

蛍光X線分析を利用した河川土砂礫の マクロ的な分布特性に関する基礎的検討

STUDY ON REGIONAL DISTRIBUTION CHARACTERISTIC OF
SAND AND STONE IN THE RIVER USING FLUORESCENT X-RAY ANALYSIS

手計太一¹・南優平²・畠俊郎¹

Taichi TEBAKARI, Yuhei MINAMI and Toshiro HATA

¹正会員 博(工) 富山県立大学大学院准教授 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²学生会員 富山県立大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

The purpose of this study is to clarify the elemental compositions of sand and stone in the rivers using the X-ray fluorescence analysis (XRF). The Kurobe, the Joganji, the Sho and the Oyabe Rivers were selected for this study. Total 379 samples of sand and rock of 4 rivers were analyzed and the spatial characteristics of sand and rock were clarified using the cluster analysis.

In the lower Kurobe River, the characteristics of the elementary compositions of the beach sand agreed with sand and stone which deposited in the Unazuki reservoir lake well.

Regional distribution characteristics of sand and rock in the rivers could be clarified according to ultimate analysis by the XRF and the cluster analysis.

Key Words : X-ray fluorescence analysis, elemental compositions, the Kurobe River

1. はじめに

日本列島は、その起伏のある特徴的な地形から、山あいでは深い峡谷を形成しており、河川は著しく急勾配である。このような地形的特徴に加え、頻発する集中豪雨や台風は、土石流や地滑りによる甚大な土砂災害をもたらすことが多い。土砂災害を未然に防ぐためには、発生場所を予測することや流下してくる土砂量を推定することが重要である¹⁾。例えば、空中写真測量を利用することで、広域的に土石流や地滑りが現在もしくは数日以内に発生した箇所を特定することは可能であるが、過去に流下した土砂礫の発生源を推定する場合、土砂流出量や堆積量、浸食量を把握するだけでなく、土砂礫の質的・化学的特性から土砂生産源を明らかにする必要がある。

土砂の化学的特性を把握する方法の一つとして、岩石の化学元素含有率が挙げられる。岩石は大きく分けて火成岩、堆積岩、変成岩の3つに分けられる。マグマが冷え固まることで生成される火成岩は、その冷却の速度の違いにより、火山岩と深成岩の二つに大別される。これら二つの岩石は主成分であるケイ素の含有率の違いによって、火山岩はコマチアイト、玄武岩、安山岩、デイ

サイト、流紋岩に分類され、深成岩はかんらん岩、斑れい岩、閃緑岩、花崗閃緑岩、花崗岩、閃長岩に分類される。堆積岩は、既に存在している礫や砂、泥、生物の死骸などが堆積し、長い期間を経て押し固められた岩石である。そして、変成岩は元々火成岩や堆積岩であった岩石が温度や圧力の上昇により鉱物の形成や組成が変化した岩石である。これらの岩石に含まれる化学元素の種類や含有率により、地質上の特徴や、岩石の種類が異なってくる。日本の上部地殻における化学元素の平均組成から、日本列島の地殻はデイサイト組成であることがわかっている²⁾。

最近、蛍光X線分析を利用した土砂礫や河川底質物の分析研究が進められている。例えば、加藤ら(2012, 2013)は、蛍光X線分析を利用して、沿岸域や河口干潟における海浜砂の化学元素含有率を計測することにより、土砂の堆積・浸食の把握、移動追跡の可能性の検討を行い、海浜状態の評価を実施している^{3),4)}。また、伊藤・松本(2007)は、木曾川と庄内川を対象として、河川底質物の化学的な特徴が自然由来なのか人工由来なのかを定量的に調査している⁵⁾。さらに、大石ら(2010)は、蛍光X線分析による鉱物の組成判定とクラスター分析を用いて富士川流域全体における土砂生産源を推定し、支川ごと



