

鉱物組成を用いた富士川流域における土砂 生産源推定に関する基礎研究

STUDY ON ESTIMATION OF SEDIMENT SOURCE
BY USING MINERAL COMPOSITION IN FUJI RIVER BASIN

大石哲¹・砂田憲吾²・Dian Sisinggih³・宮沢直季⁴
Satoru OISHI, kengo SUNADA, Dian Sisinggih and Naoki MIYAZAWA

¹ 正会員 博(工) 神戸大学・教授 都市安全研究センター (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1 - 1)

² フェロー 工博 山梨大学大学院・教授 医学工学総合研究部 (〒 400-8511 甲府市武田 4 - 3 - 11)

³ Member of JSCE, Ph.D., Brawijaya University Indonesia.

⁴ 正会員 工修 山梨大学大学院・助教 医学工学総合研究部

The estimation method for sediment source using mineral composition has been applied into the Fuji river basin in order to investigate the applicability of the method developed by Sisinggih *et al.*¹⁾, which uses X-ray diffraction and cluster analysis. In addition to cluster analysis, the present study proposed a chart to investigate the sediment source. By using the chart, the study has investigated the mineral composition of many tributaries in order to trace the mineral in the Fuji river basin. Finally, the study showed the tributaries which gives dominant effect of the recent Fuji river. Moreover, the proposed way has been shown as easier for standardization because it is free from judgement of geological expert.

Key Words: *Sediment Yield, X-ray Diffraction, Mineral Composition, Fuji River Basin*

1. はじめに

日本は、急流な河川、断層破碎帯の多い地質条件、降雨量も多く集中豪雨や台風に見舞われる気象条件にあり、世界的に見ても土砂の生産・流出が極めて活発である。近年では、ダムや貯水池などによっては大量の土砂が堆積している場合もあり、そのようなダムなどでは容量低下が問題視されている。一方で中流から下流部では河床低下が、海岸部では海岸浸食が問題となっている。

土砂が河川および沿岸環境に与えている影響について、日本では応用生態工学会が 2 度の特集^{2) 3)}で議論しており、漁業に与えている影響については水産学会が特集⁴⁾で議論している。その中で例えば、横山⁵⁾は、細粒土砂は粒子が細かいために比表面積が大きくて栄養塩を大量に付着させること、細粒および粗粒土砂は河口域に堆積して地形を変化させたり、潮流に影響を与えたり、底質環境を変化させることで生物に影響を与えているとしている。このように土砂は流域環境に影響を与えていることは間違いないといえる。

流域を山地から沿岸漂砂域まで一貫する流砂系の問題として扱うためには土砂生産源を特定する必要がある。そのため、土砂の物理化学特性を用いて、土砂生産源を特定する方法が提案されている。Oldfield *et al.*⁶⁾は、耕作地、森林起源の土砂と基盤岩に含まれる鉱物の磁気特性の違いから浮遊土砂の供給源を推定する方法

を提案している。また、Menzel⁷⁾以降、同位体をトレーサーとして用いることが可能になり、それによって土砂生産源を推定する方法も開発されてきた。恩田ら⁸⁾は、核実験生成放射線核種 Cs-137 と天然放射線核種 Be-7 の濃度の違いより浸食プロセスを推定する可能性を示し、福山ら⁹⁾は、Cs-137 が日本のヒノキ林の浸食状態指標として有効であると提案している。また、加藤ら¹⁰⁾は、崩壊地を有する貯水池集水域において Cs-137、Pb-210_{ex} を用いて河床堆積物の主要供給源を推定している。

さらに最近では蛍光 X 線分析 (TXRF) や高周波誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を用いた環境分析も盛んにおこなわれ、それは土壌の分析にも適用されている。Aulinger *et al.*¹¹⁾ はエルベ川の 100 地点の土砂サンプリングを TXRF と ICP-MS によって分析した結果をクラスター解析を含む統計処理をおこなって、河川堆積物に含まれる人為起源の重金属分布から人間活動の影響を調査した。同様の調査は数多くなされており、特に ICP-MS を用いた研究は環境評価分野で多数なされている。例えば、太田ら¹²⁾によって仙台市において、Liua *et al.*¹³⁾によって河口域のボーリングコアを用いて、平島ら¹⁴⁾によって湿原域でそれぞれ研究がおこなわれて、人間活動の影響が調べられてきた。

