蛍光砂を用いた堆積性波浪時における 底質移動動態に関する一考察

鈴木 崇之¹・伊波 友生²・崎濱 秀平³・比嘉 紘士⁴・
中村 由行⁵・柳嶋 慎一⁶

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国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail:inami-y@ceri.go.jp

³株式会社NIPPO (〒103-0028 東京都中央区八重洲1-2-16 TGビルディング)

⁴正会員 横浜国立大学助教 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)

⁵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)

⁶国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 専門研究員
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

底質移動機構の解明に関し、筆者らは2014、2015年度に蛍光砂を用いた高波浪時の底質の岸沖・鉛直方向移動動態を示した。しかし、堆積性波浪時における遡上帯から砕波帯内外一帯を研究対象領域とした移動動態については検討の余地がある。そこで本研究では、蛍光砂の投入とコア採取等により、堆積性波浪時における底質の岸沖・鉛直方向移動動態の解明を目的とした現地観測を実施した。その結果、堆積性波浪時、バーより沖側の砂は掃流漂砂として徐々に岸向きに移動し、一方、砕波帯内の底質移動は岸向きが主方向であるがトラフ沖側端まで拡散することがわかった。加えて、堆積性波浪時においてもトラフ、およびバー頂部付近では沿岸流速が大きく、この領域を挟んだ岸側と沖側とでは砂の移動動態が異なることが示された。

Key Words : *sediment transport, core sampling, bar shape, bathymetry change*

1. はじめに

砂浜海岸沿岸域の地形は、打ち寄せる波や波を起因力とする流れ、潮汐、風等によって底質移動が生じ、沿岸、岸沖、鉛直方向と3次元的に変化している。

前浜帯やバームが形成される遡上帯は、波のエネルギーを消散させる機能を持ち、いわば自然の海岸防護施設といえる¹⁾。また、やや沖側に形成されるバーにより、特に高波浪時にはこの辺りで砕波が生じ、波エネルギーを逸散させている。このような前浜帯・遡上帯での底質挙動、また、バーの形成、移動と波浪場海浜流場との関連性などについて多くの検討がなされている。遡上帯の底質移動に関しては、流体加速度の重要性が指摘されており²⁾、この領域に形成されるバームについても形成・侵食過程やモデル化に関する検討がなされている^{3,4)}。また、バーに関しては波浪場に伴う岸沖方向移動⁵⁾が検討されると共に、年単位でサイクリックに岸沖方向に移

動することも報告されている⁶⁾。

底質はこれら領域をまたいで移動しうるものであり、遡上帯から砕波帯内外にかけての領域での底質移動を一体的に捉えて解析する必要がある。Inmanら⁷⁾は、バームとバーの関連性について検討を行い、また、加藤ら⁸⁾は表層底質粒径から底質移動を検討している。さらに、海岸へのインパクトとしては高波浪時に伴う侵食による影響が大きいことから、その際の底質移動動態、汀線後退等に関する研究は盛んに行われ、報告されている。筆者らは、2014、2015年度に蛍光砂を用いた高波浪時の底質の岸沖・鉛直方向移動動態を示し、バーや沿岸流が底質移動動態に与える影響について考察している^{9,10)}。加えて、侵食からのリカバリーは海岸保全の意味からも重要であると言え、高波浪後の低波浪時において岸向き底質移動の卓越により堆積が生じることが報告されている¹¹⁾。しかし、堆積性波浪時における遡上帯から砕波帯内外一帯を研究対象領域とした移動動態については、地形形状

との関連性、鉛直混合等まだ検討を行う余地がある。

そこで本研究では、堆積性波浪時において地形測量、波浪観測、および蛍光砂の投入とコア採取等により、底質の岸沖・鉛直方向移動動態の解明を目的とする現地調査を実施した。

2. 現地観測の概要

(1) 現地観測地の概要

本研究は、茨城県の波崎海岸に位置する国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 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平均中央粒径は 0.18 mm であるが、2007 年頃より汀線付近のみ粗粒化したことが報告されている¹²⁾。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。

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) と底質コア採取位置 (黒縦実線)

図-3 栈橋先端にて観測された有義波高、有義波周期、風速、および風向

波浪データは、栈橋先端付近となる $x=378$ 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。また、風向風速データは、観測栈橋先端にて計測されたデータを用い、正時前 50 分から正時までの 10 分間の平均値を使用した。

