

砂粒子画像を用いた底質粒径の計測法の 妥当性に関する研究

A STUDY ON MEASURING SAND PARTICLE SIZE USING DIGITAL IMAGES OF SEDIMENT BY RUBIN'S METHOD

辻本剛三¹・山田文彦²・柿木哲哉³

Gozo TSUJIMOTO, Fumihiko YAMADA and Tetsuya KAKINOKI

¹ フェロー会員 工博 神戸市立高専 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

² 正会員 博(工) 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

³ 正会員 博(工) 神戸市立高専 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

A method for determining grain size from digital images of sediment proposed by Rubin was applied to field data and experimental data. Its accuracy is poor under sediments with the high sorting coefficient because fine-grained sand may be buried under coarse-grained sand. It is possible to estimate the grain size unless water permeates the sediment surface for the wet grained sand. But the grain size measured by digital images is nearly equal to that by sieving. The experimental data showed that the sorting process would be generated in a short period, and then fine-grained sand is deposited on the offshore side and coarse one on the onshore side under depositional wave actions.

Key Words : Digital Images, Grain Size, Sorting, Wave Action

1. はじめに

海浜の保全対策事業として近年、養浜事業が重要視されている。養浜等を行う場合の養浜材としては、対象海岸に存在している砂に近い粒度組成を有する養浜材を使用することが望ましいが、その確保は必ずしも容易ではない。そのため異なった粒度組成を有する材料を使用することになり混合粒径の海浜となることが多い。養浜後の維持管理は極めて重要であり、特に動的養浜は適切な管理が継続されることによりその機能が発揮されるものである。

混合粒径海岸は波や流れの分級作用により、岸沖方向や沿岸方向に粒径分布が異なり、漂砂現象も複雑であるため、養浜材が沖側や下手側等に流出することもあり、養浜後の海浜変形予測の際には粒径の分級効果を取り込む必要があり、底質の時空間分布の把握が重要となってくる。そのため例えば、福濱ら¹⁾は混合粒径砂を用いて大型水路実験を行い、地形の再現予測を行っている。目黒ら²⁾は平衡海岸の形成過程と養浜材との関係を実験的に検討している。

通常、底質調査は現地で採取したサンプルを実験室内で篩いにより分析するが、現地の底質調査には多大な時間やコストを要する。また、採取量は

少ないものの現地の地形を乱すことにもなる。

近年、砂粒子画像から底質粒径等の算定が試みられている。柿木・辻本³⁾は砂漣上の浮遊砂の粒径計測を行い、一周期間の浮遊砂粒径の変化を画像より調べ、鉛直方向に粒度分布が異なることを示している。Butlerら⁴⁾は底面の底質粒径を画像により算出する手法を提案している。しかしながら、同じ色や輝度の粒子が互いに接触することで実際の粒径よりも過大評価となる欠点がある。最近、Rubin⁵⁾により提案された画像の空間的統計の特性を考慮した手法は、これらの欠点を補う手法として有効であるが、現地海岸や移動床実験等への適用は極めて少ない。

本研究では、Rubinの手法の妥当性を検証し、移動床実験における地形変化と表面粒度との関係、現地海岸の粒度特性を調べたものである。

2. Rubinの画像計測の方法

(1) 空間的自己相関

空間的自己相関の概念は地域経済学、地理学の分野で発展してきたものであり、空間的に近接したものは遠くの事象よりも密接な関係にあり、連続的な変数を用いる代表的なものがMoran's Iのモデルである。図-1は篩い径0.85mm通過し、

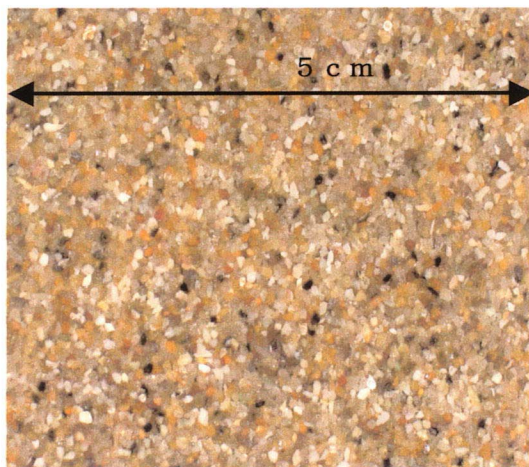


図-1 粒子画像の例(0.73mmの平均画像)

