

# 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

Time-space variations of sediment density and  
porosity profiles due to beach deformations using X-ray CT

山田文彦<sup>1</sup>・辻本剛三<sup>2</sup>・蒲原さやか<sup>3</sup>・池田有希<sup>4</sup>・外村隆臣<sup>5</sup>・Ilic Suzana<sup>6</sup>

Fumihiko YAMADA, Gozo TSUJIMOTO, Sayaka KAMOHARA, Yuki IKEDA  
Takaomi HOKAMURA and Ilic SUZANA

Three-dimensional Digital photogrammetry and X-ray Computed Tomography (CT) have been applied to investigate a time-space evolution of sediment size and density profile due to beach profile changes in the laboratory wave flume conditions. The time-space variations of grain size distributions were measured using a spatial autocorrelation between pixels in digital images. The sediment density profiles in the collected sediment cores were measured using X-ray CT scanning. Reconstructing three-dimensional images using CT values, the evolution of the low bulk density region were examined. These experiments indicate possible importance of the spatial and temporal variations of sediment grain size and sediment porosity.

## 1. はじめに

養浜海岸などの混合粒径の海浜を対象に地形変化予測を行う際には、底質の分級作用やその移動特性を含めた検討が必要である(目黒ら, 2005)。底質の分級過程の検討は、通常、サンプリングした試料のふるい試験により行われているが、試料を採取する際の地形に与える擾乱が問題となり、その時空間変動を詳細に調べた研究例は非常に少ない。近年、デジタルカメラによる砂粒子画像から底質粒径分布の算出が試みられており、Barnardら(2007)は現地海浜で、また、辻本ら(2008)は室内移動床実験により、Rubin(2004)の空間相関係数を用いた粒径分布推定法の妥当性を検証し、中央粒径や淘汰係数の時空間変動を非接触で精度よく評価できることを示した。

また、混合粒径砂においては、表層が粗砂で覆われた場合、当該箇所の侵食速度が低減し、均一砂の場合とは全く異なる移動特性を示すことが知られており(田中ら, 1989)、河川におけるアーミングと同様な現象と考えられる。そのため、従来の波・流れ場における底質分級過程の数値計算では、混合砂礫床を対象に考案された平野(1971)の交換層の概念を適用し、粒径別の移動量

や体積含有率を算定した研究例が多い。しかし、交換層厚に対しては、田中ら(1989)は底質の90%粒径を用い、熊田ら(2004)は3mm、黒岩ら(2005)は10cmと設定するなど、交換層厚が計算上のパラメータ的に取り扱われ、実現象との対応が不明確な場合も見られる。

交換層とは底質の表層付近で粒度組成が変化する層を意味する。Dibajniaら(1998)は砂の移動層厚に直接関連するものと考え、混合粒径砂を用いた振動流実験において、ビデオ画像を用いた可視化により検討を行った。その結果、混合砂中の細粒砂の移動量が均一砂のそれよりも小さくなる理由として、粗粒砂の空隙に細粒砂が入り込むことで空隙率が減少し、湿潤密度や強度が増加することが要因であることを示した。目黒ら(2005)も大型水路を用いた混合砂海浜の移動床実験を実施し、初期地形と最終地形では断面積の損失が6%生じ、空隙率を考慮する必要性を述べている。そのため、混合粒径海浜の地形変化モデルでは、波動・流動場のみならず、交換層厚に直接関係する底質の鉛直分級過程や底質内部の湿潤密度および空隙の時空間変動特性を考慮する必要がある。しかし、ビデオ画像のみでは地形変化に伴うこれらの時空間変動を定量的に精度良く評価することは困難である。

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近年X線CTスキャナーの適用が注目されている(Orsiら, 1994; Amosら, 1996)。X線CTスキャナーは、検査対象物に対して全周方向からX線を照射し、投影データを逆解析して検査対象物内部のX線吸収係数(CT値)の分布を2次元あるいは3次元的に画像化

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) ニュージェック 大阪本社  
4 正会員 日本工営 東京本社  
5 正会員 熊本大学 技術部  
6 非会員 Ph.D ランカスター大学講師 地質学科

