

デジタルカメラ画像を用いた淡路島・成ヶ島における 底質環境モニタリング

Environment monitoring on Coastal Sediment by using digital camera images in Narugashima at Awaji Island

宇野宏司¹・濱森 彩²・辻本剛三³・柿木哲哉⁴

Kohji UNO, Aya HAMAMORI, Gozo TSUJIMOTO and Tetsuya KAKINOKI

This paper proposes a new method of the environment monitoring on coastal sediment. To clarify the temporal-spatial variation of median grain size and effect on coastal vegetation, we applied the method for determining grain size from digital camera images of sediment proposed by Rubin to the sediment at the sandy beach in the Narugashima Island which is located at the mouth of Osaka bay, Japan. We also applied EOF (empirical function) analysis to the temporal-spatial data of median grain size which was obtained by above method and extracted the principal component which rules sediment dynamics. From the results of estimation of the amount of wind-blown sand, the sediment tends to move in north-south direction in summer season and in east-west direction in winter one, respectively.

1. はじめに

成ヶ島 (図-1, 写真-1) は淡路島南東部に位置する砂嘴状の島で、その形状から「淡路橋立」と言われ、瀬戸内海国立公園の一部に指定されている。本島はハクセンシオマネキ (*Uca lactea*) やハマボウ (*Hibiscus hamabo*) といった貴重な動植物が生息するほか、アカテガニ (*Chiromantes haematocheir*) やアカウミガメ (*Caretta caretta*) の産卵地にもなっている。また、細田 (2007) は、1994年より開始した調査結果をもとに本島と淡路島との間に位置する由良湾におけるアマモ (*Zostera marina*) 場の復活の経緯について検証し、成ヶ島の豊かな植生について報告している。

その一方で、潮流により運ばれてきた浮遊ごみが大量に押し寄せるため (宇野ら, 2009)、生態系への影響等、砂浜環境の悪化が懸念されている。本島東岸に広がる自然砂浜は海岸保全施設としての役割が期待されるが、その時空間的な動態については吉田ら (2002) の報告がある程度で、十分には把握されていない。

そこで本研究では、底質・海浜植生分布と風の特性把握に係る現地調査、底質特性の時空間変動に関する統計解析、現地の風の出現特性を考慮した飛砂量計算を行い、成ヶ島東岸砂浜における底質の季節変化とその要因について検討した。

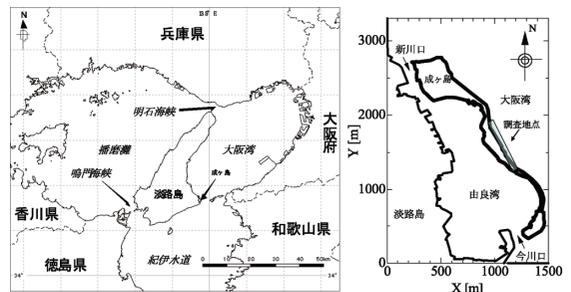


図-1 調査地点 (淡路島・成ヶ島)



写真-1 調査地点 (淡路島・成ヶ島)

2. デジタル画像を利用した底質粒径の算出方法

砂浜の底質調査、とりわけ粒度分布や平均粒径等の底質特性の把握については、通常、現地で採取したものを実験室に持ち帰り、室内でふるい試験を実施するという手順がとられる。こうした従来の調査方法では多大な労力と時間を要するため、調査域を縮小したり、サンプリング間隔を粗にする必要があり、海岸底質の詳細な時空間変動を把握することが困難であった。

しかし、近年、光学技術の目覚ましい進歩により、市販

1 正会員 博(工) 神戸市立工業高専准教授
2 学生会員 神戸市立工業高専攻科都市工学専攻
3 フェロー 工博 神戸市立工業高専教授
4 正会員 博(工) 神戸市立工業高専准教授

