

# 干潟バー地形の動的安定機構の解明

## Origin of Morphodynamic Stability of Intertidal Sand Bars

佐々真志<sup>1</sup>・渡部要一<sup>2</sup>

Shinji SASSA and Yoichi WATABE

The persistent nature of intertidal sand bars has been the subject of much speculation concerning the hydrodynamic mechanisms involved, but its origin remains enigma. Here, we aim to resolve this question by introducing salient geophysics to the analysis of intertidal sediments, in contrast to the physics of fluids above the sediments. The geophysical evidence combined with theoretical modeling and analysis demonstrates that the feedback between the effects of suction dynamics and sediment transport and morphology plays a crucial role in the intertidal bar morphodynamics, yielding the persistent nature of the intertidal sand bars. Our finding may fundamentally alter the current perspective, leading to a new level of understanding, of sediment transport and bar behavior at waterfronts that are ubiquitous in rivers, estuaries, and coastal seas.

### 1. はじめに

河口・沿岸域に発達するバー地形は、潮間帯・潮下帯に位置し、波のエネルギーを低減させて海浜を激しい侵食から護る重要な役割を担っている。このため、バー地形動態の理解を目的として、波や流れの水理動態と関連する土砂輸送過程について、これまでに広く研究されてきている（例えば、Huefel and Elgar, 2003；Masselinkら, 2006；Ruessinkら, 2007）。一般に、バー地形は、嵐の際に沖側に移動し穏やかな波浪下で岸側に戻りバームを形成する特性を有する。しかし、潮間帯に常時存在する干潟バー地形は、土砂移動の観点から十分に厳しい波浪条件下でも極めて安定していることが知られており、様々な水理要因の推測がなされているものの、その機構は未だ世界的にも謎とされている（Masselinkら, 2006）。

本研究は、上述を背景として、干潟バー地形の動的安定機構を解明することを目的としている。そのために、本研究では、土砂上の水理とは対照的に異なる潮間帯土砂物理に関する最新の知見を導入している。すなわち、筆者らは、近年、土中水分張力を表し大気圧を基準とした負の間隙水圧により定義されるサクシヨンの動態が、繰返し干出・冠水する土砂の間隙および表面せん断強度の顕著な時空間変化を引き起こす上で本質的な役割を果たしていることを見出した（Sassa and Watabe, 2007）。本論文では、このような土砂内部の物理動態過程が漂砂とバー地形動態に果たす役割を明らかにしている。

本論文の構成は、次のとおりである。まず、潮間帯の

波・流れと岸沖漂砂の特性を概観し、干潟バー地形の動的安定性を示す既往の現地観測・調査結果に言及する。そして、サクシヨンの動態効果に関する物理的事実について再整理・記述した後、漂砂と地形変化の枠組みにおける本効果の理論モデルを提示し、バー地形動態を対象として得られた解析結果について記述・考察している。

### 2. 波・流れに対する干潟バー地形の動的安定性

潮間帯のバーは、一般に、その高さや勾配に応じて、主に次の3つのタイプに分類される：すなわち、1. slip-face bars, 2. low-amplitude ridges, および3. sand wavesである（図-1(a)）。タイプ1のSlip-face barsは、バー高さが大きい最も動的なバーである。このタイプのバーは、潮下帯のバーと同様に、嵐の間に沖側に移動しその後の

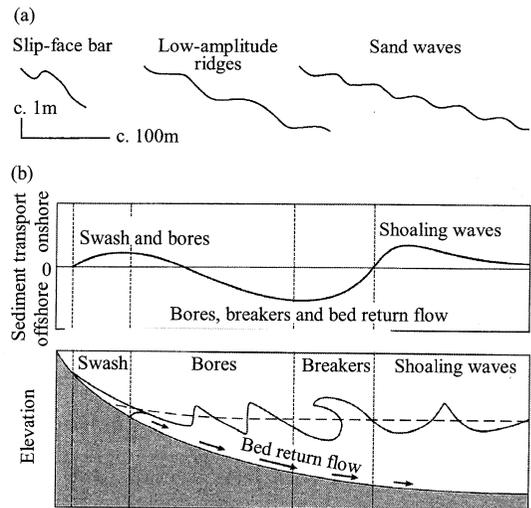


図-1 (a)潮間帯バーの3つのタイプ；(b)波・流れと岸沖漂砂の形態（Masselinkら, 2006）。

1 正 会 員 博(工)(独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部  
主任研究官

2 正 会 員 博(工)(独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部  
土質研究チームリーダー

