蛍光砂を用いた高波浪イベント時における 底質移動動態に関する一考察

鈴木 崇之¹・伊波 友生²・中村 由行³・伴野 雅之⁴

¹正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: suzuki-t@ynu.ac.jp

²横浜国立大学 大学院都市イノベーション学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: inami-yuu-zc@ynu.jp

³正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: nakamura-y@ynu.ac.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所主任研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: banno-m@pari.go.jp

遡上域から砕波帯内外にかけての底質移動, および鉛直混合動態を明らかにすることを目的とし, 茨城県波崎海岸において波浪計測, 地形測量, および蛍光砂の投入を実施し, 高波浪来襲後にコア採取を行った. コアはX線CTスキャン実施後に細分割し, 蛍光砂採取, 粒度分析を行った. その結果, 地形測量により高波浪に伴うバーの沖側への移動が確認されたが, バー周辺の蛍光砂の陸側への移動は見られず流速データ等より底質は沿岸方向, および沖側に移動したと推測された. また, 汀線付近に投入した蛍光砂はトラフ部分まで移動していたがバーまでは到達しておらず, 底質は汀線付近からバーまでの領域とバーから沖側の領域において混合していないことが示唆された. 加えて, 高波浪時の底質移動にはトラフ部分の沿岸漂砂の影響が大きいことが推察された.

Key Words : *fluorescent sand, sediment movement, vertical mixing, storm, longshore current*

1. はじめに

遡上帯から砕波帯内外にかけての領域は, 活発な底質移動が発生しており, これまでに各領域における移動機構解明に向けて多くの研究がなされている.

海底表層の底質粒径に着目した研究では, 加藤ら⁹⁾が茨城県波崎海岸にて観測された地形断面と底質採取により, 時化による底質のふるい分け特性について報告している. また, 柳嶋²⁾は同海岸での底質の分級と外力の関連性について検討を行っている. 蛍光砂を用いた現地観測として, 灘岡ら⁴⁾は茨城県阿字ヶ浦海岸にて局所的な底質移動方向と移動速度, 鉛直混合過程を示している. また, 遠藤ら⁵⁾は太東海水浴場にて粒径ごとに色分けした蛍光砂を投入し, 粒径と漂砂量係数の関係性を示している.

底質の鉛直混合や堆積侵食履歴等の検討には, コアを用いた解析が有用でありこれまでも多くなされている. 山本ら⁶⁾は鹿島灘において取得したコアにより, 海浜の堆積過程を推定している. 伴野ら⁷⁾も鹿島灘におけるコアより採取された貝殻の年代を放射性炭素年代測定する

ことにより, 数十年から数百年の海底土砂の移動, 堆積履歴を推定している. また, 大潟海岸においても馬場・内山⁸⁾によりコアによる底質空間分布の解析が行われている. 一方, 室内実験では, 田中ら⁹⁾が大型造波水路を用いた実験において, 堆積性および侵食性の規則波条件下における地形変化と分級過程を定量的に捉えている. 地形変化時における底質内部構造の検討として, X線CTを用いた解析も実施されている¹⁰⁾. このように, 蛍光砂, コアを用いた検討は多くなされているものの, 高波浪時における遡上帯から砕波帯内外までの領域の漂砂体系を一体的に解析し, 地形形状や岸沖, 鉛直底質移動特性を考慮した砂移動メカニズムの解明に関する研究は数少ない.

そこで本研究では, 遡上帯から砕波帯内外にかけての一角を研究対象領域とし, 蛍光砂の投入とコア採取により, 高波浪イベント時における底質の岸沖, および鉛直方向移動動態を明らかにすることを目的とした現地観測を行った.

2. 現地観測の概要

(1) 現地観測地の概要

本研究では、茨城県の波崎海岸に位置する独立行政法人港湾空港技術研究所所有の波崎海洋研究施設 (Hazaki Oceanographical Research Station, HORS, 図-1) にて現地調査を実施した。HORS では週に1回、長さ427 mの観測栈橋に沿って地形断面測量が5 m ピッチで行われている。陸上部はスタッフとオートレベルを用いて測量し、海域部は質量3 kgのレッドを海底面まで降ろして測量を行っている。当海岸を構成する砂の中央粒径は0.18 mmである。なお、岸沖方向位置 (x) はHORS固有の座標軸であり、地盤高の基準 (D.L.) は波崎港工事基準面 (T.P. -0.687 m) とし、観測地点における干潮位、平均潮位、満潮位はそれぞれ-0.20 m, 0.65 m, 1.25 mである。

