医療用X線CTを用いた波作用下の地形変化・底質輸送の同時連続計測

Dynamic monitoring of beach profile changes and sediment transport during wave actions using medical X-ray CT scanner

山田文彦¹・立山龍太²・辻本剛三³・末長清也⁴・Bernard Long⁵・Constant Pilote⁶

Fumihiko YAMADA, Ryuta TATEYAMA, Gozo TSUJIMOTO, Seiya SUENAGA
Bernard LONG and Constant PILOTE

Medical X-ray CT scanner was applied to dynamic measurements of beach profile changes and sediment transport during wave actions. Reconstructing three-dimensional images using Hounsfield Units (HU), the evolutions of beach morphology were examined. Both of Rouse and exponential profiles of time-averaged sediment concentrations are not good skill to show the measured profile of sediment concentrations using X-ray CT. The profile of eddy diffusivity was estimated using the 1D diffusion equation for steady state and measured CT results. Estimated profile of eddy diffusivity in the surf zone was good agreement with the model proposed by Christoffersen・Jonsson (1985).

1. はじめに

岸沖方向の底質輸送や地形変化モデルに関してはこれまでも多くの研究がなされてきたが、依然としてその予測精度は十分ではない。この要因は複数考えられるが、本研究では以下の2つの現象の理解度向上を試みる。

- 1) 地形変化時の底面付近の底質輸送プロセス
- 2) 地形変化時の底質特性の変化

具体的には、医療用X線CTを応用し、波作用下で移動床実験を実施し、非破壊・非接触で上記2点の同時連続計測を行ない、渦拡散係数の鉛直分布の推定や底質密度の時空間変動の基礎的な知見を深めることを目的とする。

まず、1つ目の地形変化時の底面付近の底質輸送プロセスに関する最近の研究例としては、Conley・Beach (2003) が高波浪時の海底面近傍の詳細な現地観測を実施し、netの底質輸送フラックスの鉛直分布は底面極近傍(4cm程度)では岸向き、それより上方(10cm程度)は沖向きであり、S字型に輸送方向が反転することを示した。また現地計測したすべてケースで外力要因(風波・平均流・長周期成分)ごとにnetの底質輸送フラックスの鉛直分布を分離して検討した結果、風波成分は底面極近傍が大きい値を示すものの、底面から10cm程度まではすべて岸方向に移動する秩序的な構造を有することを明らかにした。

さらにConleyら(2008)は、静穏時にも風波による秩序的な岸向き流れは存在し、サンドバーの岸向き移動の

主要因になると考えた。一方、高波浪時は底面近傍に高濃度の浮遊砂が存在し、濃度勾配に起因した成層が生じる。この成層が乱れを減衰させ、底面極近傍の高濃度の浮遊砂がより上方の沖向きの平均流に取り込まれるのを抑制するという新たな概念を提案し、この濃度成層による乱れの減衰効果を取り入れた計算手法を開発した。

Falchettiら(2010)は、このモデルを用いてサンドバーの岸沖移動の現地観測データと比較し、モデルの妥当性を示したが、濃度成層の効果のみでは十分に観測結果を表現できない計算ケースも存在する。これは、Conleyら(2008)のモデルは底面から発生する乱れは考慮しているが、砕波等に伴う水表面側から供給される乱れの影響を陽に取り入れていないことが原因と考えられる。以上の結果や考察を本研究で取り扱う時間平均濃度の鉛直分布から渦拡散係数の鉛直分布を推定する問題に置き換えてみると、適切に推定されたその鉛直分布には、水表面と底面からの両方の影響が反映されることが推察される。

次に、2つ目の地形変化時の底質特性の変化に関する最近の研究例としては、移動床実験時に採取した底質コアサンプルに産業用X線CTを適用し、底質の攪乱深さや間隙構造を計測した山田ら(2010)の研究がある。地形変化に伴って表層付近の間隙構造に粗密が生じ、その変化はサンドバーのクレストやトラフで異なることが示された。また、山田ら(2011)は、その実験結果を利用し、攪乱深さ内に存在する底質水中比重の空間分布を考慮することで既存の漂砂量フラックスを局所的に修正する方法を提案し、地形変化の再現性が向上することを示した。しかし、産業用X線CTは1断面の撮影に数分を要し、また、コアサンプリングが必要であるため、漂砂濃度の鉛直分布と底質内部構造を同時に連続計測することは原理的に困難であった。そこで今回、撮影の時間分解

1 正会員	博(工)	熊本大学大学院教授 自然科学研究科
2 正会員	修(工)	鹿島建設 本社国際事業部
3 フェロー	工博	神戸市立高専教授 都市工学科
4 学生会員		熊本大学大学院 自然科学研究科
5 非会員	Ph.D	ケベック大学教授 INRS
6 非会員		ケベック大学大学院 INRS