そのような背景のもと、Sisinggih *et al.*¹⁾ は土砂の鉱物組成から土砂生産源を追跡する方法として、X 線回折による鉱物の定性分析結果によって土砂の鉱物構成

を求め、その結果に対してクラスター分析によって類似性を算出することで、インドネシア国東ジャワ州のプランタス川上流域において支川からの土砂流出の影響を推定した。この方法は鉱物組成の基礎データがX線の回折波形であるために調査を標準化しやすく、またクラスター解析を用いることで全川的な解析が可能となる。TXRFやICP-MSを用いて微量重金属を対象としている上記研究と比較すると、Sisinggih *et al.*¹⁾の方法は自然に多数存在する鉱物を扱うことで人為起源ではない土砂生産源を推定しようとしている点が特徴的である。

このような背景を踏まえ、本研究では、Sisinggih *et al.*¹⁾が提案したX線回折による鉱物組成判定とクラスター解析を用いた土砂生産源推定手法を用いて、富士川全流域における土砂供給に関する支川からの影響を類推した上で、各支川ごとの影響を詳細に検討する方法を提案する。

2. X線回折データの処理方法

(1) 鉱物組成の同定方法

本研究では、鉱物組成を同定するためにX線回折を用いている。鉱物組成同定のためには、データのノイズやバックグラウンドを除く必要があり、具体的には、Savitzky-Golay法を使って平滑化し、 $K\alpha 2$ 除去を行った。また、標準試料の情報がデータベース化されたJCPDS Mineral Powder Diffraction FileとInternational Center for Diffraction Data (ICDD)を用いて、Hanawalt法によって鉱物組成を検出した。X線回折では極めて多数の鉱物種に分類することができるが、ここでは表-1の鉱物だけを対象にして、同種の鉱物をまとめて扱った。ここで、表-1のかっこ内はグループに含まれる鉱物を示している。また、回折角 41.6° にピークを持つものを大隅石と分類した。

(2) 結果の表示方法

富士川流域においてX線回折によって検出した鉱物組成をクラスター解析した結果のデンドログラムを作成し、類似度を示すユークリッド距離が6までのものを同一グループとして同じ色で図-1に表した。ここで円の中にかかれた数字は番号は支川または本川の採取地点を表しており河川番号と呼ぶ。河川番号と支川または本川の採取地点の関係を表-2に示す。

3. 結果と考察

(1) 本川全体に適用した結果と考察

図-1を見ると、富士川本川(笛吹川合流点より上流は釜無川)最上流の河川番号2(以下河川2と呼ぶ)では黄色のグループである一方、釜無川上流域の本川II

表-1 本研究で扱った鉱物

English name	日本語名
Quartz	石英
Plagioclases (Albite) (Anorthite)	斜長石 (曹長石) (灰長石)
Sanidine	ハリ長石
Osumilite	大隅石
Pyroxene	輝石
Zeolite	沸石
Kaolin	カオリン
Serpentine	蛇紋石
Chlorite	緑泥石
Smectite	スメクタイト
Talc	滑石
Mica	雲母
Amphibole	角閃石
Arsenolite	方砒素鉱
Sassolite	硼酸石
Bavenite	ベイブナイト