波浪データは、栈橋先端付近となる $x=303$ m 地点に設置された超音波式波高計によって得られたデータのうち、毎正時をはさむ20分間を用いて算出された有義波高、有義波周期を使用した。

(2) 観測日程、および観測内容

観測は、2014年10月19日から30日までの12日間実施した。この期間中に行われた4回の地形測量結果を図-2に示す。観測期間中にバーが沖側に約30 mに移動していたことがわかる。

蛍光砂は、中央粒径0.18 mmの波崎産の砂に5色の蛍光塗料を塗装したものを使用した (図-3)。これらの蛍光砂を、2014年10月19日、岸沖方向に概ね60 mピッチに計5箇所 ($x=65$ m, 桃色; $x=115$ m, 黄色; $x=180$ m, 青色; $x=240$ m, 緑色; $x=320$ m, 赤色) に約225 kgずつ海底面に投入した (図-2中の丸印)。

栈橋上 $x=303$ m 地点にて計測された波浪データを図-4に示す。蛍光砂投入3日後の10月22日に、波高約2.5 mの高波浪が来襲した。その後、10月28日に再びやや高い波浪が来襲したものの徐々に波高は低下し、静穏となった10月30日にコア採取を実施した。

コア採取は、内径52 mm (外径60 mm)、長さ1.3 mの透明塩ビパイプを用いた。採取箇所は、投入した蛍光砂位置の概ね中間地点とし、計8箇所において実施した ($x=0$ m, 40 m, 80 m, 115 m, 150 m, 215 m, 270 m, 320 m, 図-2の黒縦実線)。採取したコアの概要を表-1に示す。 $x=0$ m 地点は汀線よりも陸側の地点であるが、それ以外は海中において潜水士による打ち込みにより採取した。海中にて採取したコアの平均長は43.7 cmであった。

3. 解析結果および考察

採取したコアは、X線CTスキャン (LigheSpeed Ultra

図-1 波崎海洋研究施設 (HORS) の位置

図-2 観測期間中の地形変化、および蛍光砂投入位置 (丸印) とコア採取位置 (黒縦実線)

図-3 蛍光砂 (a) 桃, (b) 黄, (c) 青, (d) 緑, (e) 赤

表-1 採取したコアの概要

地点 x [m]	0	40	80	115	150	215	270	320
コア長 [cm]	77	40	50	42	52	30	46	46
分割数	17	8	12	9	12	8	10	11

図-4 栈橋先端付近での有義波高、および有義波周期

16GE, ヘルスケア・ジャパン(株)) による撮影を行った。画像は、X線の透過量の違いから、空間に占める密度の高い場所は白く写り、密度の低い場所は黒く写る。これにより、目視による確認の困難な堆積構造や葉理面を把握することができる。さらに、コアを半割したのち、コア連続撮影装置 ((有)アルファークム) による断面撮影を行った。

この後、蛍光砂の抽出と底質粒度分析のために各コアを表層から5 cm毎に分割した。各コアの分割数を表-1に示す。ただし、葉理面がある場合には適宜分割長を短くする対応を行った。始めに、小分けにされた各サンプルに含まれる蛍光砂数の計測を行った。蛍光砂は、分割したサンプル毎に暗室においてブラックライトを当てながら抽出し、色別に個数を計測した。また、粒度分析に関しては、連続全自動乾式音波ふるい分け測定器 (RPS-205, (株)セイシン企業) を用いてサンプル毎に行った。

図-5 岸沖方向位置 $x=0$ m における各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径,
(d) 蛍光砂数

図-6 岸沖方向位置 $x=80$ m における各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径,
(d) 蛍光砂数

