yasuhiro MITANI and Hiro IKEMI

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: nakanishi@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: mitani@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: ikemi.hiro.017@m.kyushu-u.ac.jp

Key Words: XRF, GIS, sediment transport, sandstone, mudstone

1. 研究概要

近年、降雨に起因する土砂災害の頻繁な発生により、土砂災害の防止が重要な課題となっている。特に、山地流域における斜面崩壊は河川内に大量の土砂を供給し、ダム機能に悪影響を与える可能性がある。そのため、ダムを適切に管理するためにも、土砂の発生源、発生量を適切に予測する必要がある¹⁾。

ダム貯水池内へ流入する土砂を把握する手法が数多く検討されているが、現状ではダム貯水池内の堆砂形状を測量し、年間流入土砂量のみを把握しているケースがほとんどである。また、発生源および発生量を把握するために河床変動シミュレーションを用いた研究が広く行われており、河床に堆積しやすい粒径の土砂はダム上流の河川支流からの土砂供給の多寡を評価することは比較的容易である²⁾。

しかし、本研究が対象としている耳川流域は7つの水力発電ダムを有しており、貯水池内には砂・細粒分が大量に堆積している。砂や細粒分は水中での移動形態から一般的に浮遊砂かウォッシュロードに分類され、河床変動シミュレーションのみですべての土砂動態を評価することは困難である³⁾。

このような理由から、これまで耳川流域の一支流である七ツ山川の下流において出水前後の河床堆積物調査および河道形状の測量を行い、移動土砂の粒径を把握するために出水時における堆積物の変化を観測してきた。その結果から、河床勾配が急勾配から緩勾配へと変化する地点において、粒径 2mm 程度の土砂が顕著に堆積することが確認でき、河床状況の変化から粒径 2mm 程度の土砂が大量に耳川本流へ供給されていることが考えられる⁴⁾。また、砂岩主体の流域、泥質岩主体の流域で観測した濁度に顕著な差があり、移動土砂に流域地質が関わっていると考えられる。

そこで本研究では、この特徴的な河道形状の堆積物に着目し、河川支流からの砂・細粒分の流出状況を評価することを試みる。まず七ツ山川を対象に、GIS を用いて特徴的な河道形状を持つ堆積場を選定し、河床堆積物のサンプリング調査を行う。そして、XRF により河床堆積物の化学組成を明らかにし、統計手法を用いて採取した河床堆積物と流域地質の関係性を検討する。さらに、その関係性をもとに七ツ山川を含む4つの河川支流からの砂・細粒分の流出の多寡を評価する。

2. 研究対象領域

本研究が対象とする流域は、宮崎県北部に位置する耳川流域であり、流域面積約 886km² と非常に広大な流域である。この流域は平成 17 年の台風 14 号により、流域内の市町村が甚大な浸水被害を受けた。特に、諸塚村においては河川やダム貯水池内に大量の土砂が流入したことが浸水被害を増長させた。以上の理由から、諸塚村を含む山須原ダム流域を研究対象領域とする（図-1）。

対象流域は NE 方向の付加体構造を呈しており、北部に比べ南部の地質年代が若い。セツ山川流域は、四万十帯北帯砂岩により主に構成され、四万十帯北帯泥質岩が北東から南西方向に分布している。セツ山川の大部分を占める砂岩および泥質岩が、一般的に土砂流出に影響を与える主要な地質である。また、既往研究⁵⁾より四万十帯の化学組成はすでに明らかになっており、四万十帯砂岩は SiO₂ を主成分とする砂岩に比べ、泥質岩は SiO₂ の構成比率は低く、Al₂O₃ や Fe₂O₃、MgO といった他の成分を多く含む。そのため、対象流域の河床堆積物は主に砂岩と泥質岩の混合物であると考えられ、この 2 種類の地質の分布と河床堆積物を化学成分により結び付けられると考えている。

3. 濁度観測データ

耳川流域では、砂岩主体の流域であるセツ山川、泥質岩主体の流域である増谷川において濁度、流量の観測を行っている。データの観測期間は 2014 年 4 月 1 日から 2014 年 9 月 28 日である。流量は流域面積に依存するため比流量に換算し、同一時刻の濁度データと比較した（図-2）。

