砂礫海浜の変形と袋詰め工による漂砂制御に関する現地観測

Field Survey of Topography Change and Effects of Sand Packs for Sediment Movement on a Gravel Beach

褓川龍一¹・佐藤慎司²・西嶋宏介³・高川智博⁴

Ryuichi IYAGAWA, Shinji SATO, Kousuke NISHIJIMA and Tomohiro TAKAGAWA

A field survey was conducted at Oiso Beach, Seisho Coast, Kanagawa Prefecture. Three geotextile sand packs were placed in order to examine the applicability of sand packs to beach erosion control. Nourishment was introduced together with the sand packs. Frequent high resolution monitoring of beach topography was conducted by using a 3D laser scanner. Development of beach cusps and entrapment of gravels by sand packs were described on the basis of thirteen measurements performed in the period from September 2010 to February 2011. The wavelength of the beach cusp was found to be dependent on characteristics of waves and tides, and shortened by the presence of sand packs. The applicability and limitations of stereo imagery on beach topography monitoring was discussed.

1. はじめに

海岸侵食の対策として、河川等から採取した土砂を海浜へと投入する養浜工や、漂砂を制御するために浜に海岸の構成材料を詰めた袋を設置する袋詰め工が検討されている。それら養浜工や袋詰め工は従来の海岸構造物に欠けがちであった景観等の海岸環境の保全にも有利であるという長所がある。しかし一方でそれらの効果の把握は難しく、いまだ十分には把握されていない。

そこで本研究では、3Dレーザースキャナを用いて高頻度に砂礫海浜の地形変化を追いつながら、地形変化を把握することと養浜工及び袋詰め工が海岸地形に与える影響を明らかにすることを目的とした。併せて礫カスプの発達に関しても分析を加えることで西湘海岸の地形変化の特徴に関して考察を加えた。さらに2台のカメラを用いたステレオ視による地形推定の可能性についても検討した。

2. 対象地域

本研究では、神奈川県西部に位置する西湘海岸を対象に地形測量を行った。西湘海岸では昭和40年代から海岸侵食が顕在化している。また、西湘海岸沿いには神奈川県中郡大磯町と小田原市を結ぶ西湘バイパスが設けられているが、2007年の台風9号来襲時には後浜上にある西湘バイパスの本線盛土流出や舗装版崩落といった被災が1km以上に渡って確認され、田島ら(2008)は被災に対する長波の影響を議論している。また、下山ら(2010)は台風時に海浜地が著しく侵食し、土砂は沖向きに運ば

図-1 西湘海岸大磯周辺の地図 (出典：国土地理院)

れ水深8m以浅に堆積したとしている。そういった経緯もあり西湘海岸の砂浜の回復・保全を目的とした新技術開発の一環として2010年12月からは現地試験が順次行われることとなった。2010年12月には形状の違う砂袋が計3つ設置され、2011年2月には葛川河口周辺の砂浜から採取した砂利計600m³が砂袋間の2箇所に設置された。養浜材の中央粒径は12.5mm程度であり、粒径2cm以上の礫成分を20%程度含んでいる。本論文では図-1に示す様に、平面直角国家座標第9系(-77700, -50800)を原点とする直交座標系を与えて議論を進める。

3. 3Dレーザースキャナによる地形測量

(1) 測量方法

本研究ではMDL社Quarryman Proというレーザースキャナを用いた。より正確に地形を測量するため、対象領域からy方向(岸方向)に約50m離れた標高約10mの地点3点において測量したデータを統合し、その統合されたものを地形データとして扱った。ここでは、それぞれのスキャナの位置及び相対的な向きを計測し、Quarryman Proに付属の専用ソフトMDL Model Version 1.11にその数値を入力することで3つの測量データを統合した。なお、全て水平角度0.1度刻み、垂直角度0.1度刻みで測量を行った。

1 学生会員	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
2 フェロー	工博 東京大学大学院 教授 同上
3	修(工) 首都高速道路(株)
4 正会員	博(理) 東京大学大学院 助教 同上

また、監視カメラを2台利用し、これをステレオ視することによる三次元地形監視の可能性を検討した。事前に測量した10点を基準対応点とし、2枚の写真の特徴から特徴点と呼ばれる共通の点を取得することで三次元化を試みた。

(2) 測量結果

測量結果から0.1mメッシュを作成し、まとめたものが図-2になる。なお2010年9月1日から2011年2月19日までの期間に、全13回（2010年9月1日、10日、17日、25日、29日、10月11日、11月3日、12月7日（袋詰め工設置後）、15日、22日、2011年1月13日、2月1日（養浜工実施後）、

19日）の地形測量を実施した。また、それぞれの観測日は波浪情報や潮汐の位相を考慮して設定している。

(3) 遡上高の評価

本研究では潮位として気象庁の気象統計情報における千葉県布良の毎時潮位を用いた。また波に関する情報は神奈川県平塚市虹ヶ浜の沖合1km（水深20m）にある平塚沖波浪等観測データから得ている。その波の情報からSaville（1958）に従って遡上高を求め、それに潮位を足し合わせることで2010年8月28日から2011年2月27日までの間の潮位変動を考慮した遡上高を決定した。詳細な検討は次節において行っている。