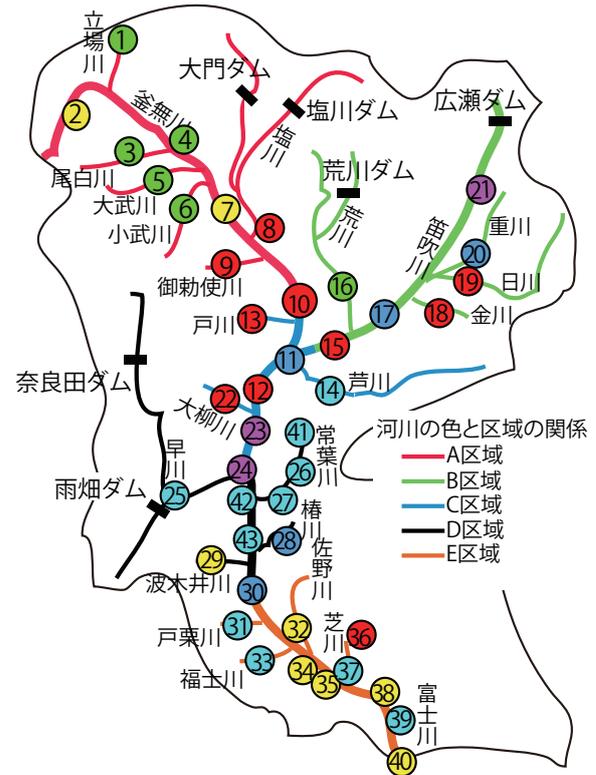


図-1 クラスター解析による類似地点を同色で示した富士川流域地図。円の色はクラスター解析の結果を示し、河川網の色は流域区分を表している。

表-2 河川番号と河川名

番号	名	番号	名	番号	名	番号	名	番号	名
1	立場川	2	本川 I	3	尾白川	4	本川 II	5	大武川
6	小武川	7	本川 III	8	塩川	9	御勅使川	10	本川 IV
k11	本川 V	h11	笛吹川 IV	12	本川 VI	13	戸川	14	芦川
15	笛吹川 III	16	荒川	17	笛吹川 II	18	金川	19	日川
20	重川	21	笛吹川 I	22	大柳川	23	本川 VII	24	本川 VIII
25	早川	26	下部川	27	常葉川 I	28	椿川	29	波木井川
30	本川 XI	31	戸栗川	32	佐野川	33	富士川	34	本川 XII
35	本川 XIII	36	稲瀬川	37	芝川	38	本川 XIV	39	本川 XV
40	本川 XVI	41	常葉川 II	42	本川 IX	43	本川 X		

(河川 4) では緑のグループになっている。このことは立場川(河川 1)または尾白川(河川 3)の影響が強いと考えられる。また、釜無川の本川 III(河川 7)は黄色のグループである一方、釜無川と笛吹川の合流点上流部である本川 IV(河川 10)では赤のグループに変化している。これから、本川 IV(河川 10)においては、塩川(河川 8)と御勅使川(河川 9)の影響が強いと考えられる。一方、富士川下流域では早川(河川 25)が合流する本川 IX(河川 42)から河口部の本川 XVI(河川 40)まで水色と黄色の星が多く点在している。これは水色で表示されている早川(河川 25)と常葉川(河川 27, 41)、黄色で表示されている波木井川(河川 29)と佐野川(河川 32)の影響が富士川下流域で現れていると考えられる。逆に赤で表示されている稲瀬川(河川 36)の影響は少ないと考えられる。

(2) 流域区分に適用した結果と考察

ここでは、流域内部を詳細に検討し個々の鉱物の存在とクラスター解析の結果を比較するために図-1 および表-3 で示すように流域を 5 分割して、区域境界にあたる本川の採取地点を両区域に含めたうえで、それぞれの区域別にクラスター分析をおこない、分割された流域内部の土砂生産について解析した。同時に図-2 に示す円形のグラフで鉱物の存在の有無を示して区域内の鉱物組成を詳細に解析した。この円形のグラフは存在比を表しているのではなく、一定の方向に鉱物ごとの色が塗られていれば、対応する鉱物が存在することを表している。

a) A 区域

A 区域のデンドログラムを図-3 に示す。デンドログラムを見ると A 区域は、塩川(河川 8)と御勅使川(河川 9)の合流前後で河川 8, 9, 10, 2 からなるクラスターと、それ以外のクラスターに二分されている。このことから塩川(河川 8)と御勅使川(河川 9)の土砂流出が本川 IV(河川 10)に与えている影響が大きいと考えられる。また、尾白川(河川 3)と本川 III(河川 7)との類似性が高い一方で、富士川源流付近の本川 I(河川 2)の鉱

表-3 5 分割された流域に入る河川、かつこ内は河川番号

A 区域	本川 (2,4,7,10)・立場川 (1)・尾白川 (3)・大武川 (5)・小武川 (6)・塩川 (8)・御勅使川 (9)
B 区域	笛吹川 (15,17,21)・重川 (20)・日川 (19)・金川 (18)・荒川 (16)
C 区域	本川 (10,k11,12,23,24)・笛吹川 (h11,15)・戸川 (13)・芦川 (14)・大柳川 (22)
D 区域	本川 (30,24,42,43)・早川 (25)・常葉川 (27,41)・椿川 (28)・波木井川 (29)・戸栗川 (31)・下部川 (26)
E 区域	本川 (30,40,34,35,38,39)・戸栗川 (31)・佐野川 (32)・富士川 (33)・稲瀬川 (36)・芝川 (37)