0.6mm 径に残留した砂粒子を(3072*2304pixels)で撮影した画像である。スケールは0.0163mm/pixelである。この画像の基準となる矩形領域とその矩形領域から一定距離 k だけ離れた同じ大きさの矩形領域との空間的自己相関係数 $r(k)$ を式(1)より計算する。空間的自己共分散を標準化した統計量が空間的自己相関係数である。

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

ここで、 x_i, y_i : 矩形領域内の各座標での輝度値、 $\bar{x}, \bar{y}$: 矩形領域内の平均輝度値である。

図-2 に空間的自己相関係数と2つの矩形間距離との関係を示す。これは時系列データへの解析に用いられるコレログラムに相当する。完全に均一粒径で規則正しく分布した画像であれば、2つの矩形領域の距離がゼロなら相関係数は1.0であり、距離が増加するにつれて線形に相関係数が低下し、粒径 D にほぼ等しい距離なら0になり、相関係数は式(2)となる。

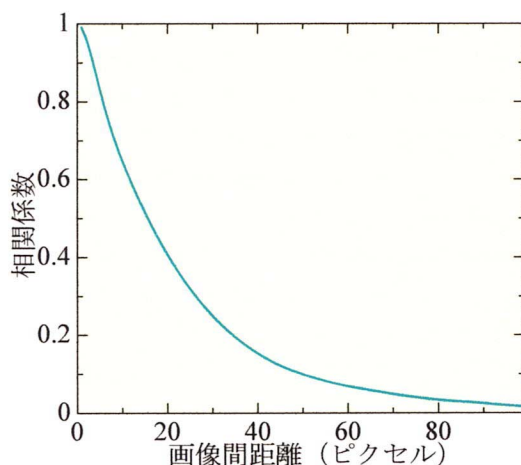


図-2 輝度値のコレログラム

$$r(k) = \frac{D-k}{D} \quad (2)$$

図-1のように砂粒子を篩い等で分類しても粒径は0.6mm~0.85mmの幅があり、形状も棒状や球状などと差異があり、さらには微小な表面の凹凸のために輝度値は一定ではないため、式(2)のような線形とはならない。図-1は平均粒径0.73mmであり画像では約45pixelsに相当する。式(2)から $k=D$ ならば相関係数は0に近くなるが、実際は約0.15程度である。しかしながら、図-2からも明らかのように空間的自己相関係数と2つの矩形領域の距離との関係は、撮影条件を常に一定にすれば一意的に決定される。

(2) 検定曲線

図-3は粒径分布に幅がある混合粒径の画像である。混合粒径の場合、複数の粒径が線形的に輝度分布に影響している考え方から、式(3)で表される方程式を解くことにより粒径や粒度分布が算出される。

$$\begin{aligned} a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,j}x_j &= b_1 \\ a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + \dots + a_{2,j}x_j &= b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ a_{k,1}x_1 + a_{k,2}x_2 + \dots + a_{k,j}x_j &= b_k \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $a_{k,j}$: k 距離、 j 番目の粒径の空間的自己相関係数、 x_j : j 番目の粒径底質が含まれる割合である。 x_j の値は非負制約を有する線形最小二乗法により算出する。そのために複数の粒径についてのコレログラムが必要となり、図-4にそれらを示す。粒径に応じた曲線が交差することなく描かれ、この曲線が検定曲線となる。これらと同じ条件下(撮影高さ、拡大率)で撮影すれば、異なった現地においても粒径等の決定に使用できる。