(2) 観測日程、および観測内容

観測は、2016 年 5 月 13 日から 6 月 2 日までの計 20 日間実施した。この期間中に行われた計 9 回の地形測量結果を図-2 に示す。観測当初、 $x=200$ m 辺りにバー地形が存在しており、観測期間中に比高が高くなると共に、バー頂部が岸側へと移動した。

蛍光砂は、桃、黄、青、緑、赤の計 5 色の蛍光塗料を中央粒径 0.2 mm の鹿島灘産の砂にそれぞれ塗装し、作成した。5 月 13 日、岸沖方向に概ね 50 m ピッチで計 5 箇所 (桃色 $x=65$ m, 黄色 $x=115$ m, 青色 $x=180$ m, 緑色 $x=240$ m, 赤色 $x=320$ m) に約 250 kg ずつ観測栈橋鉋子側の海底面に投入した (図-2 中の丸印)。

岸沖方向位置 $x=378$ m にて計測された波浪データと栈橋先端における風速、風向データを図-3 に示す。風向は栈橋軸沖方向からの風を 0 度とし、時計回りを正としている。観測翌日の 5 月 14 日から 23 日にかけて波高 1 m 以上の波が来襲した。風速については波高との相関はあまり見られず ($R=0.31$)、0.24 m/s から 14.9 m/s の間で変動していた。風向に関しては、高波浪時に北向きとなり、低波浪時に南向きとなる傾向が見られた。底質コア採取は、静穏となった 5 月 24 日 (11 日目)、および 6 月 2 日 (20 日目) の計 2 回、それぞれ 9 地点において実施した (表-1, 図-2 の黒縦実線)。岸沖方向位置 $x=-20$ m, 0 m, 10 m の

表-1 採取した底質コアの概要

地点 x [m]	2016年5月24日採取		2016年6月2日採取	
	コア長 [cm]	分割数	コア長 [cm]	分割数
-20	85.0	17	-	-
-10	-	-	92.0	20
0	65.5	14	86.0	18
20	41.0	8	94.0	19
50	113.0	24	115.0	23
85	89.0	18	94.2	19
125	110.0	22	88.0	18
160	102.0	21	89.0	18
190	89.4	18	100.0	20
255	101.5	20	90.0	18
320	111.5	22	90.0	18

陸上地点の底質コアに関してはハンマーによる打ち込みにより採取し、それ以外の海中地点に関しては、パイプロハンマーによる方式を採用し採取した。

3. 解析結果および考察

(1) 底質コア解析の概要

採取した底質コアは、高知大学海洋コア総合研究センターにてX線CTスキャン (LigheSpeed Ultra 16GE, ヘルスケア・ジャパン(株)) による撮影を行ったのち、半割した。半割した底質コアは、蛍光砂数の計測と底質粒度分析のため表層から5.0 cm毎に分割した (表-1)。分割した各サンプルは、暗室においてUVライトを用いて蛍光砂を色別に計測した。また、各サンプルに対し、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) を用いて粒度分析を実施した。

始めに、底質コア採取を行った地点のうち、インナーバー ($x=20\sim100$ m) にあたる $x=50$ m地点、トラフとなる $x=160$ m地点、およびアウターバー沖側の $x=255$ mの解析結果、および考察を示す。次に、遡上帯から砕波帯内外における底質空間的移動動態について考察する。

(2) 各観測地点における計測項目の鉛直方向分布

底質コア採取を実施した岸沖方向位置における各計測項目 (X線CT画像、底質中央粒径、蛍光砂数) の鉛直方向分布を示す。以後、採取1回目 (5月24日) の底質コアを5/24コア、採取2回目 (6月2日) の底質コアを6/2コアと表記する。また、それぞれの図面の左端に、採取1日目 (5月24日) の地盤高を基準とした地盤高変化を示す。

a) 岸沖方向 $x=50$ m地点

インナーバーに位置する $x=50$ m地点での結果を図-4に示す。観測期間中、この地点では堆積が進みインナーバーが発達し、1.24 m地盤が高くなっていった。

各層での底質中央粒径を見ると、5/24コアの最深部に

図-4 岸沖方向位置 $x=50$ mの底質コア解析結果 (a) 地盤高変化およびCT画像、(b) 底質中央粒径 (5/24コア)、(c) 蛍光砂数 (5/24コア)、(d) 底質中央粒径 (6/2コア)、(e) 蛍光砂数 (6/2コア)