図-2 から、両流域の比流量は大きく異なり、セツ山川は増谷川に比べ比流量の大きな流域であることが確認できる。また、同程度の比流量に対してセツ山川は増谷川より低い濁度が観測されており、セツ山川は増谷川と比べ高い比流量のときに観測された濁度がばらついていることが確認できる。このことから、両流域で濁度として観測されている土砂の粒径が異なる、あるいは地形・地質的な要因が影響しているのではないかと考えられる。出水時には定期的にバケツ採水を行い、流れている土砂の確認を行っているが、濁度として観測される土砂の粒径を定量的に評価することは難しい。そこで、まずは河床堆積物を調査し、両流域で顕著な違いがある地質に着目して分析する。

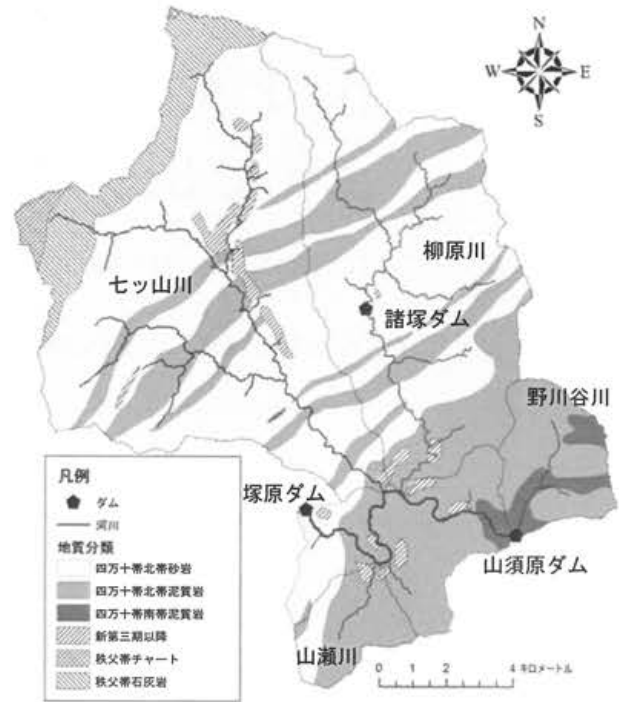


図-1 流域地質。

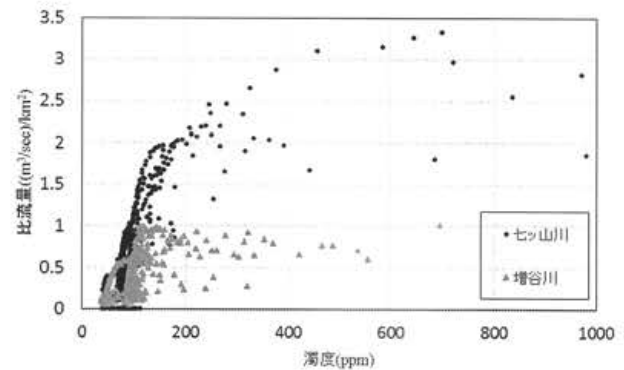


図-2 濁度と比流量の関係。

4. GIS を用いた河床堆積物のサンプリング調査地の選定および調査

河床形状および河床堆積状況を明らかにするため、これまでセツ山川の下流部において測量および河床堆積物の調査を実施してきた。調査の結果から粒径 2mm 程度の堆積物が顕著であり、河床勾配が急勾配から緩勾配へと変化する地点が主な堆積場として確認できた。同様に、地形の影響による堆積場において粒径 2mm 程度の堆積物が確認され、これが出水時に移動している堆積物であると推測した。

そこで GIS を用いてセツ山川の標高データから河道上で河床勾配が急勾配から緩勾配へと変化する地点を調査候補地として選定した。さらに、選定した地点だけではなく、地質や河川の分岐、河床状況を考

慮してサンプリング調査地を選定し、河床堆積物試料を計8箇所採取した。図-3にGISを用いて選定した地点およびサンプリング調査地を示す。

5. 堆積物と流域地質の関係性の分析

(1) 蛍光 X 線元素分析法 (XRF)

