

# X線CTを用いた地形変化に伴う バー・トラフ付近の底質内部の密度構造の検討

Internal sediment density structures around bars and troughs due to beach deformations using X-ray CT

山田文彦<sup>1</sup>・辻本剛三<sup>2</sup>・田端優憲<sup>3</sup>・立山龍太<sup>4</sup>・外村隆臣<sup>5</sup>・小林信久<sup>6</sup>

Fumihiko YAMADA, Gozo TSUJIMOTO, Masanori TABATA, Ryuta TATEYAMA  
Takaomi HOKAMURA, and Nobuhisa KOBAYASHI

X-ray Computed Tomography (CT) has been applied to investigate a time-space evolutions of sediment density profile due to beach profile changes in the laboratory wave flume conditions. The sediment density and pore profiles in the collecting sediment cores were measured using X-ray CT scanning. The sediment density profiles in the erosional conditions are different from these of depositional conditions. The depth of disturbance was found to be few centimeter orders of magnitude. Reconstructing three-dimensional images using CT value, the evolutions of low bulk density region and porosity structure were examined.

## 1. はじめに

環境意識の向上や経済性の問題から、今後の海岸整備においては、サンドリサイクルや養浜の需要が高くなると考えられる。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まると予想される。ところで、従来の地形変化予測モデルにおいては、漂砂量公式の改良に着目した研究例が多く、Bailard (1981) は Bagnold (1966) 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、地形変化に対する水平圧力勾配 (加速度) の重要性 (例えば、Madsen, 1974) 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 (Hoefel・Elgar, 2003)。しかし、現状の地形変化モデルにおける中・長期的な予測精度は必ずしも十分ではない。この理由の一つとして、現状の漂砂量公式では、波・流れの時空間変動は逐次更新されるものの、底質特性の時空間変動は必ずしも十分には反映されていないことが挙げられる。

本研究では、底質特性のなかでも碎波帯～遡上域における底質の混合深さ (depth of mixing) や攪乱深さ (depth of disturbance) の時空間変動に着目する。ここで、底質の混合深さや攪乱深さとは、平野 (1971) の交換層厚や Anfuso (2005) の活性深さ (depth of activation) と同様の概念であり、底質の表層付近で粒度組成が変化す

る層厚を意味する。これらを定量的に把握することは、漂砂量算定や地形予測の精度向上に不可欠である (Kraus, 1985)。Sainiら (2009) は、両者の相違点は底質変動の時間スケールにあり、数分～数時間の変動を混合深さ、約12時間 (1潮汐) から数日スケールの変動を攪乱深さとして区別した。さらに、従来の研究成果を整理し、現地海岸での底質の混合深さや攪乱深さは碎波波高や波の周期と比例関係にあり、碎波波高との比例係数は場所により0.02～0.4の範囲で変動することを示した。

しかし、従来の混合深さや攪乱深さの計測手法は、例えば、1) 初期に設置した蛍光砂が波の作用などによりどの程度深さ方向へ拡散したかをコアサンプリングにより計測する方法 (Kraus, 1985) や、2) 地中に埋め込んだ基準ロッドと地表面の高低差をワッシャ付きの昇降スタッフで目視観測する方法 (Masselinkら, 2007) など、複数存在する。つまり、計測手法が確立されておらず、計測結果を直接比較することが困難な場合もあり、計測結果の比較や解釈には注意が必要である。また、混合深さや攪乱深さの概念や計測値を具体的にどのように漂砂量公式に反映するかについても検討の余地が残されている。

そこで本研究の目的は、底質内部の湿潤密度の時空間変化に着目し、攪乱深さ内に存在する底質水中比重を介して漂砂量公式を逐次更新する方法について基礎検討を行うことである。今回は、その初段階として、底質内部の空隙や密度の鉛直分布の時間変化から底質の混合深さや攪乱深さを推定する方法について検討を行った。そのため、室内移動床実験により、波作用下の特徴的な地形であるトラフやバーを再現し、それら近傍での底質内部の空隙や密度構造の時空間変化を調べた。このような微

1 正会員	博(工)	熊本大学大学院教授 自然科学研究科
2 フェロー	工博	神戸市立高専教授 都市工学科
3 正会員	修(工)	日本港湾コンサルタント 本社
4 学生員		熊本大学大学院
5 正会員		熊本大学 技術部
6	Ph.D	デラウェア大学教授 応用海岸研究センター