写真-1 蛍光X線分析装置を利用した現場分析風景。

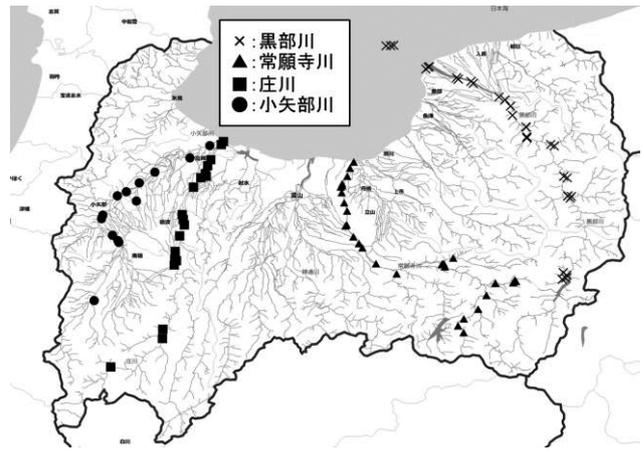


図-1 対象河川と試料分析した位置。

の影響を検討する方法を提案した⁹⁾。しかし、元素分析を利用して、河川を流下する土砂礫の特徴や沿岸域における海浜砂の供給源に関する研究は行われていない。

以上を鑑み、本研究では、携帯型蛍光X線分析を利用して、黒部川、常願寺川、庄川、小矢部川における大量の土砂礫試料を分析することによって、河川ごとの土砂礫の元素組成の特徴を明らかにする。そして、携帯型蛍光X線分析が河川の土砂礫の分布特性の解明に寄与できるかを議論する。

2. 携帯型蛍光X線分析機器による現場測定

本研究では、分析試料が放出する電磁波を利用して元素分析をする発光分析法の一つである蛍光X線分析法(X-Ray-Fluorescence-Analysis; XRF)を利用した¹¹⁾。

蛍光X線はエネルギー分析の手法からエネルギー分散型と波長分散型の2つに大別される。いずれも非破壊分析が大きな特徴であり分析は比較的短時間で済む。本研究では、エネルギー分散型装置であるSI TURBO LE(BRUKER社製)を利用した。エネルギー分散型は検出器自体がエネルギー分析機能を持つ半導体検出器を用いている。また測定を行う際に、多元素を同時に分析できることから、簡便にかつ短時間で元素分析が可能である。

本機の測定可能元素は、マグネシウムからウランまでの81種類である。マグネシウムやアルミニウム等の低エネルギーの元素も高精度に測定できる特徴を持つ。さらに、バッテリーを含めた重量は約2 kgで、持ち運びが容易であり、現場測定が容易である。そのため、大型試料や固定構造物の測定も可能である。このような長を活かして、本研究では大量の試料を分析した。本分析では、岩石の蛍光X線分析では一般的にファンダメンタルパラメータ法(FP法)を採用した。

写真-1は著者がXRFを用いた現場での測定風景の一例である。場所は常願寺川に架かる北陸線高架橋下である。測定試料は、測定日における河川水際の砂礫を採取、

分析した。その理由は次の2点である。(1)河川中の試料は水分が付着していると正確に測定できない、(2)水中の試料採取が困難である。

本研究で用いた試料は、礫については粒径範囲が4～64 mmの中礫土砂と64～256 mmの大礫土砂である。河口やダム湖と中心に採取した砂については、0.0625～2 mmの粒径を対象とした。

本研究で実施した全試料に共通して、Ar, Ga, Ge, Kr, Tc, Xe, Cs, La, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hg, Tl, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Paの31種類は希ガスやランタノイド、人工元素などであり検出されない。

3. 対象河川

本研究では、富山県の東部と西部を流れる以下の4つの1級水系を対象とした。図-1に対象河川と試料分析した位置を示す。両者は源流の山岳域が異なることから研究対象として選択した。各河川の地形、地質的な特徴は下記の通りである。

(1) 黒部川

黒部川は、幹川流路延長85 km、流域面積682 km²の1級河川である⁷⁾。流域の地質は、主に古生代～中生代の古期花崗閃緑岩類(船津花崗岩類)及び新第三紀の新期花崗閃緑岩類からなり、愛本から河口にかけては、第四紀完新世の砂礫層が分布し巨大な扇状地を形成している。黒部川では、黒部ダム湖から河口までの23箇所253試料を分析した。さらに、海洋調査を行い河口から6.4 kmと6.9 km地点の海底質についても元素分析を実施した。