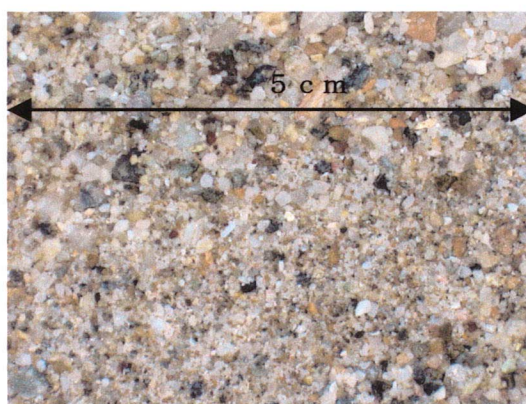


図-3 混合粒径の画像

(3) 平均粒径と粒度分布

図-3のコレログラムと図-4の一部を合わせて図-5に示す。図-3は混合粒径のため、複数の検定曲線と交差していることがわかる。同一の画像間距離における各粒径の相関係数の値を式(3)の右

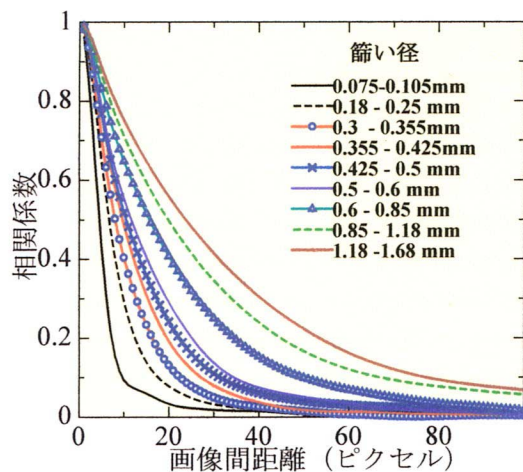


図-4 検定曲線

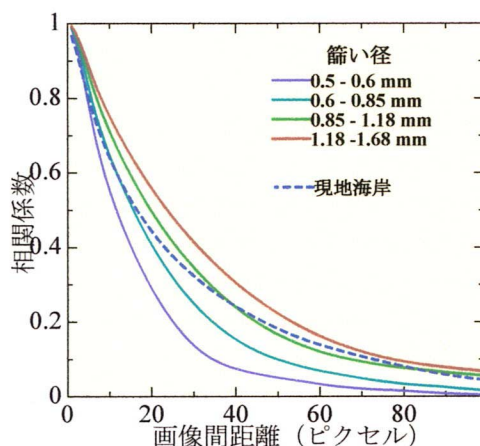


図-5 検定曲線とコレログラム

表-1 粒度分布

粒径mm	0.17	0.33	0.39	0.55	1.42	1.98
割合%	2.2	15.2	8.9	2.3	61.3	10.3

辺に代入し、各粒径の割合を算出すると表-1になる。図-3のカラー画像は図-1に比して白っぽい画像ではあるが、画像はグレースケールに変換し、式(1)からも明らかなように画像全体からの平均値からの偏差で相関係数を算出しているため画像の色相には依存しない。

3. 適用性

(1) 斜面勾配と撮影高さ

通常海浜では勾配があり、底面が軟弱な場合撮影高さが変化する事もある。基本的には底面とカメラとは垂直であることが望ましいが、現地の状況によっては垂直を確保することが困難な場合もある。図-6は底面とカメラが垂直状態の時に底面勾配を0, 1/10, 1/7と変化させた時のコレログラムである。相関係数が0.15以下になると若干の差異が見られるが、通常海浜等における斜面勾配の範囲においては十分な精度である。

汀線近傍のように波の遡上で底面が軟弱な時、

例えば撮影時にカメラの三脚が沈下することがある。図-7は撮影高さを基準より+1cm, -1cm, -2.5cmと変化させた場合の結果である。極端な高さ変化でなければ、高低差の影響は見られない。

