鵒川海岸の土砂生産源と粒径の季節変化

Source of Sediment and Seasonal Variation in Particle Size in the Mukawa Coast, Northern Japan

水垣 滋¹・大塚淳一²・丸山政浩³・矢部浩規²・浜本 聡⁴

Shigeru MIZUGAKI, Junichi OTSUKA, Masahiro MARUYAMA
Hiroki YABE and Satoshi HAMAMOTO

To elucidate the seasonal change, spatial distribution of particle size and source of coastal sediment, monitoring and fingerprinting of coastal sediment were conducted in the Mukawa Coast, the Pacific Ocean of Hokkaido, northern Japan. Statistical analysis among the indices of the particle size and the wave and discharge suggested that the seasonal and temporal variation in particle size can be controlled by fine sand dynamics through the interaction between seasonal change of wave and discharge and geographical condition associated with river mouth and port. The source areas of the fine sand were estimated as upstream and midstream of the river watersheds through the fingerprinting technique using natural radionuclides.

1. はじめに

1950年代以降、全国的に顕著な海岸侵食が指摘されており、海岸地形や砂浜、生物の生息場を長期的に保全するために、土砂の量だけでなく粒径を考慮した、山から沿岸まで一貫した流砂系の総合的な土砂管理が求められている(磯部, 2013)。近年になって河川上流域から海域まで一貫した研究事例が見られるようになったが(たとえば佐藤ら, 2004)、一般化されるほどの知見は蓄積されていない。

流砂系の観点から長期的な海岸保全策を目指すためには、海岸土砂の粒径特性について時空間変動を把握し、その土砂の生産源を把握することが重要となる。流砂系における海岸土砂の生産源推定には、トレーサとして鉱物組成が一般的に用いられてきたが(たとえば山本ら, 2001; 福山ら, 2003)、推定される生産源情報は定性的な記載にとどまっていた。一方Mizugakiら(2012)は、岩石由来の放射性同位体をトレーサにすることで、浮遊土砂の生産源を地質(岩石)別に定量評価できる手法を構築した。この手法を用いることで、海岸土砂の生産源を明らかにできる可能性がある。

本研究の目的は、海岸土砂の粒径特性とその時空間変動特性、また流域における生産源を明らかにすることである。北海道南部の鵒川河口域を含む海岸を対象に、粒径特性をモニタリングし、粒径と波浪・河川流量との関係について統計解析により検討した。また、放射性同位体トレーサを用いて土砂生産源の推定を行った。

図-1 調査位置図

2. 調査地概要

調査地は、北海道南部の一級河川鵒川流域(流域面積1270km²)、沙流川流域(流域面積1350km²)および周辺海岸とした(図-1)。鵒川河口周辺では1948年~2004年に最大で約500mの汀線後退がみられ(図-1)、河口干潟が大幅に減少している。また2006年8月の台風来襲時には下水道処理施設などが越波被害を受けたため、長期的な海岸保全策が求められている。

海岸土砂の主な生産源である鵒川・沙流川流域では、複雑に地質が入り組んでおり、土砂生産量は地質によって異なる(図-2、表-1; Mizugakiら, 2012)。沙流川の上・中流域の堆積岩や付加コンプレックスで構成される地域では、2003年8月の台風に伴い斜面崩壊や地すべりが多発し、現在でも高濃度の浮遊土砂の流出が確認されている(Abeら, 2012)。

1 正会員 博(農) (独法)土木研究所 寒地土木研究所
2 正会員 博(工) (独法)土木研究所 寒地土木研究所
3 (独法)土木研究所 寒地土木研究所
4 正会員 (独法)土木研究所 寒地土木研究所

3. 土砂試料採取および分析方法

(1) 海岸土砂の採取方法

調査地は、厚真川河口から鵡川、沙流川および日高門別川の河口周辺まで約27km区間とした(図-1)。海岸線沿いに1~3km間隔で15の調査地点を設定し、海岸土砂採取地点とした。土砂試料の採取は2010年11月18日~2012年10月12日まで、約1ヶ月間隔で計21回(No.15は20回)行い、各地点の波打ち際沿いを10m間隔で5箇所から表層5cm程度の土砂をスコップで採取し、混合して1試料とした。また、放射性同位体分析用に2010年6月および8月にも14地点で土砂を採取した(28試料)。

