UAVとネットワークカメラを用いた七里御浜 井田海岸における海浜変形に関する研究

渡邊 博之¹・小林 泰輔²・菊 雅美³・中村 友昭⁴・水谷 法美⁵

¹ 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: watanabe.hiroyuki@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

² 非会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³ 正会員 岐阜工業高等専門学校助教 環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)
E-mail: kiku@gifu-nct.ac.jp

⁴ 正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

⁵ フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)
E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

三重県南部に位置する七里御浜では海岸侵食が深刻な問題となって久しく、特に侵食が厳しい井田海岸では、様々な海岸侵食対策が行われてきた。しかし、依然として礫浜の回復には至っていないのが現状である。本研究では、同海岸を対象に行った3回のUAV-SfM測量と、ネットワークカメラによる撮影画像から、礫浜の海浜変形について検討した。その結果、礫浜の広範囲な3次元モデルの取得や断面図および体積量の算定を行えることから、海浜変形の把握にUAV-SfM測量が有用であることを示した。また、七里御浜井田海岸において、沿岸方向となる波向かつ有義波高4m以上の波浪状況のときに侵食性、法線方向となる波向かつ有義波高2~4m程度の波浪状況のときに堆積性、有義波周期や波向に關係なく、有義波高1m程度の波浪条件が続くときに安定状態の傾向になることを示した。

Key Words : UAV, SfM, remote sensing, coastal erosion, network camera

1. 概要

三重県南部に位置する七里御浜は、熊野灘に面した総延長約22kmのわが国で最も長い礫浜海岸である。しかし、熊野川流域におけるダム建設や土砂採取、鵜殿港整備による沿岸漂砂の阻止等による海岸侵食が、長い間深刻な問題となっている。特に、海岸侵食が激しい井田海岸では、これまでに消波ブロックや人工リーフの設置、養浜などの様々な海岸侵食対策が行われており、2014年度には大規模な養浜が行われた。しかしながら、依然として礫浜の回復には至っていないのが現状である。礫浜の保全・環境・利用などの観点から有効な海岸侵食対策を講じることは極めて重要であり、そのためには、波浪特性などと関連づけながら七里御浜井田海岸の海浜変化機構を詳細に把握する必要がある。

著者らはこれまでに、図-1中の赤線枠で示す七里御浜井田海岸の一部を見渡すことができる高さにネットワークカメラを設置し、撮影された連続画像から汀線を抽出する画像解析手法を確立した¹⁾。ただし、ネットワークカメラだけでは高さ方向の地形変化を観測することが困

難であるため、TLS (Terrestrial Laser Scanner) を用いた現地観測も併せて実施してきた²⁾。しかしながら、前述のように、2014年に行われた大規模な養浜によって一部の

図-1 七里御浜井田海岸の位置及び範囲の概略図 (出典: ArcMap; 一部加筆)

図-2 七里御浜井田海岸における観測範囲を示したオルソ画像

前浜が急勾配となり、TLS による測量が困難となった。

一方、近年、UAV に搭載したデジタルカメラから撮影される低高度航空写真と、SfM (Structure from Motion) を活用した測量 (以下、UAV-SfM 測量) が注目を集めている。小花和ら³⁾は、波蝕棚を対象とした UAV-SfM 測量を行い、精度や利便性、観測時間の短さなどの観点から UAV-SfM 測量の有用性について述べている。UAV-SfM 測量は、礫浜における急勾配のバームや汀線付近など、人の進入が困難な場所の観測を可能にすると考えられる。そこで、本研究では、礫浜海岸である七里御浜井田海岸を対象に、UAV-SfM 測量を行うとともに、ネットワークカメラによって撮影した画像と波浪データを関連づけながら考究し、井田海岸の海浜変化機構を明らかにすることを目的とする。

2. 研究手法

(1) 現地観測および解析

本研究では、図-2 に示すように、七里御浜井田海岸に設置したネットワークカメラの撮影範囲 (総延長約 400 m) を対象に、3 回 (2015 年 8 月 10 日、11 月 30 日、12 月 21 日) の UAV-SfM 測量を実施した。UAV には DJI Phantom 2 Vision+ を使用した。本機は風速 10m/s 以上、または降雨降雪時は航行不可能である。そのため、現地観測では強風時及び降雨時を避けて航行させ、高度 10 ～ 30 m 程度の高さからマニュアル操縦によって画像の撮影を行った。空撮画像から構築する 3 次元地形モデルに位置情報を付加するため、図-2 中に赤丸および青丸で例示するように、観測時に約 20 点の GCP (Ground Control Point) を設定して RTK-GNSS 測量を行った。バッテリー 1 本に対する航続時間は約 20 分であり、1 回の現地観測における所要時間は、準備などを含めて 2 時間半程度であった。また、1 回の観測における総撮影枚数は約 2000 枚であった。観測後は、GCP の座標値を求め、Agisoft PhotoScan を用いた SfM 処理によって平面直角座標系に基づく DEM とオルソ画像を出力した。さらに、ArcGIS を利用し、海浜地形の詳細な解析・比較を行った。