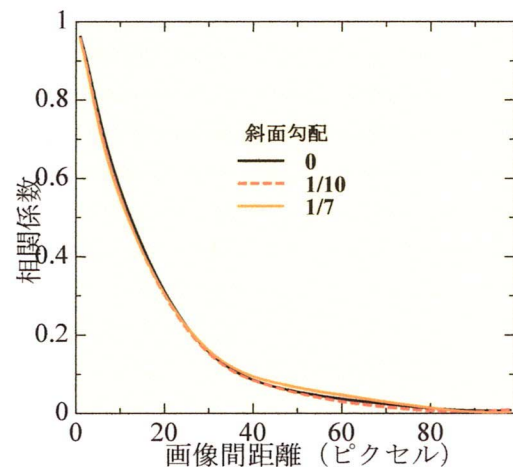


図-6 コレログラムと斜面勾配の関係

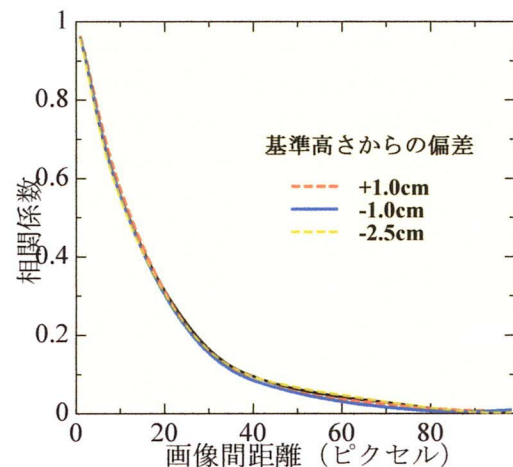


図-7 コレログラムと撮影高さの関係

(2) 水分の影響

汀線近傍では波の遡上の時間間隔や底面の透水性に応じて表面付近に水分等が含まれることがあり、そのような場所で撮影すると間隙水が反射することがある。図-8は同一の条件下で撮影した画像である。図-8(b)は砂粒子間に水が多少現れている状態である。この図のコレログラムを図-9に示す。両者には差異が見られ、粒度分析を行うと

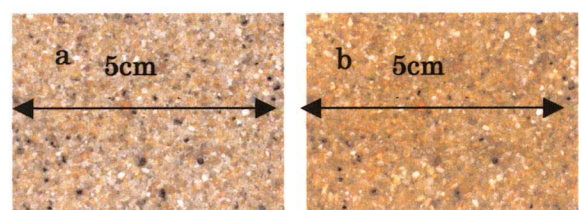


図-8 水分の有無の影響

0.694mmと0.516mmになり、(b)の方が小さくなる。表-2 に粒度分布を示す。(b)の方が微粒子の割合が増加していることがわかる。これは粒子間の水分に反射した輝度を粒径として算出するためと思われる。

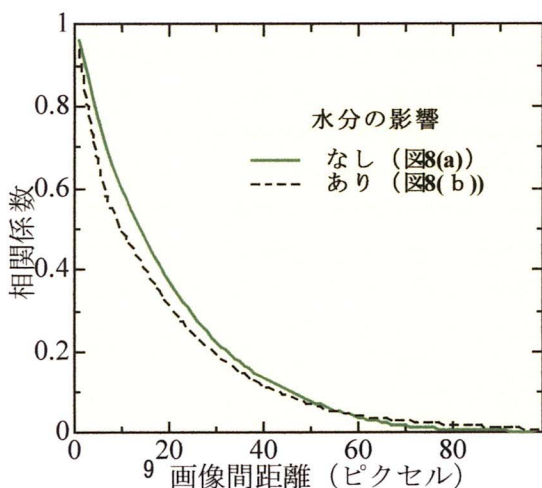


図-9 コレログラムと水分の有無

表-2 図-8の粒度分布

粒径(mm)	0.09	0.55	0.73	1.02
(a)	1.8	8.7	89.4	0
(b)	21.7	0	71.2	6.2

4. 現地海岸

人工海岸は養浜事業を伴うことが多いため自然海岸に比して混合粒径になることが多い。図-10はアジュール舞子海岸のトンボロが形成されている先端付近の表層を順次掘り下げて撮影した、底質画像である。表層は細粒子で覆われているが、数cm下では(b)のような粒度であり、さらに数cm下層に向かうにつれて粒径が変化して(c)、(d)のようになる混合粒径海岸である。