において1.0 mm以上の粗砂となっているが、観測開始以後の堆積砂については平均0.20 mmの細砂であった。

堆積した層に含まれている蛍光砂は、両コア共に主は桃色 ($x=70$ mに投入) と黄色 ($x=120$ mに投入) であった。ただし、トラフよりも沖側に投入した蛍光砂についてはほとんど確認されなかった。インナーバーの発達に関しては、桃色と黄色の蛍光砂の挙動から、インナーバー発達地点からトラフ地点にかけての領域に存在する細砂が寄与していることが確認された。

また、地形変化の最深部よりも下層において蛍光砂が確認されているが、これはこの地点が砕波帯に位置し、砕波による鉛直混合により測定を行った地盤面以下にも蛍光砂が混ざり込んだと考えられる。

b) 岸沖方向 $x=160$ m地点

トラフの位置となる $x=160$ mでの結果を図-5に示す。蛍光砂投入後、この地点は13日から24日にかけて1.02 m堆積していた。この堆積に伴い、アウターバーが岸側に発達したものの、24日以降はほぼ平衡状態であった。そのため、コアを採取した2回共にほぼ同じ地盤高からの採取となった。堆積が生じていた13日から24日は、観測期間内においてやや波高の高い時期であった。堆積層の底質粒径はほぼ一様であり、両コアの平均中央粒径はインナーバー部よりもやや細かい0.17 mmであった。

この地点は、コア下部では黄色、緑色为主であり、コア上部は桃色、赤色が支配的となっており、深度55 cm辺りを境に蛍光砂分布の堆積傾向が異なっていた。桃色と黄色の蛍光砂に関しては、戻り流れによって沖向きに

図-5 岸沖方向位置 $x=160$ mの底質コア解析結果 (a) 地盤高変化およびCT画像, (b) 底質中央粒径 (5/24コア), (d) 蛍光砂数 (5/24コア), (e) 底質中央粒径 (6/2コア), (g) 蛍光砂数 (6/2コア)

輸送され、時間的に早い段階からアウターバーの形成に寄与したと考えられる。また、16日以後については、赤色が主となっており、岸向きの掃流漂砂により $x=280$ mから到達したと言える。よって、投入時から16日までの沖側からの底質移動速度（赤色）は約1.8 m/hと計算できた。アウターバーの形成は、波浪場により沖向き、岸向き両方向への漂砂によって発達していることがわかった。

c) 岸沖方向 $x=255$ m地点

アウターバー沖側となる $x=255$ m地点での結果を図-6に示す。観測期間中、この地点の地形は他と比べてあまり変化しておらず変動幅は20 cmであった。5/24コアにおいて表層から20 cmにかけて、6/2コアでは25 cmにかけて赤色の蛍光砂が多量に検出された。底質中央粒径は、赤色が堆積した上層においてはやや粒径が小さく、平均0.14 mmであった。これらはアウターバー沖側の砂が岸向きの掃流漂砂によって輸送されたと言える。蛍光砂の検出が観測期間中の最低地盤高以下となっているが、これはリップルの形成、移動に伴うものと考えられる。

両コア共に深度40 cm以深においても蛍光砂が検出されている。地形測量結果、および波浪状況から判断すると、これら蛍光砂については今回の観測期間中に混合したとは考えにくく、昨年度、または一昨年度に実施した観測時の蛍光砂が残存していたと推測される。ただし、先に示した2地点（ $x=50$ m, 160 m）については、本年度観測期間中に堆積が起こったものであり、昨年度以前の蛍光砂である可能性は極めて低い。

図-6 岸沖方向位置 $x=255$ mの底質コア解析結果 (a) 地盤高変化およびCT画像, (b) 底質中央粒径 (5/24コア), (d) 蛍光砂数 (5/24コア), (e) 底質中央粒径 (6/2コア), (g) 蛍光砂数 (6/2コア)

(3) 堆積性波浪時における底質移動

ここで、観測期間中の土量変化と計測された蛍光砂の岸沖分布について考察すると共に、トラフ部における沿岸流速の影響について考察する。

a) 土量変化、および蛍光砂の岸沖分布

図-7に観測期間中の地形変化、土量変化（5/13～5/24, 5/13～6/2, 5/12～6/2）、表層底質中央粒径（5/13, 5/24, 6/2）、および蛍光砂総数の岸沖分布を示す。土量変化を見ると、 $x=40$ m辺りのインナーバーは継続的に単位幅当たり6.25 m³堆積したのに対し、 $x=160$ m辺りのアウターバーはアウターバー岸側が埋まる形で1回目のコア取得までに単位幅当たり5.05 m³堆積したことが分かる。また、これよりも沖側については、ほとんど地盤の変化は見られない。期間全体での土量収支は109.4 m³の増加であった。この増加は岸沖漂砂のみならず、沿岸漂砂も寄与していると考えられる。