表-1 撮影条件

項目	設定条件
撮影距離 (本体～底質表面)	33 cm
画像サイズ	3264 x 2448 pixels
撮影モード	フラッシュ撮影

画像 A



画像 B

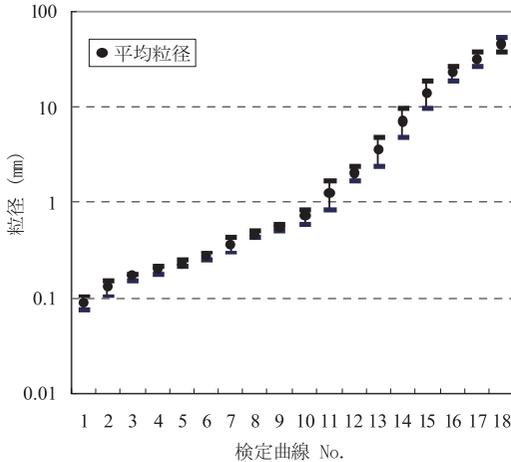


図-2 検定曲線の粒径範囲

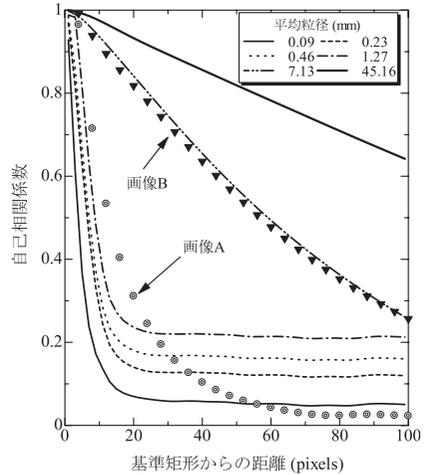


図-3 粒径別検定曲線と解析値の分布

のデジタルカメラでも高画質の画像が得られるようになり、これを利用した底質粒径の計測手法が提案されている。

たとえば、Rubin (2004) は、画像の空間的統計特性を考慮して、平均粒径を算出する手法を提案している。また、辻本ら (2008) は、撮影点の斜面勾配や撮影距離、底質の湿潤状況の違いによる解析結果から本計測方法の妥当性について検証するとともに、室内実験及び現地海岸での適用を試みている。

本手法ではまず、あらかじめ粒径のわかっている単一粒径からなる検定曲線用の底質サンプルを複数用意する。本研究では、図-2に示すとおり現地で採取した底質 (粒径0.075～53mm) を18階級にふるいわけ、これを底質サンプルとした。次に、各サンプルを表-1に示す条件で、デジタルカメラ (COOLPIX P6000, Nikon社) を用いて撮影し、得られた各画像をもとに、基準となる矩形領域の輝度値と、その矩形領域から距離だけ離れた同サイズの矩形領域の輝度値との空間的自己相関係数を式 (1) で算出した後、粒径別の検定曲線を作成した。

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x_i, y_i ; 矩形領域内の画素*i*での輝度値、 \bar{x}, \bar{y} : 矩形領域内の平均輝度値である。

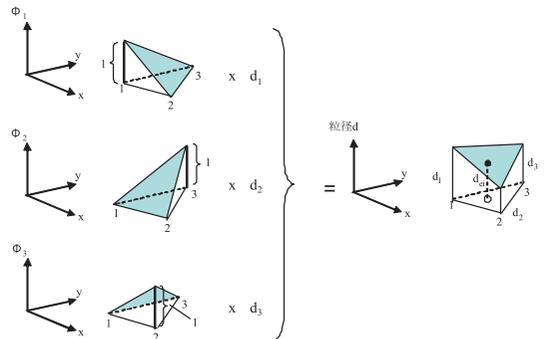


図-4 2次元1次補間関数と内挿法

図-3に粒径ごとに求めた画像間距離と自己相関係数との関係 (一部抜粋) を示す。各粒径とも基準区間からの距離が離れるにつれて自己相関係数が減少していくことがわかる。粒径が細かいほど、隣接する別の砂粒子との距離が近くなるため、矩形領域間の距離がわずかでも離れると、自己相関係数が大きく減少する。なお、これらの検定曲線は、サイズの異なる単一粒径から得られたものであるため、検定曲線どうしが交差することはない。

本図には同じ表-1の条件で撮影された現地海岸の底質画像をもとに得られた画像間距離と自己相関係数との関係についても示している。現地調査で得られた画像A, Bはいずれも混合粒径であるが、検定曲線 (単一粒径)