図-2 3Dレーザースキャナによる地形測量結果

(4) 礫カスプの発達位置と波長

図-3に示すように、スキナの観測データから任意の y における z (地形の鉛直成分) の変動をみることができる。その際、ゼロダウンクロス法により鉛直地形変動における個々の波を定義し、地形変動の波に関する有義波高及び有義波長を求めた。全断面において同様の作業を行い沿岸方向の地形変動成分の有義波高及び有義波長を示したのが図-4 (2010年9月17日分) である。 $y = 9.8\text{m}$ 及び 25.3m のとき、有義波高、有義波長ともに周囲の点と比べ急激に大きくなっていることがわかる。 $y = 8\text{m} \sim 18\text{m}$ 及び $20\text{m} \sim 24\text{m}$ において粒径 4cm 程度の礫が確認され、その他の領域は砂で覆われていた。また、図-2のそれに対応する断面を確認してみると礫カスプが顕著に発達している断面であることがわかる。従って本研究では地形変動成分の波高と波長が周囲と比べ急激に大きくなる線に礫カスプが生じているものとした。図-5の沿岸方向に平均した地形断面図において礫カスプ発生位置付近で地盤高が急激に増加していることからそれを把握することができる。台風12号によるうねり性の高波が作用した2010年9月25日には波が海浜部すべてに遡上したため、海岸は礫も見当たらずに砂が支配的になり斜面がほぼ一様勾配になっていた。その様子は断面図からも読み

図-3 $y = 25.3\text{m}$ における地盤高の変動 (2010年9月17日)

図-4 沿岸方向の鉛直地形変動成分の有義波高及び有義波長 (2010年9月17日)

図-5 沿岸方向に平均した地形断面図 ($y-z$ 図)

図-6 $y = 9.8\text{m}$ 付近に発達した礫カスプ (2010年9月17日)

取れる。さらに9月17日に礫カスプが岸側で発達した位置 y において高潮時の9月25日、養浜実施後の2011年2月1日を除く全観測日ではほぼ同様の値を示していることが図-5からわかる。また、上記5日を対象にすると9月17日を除いては汀線側に顕著な礫カスプは発見されなかった。すなわち、大潮や高波の作用を受けた後の海浜では岸側に礫カスプが発見されなかったことを考えると、波が作用しないような小潮の時期に汀線付近で礫が浜に集中し礫カスプが形成されていくということが考えられる。例に挙げた9月17日は小潮の作用を受けている日であった。図-7は波の情報及び潮汐を考慮した遡上高と礫カスプの発達位置及び波長の関係を示したものである。なお、礫が少なくなる高波や大潮の効果がある調査日においては必ずしもカスプ波高と波長の急激な増加が見られなかったため全観測結果をプロットしたものとはなっていない。また、養浜実施前の時期は養浜砂を運ぶトラックが頻繁に浜を横断していたためそれにより浜が平らにされていたことも考慮しなければならない。図-5において把握されたことと同様に、岸側で確認される礫カスプの発達位置は $y = 25 \sim 30\text{m}$ の範囲で収まっていることがわかる。遡上高が高いときに砂が岸上方まで輸送され、 $y \geq 25\text{m}$ の地点で確認されていた礫カスプは砂で覆われたと言い換えることもできる。実際に岸側の礫カスプについては発見された日とそうでない日があった。汀線側の礫カスプについては、カスプの波長が砂袋設置後に短くなっていることから砂袋が砂礫の動きに影響を与えていることを確認できた。また、9月1日や1月13日等の遡上高の低いときの観測結果や9月10日や12月7日等の遡上高の高いときの観測結果から、汀線側に発達する礫カスプの発達位置は遡上高によく対応していることがわかる。すなわち、汀線付近の礫カスプは遡上高が低ければ汀線方向に、遡上高が高ければ岸方向に移動するということである。礫カスプの波長についてはInman・Guza (1982) のedge wave modelを用いて考察を加える。

図-7 潮位を考慮した遡上高（上）、波の有義波周期及び有義波高（中）と礫カスプの波長及び発達位置（下）の関係（2010年8月28日から2011年2月27日まで）

$$\lambda = \frac{g}{\pi} T^2 \tan \beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ ：礫カスプの波長、 g ：重力加速度、 T ：入射波の周期、 $\tan \beta$ ：前浜勾配である。なお対象領域の $\tan \beta$ は1/10である。礫カスプの波長は、synchronous edge wave時には式（1）により表されるsubharmonic edge wave時の値の1/2になるとされている。本研究では観測日からその10日前までの期間において最大の遡上高を記録したときの波の周期を用いて汀線側の λ を求め、図-8に式（1）から得られた汀線側の礫カスプ波長の計算値と観測値の関係（●及び○記号）を示した。非常に高い波高を記録した後に観測を行った1月13日及び2月19日を除いては式（1）の計算値と概ね一致した。また2月19日はsynchronous edge waveの場合の λ とほぼ一致し、極端な例を除いては礫カスプの波長は打ち寄せる波の周期と関係があるということを確認できた。また9月29日に

