

X線CTによる地形変化に伴うトラフ・バー付近の底質内部の密度構造の検討

熊本大学 学生会員 ○田端優憲, 立山龍太; 正会員 外村隆臣, 山田文彦; 神戸高専 正会員 辻本 剛三

1. はじめに

今後の海岸整備においては, 環境意識の向上や経済性の問題から, サンドリサイクルや養浜の需要が高まると考えられる。そのため, 中・長期的な地形変化予測モデルのニーズはさらに高くなる。従来から漂砂量公式の改良に着目した研究例が多く, Bailard¹⁾は Bagnold²⁾の提案したパワーモデルを流速の高次モーメントを用いて, 波と流れの共存場に発展させた。その後, 地形変化に対する圧力勾配(加速度)の重要性³⁾が指摘され, 漂砂量公式に加速度の影響を取り入れ, 静穏時におけるバーの岸向き移動の再現などが報告されている⁴⁾。しかし, 現状の地形変化モデルの予測精度は十分ではない。その理由の一つとして, 現状の漂砂量公式には, 波・流れの時空間変化の情報は反映されるものの, 底質特性の時空間変化は十分ではないことが上げられる。しかしこれは, その重要性が無視されていたわけではなく, 海底表面付近の底質特性の時空間変化を精度良く把握する手段が少なかったことが主要因である。

近年, このような微細な底質内部構造の変化を識別可能な方法の一つとして X 線 CT スキャナーの適用が注目されている⁵⁾。本研究では, 底質内部の密度構造の時空間変化を把握し, 既存の漂砂量公式に反映させる方法について検討する。今回は, 移動床室内実験を行い, X 線 CT スキャナーを用いてトラフ・バー付近の底質内部の密度・空隙構造について考察した。

2. 岸沖海浜断面変形の室内実験

長さ 18m, 高さ 0.8m, 幅 0.6m の 2 次元造波水槽を用いて初期勾配 1/15, 水深 0.4m で海浜変形実験を実施した。入射波は不規則波とし, 地形変化が定常とみなせるまで波を作用させた。その作用時間は Case-A, B が 17 時間, Case-C, D は 19 時間である。実験条件の概要を表-1 に示す。水槽実験の方法はコアサンプリング方法を除いて, 山田ら(2009)⁵⁾と同様である。

表-1 実験条件

Case	入射波高 (m)	周期 (s)	中央粒径 (mm)	C パラメータ	地形変化 の分類
A	0.133	1.23	0.50	7.8	中間型
B	0.140	1.43	0.50	7.5	侵食型
C	0.038	1.15	0.50	2.4	堆積型
D	0.038	1.15	0.38	2.8	堆積型

事前の予備実験でトラフとバーが生じる場所を特定し, コアサンプリング箇所 ($x=3.2, 3.8\text{m}$ の 2 地点) を決定した。時間的なサンプリングは, 0, 5, 10, 17 時間後に, 上記 2 地点で水路奥行き方向にサンプリング箇所が重ならないように場所を変え, 深さ 15cm 程度まで採取した(合計 8 本)。コアサンプリングには, 内径 4cm, 厚さ 3mm, 長さ 30cm のアクリル製サンプラーを用いた。なお, サンプリングしたコアは山田ら(2009)と同様の方法で空隙を固定した。

図-1 は Case-B (侵食型) で定常に達するまでの海浜断面の時間変化を示す。波作用 5 時間後に $x=3.8\text{m}$ 付近を頂上(クレスト)としたバーは, 10 時間後には沖側へ移動し, クレストは 4.2m 付近にある。また, 17 時間後にはバーは若干岸側へ戻り, クレストは 4.0m 付近に位置している。このように, $x=3.2\text{m}$ のサンプリング地点は定常に達するまで常にバーのトラフに位置し, 侵食作用を受けているのに対して, 3.8m 地点は, 一旦堆積してバーとなった後, 侵食されてトラフとなり, さらにもう一度堆積してバーとなっており, 2 箇所のサンプリング地点は地形変化の履歴が異なっている。この履歴の違いが底質内部の密度場を与える影響については次章で検討する。