細な底質内部の構造を非破壊状態で識別するために、底質コアサンプルの分析にはX線CT法を適用した (Amosら, 2004, 山田ら2009)。

2. 不規則波による移動床実験の概要

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, 侵食型の波浪条件下で地形変化が定常とみなせる17時間まで波を作用させた。入射波の有義波高14.0cm, 有義波周期1.43s, 底質の中央粒径0.05mmである。底質コアサンプリング箇所は, 事前の予備実験でトラフとバーが生じる場所を特定し,  $x=3.2, 3.8\text{m}$ の2地点を決定した (図-1)。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注意しながら場所を変え, 表層から深さ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の亚克力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), Yamadaら (2010) と同様の方法で湯煎したパラフィンで空隙を固定した。

図-1は実験中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,  $3.8\text{m}$ 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。この履歴が底質密度場に与える影響について次章で検討する。

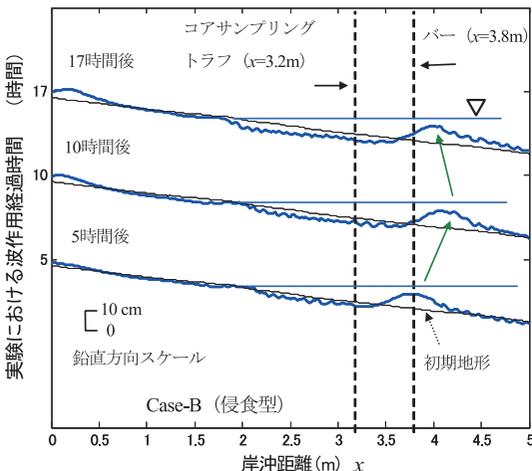


図-1 地形の時間変化とコアサンプリング箇所

3. X線CT法による底質内部の密度・空隙構造の可視化

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。コアサンプルは, 密閉されたX線CTスキャナー内に設置され, 電力200kv・3mA, 照射厚1mmでX線をシート状に照射する。解像度は2048×2048個 (縦0.073 mm, 横0.073mm, 高さ1mmのボクセル) であり, それぞれのボクセルに対してX線吸収係数 (CT値) が得られる。このCT値は撮影した物質の密度に比例するので, 次節の手法で含水比を考慮したキャリブレーションを行い湿潤密度 ( $\gamma$ ) に変換する。

次に, 今回のCT画像撮影では, 地形変化に伴う底質内部の密度構造を時間的に比較するために, 所定の時間ごとに採取したコアに対して, 最低5cm程度の共通部分を確保して撮影した。撮影ピッチは初期海底表面から2cm間は1mm, それ以外は3mm間隔である。なお, 以降の解析では, コア採取時の擾乱等の影響を最小限に抑えるために, 撮影画像平面内にROI (Region of Interest;  $300 \times 300 \times 1$ ボクセル) を設定した (図-2)。ROIの大きさはコア中心を基準とし, 約2.20cm×2.20cmの正方形である。

1) CT値を湿潤密度に変換するキャリブレーション試験

海洋底質の場合, X線CT法で算出した湿潤密度が負値となることを防ぐため, 一旦, 式 (1) を用いてCT値をCT数へと変換し, その後CT数と湿潤密度との関係式を導出するのが通例であり (例えば, Orsira, 1994), 本研究もそれにならった。