する技術である。このCT値が検査対象物の密度に比例する量であるため、適切なキャリブレーションにより、底質の湿潤密度および空隙の時空間変動特性を非破壊状態で把握することができる(例えば、山田ら、2007)。Montreuil・Long(2007)は、医療用X線CTスキャナーと移動床実験水槽(一方向流のみ)を組み合わせ、流動とともに底質表面にリップルが発達する際の湿潤密度の時空間変化を調べているが、波浪による碎波帯付近の地形変化による底質内部の湿潤密度・空隙構造に関する適用例はない。

そこで、本研究では混合砂を用いた不規則波による室内移動床実験を行い、遡上域から碎波帯付近での底質表面のデジタルカメラによる粒子画像撮影から粒度の岸沖方向の時空間変化を調べた。また、同時に時系列で特徴的な地形変動特性を示す場所でコアサンプリングを行い、産業用X線CTスキャナーを用いて底質内部の湿潤密度・空隙構造の時空間変動特性についても検討した。

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、地形変化が定常とな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。実験条件を表-1に示すが、表中の入射波高・周期は有義波高に対する値である。

実験に使用した砂は、Case A, B, Cでは中央粒径0.5mmの京都府琴引浜の現地砂を用い、Case Dでは、中央粒径0.25mmの一般砂と混ぜ中央粒径を0.38mmに調整したものをを使用した。波高の測定は、容量式波高計7台を用い、100Hzで測定した。地形変化は2時間毎に造波機を止め、地形を乱さないように数分かけてゆっくりと排水した後、レーザー距離計により2cm間隔で計測した。なお、30分ごとに水位の時系列からパワースペクトルを求め、副振動等の長周期波の発達が発験結果に影響しないか確認したが、顕著な長周期成分の発達は本実験では見られなかった。

底質表面の粒径分布の時空間変化は前述の非接触手法であるRubin(2004)の画像計測手法を用いて算出した。そのため、デジタルカメラを用いて底質表面を地形変化

表-1 実験条件

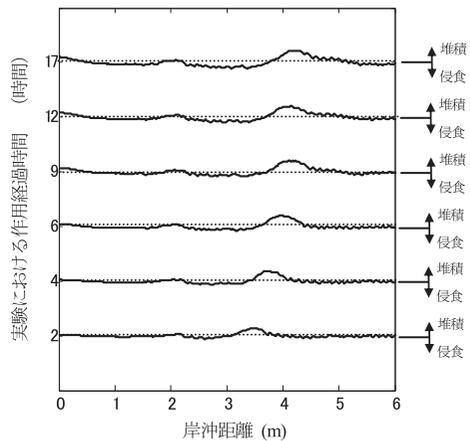
Case	入射波高 (m)	周期 (s)	中央粒径 (mm)	Cパラメーター	地形変化の分類
A	0.133	1.23	0.50	7.8	中間型
B	0.140	1.43	0.50	7.5	侵食型
C	0.038	1.15	0.50	2.4	堆積型
D	0.038	1.15	0.38	2.8	堆積型

と同じ時間間隔で岸沖方向(10cm間隔)に撮影した。

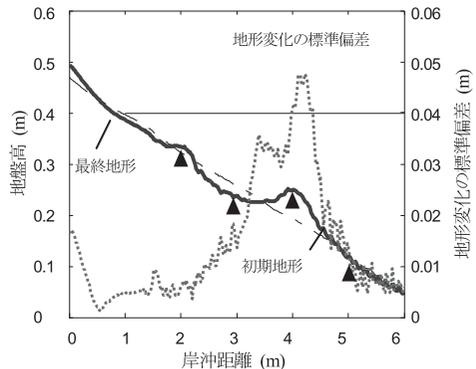
また、初期状態から定常状態に達するまでに数時間毎に、図-1中の▲の位置でコアサンプリング(内径4cm、長さ30cmの亚克力製コアサンプラー)を行い、X線CTスキャナーを用いて底質内部の空隙や湿潤密度の3次元構造を非破壊状態で表面から1mm間隔で撮影した。X線CTスキャナーを用いた実験手法の詳細は後述する。