表層底質中央粒径の岸沖分布を見ると、 $x=40$ mよりも沖側についてはほとんど変化していないが、汀線近傍となる $x=20$ mにおいては粗粒化していたものの、5月24日以降の堆積時に細砂によって覆われたことがわかる。

5/24コア、および6/2コアの各層より採取された各コアサンプル地点での累積蛍光砂数（図-7e, 7f）は、概ね同様な傾向を示している。

岸沖方向位置 $x=70$ mに投入した桃色の蛍光砂は、主に碎波帯内において取得され、移動範囲の沖側端は $x=190$ mであった。インナーバーやアウターバーの形成には寄与するものの、アウターバーより沖側へは到達しな

図-7 観測期間における地形変化および蛍光砂数 (a) 地形断面変化およびコア採取位置, (b~d) 各期間の土量変化, (e) 表層底質中央粒径, (f, g) 採取された蛍光砂数

かったことがわかる。蛍光砂取得のピーク位置は岸よりであった。これは、インナーバーの発達と共に蛍光砂が地盤内に留まったためと考えられる。この一帯は第二次砕波帯岸寄りであり、桃色蛍光砂の沖側への移動については、砕波によって巻き上がった底質が戻り流れにより移流したと考えられる。

岸沖方向位置 $x=120$ mに投入した黄色の蛍光砂は、桃色蛍光砂と同様に主に砕波帯内において取得された。ただし、桃色の取得ピークが岸寄りにあるのに対し、黄色は概ね均一に分布していた。この領域も第二次砕波帯に相当し、砕波による拡散と戻り流れによって広範囲に移流し、黄色の蛍光砂はインナーバー、アウターバーの形成に寄与したと考えられる。

岸沖方向 $x=170$ m地点に投入した青色の蛍光砂は全域に渡ってほとんど取得されなかった。また、 $x=220$ m地点に投入した緑の蛍光砂は主にアウターバーの堆積域においてのみ取得された。アウターバー沖側となる $x=280$ m地点に投入した赤色の蛍光砂は、投入地点岸側において多量に確認された。しかし、アウターバー頂部はほとんど取得されなかったものの、その岸側となるアウター

図-8 各岸沖方向地点における沿岸流速の時系列変化

バーが発達した地点の堆積層内にて多く確認された。これより、アウターバーの発達には、アウターバーよりも沖側からの底質移動も寄与していることが確認された。

b) 岸沖・沿岸方向流速の影響

岸沖方向 $x=90$ m地点に、流速計 (AEM-USB, JFEアドバンテック(株))、および多層流向流速計 (H-ADCP, TRDI社製) を固定させた小型観測アレイを設置し、流況観測を実施した。H-ADCPの計測高はD.L., -1.06 m (設置時の海底面上0.6 m) である。図-8にH-ADCPにより計測された、岸沖方向位置 $x=96$ m (インナーバー頂部)、125.5 m (インナーバーとトラフ底部の中間地点)、160 m (トラフ中央部)、189.5 m (アウターバー頂部)、219.1 m (アウターバー沖側) における沿岸流速ベクトルを示す。なお、流速値は20分間の隣接平均を用いてスムージングを行った。また、図中流速ベクトルが示されていない時間帯は欠測期間である。

流向は調査期間を通じ、鹿島方向への流れが卓越するものの、北寄りの強い風が吹き、やや高波浪時には銚子向きとなっていた。図より、トラフからアウターバー頂部となる $x=150\sim200$ m辺りにおいて周囲よりも流速値が大きくなっていることがわかる。底質コアの解析において、青色、緑色、また、沖側から移流してきた赤色の蛍光砂がこの領域においてあまり確認されなかった。青色の蛍光砂を投入した $x=170$ mはトラフにあたり、卓越した沿岸流によりその多くが沿岸方向に移流してしまったためと考えられる。また、緑色に関しては青色と同様に、他の色と比較して取得数は少なく、沿岸流による沿岸漂砂の影響を受けたと考えられる。