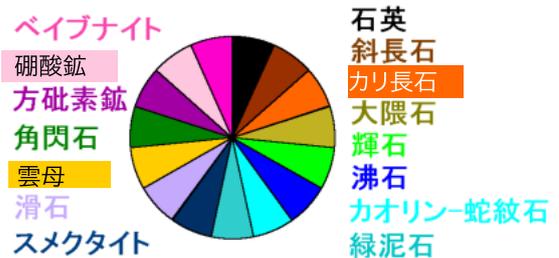


図-2 鉱物の存在の有無を表すグラフ

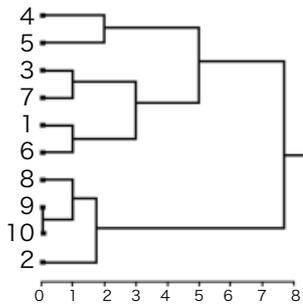


図-3 A 区域のデンドログラム

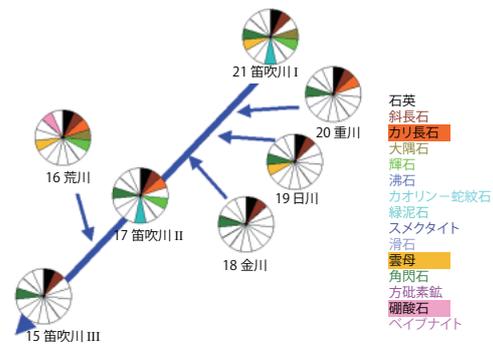


図-5 B 区域における本川・支川の鉱物組成

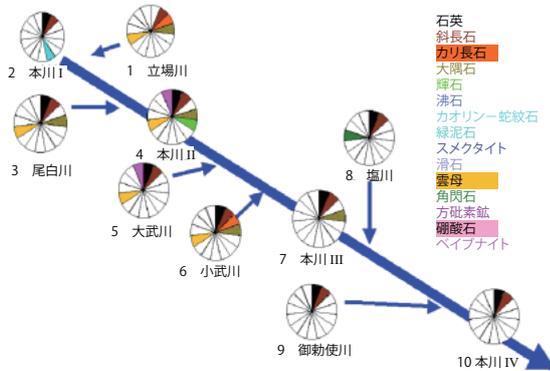


図-4 A 区域における本川・支川の鉱物組成

物組成は本川 II・III(河川 4, 7)の鉱物組成との類似性が低い。したがって、本川に対する尾白川の影響が強いことがわかる。

次に、A 区域の鉱物組成を図-4 に示す。釜無川右岸側の尾白川・大武川・小武川には雲母が存在し、本川 II と大武川にはペイブナイトが存在しており、釜無川右岸側は花崗岩質の土砂流出が多いことがわかる。また、ペイブナイトの存在によって図-3 に示すデンドログラムにおける本川 II(河川 4)と大武川(河川 5)の類似性が高いと判断されていると考えられる。

また、御勅使川からの影響が強く、合流後の本川 IV(河川 10)と御勅使川(河川 9)は、X 線回折からは石英と斜長石だけが検出されていて、全く同じ鉱物構成となっている。そのためデンドログラムでも類似性が最大となっている。

b) B 区域と C 区域

図-3 のようなデンドログラムは省略するが、B, C 区域のクラスター解析によって以下のようなことがわかった。

B 区域では、笛吹川 III(河川 15)、金川(河川 18)・日川(河川 19)・重川(河川 20)の類似性が高い結果となった。特に笛吹川(河川 15)と金川(河川 18)は鉱物構成が同一であり、金川(河川 18)からの土砂流出が顕著に表れているものと考えられた。逆に荒川(河川 16)と、笛吹川合流後の笛吹川 III(河川 15)との類似性が低いこ

とから、荒川ダムの影響もあって荒川から笛吹川への土砂の流出は少ないと考えられる。

C 区域では、笛吹川と本川の合流前後の地点で鉱物構成が類似している。特に富士川本川 VI(河川 12)と笛吹川(河川 15)の類似性が高いことから、笛吹川が本川に与えている影響が強いことが推測できる。また、C 区域を二分しているクラスターの一方は、大柳川合流後の本川 VII(河川 23)、本川 VIII(河川 24)および芦川(河川 14)で構成されている。