セツ山川で採取した8箇所の河床堆積物のうち粒径 2mm 以下のものについて、その化学組成を XRF により分析する。この手法は、試料に X 線を照射したときに、試料から発生する特性 X 線の波長を観測することにより、試料内の化学成分の含有量と種類を特定する手法である。分析の結果、堆積物試料内約 30 種類の化学成分の含有率が分析され、その結果から全試料が SiO₂ を多く含むことが明らかになった。

(2) 主成分分析

主成分分析により、各堆積物試料に含まれる化学成分の違いを明らかにする。主成分分析は対象とする因子の特徴を明らかにするための統計手法の一つである。図-4に主成分分析の結果を示す。矢印の方向と長さが各堆積物試料の化学成分の傾向と強さを表現している。また、堆積物試料の番号が全試料に対する堆積物の傾向を示している。結果より、SiO₂ や Fe₂O₃、Al₂O₃ のような主要成分のみに着目すると、それぞれの堆積物試料が SiO₂、Na₂O とその他の成分の2つの傾向に分類される。

そこで、この2種類の傾向の化学成分で単相関分

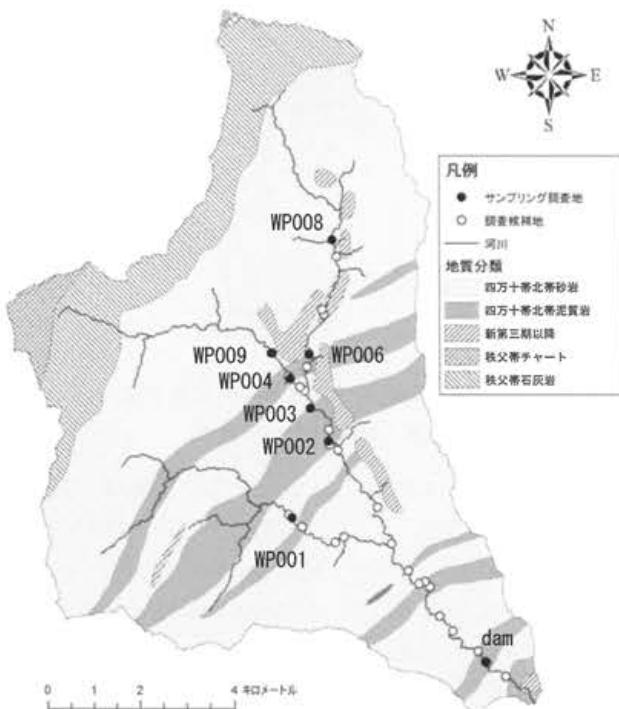


図-3 サンプリング調査地および候補地。

析を行う。単相関分析の結果から相関係数の高い SiO₂ と Fe₂O₃、Al₂O₃ の関係を図-5、図-6に示す。一般的に、岩石の化学成分のうち、アルカリ金属 (Na, K) とアルカリ土類金属 (Ca, Mg) は溶出しやすい⁶⁾。以上の理由により、Na₂O、K₂O、CaO の相関係数は低い値を得たと考えられる。また、既往研究⁵⁾より砂岩優勢層と泥質岩優勢層の SiO₂ と Al₂O₃ の関係が既に明らかであり、図-6に示すように本研究で採取した河床堆積物試料は主に両地質の影響を受けたものであると考えられる。