4. まとめ

波崎海岸において、堆積性波浪時の岸沖・鉛直方向底質移動動態の解明を目的とした現地調査を実施し、地形測量、波浪計測、および蛍光砂の投入後に実施した底質

コア等のデータを用いて検討を行った。

砕波帯内の底質に関しては、砕波による移流拡散により広範囲にまで移動していたが、インナーバーの発達においては、主に砕波帯内の底質により形成されていることがわかった。沖側への拡散は主に戻り流れのためと考えられるが、トラフ部沖側端（アウターバー岸側）が端部となっており、それよりも沖側へはほとんど移動していなかった。アウターバーより沖側に投入した蛍光砂がアウターバー堆積部において取得されたことより、底質は掃流漂砂により徐々に岸向きに移動し、アウターバーの形成に寄与していることがわかった。しかし、この位置よりも岸側ではほとんど取得されなかった。これは堆積性波浪時においてもトラフ、およびアウターバー頂部付近では沿岸流速が大きかったことから、沿岸方向に移流したと考えられる。

以上より、アウターバー付近を挟んだ岸側の領域と沖側の領域での底質移動動態はそれぞれ独立しているものの、アウターバーの形成に関しては両領域の底質により形成されていたことがわかった。また、静穏時の波浪場においても沿岸流速に伴う漂砂の影響は無視できないことが示唆された。

謝辞：本研究は科研費若手研究（A）課題番号26709034、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15B03814B051）のもとで実施された。

参考文献

- 1) 福島雅紀, 鳥居謙一, 田中茂信: 海岸保全施設としての砂浜の確率論的手法による変動量評価, 海岸工学論文集, 47, pp.701-705, 2000.
- 2) Puleo, J. A., Holland, K. T., Plant, N. G., Slinn, D. N. and Hanes, D. M.: Fluid acceleration effects on suspended sediment transport in the swash zone, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C11), 2003.
- 3) 鈴木崇之, 竹内麻衣子, 友田尚貴, 山口里実, 栗山善昭: バーム形成時および侵食時における岸沖漂砂量分布特性, 海岸工学論文集, 54, pp.486-490, 2007.
- 4) Suzuki, T., Mochizuki, Y. and Sasaki, J.: Annual Model of Swash Zone Beach Profile Change Focusing on Berm Formation and Erosion. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*, 2015.
- 5) Hoefel, F. and Elgar, S.: Wave-induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299(5614), pp.1885-1887, 2003.
- 6) 栗山善昭: 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性, 土木学会論文集, No. 677/II-55, pp.115-128, 2001.
- 7) Inman, D. L., Elwany, M. H. and Jenkins, S. A.: Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches, *Journal of Geophysical Research*, 98(C10), pp.18181-18199, 1993.
- 8) 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, 29(2), pp.37-61, 1990.
- 9) 鈴木崇之, 伊波友生, 中村由行, 伴野雅之: 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), pp.I_679-I_684, 2015.
- 10) 伊波友生, 鈴木崇之, 伴野雅之, 比嘉紘士, 中村由行, 柳嶋慎一: 二粒径の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, 土木学会論文集B2(海岸工学), 72(2), pp.I_667-I_672, 2016.
- 11) Brooks, S. M., Spencer, T. and Christie, E. K.: Storm impacts and shoreline recovery: Mechanisms and controls in the southern North Sea. *Geomorphology*, 283, pp.48-60, 2017.
- 12) 柳嶋慎一: 波崎海岸における底質粒径の変動特性, 港湾空港技術研究所資料, 1317, pp.2-42, 2016.

(2017.3.15 受付)

A STUDY OF SEDIMENT MOVEMENTS DURING CALM WAVE CONDITIONS USING FLUORESCENT SAND TRACERS

Takayuki SUZUKI, Yu INAMI, Shuhei SAKIHAMA, Hiroto HIGA,
Yoshiyuki NAKAMURA and Shinichi YANAGISHIMA

Sediment transport mechanisms in swash, inner-surf and outer-surf zones have been investigated. The authors conducted field surveys in 2014 and 2015 during storm conditions in order to analyze the cross-shore and vertical sediment movements by using fluorescent sand tracers. However, there is a space to investigate sediment movements in the area from the swash zone to the outer-surf zone during calm wave conditions. In this study, the field experiments were conducted in the season of relatively mild wave condition. Five colored fluorescent sand tracers were installed on the seabed in the five different cross-shore locations, and sand cores were collected after surtain duration. Also, wave height, current velocity and wind speed were observed during the experiments. From the results we found that the onshore ward direction of the sediment transport was dominant in the surf zone. Although the sediment also transported offshore ward, the sediment was found until at the offshore end of the trough region. Even during the mild wave conditions, the longshore current velocity was relatively large in the area around trough and outer-bar crest. The sediment movement in the onshore region and offshore region of the outer-bar moved without the correlation, however, the outer-bar formed by both regions of sediments.