次に B 区域および C 区域の鉱物組成をそれぞれ、図-5, 図-6 に示す。図-4 から、釜無川では X 線回折によって輝石と角閃石が存在すると判定された地点は少ないことがわかる。一方、図-5 から笛吹川では輝石と角閃石が存在すると判定された地点は多い。図-6 より、富士川本川の笛吹川合流点下流に輝石と角閃石があることから、釜無川・笛吹川合流後の富士川本川の土砂は笛吹川から流出してきたものが多いと考えられる。また本川 VII(河川 23)と本川 VIII(河川 24)においてスメクタイトが確認できた。本川 V(河川 k11)を含む本川上流ではスメクタイトは確認できなかったことから、スメクタイトの存在を確認できた芦川(河川 14)の影響と考える。

しかし、C 区域では本川側岸が切り立った山地であること、山地は地質的にスメクタイトを含む御坂層群に属していること、しばしば本川側岸が土砂崩れを起こしていることから、実際には本川への横流入が影響を及ぼしており、スメクタイトの供給源も本川側岸と推測することができる。本研究では本川への横流入を全川で考慮に入れて考察すると、それで全て説明することになってしまうので、横流入の影響を無視してきた。一方で、富士川では本川 VI から本川 XIV の区間では土砂崩れが直接本川に到達している場所がある。今後は、それを 1 つずつ支川のように考察することでこの問題は解決できると考えられるが、本研究では考慮しなかった。

c) D 区域と E 区域

デンドログラムは省略するが、D, E 区域のクラスター解析によって以下のようなことがわかった。

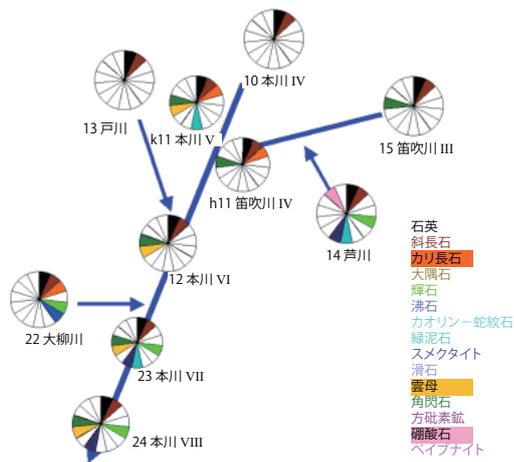


図-6 C 区域における本川・支川の鉱物組成

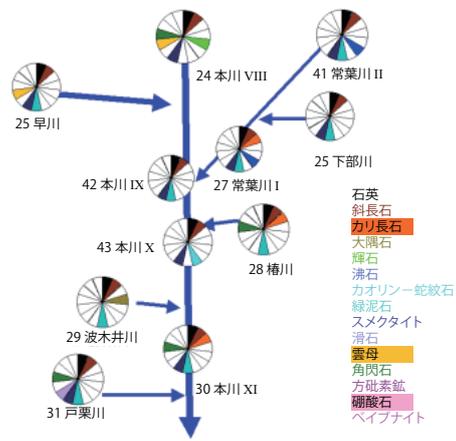


図-7 D 区域における本川・支川の鉱物組成

D 区域では本川 IX(河川 42), 本川 X(河川 43) と常葉川の支川の下部川 (河川 26), 常葉川 (河川 41, 27) および早川 (河川 25) が類似度の高いグループを形成している。しかも、このグループと本川の直上流部 (河川 24) の類似性は低い。したがって常葉川 (河川 41, 27), 早川 (河川 25) が本川 IX(河川 42) に与えている影響が大きいといえる。一方で椿川 (河川 28) と本川 XI(河川 30) の類似性が高いにもかかわらず、椿川が本川に合流している地点 (本川 X, 河川 43) の類似度は低いという、C 区域と同様の結果も現れている。