始めに、コア採取を実施した測点における解析結果、および考察を示す。次に、今回解析を実施した遡上帯から砕波帯内外における底質の空間的移動動態について考察する。

(1) 各観測点における鉛直混合

本項では、コア採取を実施した岸沖方向地点における各計測項目の鉛直分布 (X線CT画像, 柱状図, 底質中央粒径, 蛍光砂数) を示す。柱状図については、半割後に目視観察、およびX線CT画像より作成した。柱状図中の赤線は葉理面、青線は記載した日付に実施した地形測量によって得られた海底面位置である。

a) 岸沖方向 $x=0$ m 地点

$x=0$ mでの各鉛直分布を図-5に示す。この地点は遡上帯にあたり、コア取得時は汀線位置よりも陸側であった。中央粒径は深度により変化しており、10 cm以浅にかけてと70 cm以深に粗い層が存在していた。蛍光砂については、桃色 ($x=65$ m投入) と黄色 ($x=115$ m投入) が20 cm以浅において確認できる。黄色が確認されたことから100 m以上の岸向き底質移動が確認できた。計4回計測された地形断面よりも深い地点に蛍光砂が見られたことから、高波浪時に少なくとも深度20 cm辺りまで侵食され、その後堆積したと推察できる。

b) 岸沖方向 $x=80$ m 地点

$x=80$ mでの各鉛直分布を図-6に示す。海底面より5 cmから10 cmと20 cmから35 cmにかけて粒径の粗い層が存在していた。蛍光砂は、桃色 ($x=65$ m投入) と黄色 ($x=115$ m投入) がコアの最下層からも採取された。これより、高波浪が来襲した10月22日以降、この深度以深まで侵食が進み、その後、10月30日にかけて50 cm以上の堆積が進んでいたことがわかる。採取された色は桃と黄の2色のみであったことから、高波浪イベント後の堆積ではバーあたりの底質はこの位置まで移流せず、遡上域から砕波帯内を移動していた底質であったと考えられる。

c) 岸沖方向 $x=115$ m 地点

$x=115$ mでの各鉛直分布を図-7に示す。この地点の底質は、粒径の鉛直変化が見られず全層でほぼ均一であり、その平均中央粒径は0.18 mmであった。また、葉理面は他の地点に比べて少なかった。蛍光砂は全層で採取され、特に桃色 ($x=65$ m投入) については全コアの中で最多であり、特に深度20 cmから40 cmにおいて多く見られた。海底面を見ると、20日に深度100 cmとなっており、高波浪後に一気に堆積が進んだと考えられる。地形断面を見ると (図-2), この地点から急激に水深が深くなり海底勾配が急になっていることから、岸側から流れてきた底質がこの場所に堆積した結果であると考えられる。同地点に投入した黄色の蛍光砂が少ないが、これは高波浪時において拡散してしまったか、もしくは今回42 cmと十

図-7 岸沖方向位置 $x=115$ mにおける各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径,
(d) 蛍光砂数

図-8 岸沖方向位置 $x=150$ mにおける各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径,
(d) 蛍光砂数

図-9 岸沖方向位置 $x=215$ mにおける各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径,
(d) 蛍光砂数

分なコア長が取得できなかったことから、より深い箇所
に堆積していることも考えられる。

d) 岸沖方向 $x=150$ m地点

$x=150$ mでの各鉛直分布を図-8に示す。この地点は
一手前のトラフにあたる(図-2)。深度40 cm以浅にか
けて粗い砂が堆積しており、その平均中央粒径は0.72
mmであった。表層付近に粗い砂が堆積していたのはこ
の地点のみである。40 cm以深は細砂が存在していた。
蛍光砂については、これまでと同様に桃色と黄色が確認
された。しかし、トラフ位置である $x=180$ mに投入した
青色については確認されなかった。この考察は次項にて
行う。35 cm以深では蛍光砂は確認できなかったこと、
また、トラフに位置しており地形変化も小さいことから
この位置までは侵食されなかったと考えられる。

e) 岸沖方向 $x=215$ m地点

$x=215$ mでの各鉛直分布を図-9に示す。20 cm以深には
やや粗い層が存在したものの葉理面はあまり見られなか
った。5 cm以浅に存在する黒い斑点は貝殻である。ここ
では桃色($x=65$ m投入)と黄色($x=115$ m投入)が採取
されたが、 $x=150$ m地点と同様に $x=180$ mに投入した青
色は確認されなかった。桃色は $x=65$ m地点に投入して
おり、少なくとも150 m沖方向に移動していたことがわ
かった。

f) 岸沖方向 $x=270$ m地点

$x=270$ mでの各鉛直分布を図-10に示す。本地点は、
蛍光砂投入時はバー頂部であったが、高波浪によりバーが
沖側に移動し大きく侵食が進んだ箇所である(図-2)。
ここではこれまでと傾向が異なり、採取された色は緑
($x=240$ m投入)と赤($x=290$ m投入)であった。測量
結果からは判断できないが、蛍光砂がコアの最下層から
も採取されていることから、高波浪来襲前の20日の海底