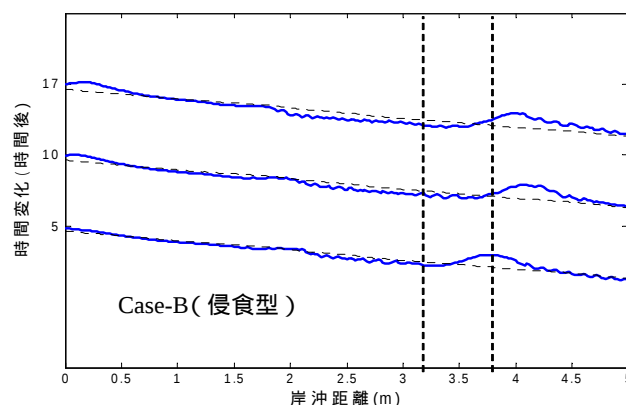


図-1 地形の時間変化とコアサンプリング箇所

3. 底質内部の時空間変動特性

熊本大学 X-Earth センター所有の産業用 X 線 CT スキャナー (TOSCANER-23200) を用いて, 底質のコアサンプルを非破壊状態で撮影し, 底質内部の空隙や密度の 3 次元構造を調べた。サンプリングしたコアは, 密閉された X 線 CT スキャナー内に設置され, 電力 200 kv・3 mA, 照射厚 1 mm の X 線を照射する。解像度は 2048×2048 個(縦 0.073 mm, 横 0.073 mm, 高さ 1 mm の直方体(ボクセル)に分割される)であり, それぞれのボクセルに対して CT 値が得られる。今回の CT 画像撮影では, 地形変化を伴う底質内部において, その密度構造の時間変化を詳細に比較するために, 時間ごとに採取したコアに対して, 最低 5cm 程度の共通部分が確保できるように撮影した。撮影ピッチは初期海底表面から 2cm 間は 1mm, それ以外は 3mm 間隔で撮影した。また, X 線 CT スキャナーでは, 撮影した水平断面内の CT 値が画素(水平方向 0.073mm, 鉛直方向 1mm)毎に出力される。この CT 値は撮影した物質の密度に比例するので, 用いた底質毎に密度変換式を求めた。また, 今回の解析では, コア採取時の擾乱等の影響を最小限に抑えるために, 図-2 のような ROI (Region of Interest; 300×300×1 ボクセル)を設定した。ROI の 2 次元平面での大きさは約 2.20cm×2.20cm となる。

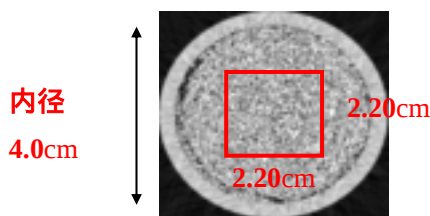


図-2 X線 CT 撮影画像と ROI

図-3 はトラフ(3.2m 地点)とバー (3.8m 地点) で時系列的に採取したコアサンプルより密度換算式を用いて算出したかさ密度の鉛直分布を重ねて示したものである。図中のかさ密度は、各撮影断面 (ROI) 内の全ボクセルのかさ密度を平均した値である。図では、初期の海底表面を、トラフで縦軸の 0 mm、バーでは 90 mm のところで表現している。トラフでのかさ密度の鉛直分布には若干の変動が存在するものの、表層から 1-2cm 付近までは低密度 ($1.0\text{--}1.5\text{ g/cm}^3$) の層が存在し、それより下の層では 2.0 g/cm^3 を越える密度となり、ある程度の深さで一様化する傾向が見られる。一方、堆積 - 侵食 - 堆積と地形変化の履歴が異なるバーでは、堆積過程(0-5h)において、堆積部のかさ密度はほぼ 2.0 g/cm^3 で一定であり、表層 2cm 付近から低下している。また、侵食過程(5-10h)において、表層から 2cm 付近まで密度が急激に低下し、低密度 (1.5 g/cm^3) となる。これは、同じ侵食過程のトラフの変化と類似している。その後、再び侵食過程(10-17h)となり、堆積部のかさ密度はほぼ 2.0 g/cm^3 で付近まで上昇するが、やはり、表層 2cm 付近から低下している。このように、X 線 CT スキャナー画像結果の比較から、地形変化に伴い圧密過程や間隙構造が変化し、特に、表層付近では見かけの密度が低下する層が生じ、その層厚は時間的に変化する様子が観察された。そこで、これらをさらに定量的に詳細に比較するために、各時間の密度の鉛直分布から初期分布を差し引き、さらに自乗したものを偏差自乗密度と定義した。図-4 にその鉛直分布を時間毎に重ねて示す。なお、全時刻の密度データが存在する範囲が侵食・堆積過程で異なるため、偏差密度の鉛直方向の比較範囲は、トラフで最終の 17 時間後の地形を基準とした 8cm 間、バーでは初期地形を基準とし、約 5cm 間とした。詳細な位置は、図-3 中に比較範囲として明示している。図より、トラフでは見かけ上、地形変化が定常と見なされる 17 時間後には鉛直方向の変動が小さくなり、一様な分布傾向にあるが、その途中の 5, 10 時間後では、最終地形の表面から 6cm 程度まで優位な偏差が存在し、しかも鉛直下向きに変動が大きくなる傾向が見られる。これは、トラフでの侵食深さの増大に合わせて、密度の変動範囲も深度方向に増大することを示している。Madsen (1974) は水平床上での波の水平圧力勾配に起因した海底表層付近の瞬時的な崩壊深さ (depth of disturbance) δ を理論的に検討し、砕波波高 (有義波高) の 1 割程度となることを示した。しかし、本ケースのように、一様勾配上で侵食型の波浪条件下で生じるトラフ付近では、密度の変動から推定される δ は、初期の海底面を基準にすると砕波波高程度、