(2) 常願寺川

常願寺川は、幹川流路延長56 km、流域面積368 km²の1級河川である⁸⁾。地質は中生代や新生代新第三紀の岩層、立山火山の噴出物等の変化に富みかつ脆弱である。常願寺川では、立山カルデラ内の支川等から河口までの26箇所79試料を分析した。

(3) 庄川

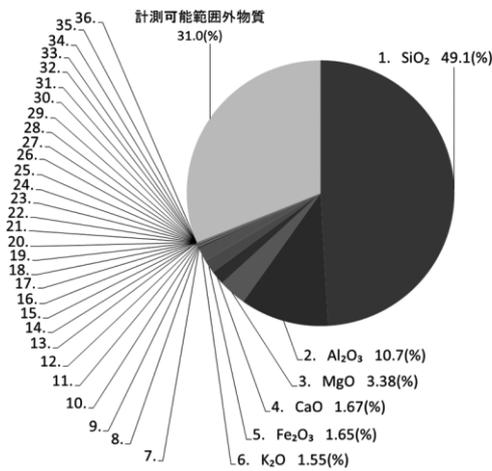


図-2 黒部川における全試料平均元素含有率。

7. Sb ₂ O ₃	1.69.E-01(%)	22. ZnO	2.01.E-03(%)
8. SnO ₂	1.55.E-01(%)	23. WO ₃	1.69.E-03(%)
9. TiO ₂	1.45.E-01(%)	24. NiO	1.24.E-03(%)
10. Co ₃ O ₄	1.38.E-01(%)	25. CuO	4.45.E-04(%)
11. S	8.55.E-02(%)	26. Ba	3.52.E-04(%)
12. MnO	8.14.E-02(%)	27. PbO	2.77.E-04(%)
13. CeO ₂	3.83.E-02(%)	28. As ₂ O ₃	2.52.E-04(%)
14. Cr ₂ O ₃	3.80.E-02(%)	29. MoO ₃	1.39.E-04(%)
15. P ₂ O ₅	2.79.E-02(%)	30. Bi	7.32.E-05(%)
16. Sr	9.93.E-03(%)	31. Se	4.45.E-05(%)
17. Rb	5.68.E-03(%)	32. Y	2.73.E-05(%)
18. HfO ₂	4.35.E-03(%)	33. Sc	9.28.E-06(%)
19. ZrO ₂	3.88.E-03(%)	34. Nb ₂ O ₅	8.82.E-06(%)
20. V ₂ O ₅	3.83.E-03(%)	35. U	4.53.E-06(%)
21. Ta ₂ O ₅	2.74.E-03(%)	36. Cd	2.47.E-07(%)

表-1 元素の検出・未検出比較表。

元素番号	元素記号	黒部川	常願寺川	庄川	小矢部川
12	Mg	▲	▲	▲	○
13	Al	○	○	○	○
19	K	○	○	○	○
20	Ca	○	○	○	○
22	Ti	○	▲	▲	▲
25	Mn	○	○	○	○
26	Fe	○	○	○	○
27	Co	▲	▲	▲	○
34	Se	▲	▲	▲	×

庄川は、幹川流路延長115 km、流域面積1,189 km²の一級河川である⁹⁾。源流部の地質は新第三紀安山岩類、上流部の支川では中世安山岩類、下流の溪谷は新第三紀花崗岩、新第三紀安山岩および火山砕屑岩地帯となり、下流は完新世の流紋岩と火山砕屑岩地帯である。庄川では、菅沼橋から河口までの16箇所21試料を分析した。

(4) 小矢部川

小矢部川は、幹川流路延長68 km、流域面積667 km²の一級河川である¹⁰⁾。西部に広がる1,000 m以下の加賀山地と宝達丘陵は軟弱な新第三紀層で、上部の地層は泥岩、砂岩、凝灰岩で構成され、丘陵の周辺に第四紀層が段丘や台地を形成している。小矢部川では、小矢部大堰より500 m下流地点から河口から2.1 km地点までの9箇所26試料を分析した。