表-1 観測実施時の気象および波浪状況

現地観測 日時	天候	風速 (m/s)	潮位 (熊野) E.L. (cm)	有義波高 (尾鷲) $H_{1/3}$ (m)
08/10/14:00	晴れ	未測定	47	2.34
11/30/10:00	晴れ	0.2	50	0.41
12/21/14:00	曇り	0.3	60	0.66

(2) ネットワークカメラシステム

前述のように、著者らはこれまでに、井田海岸を常時観測するためのネットワークカメラシステムを構築している。ネットワークカメラは回転可能であるため、井田海岸を 5 方向にわけて撮影を行っている。具体的には、1 方向につき、1 秒間隔の撮影を 5 分間行い、計 300 枚の静止画を取得する。そして、5 分間かけて得られた画像の記録・整理を行う。この作業を 1 時間のうちに 5 方向に対して行う。撮影は毎日 5:00 から 20:00 まで実施し、専用の光ケーブルで国土交通省紀勢国道事務所熊野維持出張所に設置した PC に保存した後、汀線を抽出するための計算処理を行う。

(3) 波浪情報

七里御浜の井田地区海岸では、三重県によって HF レーダを用いた波浪観測が行われているものの、欠測が多くみられる。そこで、本研究では、当該海岸から離れるものの、尾鷲沖に設置された GPS 波浪計によって安定的に観測されている NOWPHAS⁴⁾ のデータの使用を試みた。なお、当該海岸との位置関係は図-1 に示すとおりである。図-3 に、2011 年 6 月における HF レーダと GPS 波浪計の有義波高および有義波周期の比較を示す。同図から、高波浪時に若干の差が生じているものの、両者は概ね一致していることがわかる。両者の RMSE (二乗平均平方根誤差) を算出したところ、有義波高では 0.39 m、有義波周期は 1.28 s であった。波向については、データ数の関係で検証しなかった。以上から、本研究では、海象データとして尾鷲沖に設置された GPS 波浪計による有義波高、有義波周期、波向データを用いることにした。また、潮位は、気象庁によって七里御浜海岸北方に位置す

(a) 有義波高

(b) 有義波周期

図-3 尾鷲沖 GPS 波浪計と井田海岸 HF レーダの比較

図-4 波向別有義波高と有義波周期の出現特性 (2015 年 1 月 1 日～12 月 31 日)

図-5 GNSS 測量と UAV-SfM 測量による DEM の比較

る熊野で観測されたデータを使用した⁵⁾。

図-4 に、尾鷲沖における 2015 年の有義波高と有義波周期の波向別出現特性を示す。同図より、七里御浜井田海岸では ESE および SE 方向の波が卓越していることがわかる。井田海岸は、図-2 に示すように SSW 方向から NNE 方向にかけて海岸線が延びており、海岸線の法線方向は、ほぼ ESE 方向である。以上のことから、井田海岸沖合では、南側から北側へ向かう沿岸流が卓越していると推察される。

(a) UAV-SfM 測量によるテクスチャ表示

(b) UAV-SfM 測量による標高のコンター表示

(c) TLS 測量による点群表示

図-6 井田海岸の鳥瞰図

3. UAV-SfM 測量の精度検証と有用性

2015 年 12 月 21 日に実施した現地観測を対象に、UAV-SfM 測量によって得られた DEM の精度検証を行った。当該観測では、図-2 に示すように、19 点の GCP を設定し、RTK-GNSS 測量を行った。このうち、同図中に赤丸で示す 14 点を用いて、画像の合成処理を行った。そして、同図中に青丸で示す残り 5 点の標高値に対し、DEM から読み取った値と RTK-GNSS 測量の比較を行った。図-5 に、RTK-GNSS 測量と画像処理による標高の比較を示す。同図に示すように、両者の差異は標高に関わらずわずかであり、最大で 0.1 m 程度であった。また、RMSE は 0.0636 m であった。したがって、今回対象とした海浜地形の規模であれば、十分な精度で 3 次元モデルを取得可能であるといえる。