同場所から採取した砂粒子の篩い分けと画像から求めた粒径加積曲線の結果を図-11に示す。

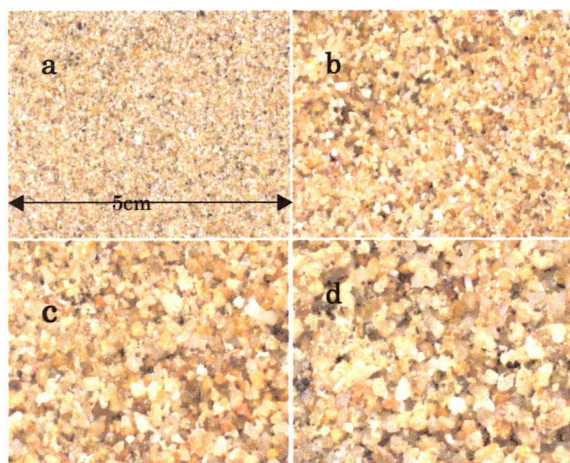


図-10 現地海岸の底質画像

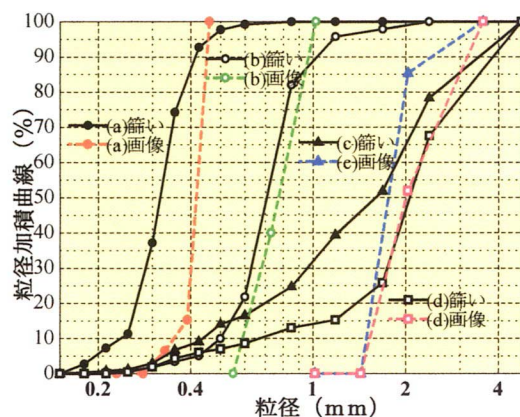


図-11 図-10の粒径加積曲線

表-3 図-10の粒径と淘汰係数の比較

図	d50 (mm)		平均粒径 画像	淘汰係数	
	篩い分け	画像		篩い分け	画像
a	0.32	0.42	0.39	1.14	1.06
b	0.71	0.77	1.08	1.16	1.16
c	1.61	1.76	1.66	1.64	1.11
d	2	2.06	1.84	1.3	1.26

細かい粒径が存在する(c)では篩い分け試験と画像の分布形状に差が見られるが、d50の対応は良好である。前述の平均粒径は画像における全粒子径の平均値であり、d50と異なる。表-3に粒径加積曲線から読みとったd50と淘汰係数、平均粒径の一覧を示す。現地の海岸で篩い分けが良好な場合、淘汰係数は1.25程度である。表-3においても篩い分けが良好な場合は画像から得た結果との対応が良好である状態である。

画像では粗粒子の間に細粒子が含まれていることもあり、その粒子を認識することは困難になる。そのために、図からも明らかのように粒子径の種類は篩いによる場合に比して少なくなることに注意する必要がある。この分析に要した時間は約10分程度であり、現地にパソコンを持参するとその場で粒度分析が可能となる。

5. 室内実験

(1) 実験方法

長さ18m、高さ0.8m、幅0.6mの2次元造波水槽に中央粒径0.5mmの砂粒子で1/10勾配の初期地形を作成した。水深40cm、周期1.1秒、波高3.8cmの波を作用させた。堀川らの地形分類によれば、堆積型地形の波である。この波を90分作用させ15分間隔で地形と粒径を計測した。岸側の最遡上点から沖側の移動限界水深までをレーザー距離計により2cm間隔で計測した。レーザー距離計の精度は±1.5mmである。画像は地形計測と同じ区間を岸沖方向に10cm間隔で2箇所撮影した。また、波浪特性の違いによる粒径の変化を調べるために、同じ斜面において水深35cm、波高13cm、周期1.23秒(侵食型)を100波作用させた後、波高3cm、周期1.0秒(堆積型)を100波作用させた。

図-12 に底面形状の時間的変化を示す。波作用 30 分後にはバームの形成が見られ、時間の経過に伴いバーム頂が成長している。バームの岸側端はほとんど変化していない。バーム幅や沖側の浸食範囲も 90 分後の地形に類似している。ただし、侵食部分の深さは波作用時間の経過に伴い徐々に深くなり、それに伴いバーム頂も発達している。3 m 付近の堆積と侵食の境界点はほとんど変化していないのが興味深い。

