波打ち帯における底面露出時を含めた漂砂量の画像計測

Image Analysis of Sediment Transport in the Swash Zone

柿木哲哉¹・辻本剛三²

Tetsuya KAKINOKI and Gozo TSUJIMOTO

The purpose of this study is to investigate sediment transport in swash zone by using an image processing technique. Although a number of researches have been carried out into sediment transport in swash zone, the sediment transport rate in that area has not been measured directly. It was found that the sediment transport rate in swash zone had spatial distributions, and the peak value appeared where the bottom elevation changing from accumulation to erosion.

1. はじめに

砕波帯から波打ち帯にかけては漂砂が活発に行われ、これらの現象は汀線の前進や後退といった海浜地形変化と直接的な強い関係がある。従って、この領域の漂砂は海浜変形を考える上で重要な問題の一つである。しかしながら、波打ち帯で生じている現象は計測するには激しく、かつ水深が非常に浅いため、波打ち帯の漂砂量を定量的に計測した研究例は少ない。

波打ち帯の底質輸送と海浜地形変化の計測に関する研究は国内外で幾つも見られるが（砂村，1983，1984；有村・服部ら，1996 など），基本的には測定地形の時系列から岸沖漂砂量を見積もっており、波打ち帯における漂砂を直接的に計測したものではない。また、これらのデータを用いて時間発展型の波浪・地形変化計算の漂砂量公式の精度検証をするのには時間スケールの点でも難しい。さらに言えば、引き波通過後、底面露出時に遡上波が戻るまでの間、沖向きの底質移動が継続するが、これを計測し定量的な評価を与えた例は殆ど無い。

そこで本研究では波打ち帯における漂砂量を地形から間接的に求めるのではなく、砂の移動そのものを画像計測により直接捉えることを目的とし、底面露出時の砂移動についても考慮した画像解析を行った。

2. 実験方法

実験は図-1 に示す長さ 17.0 m，幅 0.6 m，深さ 0.8 m の 2 次元造波水路を使用し、その岸側端は実験ケースに応じて勾配 1/10 または 1/8 の斜面に接続している。また、移動床には実海浜の砂を用い、粒度分布は図-2 に示す通りで、中央粒径 D_{50} は 0.477 mm である。使用した波は規則波とし、周期、波高および水深は表-1 の通りとした。ケースの選定にあたっては、砕波に伴う気

泡が実験を困難にするため、今回はなるべく砕波の激しくない堆積型～中間型のケースを選定した。このとき、海浜地形の発生条件については、Sunamura ら（1974）により提案されている方法を参考にし、次式（1）により決定した。

$$\frac{H_0}{L_0} = C (\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H_0/L_0 は沖波の波形勾配、 C は無次元係数、 d は底質粒径、 $\tan \beta$ は初期海底勾配とする。また、 C の値は室内実験であれば $C \geq 8$ のとき地形は侵食形を示し、 $8 > C \geq 4$ のとき中間形、 $4 > C$ のとき堆積形になるとされている。今回の実験で用いた条件では Case1 は $C=1.60$ で堆積形、Case2 は $C=5.73$ で中間形に分類されるケースである。

図-1 実験装置

図-2 粒度分布

表-1 水理条件

ケース	斜面勾配	水深(m)	周期(s)	波高(m)
Case1	1/8	0.3	1.0	0.02
Case2	1/10	0.4	2.0	0.1

1 正 会 員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校准教授
2 フェロー 工博 神戸市立工業高等専門学校教授

以上の条件で可視化断面を作成し、画像撮影、画像解析を行うが、可視化断面の撮影位置は砕波点より岸側の波打ち帯付近で、この様子を水路側方からガラス越しに CCD カメラで撮影した。今回は特に引き波時の砂移動を可視化、画像解析するため、可視化に用いるレーザーシートは底面までの水中を可視化するだけでなく、底面からさらに下方を可視化できるようにシート位置を調整し、水路のガラス側壁近傍の鉛直断面を可視化した。なお、砂粒子量測定の実像解析には、柿木ら (2004) の方法を用い、砂粒子移動速度の解析には PIV 法を用いた。