能が1sの医療用X線CTを用い、移動床実験装置と組み合わせた実験装置を作成した。その装置を用いて、波作用下での漂砂の鉛直分布や地表面形状ならびに底質内部構造を同時に、かつ連続的に計測し、基礎的なデータを取得するとともに、従来の知見との比較などを行なった。

2. 移動床実験の概要

実験は平成23年8月20日～10月16日までの約2ヶ月間カナダのケベック大学で実施した。実験装置は図-1・2に示すように、矩形断面(0.3×0.3m)の亚克力製水槽(全長7m)を可動構台に設置された医療用X線CT(Siemens: Somatom Sensation 64)の検査孔(直径70cm)の中に挿入した構造となっている。この可動構台は4本のレールの上に設置されており、水槽自体を動かすことなくX線CT本体が約2m間を自走して移動可能であり、岸沖方向の地形変化や底質輸送特性を計測できる。この2m間を移動しながら計測を行なう方法をSpiral Scanning法と呼び、撮影の所要時間は180sである。その他の撮影方法として、X線CT本体を固定した定点計測も可能であり、この方法をSingle Slice Scanning法という。撮影方法の詳細は3章で述べる。

また図-1に示すように、水槽の入射側端部にピストン式の造波装置があり、造波装置より約3m地点から中央粒径0.147mmのOttawa砂を用いて一様勾配1/15の砂浜斜面を設置した。医療用X線CTが自走して計測する際に障害とならない範囲に波高計5台とADV1台を設置した。入射波は規則波(波高4cm:周期0.7s)、沖側の一定部の水深を20cmとし、侵食型の波浪条件下(C_s パラメータは8.3)で地形変化が定常とみなせる7.5時間まで波を作用させた。岸沖方向の地形形状や底質内部構造は30分毎に造波機を止め計測した。なお、実験中の反射率は全期間を通じて0.12以下であり、実験結果への反射波の影響は小さいものと考えられる。

ADVの初期設置位置は静水深15.4cmの地点で底面から1.9cm上方で、3次元流速をサンプリング間隔200Hzで計測した。位相平均流速の時間変化の特徴についてまと

図-2 実験装置の概観

めると、岸沖方向成分が卓越し、その大きさは $\pm 10\text{cm/s}$ 程度であり、標準偏差は波の作用時間に比例して大きくなるが、最大でも 1cm/s 程度である。鉛直方向の位相平均流速は $\pm 2\text{cm/s}$ 程度であり、その標準偏差も同様に波の作用時間に比例して大きくなり、最大値は 2cm/s 程度と平均値程度の大きさとなる。また、スパン方向の位相平均流速および標準偏差は常に 0.1cm/s 以下であった。

3. 医療用X線CTによる計測方法

医療用X線CTによる計測から得られるCT画像は2Dまたは3DのX線減衰量(μ)のマトリックスに相当する。X線減衰量は物質密度と相関が高く、CT画像は相対密度分布を表すものとして捉えることができる。この相対密度の単位は、Hounsfield Unit (HU)であり、本装置の場合、 $-1024 \sim 3071\text{HU}$ の範囲で検出される。空気と水の相対密度は常に一定であり、それぞれ -1000HU と 0HU となる。今回の計測では、計測面内の相対密度がHU値としてボクセル(全方向 0.6mm)毎に出力される。このHU値は検査ボクセル内の漂砂密度(濃度)に比例する。HU値と濃度の変換式は別途キャリブレーション試験が必要となるが、今回のように砂層厚が大きく変わる場合の試験方法が確立しておらず、現在も検討中である。そこで、今回の解析では濃度の変わりにHU値を用いて検討を行った。次に、2章でも説明した本研究で用いる医療用X線CTの2つの計測方法について説明する。

(1) 岸沖方向の地形・底質内部の変動特性の連続計測

本節の目的のために用いるのがSpiral Scanning法であり、岸沖方向の地形と底質内部特性(間隙・密度)の空間分布がどのように波の作用により時間変化するかを調べる方法である。図-3に示すようにSpiral Scanning法では岸沖方向の範囲を3分割し、各区間(0.66m, 全長1.98m)をCT装置がレール上を自走しながら約60秒間

図-1 実験装置の断面図

(合計180秒)で計測する。また本手法における空間分解能は3次元方向ともに0.6mmである。なお、今回のSpiral Scanning法を用いた計測では、造波の継続時間を30分間とし、CT計測は水面変動が落ち着くのを待ってから、静水状態を確認して行なった。これはCT計測中の地形変化を防ぐためである。また、この実験手順を地形変化が定常状態に到達した450分後まで繰り返した。