4. 四河川の元素分析結果

(1) 元素組成の比較

河川ごとに全試料を平均化して元素組成の特徴について検討した。例えば、黒部川の例を図-2に示す。有機物など計測不能物質を除くと68%の元素が測定され、そのうち元素含有率1%以上の上位6元素(Mg, Al, Si, K, Ca, Fe)を合計すると全体の約70%を占め、他河川も70~80%を占める支配的な元素組成であった。特に上位3元素(含有率上位からSi, Al, Mg)はいずれの河川ともに順位が同様であった。その他のK, Ca, Feについては、河川ごとに含有率の順位は異なる。一方、最も検出率の小さい元素はCdであり、全河川に共通していた。

(2) 元素の検出・未検出の特徴

先述したように、本研究で利用した蛍光X線分析装置は、マグネシウムからウランまでを検出することができる。そのうち、希ガスなど岩石からは検出されない31種類の元素を除いた50種類の元素について、河川ごとの特徴を抽出するために、検出・未検出の元素について検討

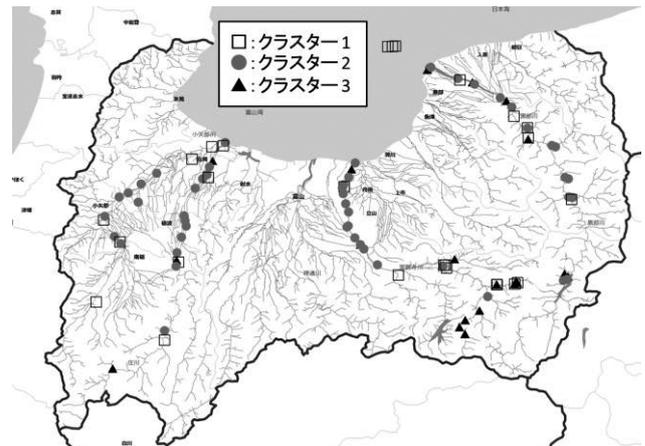


図-3 4河川全試料を利用した階層クラスター分析の結果。

した。表-1に検出された元素の割合に特徴的であった9種類の元素を示す。表中の「○」は全試料において検出されたこと、「▲」は一部の試料で検出されたこと、「×」は全試料で検出されなかったことを表す。

対象とした四河川の全ての試料において全く検出されなかった元素は、遷移元素であるRu, Rh, Pd, Ag, Re, Os, Ir, Pt, Au、卑金属であるIn、そして非金属であるCl, Br, Te, Iの合計14種類であった。また、小矢部川だけは非金属であるSeが全く検出されなかった。

一方、検査した全ての試料で検出された元素は、卑金属のAl、アルカリ金属のK、アルカリ土類金属のCa、そして遷移元素であるFeの合計4種類であった。アルカリ土類金属のMgと遷移元素のCoは小矢部川でのみ全試料から検出され、遷移元素であるTiは黒部川でのみ全試料から検出された。

以上から、検出・未検出の分類だけでも河川を流下する土砂礫の質的特徴を明らかにできる可能性がある。

(3) 階層クラスター分析

本研究対象4河川の砂礫のマクロ的な分布を評価するために、多変量解析の一つである階層クラスター分析を利用して分類を行った。クラスター間のユークリッド距離の計算はウォード法を採用し、マクロ的な分類を知るために3つに分類した。先述したように各地点で複数の