3. 実験結果

(1) 岸沖方向の地形変化量 (初期地形からの変化量)

まず、画像解析を行うに前に、可視化実験を行った際に形成された地形の特徴を調べておくこととする。

図-3 および図-4 は実験前後の岸沖方向の地形を示したもので、図-3 が Case1、図-4 が Case2 の結果を示す。横軸は造波板からの距離、縦軸は底面からの距離を表す。図中の点線は初期地形、実線は造波終了後の地形、水平方向の一点鎖線は静水面である。造波時間はどれも 2 時間程度で、地形の計測は造波終了後、時間をかけてゆっくりと排水した後、レーザー距離計で水平方向に 2 cm ピッチで底面高を計測した。その結果、どちらのケースも概ね、理論通りの地形が形成されていた。

次に、図-5 および図-6 は図-3 および図-4 を用いて計算した実験前後の単位時間 (hour) 当たりの地形変化量を表したもので、横軸は造波板からの距離、縦軸は地形変化量を表す。また、縦軸の正は堆積を示す。

まず、Case1 の結果を見てみると、バームとステップ間の中心よりやや沖側、造波板から 12.25 m 付近をゼロクロス点とし、沖側が侵食、岸側が堆積となっている。侵食と堆積の極値はバームとステップ付近に位置している。つまり、典型的な堆積形となっている。

一方、Case2 の結果についても Case1 同様の傾向が見られたが、バームの堆積傾向が目立って大きくなっている。全体的にも収支が取れていないように見える。実験終了後、確認した地形は、特に 3 次元性の強いものではなかったが、12 m 付近にできたバームの沖側に波長 10

図-3 実験前後の岸沖方向地形 (Case1)

図-4 実験前後の岸沖方向地形 (Case2)

図-5 岸沖方向の地形変化量 (Case1)

図-6 岸沖方向の地形変化量 (Case2)

cm、波高 2 ~ 3 cm 程度の砂澁が発達しており、地形の計測を行った 11.5 m より沖側から漂砂されてきたものが堆積したものであると考えられる。

(2) 底面露出時を含めた移動状態の砂の検出

図-7(a)~(c) は Case2 の可視化画像で、移動状態の砂の濃度 $C \text{ kg/m}^3$ の検出結果の例である。撮影箇所は造波板より 13.75 m 付近で、バームとステップ間のやや岸寄りの位置である。また、向かって右側が沖側、左が岸側であり、図の左中央部から右中央部に右下がりの直線が描いてあるが、これが底面である。なお、底面位置の決定についてであるが、今回は砂が移動状態ではあっても明らかに浮遊していないのであれば底面とみなした。

それぞれの位相は図のタイトルに示す通りで、砂の移動形態に特徴の見られた位相である。図-7(a)は遡上する波の先端が通過する位相、図-7(b)は水深が最大となる位相、図-7(c)は引き波が通過した後、底面が露出している位相である。また、底面と水面で挟まれた領域に白い点が写っているのが砂粒子である。

次に図-7(d)~(f) は Case2 の画像解析結果で、それぞれ順に図-7(a)~(c)の位相に対応している。なお、等高線の値は凡例の通りである。本手法では 1/15 秒毎に

図-7(a) 遡上波先端付近通過時 (可視化画像)

図-7(d) 遡上波先端付近通過時 (画像解析結果)

図-7(b) 水深最大時 (可視化画像)

図-7(e) 水深最大時 (画像解析結果)

図-7(c) 引き波通過後 (可視化画像)

図-7(f) 引き波通過後 (画像解析結果)