(2) 流域土砂の採取方法

流域から沿岸への流出土砂について粒径および放射性同位体特性を調べるため、鵡川および沙流川流域の山地小流域から下流の河口付近まで26地点において、2009年11月~2010年11月に浮遊土砂サンプラーおよび表面採水により出水中の浮遊土砂を採取した(図-2; 138試料)。

図-2 流域の地質と土砂採取箇所

表-1 調査流域の地質(岩石)

グループ名	岩相	時代
堆積岩	A 堆積岩類(海成・非海成)	白亜紀・中新世
変成岩	B 泥質片岩, 蛇紋岩等	白亜紀, 時代未詳
付加コンプレックス	C-1 玄武岩ブロック(海底火山起源)	ペルム期(ジュラ紀-白亜紀)
	C-2 玄武岩岩体	ジュラ紀-前期白亜紀
	C-3 メランジュ基質	白亜紀
	砂岩優勢砂岩泥岩互層	後期白亜紀後期-前期漸新世
深成岩	D 花崗閃緑岩	前-中期中新世
	苦鉄質深成岩類	中期始新世

産総研20万分の1シームレス地質図をもとに、Mizugakiら(2012)の区分で生産源をグループ化した。

また、二風谷ダム貯水池の24地点において、2010年6月および11月の2回、堆積土砂を採取した(48試料)。

(3) 土砂試料の分析方法

採取した土砂試料の粒径特性を調べるために、フルイ試験を行った。さらに、浮遊土砂の0.425mm以下の画分を対象にレーザー回折・散乱法により粒度分布を調べた。

(4) 土砂生産源推定法

浮遊土砂、ダム貯水池堆積土砂および海岸土砂の生産源を推定するために、ガンマー線スペクトロメトリー(井戸型高純度Ge検出器ORTEC GWL120-15; 波高分析装置 SEIKO EG&G MCA7600)により土砂試料の鉛-212(^{212}Pb)、アクチニウム-228(^{228}Ac)およびカリウム-40(^{40}K)を定量分析した(Mizugakiら, 2012)。分析試料の均一性を確保するため、採取した土砂試料を風乾したのち0.425または0.5mmのフルイを通過した画分を分析試料とした。生産源の寄与の推定は、Mizugakiら(2012)の方法にしたがい、各土砂試料について ^{212}Pb 、 ^{228}Ac 、 ^{40}K 濃度における各生産源グループとのマハラノビスの距離を算出し、次式で各生産源の寄与を推定した。

$$p_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで p_i は堆積土砂に対する生産源 i からの寄与、 d_i は堆積土砂と生産源 i との ^{212}Pb 、 ^{228}Ac および ^{40}K 濃度におけるマハラノビスの距離、 n は生産源の区分数である。生産源の区分は、Mizugakiら(2012)が鵡川および沙流川流域を対象に区分した地質(岩石)別の6グループを採用した(表-1, 図-2)。また粒度分布の指標として、等価球体を仮定した比表面積を算出した(Mizugakiら, 2012)。

(5) 波浪・流況データ

北海道開発局の鵡川観測所(KP2.55)および富川観測所(KP2.70)の日平均流量データ(暫定値)、波浪データは様似観測所(鵡川河口より東南東約95km)のデータを用いた(図-1)。

4. 結果と考察

(1) 波浪特性・流出特性と海岸土砂の粒径

波向きは、明瞭な季節変化が見られる。10月~3月の秋から冬は西南西から南西が卓越し、4月~9月の春から夏は主に南南東から南の波が卓越する(図-3(a))。有義波高が2m以上の高波浪イベントは、5月、9月~12月に多く見られ、夏は波高が小さい(図-3(b))。周期が10秒以上の大きな波浪イベントは、春から夏、秋にかけて南南東~南南西の波向きの時に多く見られる(図-3(c))。流域からの流入は、4月~5月の融雪出水と7月~11月の前線・台風に伴う降雨出水があり、12月~3月は河口付近では河川が凍結し、流量は少ない(図-3(d))。