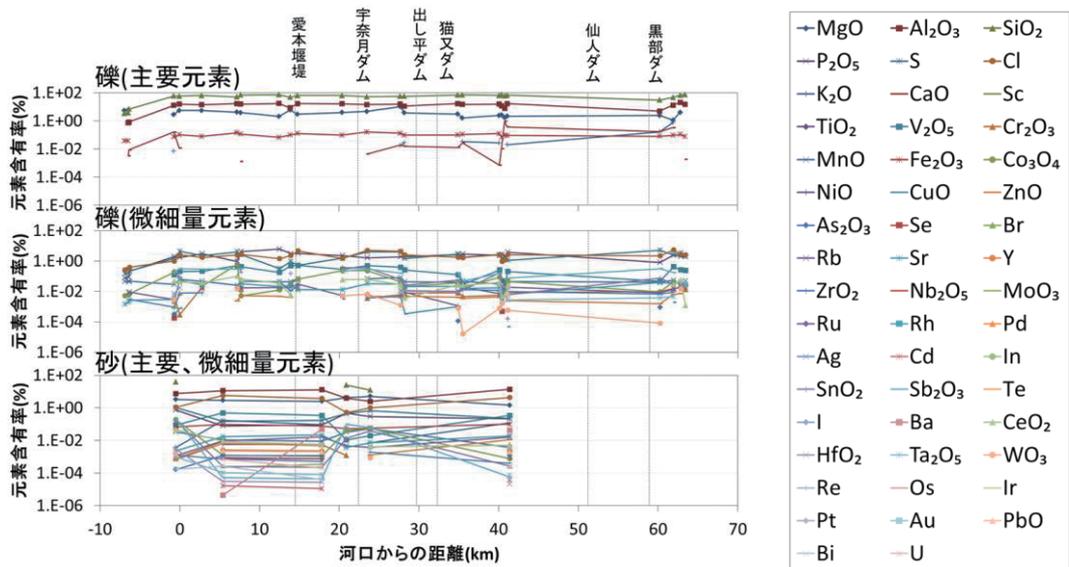


図-4 黒部川における元素組成の縦断分布.

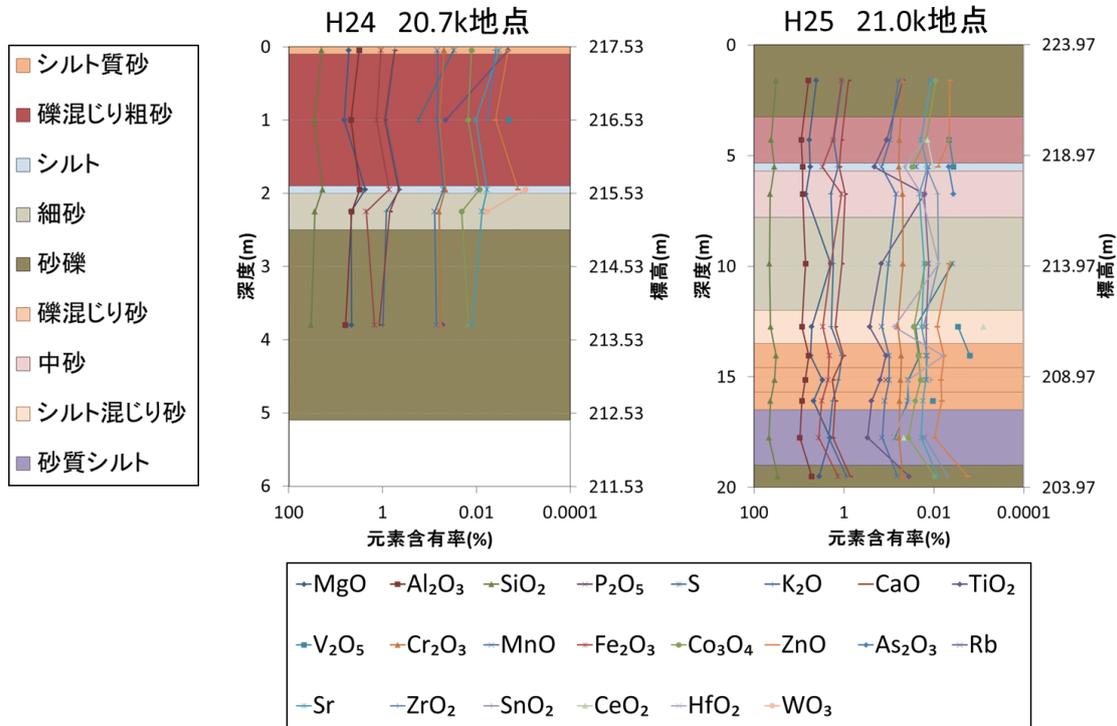


図-5 宇奈月ダム湖内で平成24年と25年に実施されたボーリングコアの元素組成.