撮影された可視化画像に対し、このような解析を行った。

次に、図-8 は得られた可視化画像から水深を読みとったもので、解析領域中央部の波1周期分の水深変化を表している。これを見ると、画像解析空間に段波状の水塊が突入し、その後水位は徐々に低減し、 $t/T=0.6$ 以降 (引き波時)、水深はほぼゼロであるのがわかる。この部分が引き波通過後である。

次に、図-9 は Case2 の解析領域内の砂粒子数の時間

図-8 画像解析領域中央部の水深の時間変化

図-9 解析領域内の砂粒子の個数

図-10 水平方向砂移動速度の鉛直分布

変化を示したもので、横軸は時間、縦軸が移動状態にある砂の量を表している。また、横軸は波の周期で無次元化し、縦軸は最大値により無次元化したものである。この図-9に示す結果は、図-7のような画像解析を波の1周期に渡って行った結果をまとめたものであり、位相は図-8と同期してある。また、図中に示す(a)~(c)の文字は図-7の位相(a)~(c)に対応している。

これを見ると、(a)遡上波に伴う浮遊砂の通過、(b)最高到達後の浮遊砂の沈降、(c)引き波による掃流砂の発生が捉えられているのがわかる。特に引き波通過後は水深ゼロであるが、本研究で用いた手法は水深に関わらず漂砂量を検出できることがわかった。

図-10はCase2の解析領域中央の水平方向砂移動速度の鉛直分布でPIVの結果である。図の横軸は砂の水平方向移動速度で、縦軸が鉛直距離である。図の左向きは岸方向の速度、右向きが沖方向の速度を表す。また、図中に示した横向きの実線は浮遊していない砂で形成されている面を示している。

まず、各位相での特徴であるが、全体的に掃流状態の移動が卓越しており、遡上時と流下時の速度のピーク値は同程度である。また、図中では少々見づらいが、 $t/T=25/31$ の、引き波時の砂移動が捉えられており、その層厚は7~8mm程度で、速度の最高点は底面表層から数mm内部に存在し、大きさは7~8cm/s程度であった。

以上の結果を用い、考えている断面でのnetの漂砂量を調べるため、解析領域中央を通過する漂砂量(砂粒子の個数)の時系列を調べたものが図-11で、沖向きを正

図-11 岸沖の砂移動量(個数)

としている。これを見ると、岸向漂砂と沖向漂砂の継続時間は1:2程度で、漂砂量絶対値の最大値は3:1程度である。また、これを積分すると-110(個)であり、つまり岸向き漂砂であった。実験が堆積型~中間型であったことを考えると、整合性が取れていることがわかる。

(3) 遡上域全体の砂移動量

前節ではCase2の結果を用いて、遡上域のある1断面での漂砂量について考えた。ここでは、Case1の結果を元に、遡上域全体の砂移動について考える。

そこで問題となるのが撮影の仕方である。全体を見渡して一気に撮影できれば良いのだが、本研究で使ったカメラの解像度(1008ピクセル×1018ピクセル)ではそれが不可能であった。したがって、図-12のように移動しながら撮影を行った。なお、図中に示す曲線はCase1のバームからステップ周辺の地形を表す線で、点線が初期地形、実線が実験終了後の地形である。さらに、実線の矩形で示した領域が1回で撮影できる範囲であり、今回は約10cm四方とした。

これによりそれぞれの画像間では撮影時刻が異なるが、目視と撮影画像で確認した限りでは、極端に不規則な現象が起こっているわけではなさそうであったことと、最終的には波の周期で平均化した量を取り扱うことなどから、今回はこのような撮影方法を採用した。ただし、可能であれば一枚の画像で撮りきる方が良いのは言うまでも無い。

次に、図-13はCase1における遡上域のある断面での水平方向漂砂量の鉛直分布を表す。図中の横軸は移動状態にある砂の濃度とその砂の移動速度の積で、濃度フラックスのようなものである。ただし、1/15秒間隔の瞬

