

大阪公立大学工学部都市学科 学生員 ○伊藤 翼
大阪公立大学大学院工学研究科 正会員 中條 壮大

1. 研究背景・目的

気候変動に伴う海面上昇や波浪の変化は砂浜の消失や安定形状の変化につながると予測される。これにより越波災害を低減する自然の防護機能や、生物生息による浄化機能、人間生活と結びつく親水文化機能といった従来の砂浜の機能が失われる恐れがある。砂浜の粒度分布は砂浜地形や生物生息場の環境を決定する、砂浜モニタリングの重要因子である。汀線変化などに比べて、粒度の空間分布や季節変化をふるい分析から明らかにすることは、分析作業量やサンプル収集の点で大きな負担である。

また砂浜に形成されるカスプなどの微地形と代表粒径の関係も研究されているが、荒天の前後での微地形の変遷と粒度分布の関係などは十分に明らかではない。これは砂浜地形計測の困難さも関係し、トータルステーション (TS) は精緻な測定が可能だが、微地形を捉えるための高密度計測が困難であり、測量時に観測対象を乱してしまう問題がある。近年は多数のレーザー光の反射を測定する LiDAR の進展がめざましいが、費用対効果の面で砂浜の定期的なモニタリングにはまだ難しい。

このような背景から、我々は粒度分布と砂浜の微地形を画像解析から求めるモニタリング法を確立する研究を進めている。本稿では大阪府の箱作海岸で行った計測結果を一例にその途中経過と今後の課題について示す。

2. 粒度分布の計測手法 (自己相関法)

Rubin¹⁾はグレースケール化した砂粒子画像の輝度値に対し空間的自己相関係数 (AC 値) を求め、AC 値の距離 k に応じた減衰から対応する粒径を推定する手法を提案した。AC 値 $a(k)$ は次式のように算出される。

$$a(k) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここで x_i および y_i は基準領域および参照領域における輝度値を示す。撮影解像度 (mm/pixel) が与えられれば、ある粒形に対し 1 つの AC 減衰曲線が定義できる。実際

の砂粒子画像はその重ね合わせで表現されるため、以下の連立方程式を解いて粒度分布 p_j を求める。

$$\begin{aligned} a_{1,1}p_1 + a_{1,2}p_2 + \dots + a_{1,j}p_j &= b_1 \\ a_{2,1}p_1 + a_{2,2}p_2 + \dots + a_{2,j}p_j &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{k,1}p_1 + a_{k,2}p_2 + \dots + a_{k,j}p_j &= b_k \end{aligned} \quad (2)$$

ここで添え字 k は基準点からの距離を、 j は粒径区分を表し、 b は解析対象の底質画像から得られる AC 値を表す。

Rubin はふるい分析により得られる底質画像から AC 減衰曲線を得ているが、中條ら²⁾は任意粒径の AC 減衰曲線を得るために最適な仮想底質画像を CG で生成する方法を提案している。本研究でもそれになった。

3. 微地形の画像計測法 (SfM)

フォトグラメトリ (SfM) は近年普及している写真測量手法である。ステレオ視された多数の写真から幾何光学的にマッチングする画素を同定し、3次元座標の点群を構成する。そのマッチングにおいて、画像中の特徴量から同じ点を探索するアルゴリズムや光軸の歪みを自動補正する手法が様々に検討されており、市販ソフトも複数提供されている。撮影は対象空間を取り巻くように行うことで対象場をできるだけ乱さない計測が可能である。推奨環境での市販ソフトの精度は十分に高いことが保証されているが、砂浜は特徴量に乏しいと思われるため、どのような撮影条件や校正方法で使用するのが望ましいかは検討の余地がある。本稿では (PhotoModeler, XLsoft Corp.) を使用した結果を示す。

4. 粒度分布計測例と課題

ここでは粒度分布推定における画像解析上の留意点と、同一の砂浜の近接した地点における粒度分布の違いについて検討した結果を示す。2025年6月25日に箱作海岸 (N 34° 20' 28", E 135° 12' 4") にて現地調査を行い、高潮位線と汀線近傍、後浜における計6地点