$$CT数 = 1 + \frac{CT値}{1000} \dots\dots\dots(1)$$

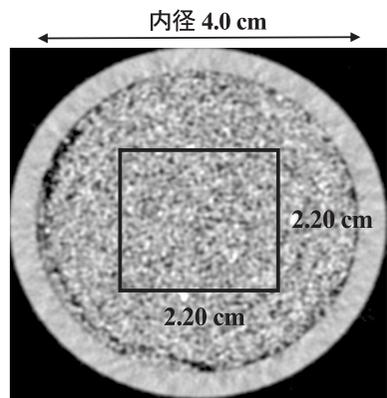


図-2 X線CT撮影画像とROI

CT数を湿潤密度 ( $\gamma_r$ ) に換算するために、実験と同じ砂を用いて、含水比を0, 10, 15, 20, 25, 30%と変化させ、キャリブレーション試験を行なった。この試験には、内径10cm, 厚さ5mm, 高さ3cmの亚克力製シャーレを用い、含水比を調整した砂を容積一杯になるようにして撮影用試料を作成した。この試料に対して鉛直方向に3断面でX線CT撮影を行い、撮影平面におけるROI内のCT値の平均値を求め、式(1)によりCT数へ変換した。また、湿潤密度 ( $\gamma_r$ ) は、試料作成前後でのシャーレの質量を計測し、シャーレの容積で除して算出した。試験より得られたCT数と湿潤密度の関係は、含水比に関わらずほぼ線形近似可能であったので、最小自乗法を用いて式(2)の湿潤密度換算式を決定した。

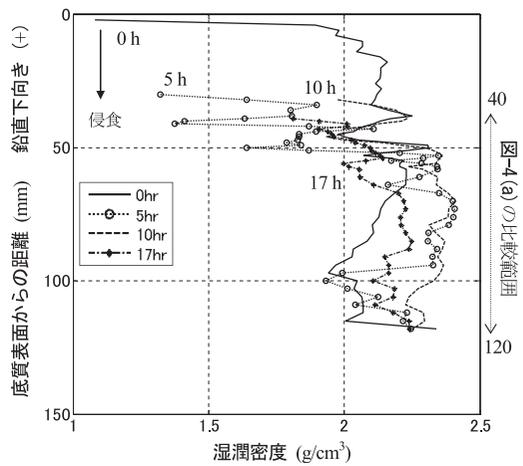
$$\gamma_r \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1.32 \times \text{CT数} - 0.39 \quad (R=0.95) \dots(2)$$

2) 底質密度の鉛直分布の時間変動特性

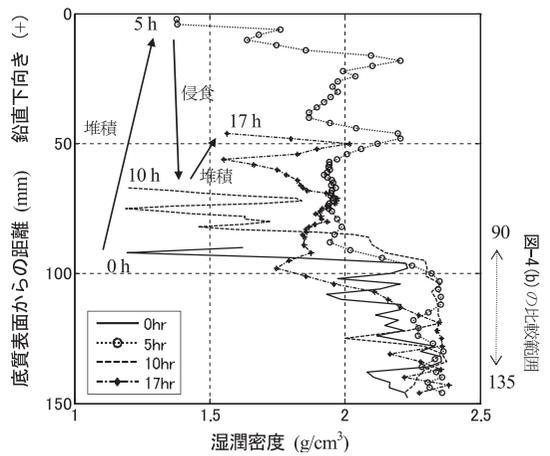
図-3はトラフ ( $x=3.2\text{m}$ 地点) とバー ( $x=3.8\text{m}$ 地点) で時系列的に採取したコアサンプルより(2)式を用いて算出した湿潤密度の鉛直分布を重ねて示したものである。図中の湿潤密度は、各撮影断面においてROI内の全ボクセルデータの平均値である。図では、初期の底質表面を、トラフで縦軸の0mm、バーでは90mmの高さで表現している。a)図のトラフでは、初期から5時間後までは、表層付近に低密度層 ( $1.0\text{--}1.5\text{g/cm}^3$ ) が存在するが、それ以降は見られない。また、表層から深部に向かって密度は増加し、概ね  $2.0\text{g/cm}^3$  を越えている。各時刻の湿潤密度の鉛直分布を平均し比較すると、 $2.1, 2.1, 2.2, 2.1\text{g/cm}^3$  となり、ほぼ一定であるが、初期底質表面から6cm以深では、侵食に伴い密度が平均で  $0.2\text{g/cm}^3$  (10%) 増加することが確認できる。

一方、堆積-侵食-堆積といった地形変化の履歴を有しているb)図のバーでは、最初の堆積過程において、初期底質表面から鉛直上方7cm間は、ほぼ  $2.0\text{g/cm}^3$  の湿潤密度で砂が堆積している。次の侵食過程においては、侵食に伴い表層付近の密度が低下し、 $1.5\text{g/cm}^3$  程度となる。その後、再び堆積過程となるが、堆積部の湿潤密度は表層付近で  $2.0\text{g/cm}^3$  程度まで増加する傾向が見られる。各時刻の湿潤密度の鉛直分布を平均し比較すると、 $2.1, 2.0, 1.9, 2.0\text{g/cm}^3$  となり、堆積から侵食へと変化する際に  $0.2\text{g/cm}^3$  (10%) の密度低下が見られる。また、初期底質表面よりも上層と下層で密度分布に相違が見られ、上層の湿潤密度の平均値は下層のそれよりも約  $0.4\text{g/cm}^3$  (20%) 低い傾向にある。