1) 実験結果

図-1(a)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(波作用から2, 4, 6, 9, 12, 17時間後)を初期地形からの偏差として示したものである。波作用2時間後にx=3.2m付近に位置したバーは時間の経過とともに沖側へ移動し、それに伴ってトラフも沖側に存在範囲を広げている。図-1(b)はCase-B(侵食型)における初期地形(点鎖線)、最終地形(実線)および地形変化の標準偏差(点線)の岸沖分布を示したものである。沖側へ移動したバーは最終地形では4.2m付近に存在している。地形変化の標準偏差もバー頂部で最も大きくなり、その大きさは5cm程度とバー高さ(10.5cm)の約50%の



(a) 海浜断面の時間変化(初期断面からの偏差)



(b) 初期・最終地形と地形変動の標準変化の岸沖分布

図-1 海浜断面の地形変動特性(Case-B侵食型)(図中の▲はX線CT用のコアサンプリング地点)

標準偏差である。また3.5m付近のトラフ沖側でも標準偏差が大きくなっている。

図-2 (a) はCase-B (侵食型) で定常に達するまでの底質表面の中央粒径 ( $d_{50}$ ) の時間変化 (波作用から2, 4, 6, 9, 12, 17時間後) を初期分布からの偏差として示したものである。中央粒径は前述のとおり, Rubin (2004) の画像計測手法を用いて10cm間隔で算出した。波作用2時間後では $x=2.0$ m付近に位置する小さなバー (inner bar) を境として, それより岸側は中央粒径が細かくなり, 沖側では粗くなっている。その後, 波作用時間の増加とともに, トラフ ( $x=3.0$ m) 付近の中央粒径が細くなる傾向が見られる。図-2 (b) は中央粒径の時空間変動特性 (●: 中央粒径の平均値, 点線: 中央粒径の標準偏差 ( $\pm\sigma_{d_{50}}$ )) を初期・最終地形に重ねて示したものである。中央粒径の岸沖分布に着目すると, 侵食型ではバーで大きく (0.7mm), トラフで小さくなり (0.45mm), 地形の起伏に応じた分布傾向が見られる。また, 汀線付近の中央粒径も0.6mmほどで初期値 (0.5mm) よりも大きくなる。次に, 中央粒径の標準偏差の岸沖分布に着目すると, 侵食型ではトラフ中央付近 ( $x=3$ m付近) で最大0.2mm程度の変動であるが, それ以外では, ほぼ0.1mm程度の変動幅で推移する。以上のように, 非接触であるRubinの

画像計測手法を用いることで, 地形変化における中央粒径の平均値および標準偏差の岸沖分布の時間変化が明らかになった。

### 3. X線CTを用いた底質内部の3次元構造の可視化

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, 底質のコアサンプルを非破壊状態で撮影し, 底質内部の湿潤空隙や密度の3次元構造を時系列で調べた。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200kv・3mA, 照射厚1mmのX線を照射する。解像度は2048×2048個 (縦0.073mm, 横0.073mm, 高さ1mmの立方体 (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。CT画像の撮影は, 事前検討で密度変化が顕著であった底質表層から3cmまでを1mm間隔で行った。本研究で使用したX線CTスキャナーの詳細は, Otaniら (2000) に詳しい。

X線CT撮影により, 被検体内部の密度は, CT値として以下のように表現される。

$$CT値 = K \times \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $\mu_t$ は被検体内部の求める点のX線吸収係数,  $\mu_w$ は水のX線吸収係数,  $K$ は比例定数 ( $K=1000$ ) である。(1)式は水のCT値が0に設定されており, 空気はX線吸収係数は0であるので, 空気はCT値は-1000となる。

X線CT画像はCT値を256階調の濃淡画像で表示したもので, CT値が大きい高密度領域は白く, 小さい低密度領域は黒く表示される。図-3は, 堆積型 (Case-D) での初期状態 (0時間) と波作用19時間後のCT画像と底質のCT値頻度分布の一例を示す。0時間のコア内部の底質のCT画像は全体的に黒っぽいが, 19時間後には該当部のCT画像は白く変化している。これは, 波の作用によって底質が締め固められ, 湿潤密度が高くなっていることに