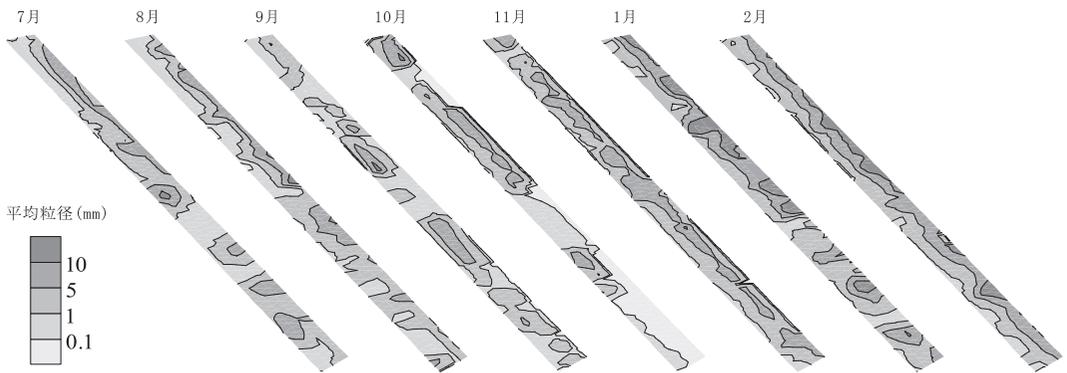


図-5 平均粒径の推移 (304点での定点モニタリング)

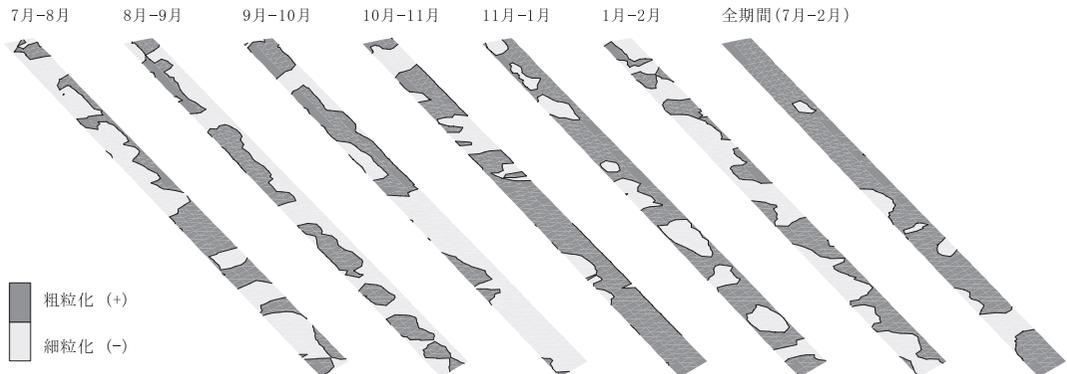


図-6 底質の粗粒化, 細粒化

の場合と同じく、基準区間からの距離が離れるにつれて自己相関係数が減少する傾向がみられる。ただし、混合粒径の場合は、例えば画像Aのように、複数の検定曲線と交差することがある。このような混合粒径に対しては、複数の粒径が線形的に輝度分布に影響しているものとし、式(2)で示される線型方程式を解くことにより、平均粒径を算出した。

$$\begin{aligned}
 I_{(1,1)}x_1 + a_{(1,2)}x_2 + \dots + a_{(1,m)}x_m &= b_1 \\
 I_{(2,1)}x_1 + a_{(2,2)}x_2 + \dots + a_{(2,m)}x_m &= b_2 \\
 &\vdots \\
 I_{(n,1)}x_1 + a_{(n,2)}x_2 + \dots + a_{(n,m)}x_m &= b_n
 \end{aligned} \dots (2)$$

ここに、 $a_{(k,j)}$: 画素間距離 k, j 番目の粒径の空間的自己相関係数 (検定曲線), x_j : j 番目の粒径が含まれる割合, b_k : 画素間距離 k における自己相関係数 (サンプル画像) である。なお、式(2)では、 x_j のみが未知数となり、非負条件を有する最小二乗法 (Lawson・Hawson, 1974) により決定することができる。

