

## 礫浜を対象とした3次元地形計測手法の高精度化

岐阜工業高等専門学校 学生会員 ○ 鳥居 大和  
岐阜工業高等専門学校 正会員 菊 雅美

### 1. はじめに

水理模型実験中に時々刻々と変化する地形を計測するため、本杉ら<sup>1)</sup>は、多視点ステレオ写真測量 SfM/MVS に着目した。そして、800 万画素の USB カメラ 12 台を千鳥状に配置し、同時撮影画像から 3D モデルを構築することで、礫浜の数値表層モデル DSM を得た。しかし、撮影画像間に時間的なずれが確認され、3D モデルを構築できなかつたり、構築した 3D モデルの再現性が低かつたりと、計測精度に課題が残された。そこで、本研究では、3次元地形計測手法を改良し、地形の再現性を高めるための画像の撮影方法と解析条件を検討する。

### 2. 3次元地形計測手法の概要

#### (1) 礫浜の水理模型

岐阜工業高等専門学校の断面 2 次元造波水路（長さ 25 m、幅 0.7 m、高さ 1.0 m）を使用した。図-1 に、実験装置の概略を示す。模型縮尺を 1/25 とし、造波板から 18.1 m 離れた地点に 1/7 の一様勾配を有する不透過斜面を設置した。不透過斜面上には、15 cm 厚で中央粒径  $d_{50} = 3.4$  mm の礫を敷き均した。

#### (2) 3次元地形計測手法

本研究では、1600 万画素の Arducam カメラ(IMX519) を Raspberry Pi 3B の CSI ポートに接続することで、撮影処理の高速化を試みた。撮影画像間のオーバーラップ率を 90% とし、図-1 に示すように、12 台のカメラを 9.1 cm 間隔で 1 列に配置した。撮影範囲の陸側端には、3D モデルの構築に必要なマーカを配置した。汀線中央を原点とし、各マーカの座標をトータルステーション（以下、TS）によって計測した。

### 3. 造波前後の地形に対する精度検証

#### (1) 撮影条件および解析条件

本検討では、3D モデルの構築精度の向上を目的に、撮影条件を検討した。撮影条件を表-1 に示す。Case 2 では、照明を設置して地形の凹凸による礫浜表面の明暗差の解消を試みた。Case 3 では、レーザを礫浜表面に照射し、3D モデルの構築に必要な特徴点として認識させることを試みた。また、砕波点より沖側を撮影範囲に含めるため、12 台のカメラで撮影後、4 台のカメラを沖側

に再配置し、全 16 枚の画像を取得することにした。

礫浜地形の再構築には、3D モデリングソフトウェア Agisoft Metashape を用いた。3D モデルの構築精度に最も影響を与える「写真のアラインメント」の解析精度を「最高」・「高」・「中」・「低」と変化させた。各撮影条件の下、オルソモザイク画像と DSM を作成した。

#### (2) 精度検証方法

表-1 の条件に基づき、排水状態で 1/7 勾配の一様斜面を撮影した。また、斜面上にネットを敷設し、Case 1 の条件下で撮影した。ネットの交点を検証点とし、TS によって全 60 点の位置座標を実測した。その後、水路内の水深を  $h = 40$  cm とし、波高  $H = 8.0$  cm、周期  $T = 2.0$  s の規則波を 3 時間作用させた。造波停止後に排水し、造波前と同様の要領で画像撮影と TS 計測を実施した。

造波後地形のオルソモザイク画像と DSM をそれぞれ図-2 および図-3 に例示する。地理情報システム QGIS を用いて、ネット敷設時の各解析条件のオルソモザイク画像から、図-2 のように検証点を特定し、X、Y 座標を算出した。さらに、図-3 のように、特定した検証点を各撮影条件の DSM に重ね、Z 座標を抽出した。DSM から抽出した座標を計測値とし、TS による実測値を正として、計測値の二乗平均平方根誤差 RMSE を求めた。

#### (3) 3次元計測手法の妥当性

各条件における計測値の RMSE を表-2 に示す。解析条件に着目すると、同表(a)から、X、Y 座標に対する計測値の RMSE はすべて 1.0 cm 未満であり、差異はみら