このような解析結果内部の不整合や経験との違いを以下に考察する。河川合流の直下には土砂が堆積されず合流後流送してから土砂が堆積される場合と、合流地点に土砂が堆積された後に別の支川の土砂の影響で下流に流される場合が考えられる。このことを考察するためには、Aulinger *et al.*¹¹⁾ が TXRF や ICP-MS を用いておこなったように、土砂の鉛直プロファイルとそれが堆積した年代に関する情報が必要と考えられる。また、河道内横断方向に鉱物組成が分布している可能性もある。岩種構成を用いる方法はある程度の大きさがなければ岩種を判断することができないので、サンプルの径による河道内の分級効果が表れると考えられる。しかし、鉱物組成検出のためのサンプルは、現況のみお筋付近でほぼ同じ条件で採取されていること、サンプルの粒径は 1~2mm 以下なので対象が河道内に平均的に分布していると考え、横断方向の鉱物組成分布は考慮していない。

E 区域では、佐野川 (河川 32) と本川 (河川 34, 35, 38) および本川河口 (河川 40) との類似性が高く、佐野川からの土砂流出が本川に与えている影響が強いことがわかった。一方、稲瀬川 (河川 36) と本川 (河川 38, 40) は類似性が低いことがわかる。

次に D 区域の鉱物組成を図-7 に示し、E 区域の鉱物組成を図-8 に示す。早川 (河川 25) と常葉川 (河川 27) の各点から、緑泥石とスメクタイトを確認することが

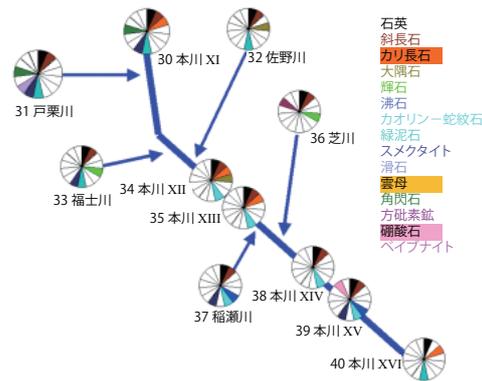


図-8 E 区域における本川・支川の鉱物組成

表-4 本川に与えている土砂流出の影響が強いと考えられる支川、カッコ内は河川番号

A 区域	尾白川 (3)・御勅使川 (9)・塩川 (8)
B 区域	金川 (18)
C 区域	笛吹川 (h11,15)・芦川 (14)
D 区域	早川 (25)・常葉川 (27)・椿川 (28)
E 区域	佐野川 (32)

できる。特に四万十帯の綠色岩に多く含まれている緑泥石は、河口部である本川 XVI (40) においても存在が確認できた。また、佐野川 (河川 32) および富士川 (河川 33) の影響について考察すれば、本川下流部では富士川 (河川 33) のように輝石とスメクタイトが検出されることはなかったこと、佐野川 (河川 32) と本川 XII (河川 34) の鉱物組成が似ていることから、佐野川 (河川 32) の方が本川に与える影響が大きいといえる。

以上の議論をもとに、5 区域のクラスター解析結果から、本川に与えている土砂流出の影響が強いと考えられる支川を表-4 に挙げる。

このように、河床を構成する鉱物組成の類似性を詳

細に解析することはかなりの時間が必要な作業であるが、クラスター解析によっておおよその類似性は算定できる。また、鉱物組成は少量のサンプルを使って室内解析が可能であり、解析過程も規格化しやすい。したがって、X線回折によって鉱物組成を算出し、クラスター解析によっておおよその類似性を算出した後に、本研究で用いたような流域区分ごとの鉱物組成図を示して解析する方法は大流域の河川における土砂生産源の特定に有効な方法であるといえる。

4. おわりに

本研究では、Sisinggih *et al.*¹⁾ によって提唱された、X線回折による鉱物組成判定とクラスター解析を用いた土砂生産源推定手法の富土川への適用性の調査を行った。

鉱物組成を用いる土砂生産源推定手法では、比較的希少な鉱物の有無が推定される土砂生産源を決めてしまうことや、それぞれの土砂生産源の比率などの量的な結果が得られないといった欠点があることが改めて理解された。また、河川合流の直下には土砂が堆積されず、合流後流送してから土砂が堆積される場合と、合流地点に土砂が堆積された後に別の支川の土砂の影響で下流に流される場合を特定するためには、土砂の鉛直プロファイルとそれが堆積した年代についての調査が必要になることが示唆された。さらに、本川への横流入を1つずつ支川のように考察することで、本川側岸の土砂崩壊が本川の河床構成に与えている影響を考察できるといった今後の課題も発見された。