試料を分析した場合には、複数試料データを平均化した。階層クラスター分析の結果を図-3に示す。約50%がクラスター2に分類されている。クラスター1と3にはそれぞれ約26%、24%が分類されている。クラスター1は砂、クラスター2はNiとMoを含む礫、クラスター3はNiとMoを含まない礫であった。統計的なクラスター分析結果は、物性分類からも適切であったと評価できる。

いずれの河川も中流から下流は主にクラスター2に分類されており、類似した元素組成であることが考えられる。一方、例えば常願寺川のように、上流部と中流・下流部では明瞭に石礫の種類が異なっていることがわかる。

5. 黒部川における土砂礫の元素組成の特徴

黒部川では、ダム湖の機能維持や下流河川の河床低下や海岸侵食防止のために、出し平ダムと宇奈月ダムによる連携排砂事業が実施されている。世界的にも稀な事業であり、土砂動態も特徴的であると考えられる。本稿では、研究対象とした4河川の中で特に黒部川の元素組成の特徴について報告する。

(1) 元素組成の縦断分布

図-4は黒部川における土砂礫の元素組成の縦断分布を示している。ここで、各地点において複数の試料を分析

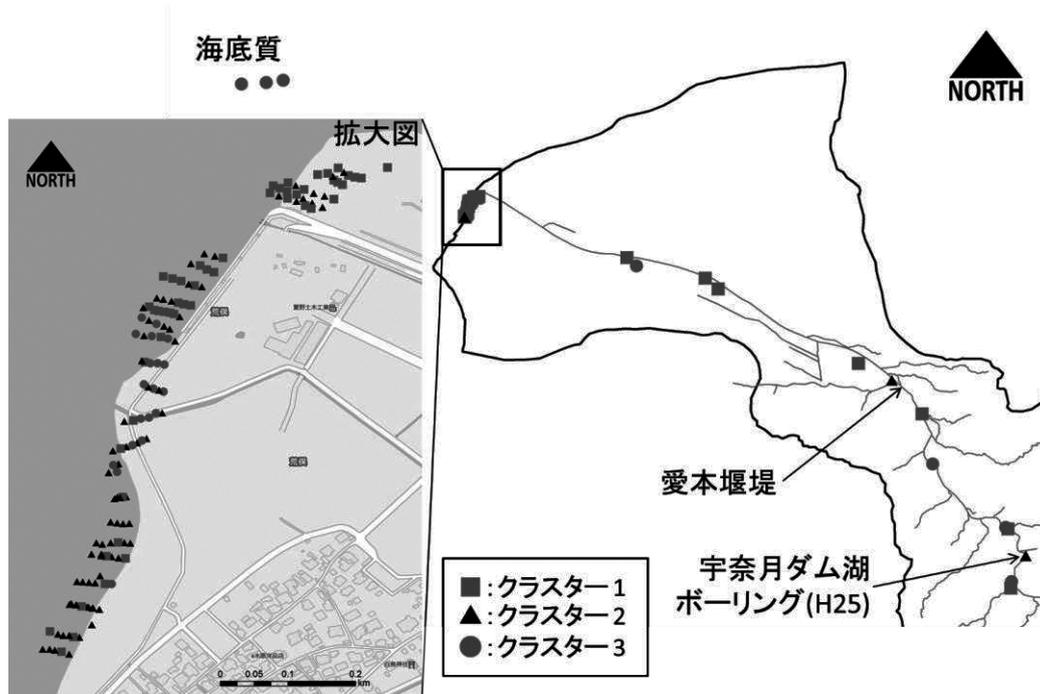


図-6 宇奈月湖から下流における砂礫の元素組成を利用した階層クラスター分析の結果。

している場合にはそれら試料の平均値を示している。また、図中には土砂礫の自然流下を阻害すると考えられるダムと堰堤の位置を示している。本図中には、支川の黒薙川、祖母谷川とタンボ沢の試料データも含んでいる。さらに、海底質の試料データも併記している。いずれの元素についても、縦断方向に系統的な傾向は認められなかった。黒部川に限らず、他の3河川についても同様の傾向であった。

しかしながら、礫と砂では傾向が異なっていることがわかった。礫については、主要6元素は縦断方向に安定的な割合で組成しているものの、微細量元素については元素によって縦断方向の挙動が大きく変化するものが認められる。砂については、宇奈月ダムを挟んだ上下流で特に微細量元素の挙動が大きく変化している。しかし、ダム湖前後と河口の組成が良く似ていることから、連携排砂による効果が推察される。