図-12 撮影断面

図-13 水平方向砂移動量の鉛直分布

間値を波1周期間で積分したものをプロットしている。

縦軸は鉛直方向距離であるが、底面からの距離というわけではなく、移動をしていない砂層と移動している砂層の境界からの距離である。これはPIV解析を行って速度がゼロになる点を鉛直分布の始点とした。また、図中のNo.1～No.10に至るまでの地点番号は、解析を行った鉛直断面に割り振った番号で、No.1という地点は図-12の12.1 m（造波板より12.1 mの地点であることを示す）の地点に相当する。そこから岸方向に5 cmずつ鉛直断面をずらしながら解析を行っているので、抜き出したNo.1～No.10の4断面の位置はグラフの凡例に書き込んだ通りの位置になる。

図-13を見ると、実線で示された地点No.1（ステップ沖側先端付近）はあまり砂移動が生じていない。目視や画像を見る限りにおいてもステップ沖側先端から沖側に移動する砂は少なく、引き波によってバームからステップ方向に沖向に移動せしめられた砂はステップ沖側端に生じた渦に取り込まれ、再び波によりバーム上へ運ばれていく。その結果、波1周期で積分するとその漂砂量は少なく抑えられてしまう。

次に、No.1地点から15 cm岸に移動したNo.4地点では、下層と上層で異なる方向に漂砂が卓越している。この位置は碎波した波が再突入する位置で、水塊が再突入した折に底面の砂が大量に巻き上げられる。その一部が渦により沖側に移動させられるため、この様な分布になっている。上層の岸向きの漂砂は碎波により巻き上げられていた浮遊砂がそのまま岸向きに移動させられたものである。また、この地点は図-5を見るとちょうど地形変化量がゼロとなっている地点である。

地点No.7, No.10のようにさらに岸に上がると岸向き漂砂のみが卓越しそうであるが、実際にはかなり上部まで行かないと引き波の影響で底層は沖向きに移動していることがわかる。

次に示す図-14は図-13の鉛直分布を積分したもので、

図-14 砂の総移動量

単位幅あたりのフラックスを表し、各地点での砂の総移動量をプロットしたものである。横軸が地点を表し、縦軸が砂の総移動量を示す。つまり、netの漂砂量に相当するものである。

このケースは先にも述べたように12.3 m付近を境に岸側が堆積、沖側が侵食になっているが、画像解析により得られた最大漂砂量を与える点がこの点と重なっている。つまり、従来の知見と一致する結果が得られた。

4. 結 論

本研究では波打ち帯における漂砂量を地形から間接的に求めるのではなく、砂の移動そのものを画像計測により直接捉えることを目的とし、底面露出時の砂移動についても考慮した画像解析を行った。その結果得られた知見を要約すると次のようになる。

- (1) 本研究で用いた手法は水深に関わらず漂砂量を計測できることが分かった。
- (2) 引き波時の砂移動が計測できており、その層厚は7～8 mm程度で、速度の最高点は底面表層から数mm内部に存在し、大きさは7～8 cm/s程度であった。
- (3) 遡上域全体にわたって漂砂量を調べた結果、岸沖漂砂は空間的な分布を持ち、そのピークは地形が堆積から侵食に変化する地点であった。

参 考 文 献

- 有村盾一・服部昌太郎・内田一裕(1996): 波打ち帯の底質輸送と海浜地形変化の実験的研究, 第43回海講論文集, pp. 516-520.
- 柿木哲哉・辻本剛三(2005): 画像解析を用いた混合粒径の浮遊砂粒度計測, 海工論文集, 第52巻, pp. 376-380.
- 砂村継夫(1983): Swash zoneにおける岸沖漂砂量の算定式, 第30回海講論文集, pp. 214-218.
- 砂村継夫(1984): Swash zoneを含む碎波帯の岸沖漂砂量に関する研究, 第31回海講論文集, pp. 316-320.
- Sunamura, T. and K. Horikawa(1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 920-938.