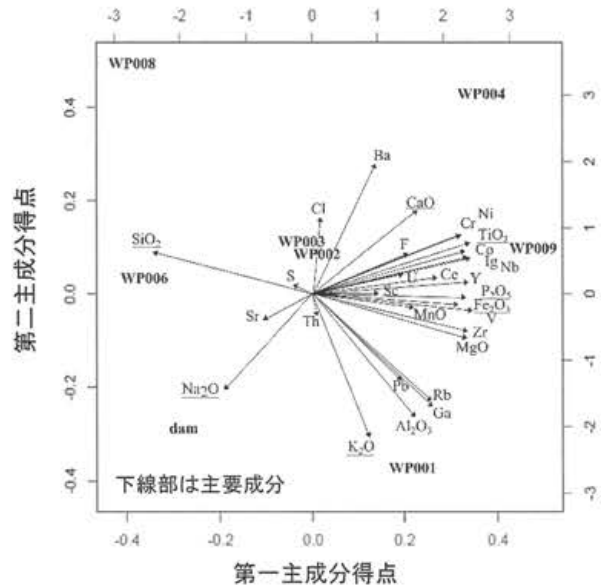


図-4 主成分分析の結果。

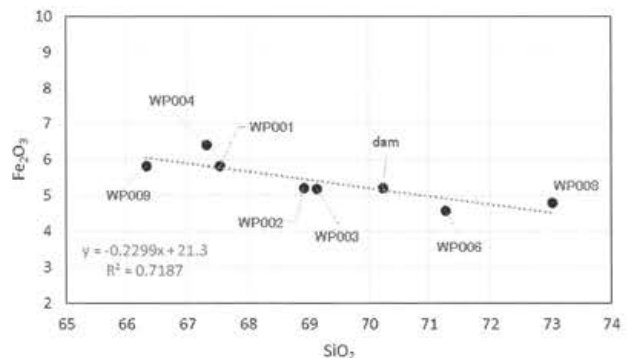


図-5 SiO₂ と Fe₂O₃ の関係。

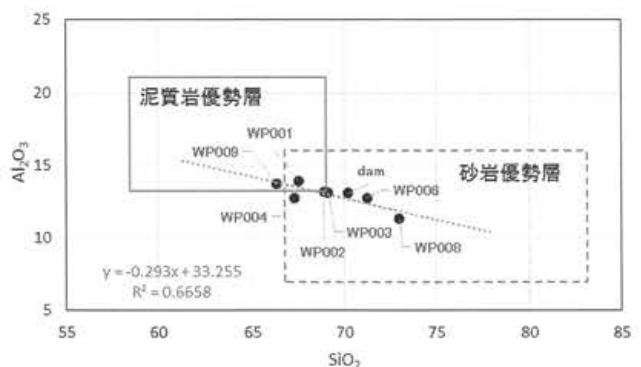


図-6 SiO₂ と Al₂O₃ の関係。

6. 河川支流の砂・細粒分の流出比率の評価

(1) セツ山川における河床堆積物と流域地質の関係性の検討

図-6に示すように、採取した試料は砂岩と泥質岩の分布の中央付近に位置する。そこで、最も SiO₂ の含有率が高い WP008 を Type A、最も SiO₂ の含有率が低い WP009 を Type B とし、図-6 の近似直線上で全ての試料を Type A と Type B の割合で評価した(図-7)。WP008 地点の上流には泥質岩がほとんど存在しないことから Type A は砂岩主体の堆積物であると考えられる。また、WP009 は全試料中で最も SiO₂ の含有率が低く、泥質岩優勢層に近い分布を示すことから、Type B は Type A に比べて砂岩以外の地質、特に泥質岩の影響を受けた堆積物であることが考えられる。

図-7から WP001 など集水面積の小さな所のサンプルではこの相関から外れるが、集水面積の大きい地点では、概ね Type A と Type B の混合比は各地点の集水域内の砂岩面積比率と相関が高いことが確認できる。また、Type A と Type B が同じ割合の場合、集水域内の砂岩は 65% 程度を占める。Type A は砂岩主体の堆積物であることから、堆積物に対して砂岩よりもその他の地質が大きく寄与していると考えられる。さらに、耳川流域内で土砂流出に影響を与える地質は砂岩、泥質岩が主であることから泥質岩の寄与が大きいと推察される。

(2) 線形モデル式を用いた河川支流からの砂・細粒分の流出比率の評価

セツ山川流域の地質分布や堆積物の化学分析結果から、堆積物は砂岩と泥質岩の混合物であると仮定し、次の手順により山須原ダム流域内の4つ河川支流からの砂・細粒分の流出比率を評価する。まず、図-7より次の線形モデル式(1)、(2)が求められる。

$$Y = 3.7819 X - 194.71 \quad (1)$$

$$Z = 100 - Y \quad (2)$$

X: 流域内の砂岩の面積比率 (%)

Y: 堆積物内の砂岩の割合 (%)

Z: 堆積物内の泥質岩の割合 (%)

GIS を用いて、セツ山川流域を占める砂岩領域の面積を計算し、式(1)、(2)に当てはめることで堆積物内の砂岩と泥質岩の割合を評価した。セツ山川から流出する砂・細粒分の流出量を 100m³ と仮定し、Y