3. 淡路島・成ヶ島東岸砂浜における底質の時空間変動

(1) 現地調査結果

2009年7月から2010年2月にかけて毎月1回 (ただし、2009年12月は器材不良により欠測)、淡路島・成ヶ島東岸砂浜 (岸沖方向30m, 沿岸方向750m) において、沿岸方向に4本のline (Line-1 : 汀線直上~Line-4 : 後浜の海浜植生生育境界付近) を設け、各Line上、約10mごとに前章と同一条件で表層底質の画像撮影を行った。これらの画像をもとに前章のRubin (2004) が提案する画像の空間統計特性を考慮した手法によって、各画像の平均粒径を算出した。

各撮影点には歩測により移動し、携帯型GPS (MobileMapper™6, MAGELLAN社) を用いて位置情報を記録した。この段階では、厳密な意味での定点計測とはならない。そこで、テローニによる要素分割法 (谷口, 1992) を利用して、各撮影点を節点とする三角形要素分割を行い、平均粒径の空間分布図を作成したのち、これをもとに図-4に示す2次元1次補間関数 ϕ_i を用いて、あらかじめ用意した定点格子上的平均粒径を空間補間によって算出した。すなわち、定点格子上的平均粒径は、その

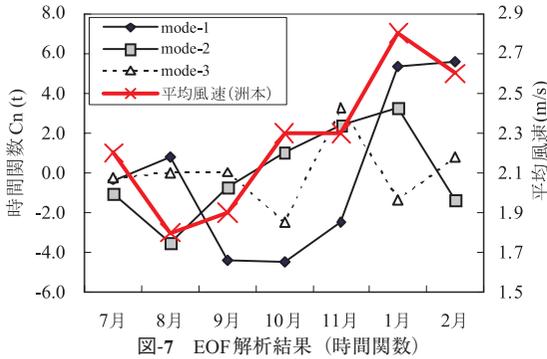


図-7 EOF解析結果 (時間関数)

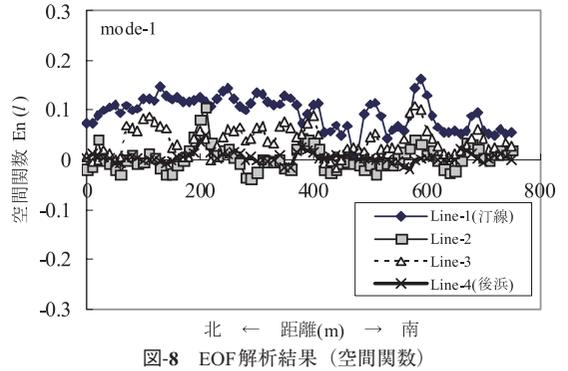


図-8 EOF解析結果 (空間関数)

点が含まれる三角形要素の各節点の平均粒径の値を用いて、次式で評価される。

$$\phi_i = \frac{1}{2\Delta^e} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$d_{50}(x, y) = \sum_{i=1}^3 \phi_i(x, y) d_i \quad \dots (3)$$

ここに、 Δ^e ：三角形要素 e の面積、 d_i ：節点 i の粒径（解析値）、 a_i, b_i, c_i は節点の xy 座標を用いて計算される係数である。このようにして、各line上76点、合計304地点の平均粒径を算出し、その空間分布を把握した。

図-5に平均粒径の空間分布の推移を示す。汀線付近では、夏季から秋季にかけて、底質が一度細粒化した後、冬季にかけて粗粒化に転じる傾向がみられる。一方、海浜植生の繁茂する後浜付近の底質については、植生の繁茂する夏季には粒径1mm程度の細砂が捕捉される傾向が強いが、冬季になるにつれてこれらの植生が枯死するため、捕捉効果が低下し、同様に粗粒化する傾向にあることがわかる。

図-6は図-5に示す前後の調査結果から底質粒径の変化量をみたものである。調査開始時（2009年7月）と調査終了時（2010年2月）という約半年の時間スケールでは、本砂浜は全体的に粗粒化する傾向にあると判断されるが、1～2ヶ月という時間スケールでの比較からは、局所的な粗粒化、細粒化を繰り返していることがわかる。