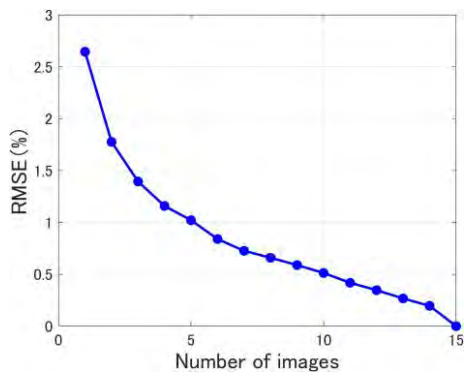


図-1 解析画像数が粒度分布のRMSEに及ぼす影響

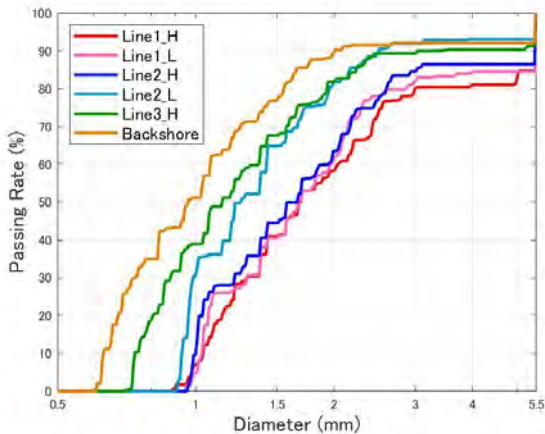


図-2 同一の砂浜における粒度分布の比較

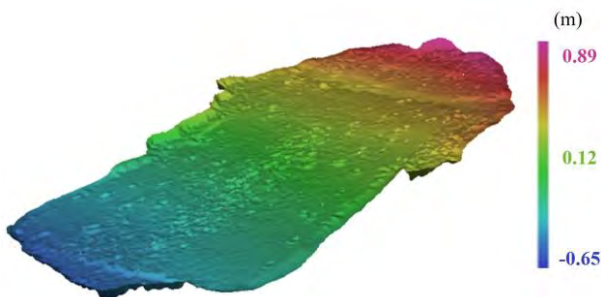


図-3 フォトグラメトリによる潮間帯の微地形計測結果

で底質試料の取得（各地点で約 500 mL）を行った。今回は現地で画像取得を行わず、底質が含有する水分の反射の影響を排除するために 110°C の乾燥炉で 6 時間乾燥させたバット内の資料に対し、室内照明環境で砂面とレンズが平行になる状態で撮影を行った。撮影には iPhone15 (Apple Inc.) を用い、4284×5712 pixel の JPEG 画像として取得した。撮影解像度は 0.0256 mm/pixel であった。撮影画像の解析数が解析結果に及ぼす影響を評価するため、各底質試料に対しバット内での敷き直しをしながら各 15 回の撮影を行った。

図-1 は画像数が 15 枚の時の結果を基準に、解析画像数が減少した場合の RMSE 値 (%) の変化を示している。これより画像数が 5 枚までは大きな変化がある

がそれ以降は緩やかな変化である事がわかる。図-2 は 15 枚の解析結果より求めた、サンプリング地点間の粒度分布の比較を示す。Line1 と 2 は離岸堤背後の汀線凸部に、Line3 は汀線凹部に位置する。H は高潮位線、L は低潮位線付近を意味する。凹部は凸部よりも細かな粒径が多く、後浜では顕著に粒径が細かい。ただし Line2 の低潮位では d_{50} で 0.3 mm ほど細かくなっており、地点間差の有意性を議論するにはさらに分析数を増やす必要がある。とはいえ、同一砂浜の比較的近い地点で比較的大きな差が生じたことは興味深い。

5. 微地形測定結果

面積 25m² 程度の空間に対し計 98 枚の撮影画像を取得し、SfM 解析を行った一例が図-3 である。TS の測量結果との比較から、水平方向の精度は 0.35m と大きい。再構築された結果からは調査中に生じた足跡が明瞭に判別できるなどステレオマッチングは良好に実施されている。校正用地点の適切な配置や撮影方法の検討が今後の課題と考えている。

6. まとめ

同一砂浜内でも砂粒子のばらつきが大きいことが示された。この原因を解明するために、地形と粒度分布の相互関係をより多地点で把握する必要がある。現在は限られた範囲の検討で、砂浜勾配などとの関係性も十分に分析できていない。座標の正確な取得のために校正点の設置方法などを改良しながら、撮影領域を拡大したいと考えている。また、現地の砂浜画像から前処理なしに粒度分布をある程度の精度で求める事ができれば粒度分布を高密度に測定できるようになるため、そうした画像計測上の課題を整理し、改良を進めたい。

謝辞：本研究の一部は日本生命財団若手研究助成の支援を受けて実施されたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Rubin, M. D. (2003): A Simple Autocorrelation Algorithm for Determining Grain Size from Digital Images of Sediment, *J. Sed. Res.*, 68, 2, 1456-1460.
- 2) 中條ら (2020) : 仮想底質画像の自己相関関数を用いた粒径分布の画像計測に撮影条件が及ぼす影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 76, 2, I_714-I_719.