図-3 観測期間中の波浪・流量と海岸土砂の中央粒径（波向きは北を0°とした時計回りの角度）

海岸の全地点で採取した土砂の粒度組成を見ると、中砂（54.6%）、細砂（25.1%）、粗砂（11%）で90%以上を占め、シルト・粘土はほとんど含まれない（図-4）。中央粒径（ D_{50} ）は、0.16mm～4.84mmの範囲で、平均は0.51mmであった。 D_{50} の全地点平均は調査時期により0.30mm～0.76mmの範囲で変動し、2010年4月28日、2011年10月12日、2012年1月21日はとくに D_{50} の変動係数（標準偏差/平均；CV）が1.2～1.5とバラツキが大きかった（図-3（e））。

このように、波浪や流況の明瞭な季節変化は、沿岸漂砂の量や移動方向に影響するため、海岸土砂の粒径特性に時空間変動をもたらす可能性がある。そこで、土砂採取期間の波浪・流量と粒径との関係を調べるため、相関分析を行った（表-2）。主要な粒径画分である中砂分はどの指標とも有意な相関が認められず、また河川の最大流量はいずれの粒径指標とも相関が認められなかった。細砂分、最大粒径（ D_{max} ）および D_{50} は波向き、波高、周期のいずれとも有意な相関が認められたが、相関係数は小さい。比較的高い相関が認められたのは、期間最大波

図-4 海岸土砂の粒度組成（サンプル数：314）

図-5 観測期間中の最大有義波高と粒径特性（ r ：相関係数， p ：有意水準）

高と粗砂分および細砂分との関係であり、粗砂分は正の相関、細砂分は負の相関が認められた（図-5）。これらのことから、期間中に観測された波浪イベントの波高が大きいほど細砂分が減少し、粗砂分の寄与が高くなると推察される。

調査地点毎に粒径特性を整理したところ、全観測期間の平均 D_{50} および変動係数CVは地点により異なっていた（図-6）。河口付近のいずれの地点でも D_{50} が小さく、とくに鵠川・沙流川の河口付近（No. 7, No. 11）ではCVも小さい。港で区切られた区間でみると、鵠川および沙流川の河口から西向きに D_{50} およびCVの増加傾向が認められる。

河川からは春の融雪出水や夏・秋の降雨出水に伴い（図-3（d））浮遊土砂が大量に沿岸に供給されるが、この時期に卓越する南南東～南からの波により、海岸土砂と交換しながら南東から北西方向に移動し、港の突堤などにトラップされると考えられる（山本ら、1998）。

そこで、河口からの距離と粒径との関係を調べるため、厚真川、鵠川、沙流川および日高門別川の各河口から西向きの距離に対して、 D_{50} および変動係数CVをプロット

表-2 海岸土砂の粒径特性と波浪・流量との相関係数

		中礫	細礫	粗砂	中砂	細砂	D_{max}	D_{50}
波向き	平均	0.167**	0.111*	0.120*	0.007	-0.174**	0.139*	0.183**
	最大	0.105	0.176**	0.265**	0.060	-0.308**	0.119*	0.159**
波高	平均	0.154**	0.190**	0.223**	0.038	-0.288**	0.160**	0.196**
	最大	-0.207**	-0.161**	-0.103	0.094	0.098	-0.193**	-0.159**
周期	平均	-0.194**	-0.143*	-0.099	0.067	0.111	-0.217**	-0.176**
	最大	-0.194**	-0.143*	-0.099	0.067	0.111	-0.217**	-0.176**
流量	鵠川	-0.022	0.021	-0.022	0.074	-0.045	-0.034	-0.032
	沙流川	0.031	0.057	0.047	0.038	-0.090	0.048	0.021