(2) 経験的固有関数法による底質変動要因の抽出

成ヶ島東岸砂浜の底質変動要因について考察するため、経験的固有関数法（以下、EOF解析）による時間関数と空間関数の抽出を試みた。

ここでは、観測日ごとに各ラインの平均粒径の平均値を算出する。次に、ある観測日 t のライン l における平均粒径の平均値を $d_{50}(l, t)$ 、全期間平均の平均粒径を $\overline{d_{50}}(l)$ として、全期間平均値からの変動量

$$\Delta d_{50}(l, t) = d_{50}(l, t) - \overline{d_{50}}(l) \quad \dots (4)$$

を求める。これを時間方向の固有関数 $c_i(t)$ と空間方向

の固有関数 $e_i(l)$ を用いて

$$\Delta d_{50}(l, t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) e_i(l) \quad \dots (5)$$

と表現し、Winantら（1975）の方法によって $c_i(t)$ と $e_i(l)$ を求めた。ここで $e_i(l)$ は対象とするライン固有のものであり、データから経験的に得られるものである。 $c_i(t)$ と $e_i(l)$ は寄与率の大きい順に第1次モード c_1, e_1 、第2次モード $c_2, e_2 \dots$ とする。

図-7にEOF解析により得られた時間固有関数を示す。最も寄与率の高いmode-1（寄与率54%）の時間関数は、現地付近で観測された平均風速の推移と似た傾向を示しており、現地底質の時間変動には風の影響が卓越しているのではないかと考えられる。

図-8にEOF解析により得られた空間固有関数（mode-1）を示す。汀線直上（Line-1）では、他のラインと比較して値が大きく、この付近での変動が最も大きいことがわかる。また、沿岸方向の変化量の違いについてみると北岸側での変化量が南岸側でのそれと比較して大きくなっており、湾曲した海岸形状により潮汐や波浪の侵入の程度が異なることを示すものと考えられる。一方、後浜（Line-4）での変化は汀線付近と比較して小さくなっており、海浜植生による砂の捕捉効果が示唆された。

4. 成ヶ島における風の出現特性とそれを考慮した飛砂量算定

前章(2)の統計解析の結果から、淡路島・成ヶ島東岸砂浜の底質変動要因として風が重要であることが示唆された。そのため、飛砂による砂浜全体の底質異動量を把握しておくことが重要であると考えられる。しかし、現地における風向風速の連続データは取得されていない。そこで、最寄の気象庁AMeDASの観測データ（観測点：洲本）で代替できるかどうか検討するため、2009年8月、10月、2010年1月に現地海岸において風向風速計（KDEC21-KAZE, ノースワン社）を設置し、測定間隔1秒で地上100cmの風向風速データを取得したのち、10