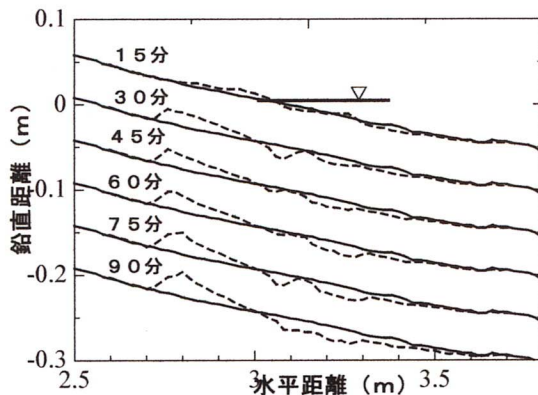


図-12 海浜地形の時間的変化

(3) 粒度特性

図-13 に平均粒径の時空間分布を示す。縦軸は測定点を示し、点 1 が図-12 の水平距離 3.7m に対応している。初期平均粒径 (0.4~0.6mm) が時間の経過に伴い岸沖方向に分級し、バームの成長とともに岸側に粗い粒子、沖側には細粒子が堆積している。粒径がバームやバー上では大きくなることが現地や大型水路実験等で明らかになっており、汀線近傍では粗砂が細砂より打ち上げられ易く、砕波帯近傍では浮遊砂の細砂分は沖側に拡散しやすいためであり、画像により算定された粒径評価も同様な傾向になっている。

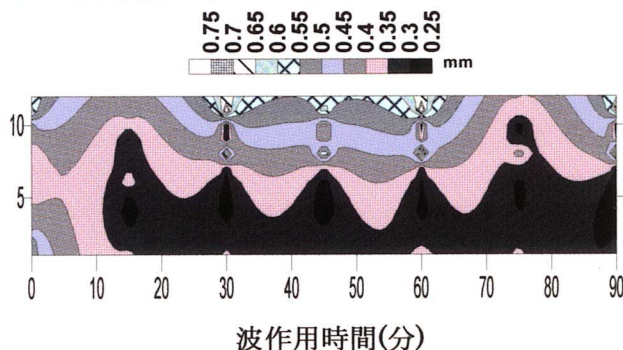


図-13 平均粒径の時空間分布

図-14 に粒度分布の時間的推移を示す。上からバームの岸側、汀線近傍、沖側 3.5m 付近である。凡例の数値は平均粒径を示す。沖側の粒度分布はほぼ均一であり時間的な変化は無いことがわかる。汀線近傍では細粒子分が減少し徐々に粗粒化していることがわかる。バームの岸側は波の最遡上点近傍であり、図-12 から明らかなようにバーム

の成長に伴い粗粒化し 3mm 程度の粒子が堆積する結果となっている。

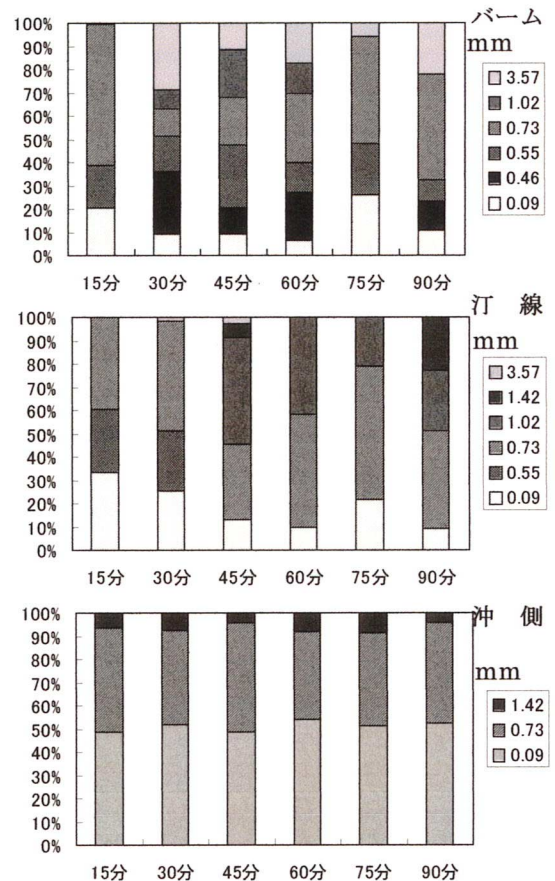


図-14 粒度分布の時間的変化

(4) 波の特性の影響

図-15 は侵食型波作用後に堆積型波を作用させた場合の平均粒径の分布である。初期は地形を整形した直後のため表面付近には 0.8mm 前後の粒径が存在しているが、侵食型波作用後は d50 に近い細かい粒子が表層に出てきている。一方、堆積型波作用後は粒径が 1mm 以上の砂粒子が表層に存在している。画像による底質粒径は表層付近に限られているが、侵食型と堆積型の波作用時においては底質粒径に 3 倍程度の差が見られた。