図-6 に、井田海岸の鳥瞰図を例示する。同図(a)および(b)は、それぞれ UAV-SfM 測量によって得たテクスチャと標高のコンター図である。また、著者らがこれまでに実施した TLS 測量によって得られた点群を同図(c)に示

図-7 海浜断面図

す。同図(c)に示すように、TLS 測量では、急勾配のバームや消波ブロック周辺といった複雑な地形の詳細なデータを得ることは困難であった。一方、同図(a)および(b)に示すように、UAV-SfM 測量では、消波ブロック周辺の複雑な地形を含む広範囲な海浜地形データを取得できていることがわかる。したがって、TLS 測量に比べて低労力・短時間であること、また、本研究で対象とする現地に対しては十分な精度でデータを得られることから、UAV-SfM 測量の有用性は高いといえる。

4. 七里御浜井田海岸の海浜変化特性

(1) 標高および体積量の変化

UAV-SfM 測量の結果から作成した断面図を図-7 に示す。各断面の位置は、図-2 に示したとおりであり、図-7 における横軸は、護岸を 0 とした法線方向の距離である。また、観測実施時における潮位と有義波高は表-1 に示すとおりである。図-7(a)中の岸沖方向 20 ～30m 付近や同図(b)中の 40 ～50m 付近における高低差の激しい断面は、消波ブロック帯である。特に、図-7(a)に示す測線 1 では、消波ブロック周辺の断面が各観測で概ね一致していることから、複雑な地形でも高精度な測量が可能であると考えられる。また、図-7(e)および(f)より、8 月 10 日から 11 月 30 日までの間に、北側にあたる測線 5 や測線 6 では、護岸から浜崖までの距離が短くなっていることがわかる。一方、同図(b)に示す測線 2 では、このような変化は認められない。この要因として、図-2 に示すように、測線 5

および測線 6 の前面海域には人工リーフが設置されていないことが挙げられる。当該地域には、8 月 25 日に低気圧が来襲していることから、高波が礫浜を遡上し、測線 3、測線 5 および測線 6 で大きく侵食が生じたと考えられる。一方、同一期間にて、全体的に岸沖方向 40 ～50m 付近での堆積傾向が確認できる。図-7(c)および(d)に示す測線 3 および測線 4 では標高 4 m 程度、最も北側にあたる測線 6 では標高 6 m 以上の高いソバムが発達している。また、測線 2 では、岸沖方向 46 m 付近の消波ブロックが埋没していると判断できる。11 月 30 日から 12 月 21 日までの断面変化について着目すると、測線 5 および測線 6 では、岸沖距離 40 m より海側で大きく侵食され、バームが陸側に後退している様子が認められる。一方、測線 2 の断面変化は小さい。したがって、浜崖の侵食やバームの後退をもたらす波浪に対する人工リーフの効果は大きいと考えられる。

図-2 中に示した沿岸方向 25 m×岸沖方向 40 m の範囲における 8 月 10 日から 11 月 30 日、11 月 30 日から 12 月 21 日の体積量変化を図-8 に示す。同図から、8 月 10 日から 11 月 30 日にかけて、主に標高 3 ～4 m の範囲を中心に堆積が確認される。特に、最も北側にあたる同図(e)では、その上下も含めて約 650 m³ の砂礫が堆積していることがわかる。しかし、同図(e)の標高 6 ～7 m の範囲では大きく侵食されており、前面に人工リーフが設置されていない北側では、礫の移動がより活発に生じたものと考えられる。なお、11 月 30 日から 12 月 21 日の期間では、護岸から岸沖距離 40 m 以内の範囲にて、体積量の大きな変化はみられなかった。

図-8 海浜体積量の推移

(2) 海浜変化をもたらす波浪特性

図-9に、ネットワークカメラによって撮影された2015年9月15日9時と9月19日9時の測線2付近の画像を示す。図-9(a)で確認できる消波ブロックは、同図(b)ではその多くが礫の堆積により隠れていることがわかる。図-10に、同期間内における有義波高と有義波周期の波向別出現特性を示す。同図から、期間内は、井田海岸の岸沖方向に近いE方向、かつ有義波高2~4mの波が卓越していたことがわかる。したがって、尾鷲沖にて波向E方向および有義波高2~4mが観測される波浪状況のとき、井田海岸は堆積傾向になると考えられる。