図-10 岸沖方向位置 $x=270$ mにおける各計測結果の鉛直分布
(a) X線CT画像, (b) 柱状図, (c) 底質中央粒径, (d)
蛍光砂数

面を基準にすると高波浪により少なくとも93 cm以上侵食し、その後に46 cm以上堆積したといえる。この堆積した層の底質粒径は全層に渡りほぼ均一であり、その平均中央粒径は0.16 mmであった。コアには多くの葉理面が確認されたことから、時間スケールは不明であるが高波浪後段階的に堆積が進んだと考えられる。

(2) 高波浪時における底質移動

本項では、高波浪時における遡上帯から砕波帯内外での底質移動について考察する。解析期間における地形断面変化とこの断面変化から算出した5 m毎の変化土量、および蛍光砂取得数を図-11に示す。図-11(a)の地形断面図中に示した丸印は、それぞれの色の蛍光砂投入地点であり、また、鉛直黒太線はコア採取地点である。この鉛直黒太線の長さはコア長に対応している。観測中の変化土量は、 $x=35$ m, 110 m辺りにおいて21.1 m³, 19.3 m³程度の堆積が進み、 $x=255$ m一帯において34.1 m³程度の侵食であったことがわかる。

図-11 (a) 解析期間における地形断面変化, (b) 土量変化, (c) 蛍光砂数

図-12 解析期間中岸沖方向位置 $x=245$ mにて計測された岸沖方流速と沿岸方向流速

バー頂部やや陸側の $x=245$ m地点 (緑色の蛍光砂投入地点よりも5 m沖側) に、波高計 (AWH-USB, JFEアドバンテック(株)) と流速計 (AEM-USB, JFEアドバンテック(株)) を固定させた小型アレイを設置していた。流速計の計測地点は設置時の海底面上約 0.7 m である。しかし、10月22日から続いた高波浪による地形変化により、24日7時50分頃にアレイが流出している。この時刻までの流速分布 (10分間隔2分間平均値) を図-12に示す。岸沖流速については岸向きを正、沿岸流速は銚子向きを正としている (図-1)。図より、高波浪の来襲と共に沖向きの流れが卓越していることがわかる。また、沿岸流速に関しては、一度銚子方向に向いた流れが時間と共に変化し、23日12時ごろには逆向きに転じていることがわかった。この高波浪までの地形変化は小さいと考えられることから (図-2)、蛍光砂はある程度その場に留まっていたと推測されるが、高波浪時の沿岸流、および岸沖方向の流れにより一気に移流したと考えられる。

$x=65$ mに投入した桃色の蛍光砂は $x=0$ mから215 mまでで確認することができた。取得数から判断すると、沖向きの移動が支配的であったと考えられる。また、 $x=115$ mで桃色の蛍光砂を特に多く確認できたことから、沖向きの流れによる漂砂により、この辺りの堆積が進んだと考えられる。黄色 ($x=115$ mに投入) の蛍光砂は、桃色の蛍光砂と同様の領域で確認できた。この同地点に投入した黄色の個数が少ないが、これはコア長が短く、より深い部分に堆積していることも考えられる。

$x=180$ m地点に投入した青色の蛍光砂は、どのコアからも採取できなかった。蛍光砂投入時、この位置はトラフであり、この部分に生じていた沿岸流により岸沖方向に加え沿岸方向にも移流した可能性が考えられる。 $x=240$ mに投入した緑色の蛍光砂は、僅かであるが $x=270$ m地点でのみ確認できた。緑色に関しても、青色と同様に沿岸方向に移流したと考えられる。バー頂部よりもやや沖側に投入した赤色 ($x=290$ m) の蛍光砂は、 $x=270$ mと320 mで確認できた。沿岸流の分布は、バーよりも岸側にて大きくなるが、その沖側では小さくなることから¹⁾、赤色の蛍光砂は青色や緑色に比べて投入箇所周囲に留まっていたと考えられる。このことが、 $x=215$ mより岸側と $x=270$ mよりも沖側において蛍光砂の取得色に顕著な差が表れた理由と考えられる。