一方で、本手法の調査方法には専門家による野外調査の必要や、人間による判断が入る余地が少なく、規格化しやすいといった利点がある。また、クラスター解析で全体的な類似性を理解した上で、各流域区分ごとに鉱物組成を示して支川からの土砂供給が本川に与えている影響を詳細に理解する土砂生産源推定方法を示すことができた。それは、今後の土砂生産源推定においては検討する価値があるものと確信する。

以上を本論文の結論とする。

謝辞：本研究は平成18年度～20年度科学研究費補助金基盤研究(B)「土砂の量的・質的構成に基づく流域総合土砂追跡法の開発」(代表：砂田憲吾 山梨大学大学院教授)、平成15年度～19年度21世紀COEプログラム「アジアモンスーン域流域総合水管理研究教育拠点」(代表：竹内邦良・砂田憲吾 山梨大学大学院教授)の援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sisinggih, D., Oishi, S. and Sunada, K. A method for detecting the source of sedimentation using mineral composition

in sengguruh basin, indonesia. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 51, pp. 121–126, 2007.

- 2) 楠田哲也・堀家健司・森・川・海の自然連鎖系を重視した有明海・八代海の再生. *応用生態工学*, Vol. 8, No. 1, pp. 41–50, 2005.
- 3) 中村太士. ダム影響評価の背景と課題 -特集を編集するにあたって-. *応用生態工学*, Vol. 2, No. 2, pp. 101–102, 1999.
- 4) 清野聡子. 河川管理 -ダムと水産 企画趣旨. *日本水産学会誌*, Vol. 73, No. 1, pp. 78–79, 2007.
- 5) 横山勝英. 河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について -白川と筑後川の事例-. *応用生態工学*, Vol. 8, No. 1, pp. 61–72, 2005.
- 6) Oldfield, F., Rummery, T.A., Thompson, R. and Walling, D.E. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 211–218, 1979.
- 7) Menzel, R. G. Transport of strontium-90 in runoff. *Science*, Vol. 131, pp. 499–500, 1960.
- 8) 恩田裕一・竹中千里・神谷義久・浜島靖典・野々田稔郎. 放射性核種を用いた侵食土砂の起源推定に関する基礎実験. *砂防学会誌*, Vol. 50, No. 4, pp. 19–24, 1997.
- 9) 福山泰治郎・恩田裕一・竹中千里・山本高也. 貯水池堆積物と森林土壌の放射性同位体を用いた浸食土砂量推定. *砂防学会誌*, Vol. 54, No. 1, pp. 4–11, 2001.
- 10) 加藤弘亮・恩田裕一・平松晋也・柏木章子・宮本邦明. 吉野川上流長沢ダム流域における放射性同位体を用いた微細土砂供給源の推定. *砂防学会誌*, Vol. 58, No. 2, pp. 5–14, 2005.
- 11) Aulinger, A., Prange, A., Niedergesass, R., Schmolke, S. and Einax, J.W. Characterization of elemental pollution and its variations in sediments and suspended particulate matter from the river elbe via multi-element analysis combined with chemometric data evaluation. *Journal of Environmental Monitoring*, Vol. 4, pp. 942–949, 2002.
- 12) 太田充恒・今井登・岡井貴司・遠藤秀典・石井武政・田口雄作・上岡晃・御子柴(氏家)真澄・寺島滋. 地球化学図を用いた仙台市周辺地域の元素挙動の解明と環境評価. *地球科学*, Vol. 57, No. 1, pp. 61–72, 2003.
- 13) Liua, W.X., Li, X.D., Shena, Z.G., Wanga, D.C., Waia, O.W.H. and Lia, Y.S. Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the pearl river estuary. *Environmental Pollution*, Vol. 121, pp. 377–388, 2003.
- 14) 平島邦人・深澤達矢・橋治国・柴田英昭・野村睦・高木健太郎. 中の峰平湿原における土壌中金属成分の鉛直成分. *衛生工学シンポジウム論文集*, Vol. 12, pp. 48–52, 2004.
- 15) 榎本政雄・佐藤昭夫・山本兼治・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手法 -. *砂防学会誌*, Vol. 20, No. 3, pp. 9–20, 1967.
- 16) 砂田憲吾・中村良光・椎葉秀作・小島淳. 河床材料の礫種構成に基づく水系土砂移動特性の把握の試み. *土木学会第58回年次学術講演会要旨集*, pp. 499–500, 2003.

(2009.9.30 受付)