(2) 宇奈月ダム湖内の土砂と河口海浜砂の関係

近年、黒部川河口左岸の海浜の回復が顕著であることが報告されている¹²⁾。平成13年から実施している連携排砂による効果が示唆されているものの、測量や航空写真だけでは明確な因果関係を示すことは困難である。

そこで本研究では、平成24年と25年に実施された宇奈月湖内のボーリングコアと黒部川河口左岸の海浜砂の元素組成を比較検討した。平成24年は宇奈月ダム堤体から100 m上流における20.7 kmの湖左岸、平成25年は宇奈月ダム堤体から400 m上流における21.0 kmの湖中心部のボーリングコアを試料とした。いずれも堤体から最も近い位置のボーリングコアである。各年ともに10月～12月に実施されている。各層の中央部の試料について元素分析を行った。柱状図と各層の元素分析の結果を図-5に示

す。全く検出されなかった元素は第4章(2)で先述したものに加えて、平成24、25年のボーリングコアとともにSc, Ni, Cu, Se, Y, Cd, Sb, Ba, Ta, Pb, Biが検出されなかった。先述した河川内の元素組成とは異なる結果であった。また、平成24、25年の結果とともに、主要6元素については、鉛直方向の含有率に大きな変化は認められない。

平成25年に実施された21.0 km地点のボーリングコアの鉛直平均元素組成に着目して、黒部川全体の平均元素組成を示す図-2と比較すると、15種類の元素が検出されなかった。検出可能な81元素の中では、57%しか検出されなかった。河川では70～80%を検出していることから、ダム湖の堆積物には多くの重元素を含まない有機物が多いことが推察される。含有率1%以上の主要6元素(Mg, Al, Si, K, Ca, Fe)は、河川や海浜、海底の元素組成と同様であった。

次に、平成25年に実施されたボーリングコアと宇奈月ダムから下流、海浜砂の元素組成データを利用して階層クラスター分析を行った。手法等は先述の通りであり、3つにクラスター分類した。なお、ボーリングコアデータについては、連携排砂として流出していると推定されている深度2 mまでの分析結果を使用した。

図-6は宇奈月湖から下流における砂礫の元素組成を利用した階層クラスター分析の結果を地図に示している。分析手法等は図-3と同様である。宇奈月湖から下流の河川においては、主にクラスター1に分類されており、距離が短いことから類似した元素組成であると推察される。

拡大図で示した黒部川河口左岸の海浜砂の53%がクラスター2に分類され、広く分布している。宇奈月ダム湖のボーリングコアデータがクラスター2に分類されている。これらは、宇奈月ダム湖内の表層土砂礫と黒部川河

口左岸の海浜砂の元素組成が非常に良く似ていることを示している。黒部川河口左岸の海浜砂の34%がクラスター1に分類され、河川の砂礫と同様の分類である。残り13%がクラスター3に分類されており、海底質と同様の分類であることから、海から供給されている砂礫であることが推察される。

(3) 安定した元素を利用した指標化の検討

土砂礫の生成過程は固有であり、一つ一つの砂礫の元素含有率そのものだけを利用して土砂礫の分布特性を明らかにするには、空間のバラつきを検討する必要がある。また、多くの元素組成の特徴があり、どの元素を利用することが適切か否かを評価する必要がある。そこで、検出した元素含有率をFeなど安定した元素の含有率で正規化することによる指標化の可能性について検討した。本研究では、全試料にわたって安定的に検出されたAl, K, Ca, Feと主要元素であるMg, Siを利用して各元素を正規化した。その結果、Caの含有率による正規化値は縦断分布に特徴が認められたので図-7に礫の結果を示す。主要元素5種類(Mg, Al, Si, K, Fe)について示す。仙人ダムから宇奈月ダムまで、正規化値に大きな変化は認められないものの、愛本堰堤直下に上昇し、下流方向に減少している。6種類の元素含有率を利用した中では、Caの含有率が最も定性的な傾向を示しており、Caを利用することによって土砂礫分布の指標化が可能であると考えられる。