次に、この密度変化の時間履歴を詳細に検討するため、各時刻の湿潤密度の鉛直分布を時間毎に差し引いて密度の時間偏差(絶対値)を求め、図-4に重ねて示した。ここで、全時刻の密度データが存在する範囲が侵食・堆積



a) トラフ ( $x=3.2\text{m}$ )



b) バー ( $x=3.8\text{m}$ )

図-3 底質湿潤密度の鉛直分布の時間変化 (X線CT法)

過程で異なるため、密度偏差の鉛直分布の比較範囲は、トラフで最終の17時間後の底質表面(図-3 a)の縦軸で40mmの位置)基準とした下方8cm間、また、バーでは初期の底質表面(図-3 b)の縦軸で90mmの位置)を基準とした下方約4.5cm間とした。その詳細な位置は図-3に比較範囲として明示している。

図-4 a)より、実験中、常に巻き波砕波による侵食作用を受けていたトラフでは、最終地形の表面から6cm間で、初期の湿潤密度の平均値に対して、5% ( $0.1\text{g/cm}^3$ )以上の密度変化が生じている。この傾向は、地形変化が動的平衡状態(定常)に至ったと判断される17時間後まで継続しており、時間とともに減少する傾向は見られない。これは、トラフでの侵食の増大に合わせて、密度の変動範囲も深度方向に増大していることを示しており、底質の混合深さや攪乱深さに関係するものと考えられる。Madsen (1974)は、水平床上での崩れ波砕波による

水平圧力勾配に起因した底質表層付近の攪乱深さ $\delta$ を理論的に検討し、碎波波高の1割程度となることを示した。しかし、本ケースのように、一様勾配上での巻き波碎波によって生じるトラフ付近では、密度変化から推定される $\delta$ の大きさは、初期の底質表層を基準にすると碎波波高程度、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、この結果はSainiら(2009)の現地データの最大値と符合する結果である。

次に、堆積-侵食-堆積の地形履歴を有するバーでは、最初の堆積過程で初期地形の表面から3.5cmの範囲で、初期の湿潤密度の平均値に対して、5% (0.1g/cm<sup>3</sup>)以上の密度変化が生じているが、その後の侵食過程では大きな変動は見られない(図-4 b)。しかし、2度目の堆積過程では、表層から3.5cmの間で密度は変動し、特に表層に向かって変動が大きくなる傾向を示している。つまりバーでは、トラフとは異なり、表層に向かって密度変動は大きくなっている。よって、侵食型の波浪条件下で生じるバー付近では、密度変動から推定される $\delta$ は、初期の海底面を基準にすると碎波波高の8割程度、また、最終地形で考えると波高程度となる。

以上、微細な底質内部の構造を非破壊で識別するために、底質コアサンプルの分析にX線CT法を適用し密度構造の時間変化から底質の攪乱深さ $\delta$ を推定すると、バーとトラフではその大きさが異なり、また、定常に至るまでにその攪乱深さは時間変動することが分かった。

3) 底質空隙率の鉛直分布の時空間変動特性

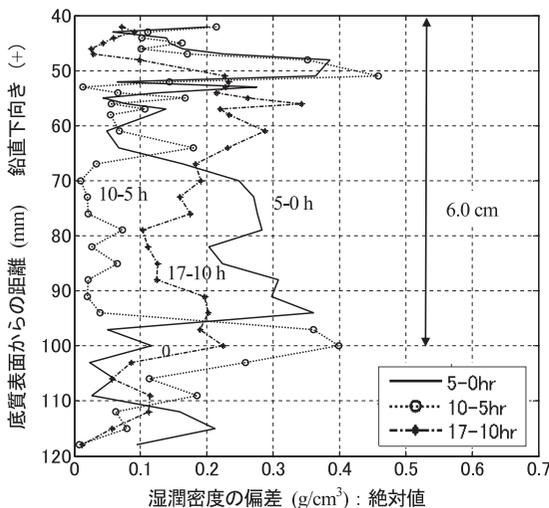
前節の底質内部の湿潤密度構造の変化は、底質内部の空隙構造の変化を表している。そこで、湿潤密度( $\gamma_t$ )から空隙率( $n$ )を(3)、(4)式により算出した。こ