表-1 河川支流の流域パラメータ

河川名	山瀬川	セツ山川	柳原川	野川谷川
総面積 (km ²)	8.1	90.8	62.7	12.3
砂岩面積 (km ²)	1.8	60.6	40	0
泥質岩面積 (km ²)	6.1	14.1	22.1	12.3

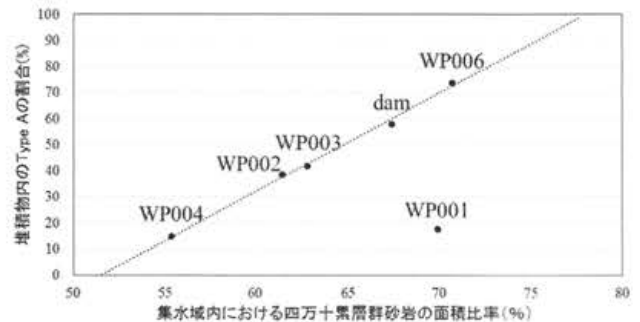


図-7 河床堆積物とサンプリング調査地上流の砂岩面積比率の関係。



図-8 山須原ダム流域内河川支流の砂・細粒分の流出比率。

および Z を表-1 に示すセツ山川の砂岩面積、泥質岩面積で除すると、単位面積当たりの砂・細粒分の流出量は砂岩 0.95m³/km²、泥質岩 2.98m³/km² となり、砂岩に比べて泥質岩は約 3 倍の砂・細粒分を流出するポテンシャルがあると考えられる。他の河川支流の砂・細粒分の流出量を表-1 の河川支流の地質面積をもとに概算し、比較すると図-8 に示す結果となる。

図-8より、柳原川の砂岩面積はセツ山川より約20km²小さいが、泥質岩面積が約7km²大きいと考えられる。さらに、セツ山川と柳原川は他の2支流に比べ流域面積が大きいので、砂岩と泥質岩の比に依存せず、著しく砂・細粒分が流出すると評価された。

(3) 流域地形量と比土砂量

流域から生産される土砂量と地形の関係を検討するために、セツ山川と柳原川の流域を支流の分岐に応じて細分化し、定義した砂岩、泥質岩の単位面積当たりの砂・細粒分の流出量から各小領域の砂・細粒分の比土砂量 (m³/km²) を概算した (図-9)。比土砂量の多い小領域は泥質岩が主に分布している対象流域の南東方向に集中し、流域全体が泥質岩で構成される野川谷川が最も比土砂量の多いエリアとなり、一方総面積は広いものの砂岩や泥質岩以外の地質で構成されるセツ山川上流部の小領域が最も比土砂量の少ない結果となった。支流単位の砂・細粒分の流出比率の評価では顕著な土砂量を流出すると評価されたセツ山川、柳原川であるが、両支流の小領域に着目すると個々の流域が顕著な土砂流出をするわけではなく、砂岩の占める面積が広いことから流出する総土砂量が高く評価されたことが確認できる。

図-10は山須原ダム流域内の小領域における比土砂量と各小領域の平均傾斜角を比較した図である。

比土砂量の比較対象として平均傾斜角を選出した理由は、既往研究⁷⁾において河床変動シミュレーションにより算定された同領域の支流から流出する土砂の総量に対して平均傾斜角が高い相関を得ているからである。平均傾斜角の高いエリアは対象領域の北西に集中し、支流単位で見ればセツ山川、柳原川の小領域は総じて平均傾斜角が高い。比土砂量の分布と比較すると、比土砂量の多いエリアほど平均傾斜角が低い傾向が見られる。しかし、図-8の結果も考慮し支流単位で平均傾斜角と流出比率を比較すると、既往研究⁷⁾と整合する結果であることが推察される。