6. 結論

本稿では、携帯型蛍光X線分析を利用した河川の土砂礫のマクロ的な分布特性の解明可能性について検討を行った。

黒部川、常願寺川、庄川、小矢部川における合計379の土砂礫試料を分析することによって、河川ごとの土砂礫の元素組成の特徴を明らかにした。特に、微細量元素は河川ごとに特徴的な組成を持っていた。小矢部川では全川にわたってSeが検出されず、MgとCoの検出率が100%であった。黒部川におけるTiの検出率は100%であった。庄川では、SnとSbの含有率が他3河川と1オーダー以上小さい。常願寺川では、PbとBiの値が他3河川よりも1オーダー以上大きい。

黒部川下流域においては、宇奈月ダム湖に堆積していた土砂礫と河口左岸の海浜砂の元素組成の特徴が良く一致していることがわかった。

携帯型蛍光X線分析を利用し、多くの砂礫試料の元素組成データを階層クラスター分析することによって、マクロ的な河川土砂礫の分布特性を明らかできる可能性が高いことがわかった。

また、Caの含有率を利用した正規化値は、定性的に河川縦断方向の土砂礫の特徴を表現していた。しかしながら、物理的意味については今後の検討課題である。

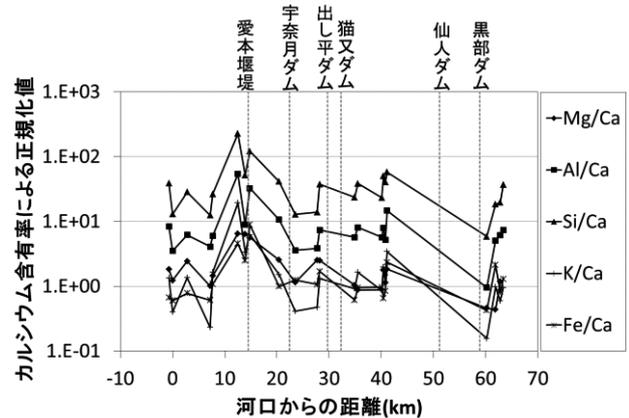


図-7 黒部川におけるCaの含有率による正規化値の縦断分布。

謝辞：本研究の遂行に際しまして、蛍光X線分析やデータ解析について丸茂克美教授(富山大学大学院理工学研究部)にご教授いただきました。国土交通省富山河川国道事務所と同黒部河川事務所からデータや資料の提供をいただきました。合わせてここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三輪賢志, 永井健二, 荒木孝宏, 中川達也: 富士山大沢川における土石流観測, 砂防学会誌, 第62巻, pp.65-68, 2009.
- 2) Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y.: Young upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 1, No.11, 2000, DOI: 10.1029/2000GC000083.
- 3) 加藤茂, 光山英典, 岡辺拓巳, 青木伸一: 沿岸域での土砂堆積・侵食域調査における蛍光X線分析の適用に関する検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第68巻, pp.651-655, 2012.
- 4) 加藤茂, 岡部拓巳, 光山英典, 中垣聡: 着色砂調査と蛍光X線分析を併用した河口干潟での土砂移動調査, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第69巻, pp.576-580, 2013.
- 5) 伊藤麻由佳, 松本一郎: 河川底質物の地質学的・地球科学的研究- 中部地方木曾川と庄内川の比較 -, 島根大学教育学部紀要(自然科学), 第41巻, pp.179-189, 2007.
- 6) 大石哲, 砂田憲吾, Dian Sisingsih, 宮沢直季: 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, 水工学論文集, 第54巻, pp.673-678, 2010.
- 7) 国土交通省: 黒部川水系河川整備基本方針, 2006年.
- 8) 国土交通省: 常願寺川水系河川整備基本方針, 2005年.
- 9) 国土交通省: 庄川水系河川整備基本方針, 2007年.
- 10) 国土交通省: 小矢部川水系河川整備基本方針, 2008年.
- 11) 佐野有司, 高橋嘉夫: 地球化学, 共立出版, pp.266-270, 2013.
- 12) 宮下優, 竹内正信, 池田博明: 黒部川における有効粒径集団毎の移動特性と課題について, 平成24年度北陸地方整備局事業研究発表会, No.14, 2012.

(2015. 4. 3受付)