で、 $e$ は空隙比、 $G_s$ は比重、 $\omega$ は含水比である。今回の計算では、 $G_s$ は比重試験の結果から2.65、 $\omega$ は移動床実験後の砂を採取し測定して得られた平均値26%を用いた。

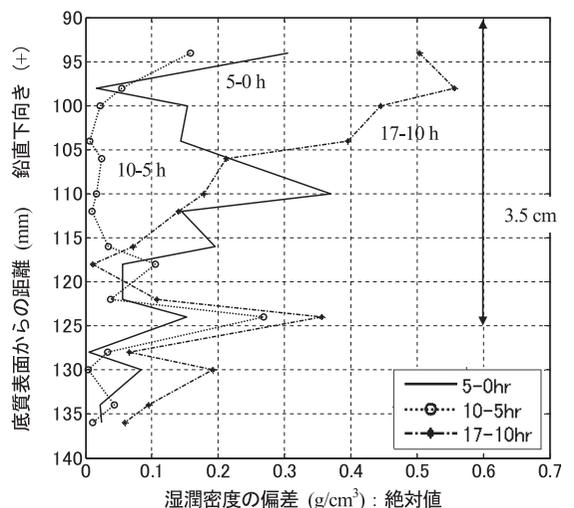
$$\text{空隙比 } (e) : e = \frac{G_s(1+\omega)}{\gamma_t} - 1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{空隙率 } (n) : n = \frac{e}{e+1} = 1 - \frac{\gamma_t}{G_s(1+\omega)} \dots\dots (4)$$

図-5は、図-2の鉛直密度分布を空隙率へと変換し、時間毎に重ねて示したものである。図より、既存の地形変化予測モデルにおいては、空隙率 $n=0.35\sim 0.4$ と時空間で一定として扱うことが多いが、実際には0.28~0.6程度の範囲で時空間変動していることがわかる。これは粗粒砂空隙への細粒砂の入り込みや圧密による空隙の減少を表している。Montreuil・Long(2007)は一方向流動場で生じる底質表面上の砂漣の湿潤密度の時空間変化を室内実験で検証した。実験は砂を敷き詰めた水槽に一様流を起こし、時間ごとの変化を医療用(人体用)X線CTで撮影するものだが、CT装置内に実験水路が組み込まれているため、コアサンプリングの必要がなく、より正確な底質密度の鉛直分布の時間変化が測定可能である。Montreuil・Long(2007)の実験結果によると、空隙率は0.25~0.5の範囲で変動しており、本実験結果と同様の結果が得られている。以上の結果より、これまで時間に依存しないと仮定されてきた波作用下での底質の空隙率は堆積・侵食過程の中で時空間変動することが確認できた。



a) トラフ (x=3.2 m)



b) バー (x=3.8 m)

図-4 底質湿潤密度の時間偏差の鉛直分布比較図 (X線CT法)