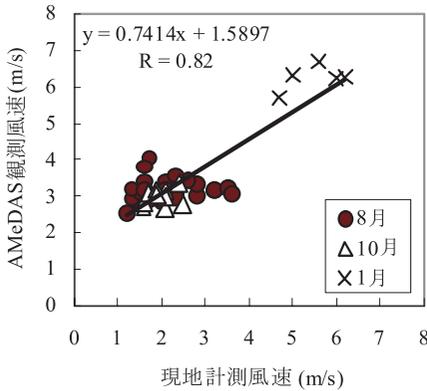


図-9 風速データの検証

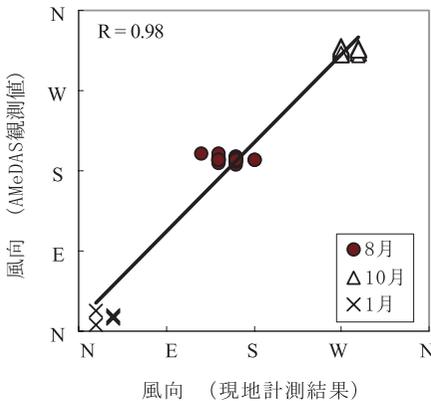


図-10 風向データの検証

分平均値を算出して、気象庁 AMeDAS の観測データと比較した。

図-9に風速データ、図-10に風向データの検証結果を示す。風速についてみると、夏季～秋季にかけては観測値、気象庁 AMeDAS データともに4m/s以下であるが、冬季には季節風が発達するため、5m/s以上の強い風の出現が見られる。いずれの時季とも観測値、気象庁 AMeDAS データには有意な相関がみられた。一方、風向についても季節ごとに卓越方向は異なるが、有意な相関が見られた。以上の結果から、現地の飛砂量算定に必要な風向風速データは気象庁 AMeDAS の観測データ (10分平均値) で代用可能であると判断した。そこで気象庁の10分平均風速と最頻出風向を用いて、淡路島・成ヶ島における飛砂量の時間変化を算出した。飛砂量算定に必要な摩擦速度は、河田 (1950) の経験式を用いた。また、砂粒が運動を開始する移動限界摩擦速度 u_{*c} は、Bagnold (1954) の式で評価し、全飛砂量 Q は、河村 (1951) の式を適用することとした。

図-11に飛砂量計算の結果を示す。本図より夏季には沿岸方向 (南→北) への飛砂が卓越する一方、冬季には岸沖方向 (西→東) への飛砂が卓越していることがわか

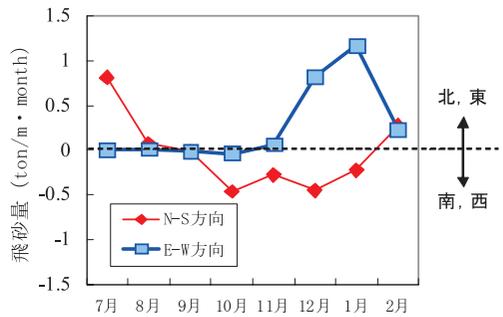


図-11 飛砂量計算結果 (0.1mm)

る。図-5の平均粒径の推移をみると、夏季から秋季にかけて砂浜南端に堆積していた細砂が、秋季から冬季には一掃されており、定性的には飛砂量計算の結果と一致する結果が得られた。

5. まとめ

本研究の結果、淡路島・成ヶ島における平均粒径の時間変動は、風の出現特性との相関が高く、空間変動は岸沖方向にはほぼ一様で、標高に応じた変動特性が見られることがわかった。今後は波浪による底質変化や地形変化と底質粒径変化の応答性についても検討する予定である。なお、本研究の一部は文部科学省研究費補助金基礎研究 (C) 課題番号21560547の補助によるものである。

参考文献

宇野宏司・近藤文音・辻本剛三・柿木哲哉 (2009) : 淡路島・成ヶ島における浮遊ごみの実態把握調査, 海洋開発論文集, 25巻, pp.117-122.
 河田三治 (1950) : 防災林に関する調査報告, 治山事業参考資料, 林野庁, pp.1-22.
 河村龍馬 (1951) : 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第5巻, 第3-4号, pp.95-112.
 谷口健男 (1992) : FEMのための要素自動分割-デローニ三角分割法の利用-, 森北出版, 198p.
 辻本剛三・山田文彦・柿木哲哉 (2008) : 砂画像粒子を用いた底質粒径の計測法の妥当性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 24, pp.1207-1212.
 細田龍介 (2007) : 由良湾におけるアマモ復活の経緯とその検証-自然と人間の共生の例-, 海洋と生物, Vol. 30, No.5, pp.685-694.
 吉田英治・荒木進歩・出口一郎・池田智大 (2002) : 混合砂礫海岸における底質の分級と断面変形, 第49回海講演文集, pp.461-465.
 Bagnold, R. A. (1954) : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., 265p.
 Lawson, C.L. and Hawson, B.J. (1974) : Solving Least Squares Problems : Eglewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 340p.
 Rubin, D.M. (2004) : A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, Journal of Sedimentary Research, Vol.74, No.1, pp.160-165.
 Winant, D.C., D.L. Inman and C.E. Nordstrom. (1975) : Description of seasonal beach change using empirical eigenfunction, J.G.R., Vol.80, No.15, pp.1979-1986.