波向き、波高、周期および流量はいずれも前回の調査日からの期間最大および平均の値を採用した。サンプル数は314。**は有意水準0.01未満、*は有意水準0.05未満で有意であることを示し、太字は正の相関、イタリック太字は負の相関を示す。

図-6 平均 D_{50} と変動係数CVの空間分布 (矢印は河口の位置を示し、西から厚真川、鵠川、沙流川および日高門別川。点線は漁港・港の位置を示し、西から苦小牧東港、鵠川漁港、富浜漁港および日高門別漁港。)

図-7 河口からの西向き距離と平均 D_{50} と変動係数

した (図-7)。鵠川・沙流川河口の西側では河口からの距離に対して D_{50} に増加傾向が認められた。CVは日高門別川の河口付近で大きいものの、概ね河口からの距離に対して増加傾向を示している。このことは、河口付近の土砂は粒径が小さく、安定しており、河口から西に離れるにしたがって海岸土砂の粒径やその時間変化が大きくなることを示唆している。

河口からの西向き距離が海岸土砂の粒径特性に及ぼす影響について考察する。流量と D_{50} との間に有意な相関は認められなかったことから (表-2)、出水が広域にわたって海岸土砂の粒径に変化をもたらすとは考えにくい。むしろ、河口付近には小規模な出水でも頻繁に細粒土砂が供給されるため、河口付近では安定して小さな粒径で海岸土砂が構成されると考えられる。一方、粗砂分および細砂分は期間最大有義波高とそれぞれ正の相関および負の相関を示したことから (表-2; 図-5)、 D_{50} の変動が波浪イベントによってもたらされると考えられる。すなわち、河口から西向き距離が大きいほど、大規模な出水時のみ細粒土砂が到達し堆積するが、冬の高波浪により細粒分が流出して粗粒化し (佐藤ら, 2000)、また D_{50} の季節変動が大きくなったものと推察される。このよう

図-8 海岸土砂・ダム堆積土砂・浮遊土砂の生産源寄与 (括弧内の数字はサンプル数。生産源は表-1参照。)

図-9 海岸土砂、ダム堆積土砂、浮遊土砂の比表面積 (ボックスの上端・下端はそれぞれ75%値・25%値、ひげ上端・下端は最大値・最小値、外れ値は75%値+(75%値-25%値)×1.5より大きい値、25%値-(75%値-25%値)×1.5より小さい値を示す。括弧内の数字はサンプル数。)

に、鵠川海岸では、河口や港の地理的条件、流域からの土砂供給と波浪の季節性との相互作用が、海岸土砂粒径の時空間分布に影響していることがわかった。

(2) 土砂生産源の推定

鵠川海岸の土砂は、中央粒径は0.5mm程度、おもに中砂で構成されること、また流域からの土砂供給や波浪の季節変化による細砂分 (0.075~0.25mm) の挙動が、粒径特性の時空間分布において重要な役割をはたす可能性が示された。本研究では、土砂生産源の推定において粒径0.425mmないし0.5mm以下の画分のみを取り扱うが、これらの粒径階の生産源を把握することは、流砂系を考慮した海岸保全策を検討する上で重要な情報を与えるものと考えられる。

流域の浮遊土砂 (SS)、ダム貯水池の堆積土砂および海岸土砂の生産源の寄与を算出したところ、おもな生産源地域が異なることがわかった (図-8)。浮遊土砂の生産源は中・下流域に広く分布する堆積岩 (A)、変成岩 (B) の寄与が高く、ダム堆積土砂は鵠川上流域と沙流川中・上流域に分布する付加コンプレックス (メランジュ基質・堆積岩) (C-3; 以下、付加体基質)、海岸土砂はそれに加えて沙流川最上流域に分布する深成岩 (D) の寄与が高かった (図-2, 図-8)。堆積岩および変成岩の寄与

図-10 比表面積と生産源寄与との相関(r :相関係数, p :有意水準)

図-11 河口からの西向き距離と生産源寄与との相関 (r :相関係数, p :有意水準)