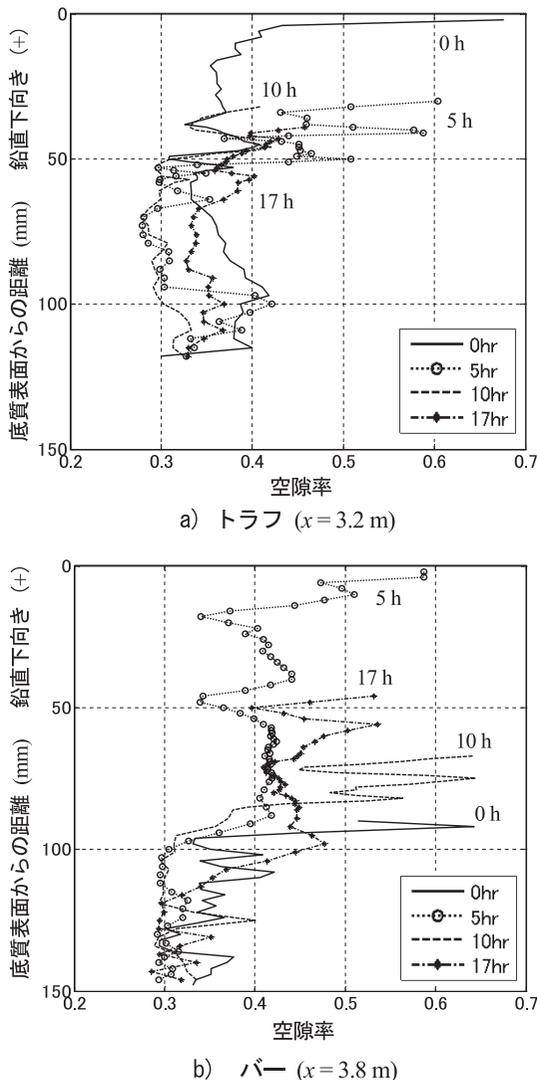


図-5 底質空隙率の鉛直分布の時間変化 (X線CT法)

#### 4. 結論

本研究では、室内移動床実験により、波作用下の特徴的な地形であるトラフやバーを再現し、それら近傍での底質内部の空隙や密度構造の時空間変化をX線CT法により調べた。得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) X線CT法を適用し底質の湿潤密度分布の時間変化から底質の攪乱深さを推定することが可能であり、バーとトラフではその大きさが異なる。また、地形変化が定常に至るまでにその深さは時間変動する。
- 2) CT値から含水比を考慮して湿潤密度に変換する方法を検討するとともに、空隙率を推定し、地形変動下で

の空隙構造の変動を調べた。その結果、空隙率は地形変動にもなって一定ではなく、今回の実験条件下では0.28～0.6程度の範囲で時空間変動する。

今後は、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さらに検討し、数値モデルの精度向上に反映させてゆく予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費による研究の一部であることを付記し、謝意を表します。またX線CT撮影は、熊本大学X-Earthセンター各位にご協力いただきました。

#### 参考文献

- 平野宗夫 (1971) : Armoringをともなう河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp. 56-65.
- 山田文彦・辻本剛三・蒲原さやか・池田有希・外村隆臣・Ilic Suzana (2009) : X線CTを用いた海浜断面変形に伴う底質内部の密度・空隙の時空間変動解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), B2-65, pp. 681-685.
- Anfuso, G. (2005): Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches, *Marine Geology*, 220, pp. 101-112.
- Amos, C. L., Bergamasco, A., Umgiesser, G., Cappucci, S., Cloutier, D., DeNat, L., Flindt, M., Bonardi, M., and Cristante, S. (2004): The stability of tidal flats in Venice Lagoon – The results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes, *J. of Marine System*, 51, pp. 211-241.
- Bailard, J. A. (1981): An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, *J. of Geophysical Research*, 86, pp. 10938-10954.
- Bagnold, R. A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-I
- Hoefel, F. and Elgar, S. (2003): Wave-induced sediment transport and sandbar migration, *Science*, 299, pp. 1885-1887.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, *J. of Sedimentary petrology*, 55, pp. 3-14.
- Madsen, O. S. (1974): Stability of a sand bed under breaking waves, *Proc. of 14<sup>th</sup> Coastal Engineering*, pp. 776-794.
- Masselink, G., Auger, N., Russel, P., and O'hare, T. (2007): Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach, *Sedimentology*, 54, pp. 39-53.
- Montreuil, S. and Long, B. F. (2007): Flume experiments under CAT-SCAN to measure internal sedimentological parameter during sediment transport, *Proc. of Coastal Sediment Conference*, pp. 124-136.
- Orsi, T.H., Carl, M. E, and Aubery, L. L. (1994): X-ray computed tomography: A nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores, *J. of Sedimentary Research*, 64, pp. 690-693, 1994.
- Saini, S., Jackson, N. L., and Nordstorm, K. F. (2009): Depth of activation on a mixed sediment beach, *Coastal Engineering*, 56, pp. 788-791.
- Yamada, F., Tamaki, A., and Obara, Y. (2010): Assessment of time-space evolutions of intertidal flat geo-environments using x-ray CT scanner, *Advances in Computed Tomography for Geomaterials*, Alshibli, K.A. and Reed, A. H. Eds., Wiley, pp. 343-351.