また、他の既往研究に砂防ダムの計画堆砂量と起伏比に高い相関があるという結果がある⁸⁾。本研究で算出した比土砂量は特異的に土砂がたまりやすい場所の河床堆積物をデータソースとしたものであるため、既往研究と同様に起伏比と相関が得られることが考えられる。そこで、細分化した各領域の起伏比を次の定義式に基づき算出した。

$$R_h = h_{max}/L_h \quad (3)$$

$$h_{max} = H_{max} - H_{min} \quad (4)$$

R_h: 起伏比, h_{max}: 最大起伏

L_h: 谷口から H_{max} 地点までの距離

H_{max}: 流域内の最高点高度

H_{min}: 流域の谷口の高度

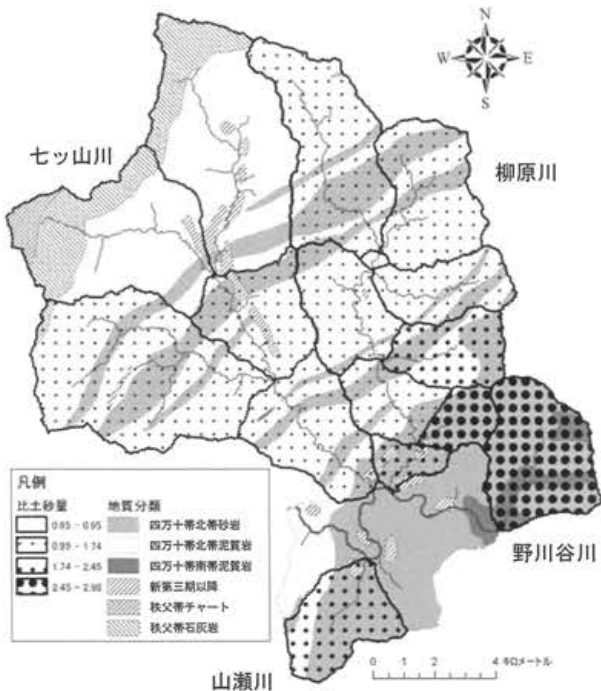


図-9 山須原ダム流域内の小領域における比土砂量と地質分布。

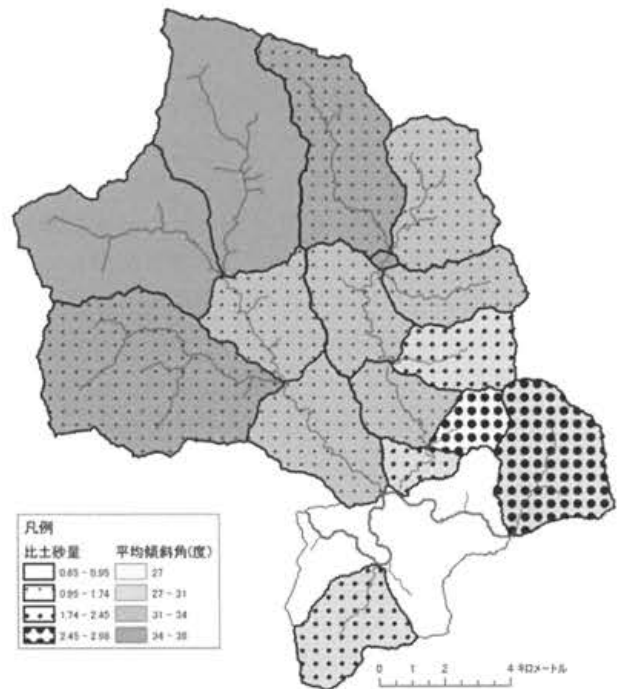


図-10 山須原ダム流域内の小領域における比土砂量と平均傾斜角。

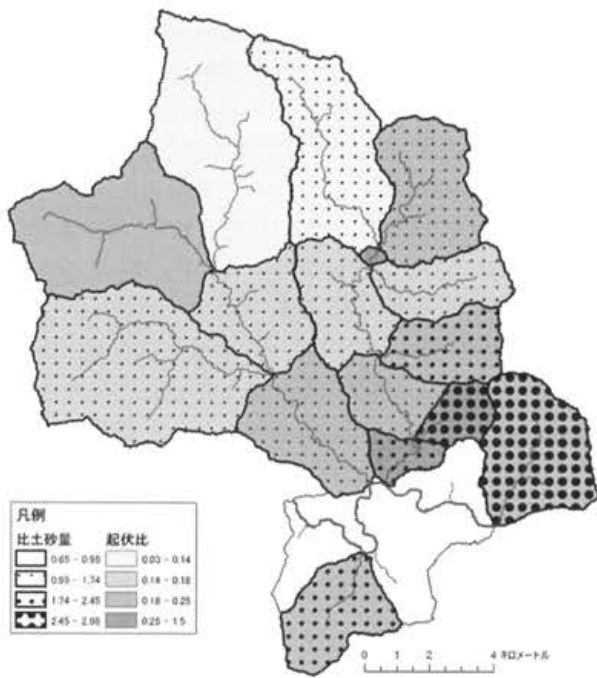


図-1 1 山須原ダム流域内の小領域における比土砂量と起伏比。

式(3), (4)に基づき算出した各小領域の起伏比と比土砂量を比較した結果を図-1 1に示す。図-1 1より、起伏比の大きい小領域のほとんどが対象領域の南東に集中しており、起伏に富んだ地形は地質との関連性があるとも推察できる。さらに、起伏比は算出した比土砂量と概ね比例関係にあり、起伏比と堆砂量が比例関係にあるという既往研究とも整合する。

以上の結果から、地質は土砂流出量の多寡に寄与する重要な因子として考えられ、特に泥質岩を多く含む領域については土砂流出ポテンシャルを高く見積もる必要がある。しかし、セツ山川上流部のように比土砂量は少ないが、起伏比が大きく、平均傾斜角が高い領域も存在する。このような領域は非常時に斜面崩壊などを発生する危険性が高く、地質による評価以上に土砂を流出するポテンシャルを秘めていると考えられるため、平常時と非常時の土砂流出現象は分けて考える必要があると考えられる。

7. まとめ

本研究では、堆積物が顕著な地点において河床堆積物の調査を行い、XRFにより河床堆積物の化学組成を明らかにした。XRFの結果として、河床堆積物は砂岩と泥質岩の混合物として評価された。さらに、統計分析によりセツ山川の河床堆積物の化学組成と流域地質の化学組成の相関性が明らかになった。特に、四万十帯砂岩の面積比率と堆積物内の砂岩が相