また、最終地形で考えると 4 割程度に達することが確認できる。一方バーでは、トラフとは異なり、鉛直上向き、つまり表層に向かって密度変動は大きくなっており、図中の鉛直距離で 20-45 mm の範囲では、変動幅が小さい。これは、初期の海底表面から 2 cm 以深では、地形の堆積過程は底質密度構造に影響しないことを示唆している。よって、侵食型の波浪条件下で生じるバー付近では、密度の変動から推定される δ は、初期の海底面を基準にすると砕波波高の 8 割程度、また、最終地形で考えると波高程度となる。以上の結果より、波の水平圧力勾配に起因する地盤表層付近の瞬時的な崩壊深さ (depth of disturbance) δ を密度構造から推定すると、バー・トラフではその大きさが異なり、従来の岸沖方向に層厚を一定とする仮定の妥当性には疑問が残る。

今後は、実験データを増やして、実験結果の解釈についての一般性を高めるとともに、底質内部の密度や空隙構造の時空間変化を既存の漂砂量公式に反映させる方法についても検討し、数値モデルの精度向上に反映させてゆく予定である。

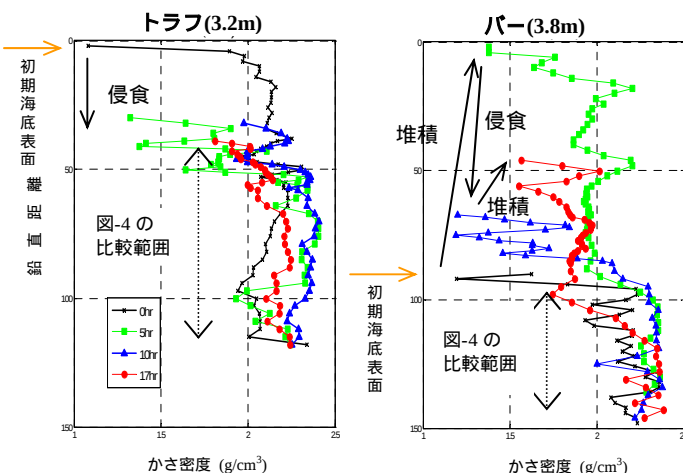


図-3 鉛直密度分布

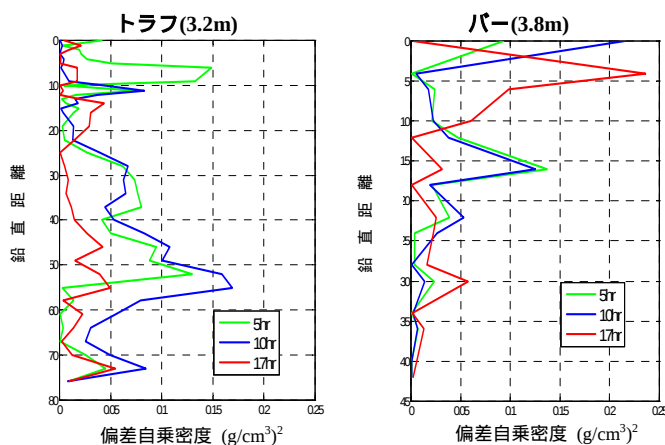


図-4 偏差自乗密度の鉛直分布の時間変化

参考文献

- 1) Bailard, J. A.: JGR, 86, pp. 10938-10954, 1981
- 2) Bagnold, R. A.: U.S. G.S. Survey Rep. 422-I, 1966.
- 3) Madsen, O. S., 14th ICCE, pp. 776 - 794, 1974.
- 4) Hoefel, F. & S. Elgar, Science, 299, pp. 1885-1887, 2003.
- 5) 山田ら, 海岸工学論文集, 56, 681-685, 2009