図-8 汀線側の礫カスプの波長の観測値と計算値の関係

確認された岸側の礫カスプは台風12号が作用して発達したと考えられ、台風来襲時の有義波周期15秒から計算した礫カスプ波長もほぼ観測値と一致していることが確認できる(▲及び△記号)。有働(2009)もカスプ波長と波の周期の関係を報告しており西湘海岸においても同様の現象が確認された。

最後にスキャナによる観測に加え、2台のカメラを用いたステレオ視による連続的な地形推定の可能性についても検討したい。本研究では $(x, y) = (110\text{m}, 30\text{m})$ 付近に設置された砂袋を中心に対象領域を選び、その高さ情報を取得した(図-2を参照)。ステレオ視後の断面図において汀線側の断面が低くなっていることから海浜斜面を捉えられていることがわかった。また、砂袋の斜面からの最大高さは70cm程度となっており、実際のものと同じであることが確認された。しかし実際には丸みを帯びた形状である砂袋を、直線として認識してしまっていた。詳細に情報を得るには位置情報を特定する対応点を増やすことや、2枚の画像から同一の点を決定する特徴点をより正確に取得できるように再検討する必要があると言える。

(5) 土砂量の評価

測量対象領域を東西に2等分($0\text{m} \leq x \leq 150\text{m}$ を西領域、 $150\text{m} < x \leq 300\text{m}$ を東領域)し土砂量を計算したものを図-9に示した。計 600m^3 の養浜砂が投入された2月1日の土砂量はその直前と比べ $2,000\text{m}^3$ 程度増えたが、次の観測日(2月19日)にはほぼ過去の平均的な土砂量となっている。それは2月14日の激しい高波時に沖に流出したためだと考えられる。東領域の土砂量の標準偏差は約 715m^3 で、約 634m^3 となった西領域のそれに比べ1割以上大きくなっていて、東領域の土砂量の変動がより激しくなっていることがわかった。

4. おわりに

本研究では3Dレーザースキャナを用いた高頻度の地形測量を通じて、西湘海岸の砂礫海浜の変化と袋詰め工及び養浜工のそれに与える影響を礫カスプの発達と併せながら検討した。主要な結論は以下の通りである。

- (1) 高波や大潮の作用後の対象海岸は砂が一面を覆い隠し礫が少なくなり岸側で確認されていた礫カスプは見当たらなくなる。地形断面の測量結果から岸側にある礫カスプの上に砂が堆積しており、条件によっては埋もれていた礫カスプが現れることもあるということがわかった。一方、小潮期や静穏波が続く時期は礫が堆積するため礫カスプの発達が顕著になり、汀線付近だけでなく岸側においても礫カスプは確認された。
- (2) 汀線際の礫カスプの発達位置は遡上高と密接な関係がある。遡上高の低い時期の礫カスプの発達位置は海

図-9 土砂量の変化

側になくなっていて、遡上高の高い時期のそれは岸側へと向かっていた。

- (3) 遡上高の高い時期に礫カスプの波長が長くなることから、礫カスプの波長は打ち寄せる波の特性と関係があることが確認された。
- (4) 砂袋設置後には礫カスプ波長が設置前と比べ短くなったことから、海浜に設置された3つの砂袋は浜漂砂に影響を与えたと言える。
- (5) 養浜として 600m^3 の砂利が投入され、地形測量からもその量を確認できたが、養浜の2週間後に作用した高波浪の影響で対象領域から流出したことがわかった。
- (6) 2台のカメラを用いたステレオ視により海浜の斜面構造や対象物の最大高さ等の大まかな高さ情報は得られることは確認されたものの、砂礫の追跡や地形の詳細まで検討するには至らなかった。さらに精度を上げるためには特徴点の取得に際して工夫をする必要があると言える。

謝辞：画像のステレオ視分析については、浜松ホトニクス花嶋氏の協力を得た。本研究は、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所、国土技術政策総合研究所、(財)土木研究センターと共同で実施した研究の一部をまとめたものである。関係諸氏のご協力に謝意を表する。

参考文献

- 有働恵子(2009): 茨城県青塚海岸の後浜変形および底質粒径変化に関する研究, 土木学会論文誌B, Vol.65, No.1, pp.31-45.
- 下山陽平・小林昭男・宇多高明・石川仁憲・遠藤将利(2010): 西湘海岸の大磯地先における礫の堆積状況調査, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.546-550.
- 田島芳満・佐藤慎司・吉井拓也・細川順一・山田浩次・石川仁憲・三波俊郎(2008), 西湘海岸における2007年台風9号による被害の集中機構, 海岸工学講演会論文集, 第55巻, pp.1386-1390.
- Inman, D.L. and R.T. Guza (1982): The origin of swash cusps on beaches, Marine Geology, Vol.49, pp.133-148.
- Saville, T. Jr. (1958): Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.691-699.