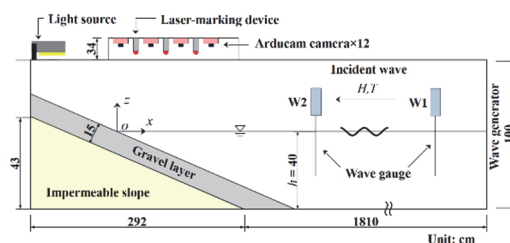


図-1 実験装置の概略

表-1 撮影条件

Case	Light Source	Laser
1	×	×
2	○	×
3	×	○
4	○	○

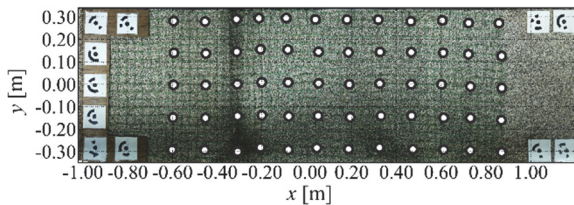


図-2 ネット敷設時のオルソモザイク画像と検証点

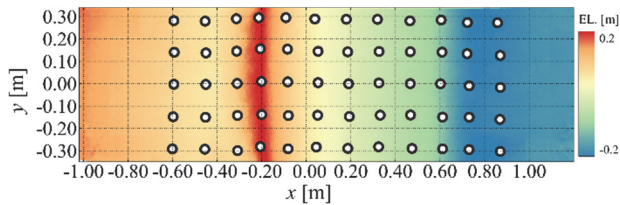


図-3 数値表層モデル DSM と検証点

表-2 X, Y, Z座標の RMSE

(a) X, Y座標の RMSE

Alignment	Coordinate	Before [cm]	After [cm]
Highest	X	0.6	0.4
	Y	0.7	0.7
High	X	0.6	0.3
	Y	0.6	0.6
Medium	X	0.7	0.6
	Y	0.5	0.5
Low	X	0.4	0.5
	Y	0.5	0.5

(b) Z座標の RMSE

Alignment	Case	Before [cm]	After [cm]
Highest	1	0.6	0.6
	2	0.7	0.6
	3	0.8	0.6
High	1	0.6	0.5
	2	0.7	0.5
	3	0.8	0.6
Medium	1	1.9	1.7
	2	1.8	1.6
	3	2.3	2.3
Low	1	2.1	1.8
	2	1.7	1.6
	3	1.6	2.1

れない。一方、同表(b)から、Z座標の RMSE は、「最高」または「高」とすることで、1.0 cm 未満になった。画像から特徴点をより多く捉えることが必要といえる。

撮影条件に着目すると、解析条件を「最高」または「高」とした場合、照明とレーザを使用しない Case 1 の RMSE が最も小さくなった。Case 2 と Case 3 では、照明とレーザはそれぞれ礫浜表面を白飛びさせ、当初意図した目的を果たさなかった。なお、Case 4 は、照明によりレーザの白飛びが顕著化したため、検討対象外とした。

以上から、照明とレーザを設置しない状況で撮影し、「写真のアラインメント」の設定精度を「高」とすることで、3D モデルの再現性を高められるとわかった。本杉らりの手法では、Z座標の RMSE が 1.0 cm だったため、本研究によって計測精度を高められた。

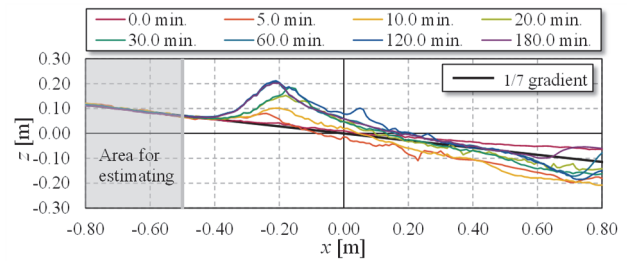


図-4 水路中央における断面地形

#### 4. 造波中の地形変化に対する再現性

水深  $h = 40$  cm の下、波高  $H = 8.0$  cm、周期  $T = 2.0$  s の規則波を作用させた。撮影条件を Case 1 とし、12 台のカメラで 30 s ごとに礫浜地形を撮影した。3 時間の撮影で、361 セットの画像を得た。撮影画像の解析条件として「写真のアラインメント」の設定精度を「高」とした。

各時刻の DSM から抽出した水路中央 ( $y = 0.0$  m) における断面地形を図-4 に示す。同図から、 $t = 0.0$  min. (初期地形) のとき、 $x > 0$  では水面の影響を受けて勾配が緩やかになっているものの、 $x < 0$  の範囲では 1/7 勾配が再現されている。そのため、水面に接していない地形に対する再現性は高いと判断できる。また、造波中に波が遡上しない範囲 ( $-0.80$  m  $< x < -0.50$  m) について、初期地形の標高を正とし、各時刻の標高の RMSE を求めた。その結果、RMSE の最大値は  $t = 6.0$  min. の 0.7 cm であった。RMSE が 0.6 cm 以上となったのは、361 個中 7 つで、いずれも  $t = 8.5$  min. までだった。造波開始直後は一様斜面上を遡上する波がより多くのカメラ画像に写りこむため、再現性の低いモデルが構築されたといえる。

同図から、 $t = 60.0$  min. までに堆積が進行し、その後、 $x = -0.20$  m 付近を頂点とするバーム形成されていることがわかる。本杉らりの手法では、造波中における 3D モデルの再現精度が低く、地形変化の検討に用いることのできる DSM が限られていた。本計測手法によって、任意時刻における断面地形の抽出が可能となり、地形の発達過程を検討できるようになった。

#### 5. おわりに

本研究では、本杉らりによる 3 次元計測手法の改良を試みた。その結果、造波前後の地形に対して、本手法の RMSE は 1.0 cm 未満となり、計測精度が向上した。また、造波中においても、時々刻々と変化する礫浜の 3D モデルを高精度に構築可能となった。

**謝辞:** 本研究は、小川財団助成金および JSPS 科研費 21K04282 の助成を受けたことをここに付記し、感謝の意を表す。

**参考文献:** 1) 本杉 蓮, 菊 雅美, 若松果穂: 3 次元地形計測システムの構築と消波ブロックが地形変化に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I\_115-I\_120, 2022.