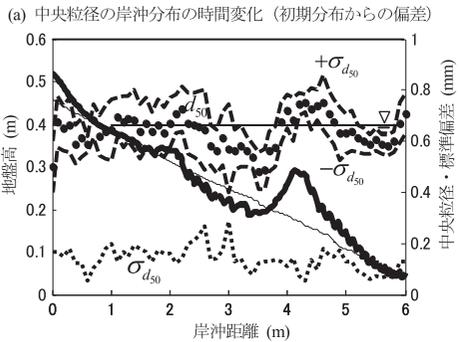
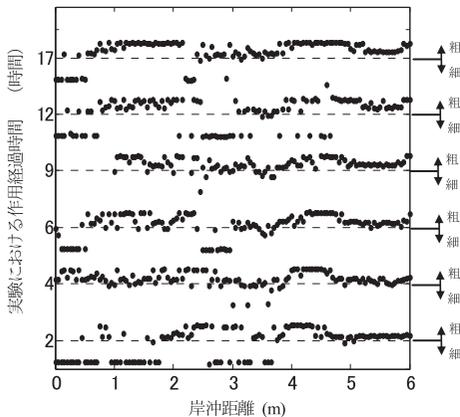


図-2 中央粒径 ( $d_{50}$ ) の時空間変動特性 (Case-B 侵食型)

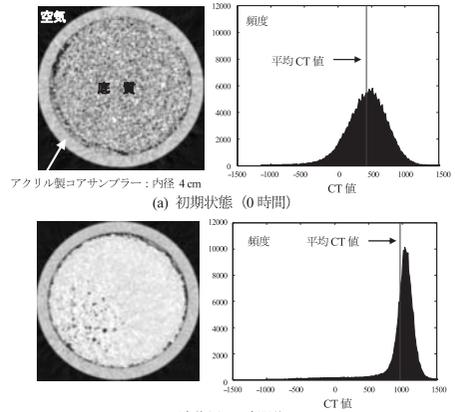


図-3 波作用に伴うCT画像とCT値頻度分布の時間変化

対応する。このことは、CT値の頻度分布において、0時間から19時間後では、ピーク値が増加していることで定量的に確認できる。山田ら(2007)と同様の手法で本実験用の砂を用いてキャリブレーション試験を実施し、別途求めた含水比と合わせて、CT値から湿潤密度に換算した。

今回のCT用のコアサンプリングは、地形計測と同時にに行った。つまり、一旦排水後、水路奥行き方向に場所を変えてサンプリングし、サンプリング後は遡上帯上部の砂で置き換え、同じ場所では時系列的なサンプリングは行っていない。サンプリングの具体的な方法は、先端をテーパ状に加工したアクリル製コアを底質の状態を乱さないように注意しながら慎重に底質中に貫入する。コア挿入後は、上部からは湯銭により融解したパラフィンを流し込み、短時間で空隙を固定する。また、コア底面は防水キャップと止水テープを施した。コアサンプリングに要する時間は1本あたり約20分である。なお、用いたパラフィンは、常温では5分ほどで固まるため、含水比の変化や振動等によるコア内部の湿潤密度の変化を防ぐことができる。さらに、パラフィンの密度は純水より若干大きい、砂粒子と比べると無視できる大きさであり、CT撮影および得られたCT値には影響しない。

1) 解析結果

図-4は侵食型のトラフとバーで採取したコアのX線CT撮影結果である。CT画像はすべて表層10mmでの撮影結果を256階調で示したものである。(a)、(b)図のCT画像の色の比較より、地形変化が定常に至る17時間の間にトラフにおいて湿潤密度の増加が確認できる。しかし、(c)図のバーでは、17時間後でもCT画像には濃淡が目立ち、低密度域が混在している。また、各段の右図はCT値にしきい値を設定し、空隙を含む低密度域を抽出後、コア全体の3次元再構成を行った結果である。鉛直方向の変化がわかりやすいように縮尺を変えて表示している。トラフでは定常に至るまでに空隙部分(黒色)が均等に減少し、空隙率はCT値の変化と別途計測した含水比(20%)から、湿潤密度が45%から33%に減少していることがわかる。これは、粗粒砂の空隙への細粒砂の入り込みや圧密による空隙の減少をCTで捉えた結果である。次に、バーでは定常状態でも湿潤密度に粗密構造が存在し、トラフほど空隙率は減少していないこともわかる。