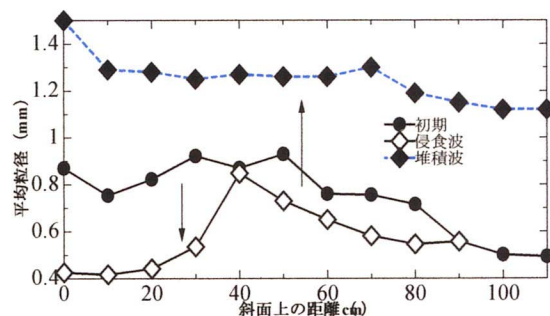


図-15 波による平均粒径の変化

6. 結論

従来の篩いによる底質粒径計測では、1 サンプルあたり 500 g 程度の底質を現地において採取し、実験室に持ち帰り乾燥させた後、複数の篩いを用いて各篩いに残存した底質の重量を計測し、粒径加積曲線を用いて粒径等を算定していた。乾燥作業を除いても、1 時間内に 6 サンプル程度が限界である。乾燥作業と粒径加積曲線作成の時間を考慮すると 1 時間で平均粒径を算定可能な 1 サンプル程度である。

一方、Rubin により提案された粒子画像を用いる手法では、サンプルを採取しないので乾燥の手間を必要とせず、実験室内に持ち帰る必要がない。また、画像データ-をパソコン等に取り込むだけで、粒径分析は自動処理が可能である。サンプルの処理速度はパソコンの性能に依存するが、1 時間あたり 50 サンプル程度は処理が可能である。Rubin らは篩いによる方法の 100 倍程度の速さであるとしている。著者らは現地海岸で 150 余り（全重量約 75kg）のサンプルを採取し、炉乾燥に 1 週間、篩い分けに 3 日間程度要した。一方、画像による手法では 3 時間程度であり、速さと手軽さが実感できる。

本手法の大きなメリットは 1 連の作業を 1 人で手軽に実施できることであり、GPS を併用することにより、現地海浜の底質粒径の時空間分布が容易に把握できる。

本研究ではこのような特性を有する手法から以下のような知見を得た。

- 1) 底質の平均粒径や淘汰係数を短時間で算定することが可能であり、篩い分けの結果との対応も良好である。
- 2) 粒度分布に幅がある場合や粒径の大きい砂粒子の陰に粒径の小さい砂粒子が存在する時は淘汰係

数の推定は難しい。

3) 遡上域のような透水性を有する斜面においても砂粒子間に水分が存在しなければ湿潤状態でも計測は可能である。

4) 1/10 程度より緩斜面であればカメラと底面との垂直性は粒径の算定に影響をしない。

5) 室内実験では底面地形を変形させることなく粒径計測が行えるため、効率的に実験が可能である。

6) 地形の変化に伴い岸沖方向に分級し、粒径の変化や粒度分布などの知見が得られ、短時間内においても底質特性が変化していることが判明した。

謝辞: 本研究の一部は科学研究補助金基盤研究(C) (代表; 辻本剛三, 課題番号 18560509) により行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 福濱方哉, 山本幸次, 宇多高明, 芹沢真澄, 石川仁憲: 混合粒径を用いた大型水路実験による縦断面変化の再現と予測, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 446-450, 2006.
- 2) 目黒嗣樹, 山本幸次, 福濱方哉: 平衡海浜の形成過程と養浜材の粒径に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 501-505, 2005.
- 3) 柿木哲哉, 辻本剛三: 浮遊粒子の粒度及び濃度分布の同時計測に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1446-1450, 2004.
- 4) David M. Rubin: A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, *Journal of Sedimentary Research*, Vol.74, No.1, pp.160-165, 2004.
- 5) Butler, J.B., Lane, S.N. and Chandler, J.H.: Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing for hydraulic research, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.39, pp.1-11, 2001.