関していた。さらに、この関係性を用いて4つの河川支流からの砂・細粒分の流出比率を評価した結果、セツ山川、柳原川からの土砂流出が同程度であり、他の2支流に比べて顕著であった。これらの結果から、砂・細粒分の流出には砂岩に比べ泥質岩が大きく寄与するが、総流出量の評価には砂岩、泥質岩の両地質の占める面積が重要であると推察される。さらに、支流域を小領域に分割し、総土砂量ではなく比土砂量で評価することで、砂・細粒分の土砂流出のポテンシャルの高い領域を選出することができた。さらに、小領域ごとに平均傾斜角を算出し、比土砂量と比較したところ、平均傾斜角に対して比土砂量は反比例する関係にあり、支流単位で見れば総土砂量と比例する関係にあることから既往研究と整合する結果であることが明らかになった。また、起伏比についても砂・細粒分の比土砂量と概ね比例する関係にあり、本研究により明らかにされた地質ごとの土砂流出への寄与度の違いは土砂流出量を把握する上で重要な位置づけになると考えられる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP25350429 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 高橋保:土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, 2006.
- 2) 加藤靖之・二瓶泰雄・重田京助:簡易数値モデルに基づく粒径別掃流砂量の算定, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.679-684, 2009.
- 3) 田方智・長山孝彦・杉山実・宮元邦明:土砂移動形態に着目した土砂移動モニタリング手法に関する一考察, 砂防学会研究発表会概要集, pp.308-309, 2009.
- 4) 中西隆之介・三谷泰浩・池見洋明・パチリヘンドラ:山地流域における土砂動態把握を目的とした河道形状と河床堆積物に関する研究, 研究発表会講演論文集, 平成 26 年度, pp.227-228, 2014.
- 5) 寺岡易司:九州の四万十累層群, 地質ニュース 599 号, pp.40-48, 2004.
- 6) 木宮一邦:地質学から見た岩石風化, 応用地質, 32 巻, 3 号, 1991.
- 7) 吉田眞子・三谷泰浩・池見洋明・中西隆之介:山地流域における河川支流からの土砂流出現象に関わる因子の検討, 土木学会西部支部研究発表会 (2016.3), pp171-172, 2016.
- 8) 松原ゆうか・三谷泰浩・池見洋明・鮫島康之・吉武宏晃:河川支流における土砂流出因子に関する基礎的研究, 土木学会西部支部研究発表会 (2013. 3), pp327-328, 2013.