図-5、6は底質の湿潤密度の鉛直分布を時間的に比較したもので、初期分布からの偏差を表す。図-5の侵食型のトラフ(3.55m)では、造波開始とともに湿潤密度が鉛直方向に変動しながら増加している。この現象は交換層内の鉛直分級を捉えたものと考えられる。定常状態の17時間後は湿潤密度の増分はほぼ一様(0.4g/cm<sup>3</sup>程度)となる。またバーとトラフを比較すると、トラフの方が

バーよりも密度増分は2倍程度大きい。しかし、堆積型では場所によらず底質表層に近いほど密度が増加しており、侵食型とは異なる(図-6)。さらに、侵食型のバーと堆積型のバーでは、ともに砂が局所的に堆積した地形

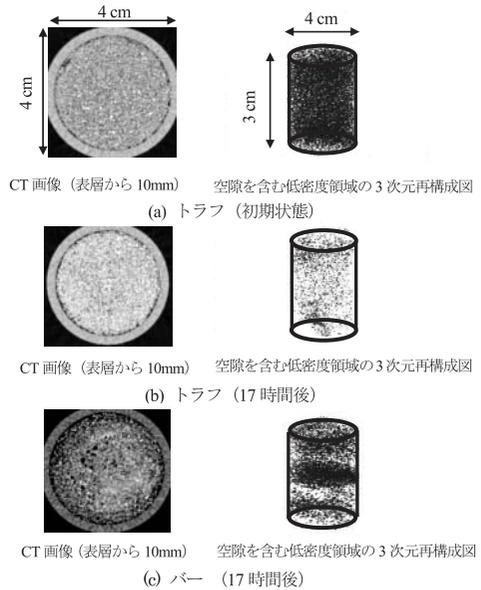


図-4 X線CTスキャナーによる撮影結果(侵食型)

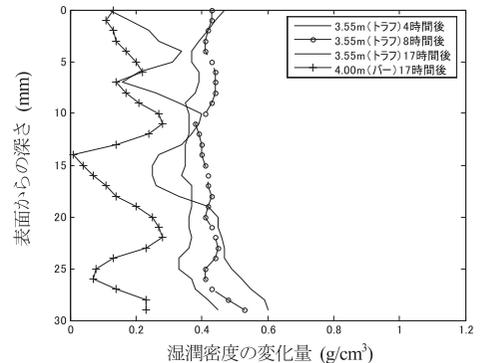


図-5 湿潤密度変化量の鉛直分布の時間変化(侵食型)

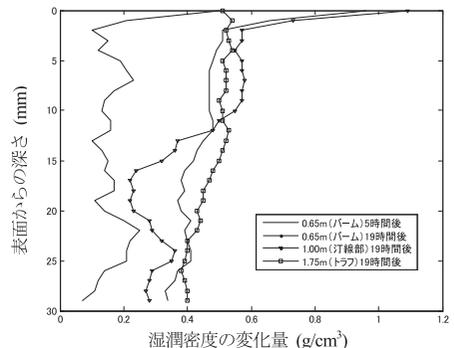


図-6 湿潤密度変化量の鉛直分布の時間変化(堆積型)