2015年12月9日9時と12月12日9時の測線5および測線6付近の画像を図-11に示す。本研究では、バームでは陰影がより強く映し出される特徴と画像の連続撮影を活かし、目視によってバームを判読した。同図(a)から判読したバームを赤線、同図(b)から判読したバームを黄線で示し、両図を重ね合わせたものを同図(c)に示す。前述のように、UAV-SfM測量の結果から、2015年11月30日から12月21日の間に、測線5および測線6付近ではバームが陸側に後退するような侵食傾向を示している。この傾向は図-11(c)の変化からも判断でき、赤線で示したバームの頂点は黄線まで後退・変形しており、画像上部では消波ブロックの露出も確認された。同期間内における有義波高と有義波周期の波向別出現特性を図

(a) 2015年9月15日9時

(b) 2015年9月19日9時

図-9 ネットワークカメラによるスナップショット

図-10 波向別有義波高と有義波周期の出現特性 (2015年9月15日~9月19日)

-12に示す。この期間内では、井田海岸の沿岸方向に近いSSE方向、かつ有義波高4m以上の波が卓越していることがわかる。このうち、最大有義波高は7m近くまで到達していたことを確認した。以上のことから、尾鷲沖にて波向SSE方向、有義波高4m以上の高波浪が観測される状況のとき、井田海岸は侵食傾向になると考えられる。また、紙面の都合上割愛したが、同様の解析から、有義波周期や波向に関係なく、有義波高1m程度の波浪条件が続く場合、井田海岸では安定した傾向を示した。これは、Vuら²⁾の研究と同様の結果を示唆している。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 礫浜海岸における UAV-SfM 測量は、低労力・短時間・高精度で、広範囲な3次元地形の取得や断面図および体積量の算定が可能であり、海浜変形の把握

(a) 2015 年 12 月 9 日 9 時 (b) 2015 年 12 月 12 日 9 時

(c) (a)と(b)の合成画像

図-11 ネットワークカメラによるスナップショット

に有用である。

- 2) 七里御浜井田海岸では、海岸線のほぼ法線方向である波向 E 方向、かつ有義波高 2 ～4 m が観測される波浪条件のとき、堆積傾向となる。
- 3) 七里御浜井田海岸では、海岸線の沿岸方向に近い波向 SSE 方向、かつ有義波高 4 m 以上の高波浪が尾鷲沖で観測される波浪条件のとき、侵食傾向となる。
- 4) 七里御浜井田海岸では、有義波周期や波向に関係なく、有義波高 1 m 程度の波浪条件になると安定傾向となる。

謝辞: 本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者: 岐阜工業高等専門学校・菊 雅美, 課題

図-12 波向別有義波高と有義波周期の出現特性 (2015 年 12 月 9 日～12 月 12 日)

番号: 26709035) の助成を受けたことをここに付記し、感謝の意を表する。また、本稿では、気象庁による潮位データならびに、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理された NOWPHAS の波浪データを用いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Vu Thi Lan Huong, 水谷法美: 画像解析に基づく七里御浜井田海岸の汀線変化特性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. L586-L590, 2013.
- 2) Vu Thi Lan Huong, 菊 雅美, 西浦洋平, 中村友昭, 水谷法美: 七里御浜井田海岸の海浜地形変化機構に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. L697-L702, 2015.
- 3) 小花和宏之, 早川裕弐, 齋藤 仁, ゴメスクリストファー: UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 53, No. 2, pp. 67-74, 2014.
- 4) リアルタイムナウファス国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網: <http://nowphas.mlit.go.jp/>, 2016-03-02 参照.
- 5) 国土交通省気象庁 潮汐観測資料: <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, 2016-03-02 参照. (2016.2.4 受付)

STUDY ON BEACH TOPOGRAPHIC CHANGE USING UAV AND NETWORK CAMERA AT SHICHIRI-MIHAMA IDA BEACH

Hiroyuki WATANABE, Taisuke KOBAYASHI, Masami KIKU, Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

Shichiri-Mihama Ida beach is suffering from severe beach erosion. To clarify the mechanism of such beach erosion, short-term beach topographic change including shoreline changes and berm developments obtained by UAV-SfM and network camera was investigated in the relation with wave characteristics. Results showed that UAV-SfM measurement provides the three-dimensional image, sectional view, and calculation of volume amounts of the gravel beach very well and it is useful to understand the beach deformation. Furthermore, it is showed that the beach tends to be erosive under the oblique wave of a significant wave height of 4 m or higher, waves of a significant wave height of the order between 2 m and 4 m from the normal direction of coastline tends to cause deposit, and the beach tends to be stable under waves of a significant wave height of about 1 m or less with regardless of the period and the wave direction, at Shichiri-Mihama Ida beach.