(2) 碎波帯内外での底質輸送プロセスの動的計測

本節の目的のために用いるのがSingle Slice Scanning法であり、医療用X線CTの高時間分解能(1Hz)を利用して、波が作用している動的な状況下での漂砂の浮遊と掃流移動、および底質特性(表面・内部)を同時に計測する。本手法では、CT装置本体を図-3の初期汀線から0.26m(碎波帯内)および1.81m(碎波帯外)の2点にそれぞれ固定し、波を造波させたままの動的な状況下で、水路断面方向の相対密度分布を連続的に計測する。水槽断面方向の空間解像度は0.6mm(構成画素数は 512×512 pixel)であり、岸沖方向にも分解能は同じである。CT撮影間隔(1s)が波の周期(0.7s)より若干長いため、35回の計測から時間平均した漂砂濃度(HU値)の分布を30分ごとに450分後まで繰り返した。また、得られた漂砂濃度(HU値)の鉛直分布についてRouse分布や指数分布などと比較するとともに、鉛直1次元の定常拡散方程式から渦拡散係数の鉛直分布を推定した。

4. 実験結果と考察

(1) 海浜地形の時空間分布特性

図-4はSpiral Scanning法により得られた海浜地形の時空間分布を3Dで表示した結果である。計測による地表面の決定は、相対密度を表すHU値の閾値を500として水と底質の境界面として抽出した。なお、閾値は別途スケールで計測したバーのトラフ・クレスト位置・形状およびリップルの波長・波高の測量結果と比較して決定した。図中の地形の濃淡は標高を表しているが、180s間の計測で岸沖方向2m間の3次元の海浜地形がよく再現できていることが分かる。特に、従来の計測と異なる点は、空間分解能が0.6mmと高精度であるため、リップル等の微地形まで詳細に計測できることである。今回のリップルの代表的な大きさは波高8mm、波長2.5cmであった。

(2) 碎波帯内外での底質輸送プロセスの動的計測結果

今回Single Slice Scanning法を適用するにあたっての課題は、波の周期(0.7s)がCTの撮影分解能(1s)より短いことである。また、CTを安定して連続的に使用するには、機械的な制約として撮影間で2s間の休止を要する。そのため1回のみ計測では漂砂現象の再現性に問題が残る。そこで今回は瞬時的な漂砂現象ではなく、時間平均された漂砂現象を把握することとし、各計測では35回の

図-3 2種類の計測方法の撮影範囲と位置

図-4 地形の時空間変化の計測結果（奥行30cm）

計測結果を平均し、各時刻の漂砂現象を考察した。

図-5は碎波帯内外で計測された漂砂濃度(HU値)の鉛直分布の時系列をそれぞれの場所ごとにすべて重ねて表示したものである。(a)図より、碎波帯外では漂砂濃度の鉛直分布は時間変化が小さく、底面から上方に向かって指数的に減衰し、純水のCT値である0に漸近している。一方、(b)図の碎波帯内では漂砂濃度の鉛直分布の時間変化は、特に底面付近で顕著である。また、碎波帯外と比較すると底面から上方に向かってのHU値の減衰は小さく、200程度の値で水面付近まで分布しており、碎波による水面からの乱れの影響がよく捉えられている。

図-5の各時刻の漂砂濃度の鉛直分布の計測値をRouse分布や指数分布と比較した。図-6は造波開始後220分程度経過し、バー発達段階での漂砂濃度(HU値)の鉛直分布(実線)をRouse分布(点線)と比較した結果であり、基準点高を水深の5%(碎波帯外:6mm;碎波帯外:1mm)と仮定した結果である。なお、図中の β はRouse数を示す。(a)図より、碎波帯外では底面～無次元水深0.4程度までの下層ではRouse分布と一致するが、それより上方では、Rouse分布より外れ、大きな濃度となる。この結果より、碎波帯外でも水面からの乱れの影響が

図-5 漂砂濃度 (HU値) の鉛直分布の時間変化

図-6 Rouse分布との比較の一例

図-7 渦拡散係数の鉛直分布の推定

示唆される．一方，(b) 図では，碎波帯内の漂砂濃度分布はRouse分布とは大きく異なる．これは，水表面と底面の両方からの乱れの影響を受け，濃度がより大きくなり，碎波帯外よりも多くの変曲点を有する分布となったと解釈できる．なお，指数分布との比較結果もほぼ同じ結果であった．