であるが、湿潤密度の増分はバームの方が2～3倍程度大きい。

次に、このような底質表層部での湿潤密度・空隙構造の時空間変化と粒度組成の変化を直接比較するために、Rubin (2004) の画像計測手法をCT画像に適用し、粒径分布と湿潤密度・空隙分布の同時計測を試みた。しかし、CT画像から砂粒径情報を抽出することは困難であった。そこで、粒径そのものではなく、粒径分布を代表する“ふるいわけ係数”や“偏わい度”に着目した。具体的には、図-3のCT頻度分布を正規化し、累積することで累積CT値発生確率曲線を求める。この曲線から底質の粒径加積曲線と同様に25, 50, 70%の累積確率に相当するCT値を用いてふるいわけ係数などに相当する値を計算する。一方、CT撮影後のコアから対応深度の底質を取り出し、ふるいわけ試験を行ってふるいわけ係数や偏わい度を求め、両手法を比較した(図-7)。同図は、Case-B(侵食型)のトラフでのふるいわけ係数を比較したもので、横軸はふるいわけ試験、縦軸は累積CT値発生確率曲線から算定したものである。図中の凡例はCT撮影時の表面からの深度である。両者は10%内の精度で一致しており、他のケースでも同様の結果が得られた。この結果は、特に、交換層内では、底質のかさ密度・空隙構造の時空間変化が粒度組成と直接関係することを示唆するものと解釈できる。今後、粒径分布と湿潤密度・空隙構造の関係をさらに検討し、限界せん断応力の時空間変動に与える影響を明らかにする必要がある。

#### 4. 結論

実験結果からRubinの画像計測手法やX線CTスキャナーは、現地や室内実験の底質表面の粒度分布や内部の密度・空隙構造の時空間変動を非破壊で短時間に把握できる有効な手法であることが示された。また、現状の地形変化の数値モデルでは、時間に依存しないと仮定される

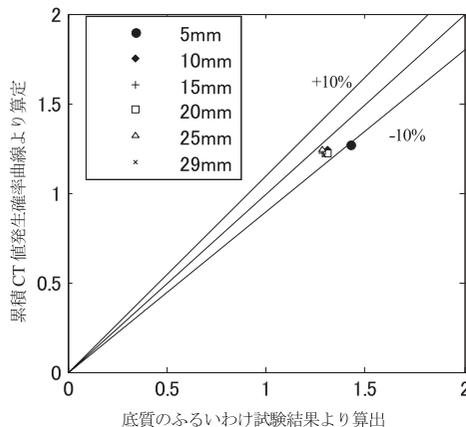


図-7 底質のふるいわけ係数の算定精度の比較

ことの多い底質の空隙率は、実際には時空間で変動すること、また、かさ密度の増加が局地的な地形変化に依存し、地盤強度に影響を与えるなどがわかり、今後の地形変化モデルに検討すべき一方向性が示された。

**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、熊本大学の尾原教授、大谷教授をはじめ、X-Earthセンター各位にご協力いただきました。

#### 参考文献

- 熊田貴之, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 野志保仁 (2004): 粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 441-445.
- 黒岩正光, 口石孝幸, 加藤憲一, 松原雄平, 野田英明, 中本良平 (2005): 混合粒径砂の分級と汀線変化を考慮した3次元海浜変形予測モデル, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 521-525.
- 田中 仁, 吉竹豊尚, 首藤伸夫 (1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 辻本剛三, 山田文彦, 柿木哲哉 (2008): 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, 海洋開発論文集, Vol.24, pp. 1207-1212.
- 目黒嗣樹, 山本幸次, 福濱方哉 (2005): 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.
- 平野宗夫 (1971): Armoringをともなう河床底下について, 土木学会論文集, 第195号, pp. 56-65.
- 山田文彦, 柴田康晴, 原田翔太, 外村隆臣, 玉置昭夫, 尾原祐三 (2007): 潮間帯干潟の土砂動態と底質環境調査への地上型3次元スキャナーとX線CTの適用, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1146-1150.
- Amos, C. L., T.F. Sutherland, B. Radzizieski and M. Doucette (1996): A rapid technique to determine bulk density of fine-grained sediments by X-ray computed tomography, *J. of Sedimentary Research*, 66, pp.1023-1025, 1996.
- Barnard, P. L., Rubin, D. M., Harney, J., and Mustain, N. (2007): Field test comparison of an autocorrelation technique for determining grain size using a digital "beachball" camera versus traditional method, *Sedimentary Geology*, 201, pp. 180-195.
- Dibajnia, M., 高沢大志, 渡辺 晃 (1998): 混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 481-485.
- 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.
- Otani, J., T. Mukunoki and Y. Obara (2000): Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, 40(2), pp. 118-118.
- Rubin, D. M. (2004): A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital image of sediment, *Journal of sedimentary Research*, 74, No.1, pp. 160-165.