また、高波浪時の地形変化は主に岸沖漂砂が支配的とされているが、地形形状によっては沿岸漂砂の影響も大きいことが示唆された。

5. まとめ

波崎海岸において、波浪計測、地形測量、および蛍光砂の投入とコア採取により、高波浪時における底質移動

動態について検討を行った。主な結論を以下に示す。

(1) 地形測量による侵食堆積履歴と蛍光砂の取得状況により、底質の岸沖移動、鉛直配分機構の検討が可能となった。

(2) 地形断面計測、およびコアのX線CTスキャン画像により、同じ堆積においても葉理面の形成しながらの場合とそうでない場合が確認された。

(3) 高波浪時、底質は汀線付近からバーまでの領域とバーから沖側の領域において、それぞれの領域内のみに移動をし、その領域におおよそ留まっていることが示唆された。また、トラフ部分においては沿岸流の影響が大きいことが推察された。

謝辞：本研究の観測を実施するにあたり、本学修士1年栗原圭梧君、JSPS海外特別研究員Ahmad Nadeem氏に協力頂いた。また、底質粒度分析においては、港湾空港技術研究所、柳嶋慎一氏にご協力頂いた。ここに謝意を表する。本研究は科研費若手研究（A）課題番号26709034、特別研究奨励費課題番号26・04759の支援によるものである。また、解析の一部は高知大学海洋コア総合研究センター共同利用研究（後期14B051）のもとで実施された。

参考文献

- 1) 加藤一正, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 磯上知良, 村上裕幸, 藤田誠：砕波帯内の底質粒度の変動特性—波崎海洋研究施設における現地調査—, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp.37-61, 1990.
- 2) 柳嶋慎一：汀線付近における底質粒径の時空間変化に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.401-405, 2005.
- 3) 柳嶋慎一：台風強化に伴い砂浜海岸で想定される地形変化と底質粒径変化に関する検討, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.551-555, 2013.
- 4) 灘岡和夫, 田中則男, 加藤一正：蛍光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻, 第 2 号, pp.75-126, 1981.
- 5) 遠藤将利, 小林昭男, 野志保仁：蛍光砂の追跡調査結果に基づいた漂砂量の粒径依存に関する考察, 平成 22 年度日本大学理工学部学術講演会論文集, pp.649-650, 2012.
- 6) 山本幸次, 鳥居謙一, 笠井雅広, 佐藤慎司：柱状コアと音波探査に基づく鹿島灘沿岸の堆積物特性の把握, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.651-655, 2000.
- 7) 伴野雅之, 清家弘治, 小松原純子, 栗山善昭：放射性炭素年代測定を用いた海底土砂の長期的移動・堆積履歴の推定, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.686-690, 2013.
- 8) 馬場康之, 内山清：大潟海岸における平面地形および底質のコアサンプリング調査, 京都大学防災研究所年報, 第 54 号 B, pp.633-638, 2011.
- 9) 田中正博, 井上亮, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 渡辺晃, 池野正明, 清水隆夫：2 粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.551-555, 2000.
- 10) 山田文彦, 立川龍太, 辻本剛三, 末長清也, Long B., Pilote C.：医療用 X 線 CT を用いた波作用下の地形変化・底質輸送の同時連続計測, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.506-510, 2012.
- 11) Kuriyama, Y.: A one-dimensional parametric model for undertow and longshore current velocities on barred beaches, *Coastal Engineering Journal*, pp.133-155, DOI No: 10.1142/S0578563410002130, 2010.

(2015.3.18 受付)

A STUDY ON SEDIMENT MOVEMENT DURING A STORM USING FLUORESCENT SAND

Takayuki SUZUKI, Yu INAMI, Yoshiyuki NAKAMURA and Masayuki BANNO

The field experiments were conducted at Hasaki Coast, Japan in order to investigate the sediment cross-shore and vertical movements in the area of the swash zone to the offshore end of the surf zone. In the experiments, the fluorescent sand was installed on the coast for five locations from the swash zone to the offshore. After the storm pass through the site, eight vertical sand cores were collected. During the experiments, wave data, and ground elevation data were also collected. The cores are subdivided after scanning by an X-ray scanner, the vertical distributions of sediment diameter and the number of fluorescent sand are investigated. From the ground elevation survey, an offshore bar was moved offshore about 30 m due to the storm. The fluorescent sand that installed near the bar were not collected in the surf zone or swash zone. This fact indicates that the sand around the bar area was advected toward alongshore or offshore. The fluorescent sand that installed in the swash zone and surf zone were drifted toward the swash zone and the trough area. Therefore, it can be considered that the sand movements are separated onshore side and offshore side of the bar. Moreover, it is suggested that the sediment transport in the trough area during a storm is affected by the longshore current.