は浮遊土砂, ダム堆積土砂, 海岸土砂と徐々に小さくなり, 一方, 付加体基質および深成岩の寄与は大きくなる(図-8). 付加コンプレックスの玄武岩ブロック(C-1)および玄武岩岩体(C-2)の寄与はいずれもほとんど変わらない. 土砂の比表面積は浮遊土砂, ダム堆積土砂, 海岸土砂の順に小さく(図-9), 生産源寄与との関係が示唆される. そこで, 比表面積と土砂生産源の寄与との関係を調べたところ, 堆積岩および変成岩の寄与は有意な正の相関が, 付加体基質と深成岩の寄与は有意な負の相関が認められた(図-10). これらのことから, 流域から流出する土砂は, 粒径に応じて流域内の土砂生産源が異なり, また海岸土砂のおもな生産源は付加体基質と深成岩であるが, 地点や時期によって大きく変動していることがわかった.

海岸土砂に対する付加体基質および深成岩の寄与について波浪・流量や粒径との相関を調べたところ, 有意な正の相関は深成岩の寄与のみ, 鵠川・沙流川の最大流量(それぞれ相関係数 $r = 0.217$, 有意水準 $p = 0.008$; $r = 0.193$, $p = 0.019$)および $0.5 \sim 0.25\text{mm}$ 画分($r = 0.176$, $p = 0.019$)に対して認められた. このことから, 流量が大きなイベント時に上流の深成岩地域から比較的粗粒な土砂が供給されることが示唆される. また深成岩の寄与

は, 河口からの西向き距離に対して有意な正の相関が, 最も寄与が高い付加体基質は有意な負の相関が認められた(図-11). これらのことは, D_{50} と河口からの距離との関係(図-7)から推察された, 高波浪時の細粒分流出による粗粒化を支持する結果であり, 一方, 河口付近への恒常的な細粒分の供給には, 付加体基質からの寄与が大きいものと推察される.

5. 結論

鵠川海岸における粒径モニタリングと放射性同位体トレーサによる鵠川・沙流川流域における生産源推定の結果, 粒径特性の時空間分布は港ではさまれた区間において河口からの距離と波浪や河川流量の季節変化による細砂分の挙動で説明することができた. また, 海岸土砂の主要な生産源は鵠川・沙流川の中・上流域に分布する付加コンプレックス(メランジュ基質・堆積岩)と深成岩の地域であると推定された. 鵠川海岸の長期的な保全には河川上流域から沿岸域まで土砂の連続性を確保する重要性を示している.

謝辞: 波浪・流量データおよびダム堆積土砂は北海道開発局室蘭開発建設部より提供をうけた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 磯部雅彦(2013): 砂浜の機能と現状-海岸の変遷と海岸工学の展開を踏まえて-, 土木学会誌, 第98巻, 第5号, pp. 6-9.
- 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹也・芹沢真澄(2004): 天竜川-遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 571-575.
- 佐藤慎司・前田 亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅広・鳥居謙一・山本幸次(2000): 鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査, 土木学会論文集, 第663巻, II-53, pp. 89-99.
- 福山貴子・松田武久・佐藤慎司・田中 晋(2003): 湘南海岸流砂系の土砂動態と相模川河口地形の変化, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 576-580.
- 山本幸次・鳥居謙一・佐藤慎司・田中 晋・宮野正実(2001): 流砂系における堆積物調査手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 581-585.
- 山本 徹・吉澤 良・黒木幹男・板倉忠興(1998): 胆振日高海岸における海浜変形と流域の土砂生産に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 621-625.
- Abe, T., S. Mizugaki, T. Toyabe, M. Maruyama, Y. Murakami and T. Ishiya (2012): High range turbidity monitoring in the Mu and Saru river basins: All-year monitoring of hydrology and sediment transport in 2010, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 70-79.
- Mizugaki, S., T. Abe, Y. Murakami, M. Maruyama and M. Kubo (2012): Fingerprinting suspended sediment sources in the Nukabira River, northern Japan, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.5, No.1, pp. 60-69.