(3) CT計測結果を用いた渦拡散係数の鉛直分布推定

前節の検討により，時間平均の漂砂濃度の鉛直分布はRouse分布や指数分布では完全に表現できないことが分かった．そこで，鉛直1次元の定常拡散方程式と計測された時間平均漂砂濃度 (C) の鉛直分布を用いて (1) 式のように渦粘性係数の鉛直分布を推定した．

$$\epsilon_z = w_0 C \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (1)$$

ここで， w_0 は粒子の沈降速度であり，今回は中央粒径を用いた van Rijn の式 (Soulsby, 1997) で求め， $w_0=0.012\text{m/s}$ である．図-7に碎波帯内での推定結果 (+印) とその移動平均 (実線) を示す．図より，推定した渦拡散係数のオーダーは $10\text{cm}^2/\text{s}$ 程度であり，柴山・Winyu (1993) の室内実験および Sheng・Hay (1995) や Lee ら (2002) の現地観測から推定した結果と同様であることがわかる．次に，その鉛直分布は底面から離れるに従って線形的に増加するが，無次元水深 0.3 (底面上約 6mm) 付近で不連続的に急減している．この傾向は Grant・Madsen (1979) のモデル同様であるので，このモデルから摩擦速度 (3.0cm/s 程度) を求め，波動境界層の厚さを推定すると 3～6mm (無次元水深 0.15～0.3) 程度となる．また，この高さより上方では線形的に増加するのではなく無次元水深 0.6 (底面上約 12mm) 付近を極大として水面に向かって緩やかに放物的に減衰しており Christoffersen・Jonsson (1985) のモデルⅡと類似した分布を示した．

図-8 初期状態との底質内部密度の差画像 (3.5時間後)

(4) 底質内部密度の時空間変化

底質の内部密度の時空間変化から底質の攪乱深さを推定するため、Spiral Scanning法による3.5時間後のHU分布と初期分布の差分を取った(図-8)。差画像は白色ほど密度が増加したことを示し、バー岸側の表層部で密度増加が顕著である。図では表層以外でほとんど大きな相対密度変化を起こしていないことから、表層の密度変動層の厚さは6~9mm程度である。Madsen (1974)は攪乱深さが碎波帯において碎波波高の11%と提案したが、今回の計測では碎波波高の16~24%で分布しており、波の条件以外にも底質粒径や海底地形(バーやリップル)の影響を受けて変化することが考えられる。

5. 結論

時間分解能の高い医療用X線CTを応用し、波が作用している動的な状況下での漂砂の浮遊と掃流移動、および底質特性(表面・内部)の同時計測を行ない、渦拡散係数の鉛直分布の推定や底質密度の時空間変動に関する検討を行った。特に碎波帯内においては推定された渦拡散係数の鉛直分布には水表面と底面からの両方の影響が反映されることが確認できた。なお、定量的な検討に関して、実験と現地のスケール効果が明確に現れない理由など今後の検討課題も多く、実験ケースを増やすとともに、数値モデルの構築による理論的解釈が必要となる。

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。

参考文献

- 柴山知也・Winyu Rattanapitikon (1993): 碎波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価, 海岸工学論文集, 40, pp.306-310.
- 山田文彦・辻本剛三・田端優憲・立山龍太・外村隆臣・小林信久 (2010): 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, 土木学会論文集(海岸工学), 66 (1), pp.436-440.
- 山田文彦・舟越善隆・辻本剛三・立山龍太 (2011): 底質密度の時空間変化を考慮した岸沖海浜変化モデルの適用性, 土木学会論文集(海岸工学), 67 (2), pp.I_496-I_500.
- Christoffersen, J. B. and Jonsson, I. G.. (1985): Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion, *Ocean Engineering*, 12, pp. 387-423.
- Conley, D. C., and Beach, R. A. (2003): Cross-shore sediment transport partitioning in the nearshore during a storm event, *J. Geophysical Research*, 108 (C3), doi:10.1029/2001JC001230.
- Conley, D. C., Falchetti, S., Lohmann, I. P., and Brocchini, M.(2008): The effect of flow stratification by non-cohesive sediment on transport in high-energy wave-driven flows, *J. of Fluid Mechanics*, 610, pp. 43-67.
- Grant, W.D. and Madsen, O.S. (1979): Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. of Geophysical Research*, 84, pp.1797-1808.
- Falchetti, S., Conley, D. C., Brocchini, M., and Elgar, S. (2010): Nearshore bar migration and sediment-induced buoyancy effect, *Continental Shelf Research*, 30, pp. 226-238.
- Lee, G., Friedrichs, C. T., and Vincent, C. E. (2002): Examination of diffusion versus advection dominated sediment suspension on the inner shelf under storm and swell conditions, *Duck, North Carolina, J. of Geophysical Research*, 107, (C7), doi:10.1029/2001JC000918.
- Madsen, O. S. (1974): Stability of a sand bed under breaking waves, *Proc. of 14th Coastal Engineering*, pp.776-794.
- Sheng, J. and Hay, A. E. (1995): Sediment eddy diffusivities in the nearshore zone, from multifrequency acoustic backscatter, *Continental Shelf Research*, 15, 129-147.
- Soulsby, R. (1997): *Dynamics of marine sand*, 249, Thomas Telford