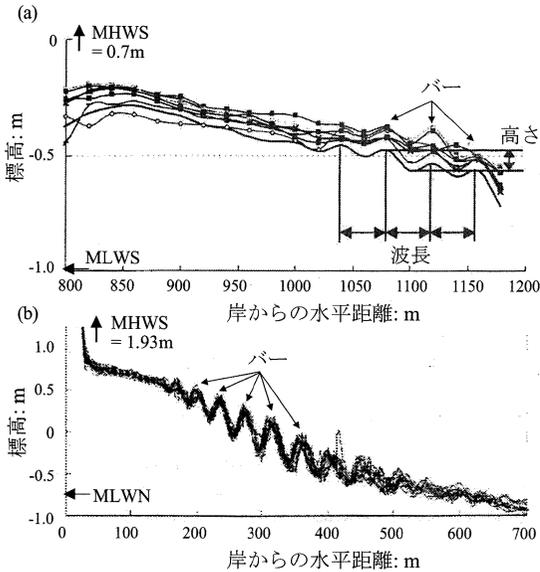


図-2 干潟バー地形の動的安定性を示す現地調査結果：(a)盤州干潟（古川ら，2000）；(b)御輿来干潟（Yamada and Kobayashi, 2007）．MHWS：大潮平均高潮位，MLWN：小潮平均低潮位．

穏やかな波浪条件下で岸側に戻る特性を有する．これとは対照的に，タイプ2，特に干潟バー地形に相当するタイプ3のバーは，バー高さが抑制された非常に安定した地形である．これまでに，水理動態特性に関する長周期重複波や多段砕波等の様々な推測がなされているものの，これらのバーの動的安定性の起源は未解明に留まっている（Masselinkら，2006）．

冠水した潮間帯のバーは，潮汐による水位変化を通じて，一連の波浪過程を経験する（図-1(b)）．これにともない，岸沖方向の漂砂は，岸側・沖側の双方に繰り返し変動するため，時間的空間的に非定常であることが知られている（図-1(b)）．

以下では，干潟バー地形の動的安定性を示す2つの典型的な事例について記述する．図-2(a)は，東京湾の小櫃川河口に位置する盤州干潟において1994～2000年の7年間にかけて実施した現地調査結果（古川ら，2000）を示している．当該干潟の土砂は，中央粒径 $D_{50}=0.17\sim 0.23\text{mm}$ の細砂である．本図より，約1/1000の緩勾配上にバー高さ0.1～0.2m，波長40mの多段バー地形が潮間帯下部に存在していることがわかる．本干潟は，年平均0.04mの割合で正味の堆積傾向（Uchiyama, 2007）にあり，地盤高は経年的に変動している．それにも関わらず，バーは常に同じ位置に留まっていることがわかる．

図-2(b)は，有明海の御輿来干潟において2003～2005年の3年間に26回の現地調査を実施した結果（Yamada and Kobayashi, 2007）を示している．当該干潟の土砂

は，中央粒径 $D_{50}=0.12\sim 0.33\text{mm}$ の細砂である．本図より，約1/300の緩勾配上に，バー高さ0.15～0.5m，波長30～50mの多段バー地形が存在しており，かつ，沖側フロント域を除いて，バーの位置が実質的に同じに留まっていることがわかる．

ここで重要なことは，上述の両調査の期間中，盤州干潟と御輿来干潟の双方とも，幾度の嵐や台風イベントを経験している事実である（古川ら，2000；Yamada and Kobayashi, 2007）．このことは，上述の調査結果と合わせて，波・流れに対する干潟バー地形の動的安定性を如実に示している．

### 3. 潮間帯の土砂物理：漂砂とバー動態に果たす役割

#### (1) サクシオン動態効果

潮間帯の土砂は，繰返し干出・冠水する．これにより，地下水位変動が生じ，土砂内部のサクシオン状態が動的に変化する（Sassa and Watabe, 2007）．サクシオンは，土中の水分張力を表し，次式によって定義される．

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

ここに， $u_a$ は大気圧， $u_w$ は間隙水圧を表す．本定義により，サクシオンは地下水位においてゼロとなる．

筆者らは，サクシオン動態の効果に関する現地観測・模型実験・理論解析の連携を通じて，次のことを明らかにしている（Sassa and Watabe, 2007）．すなわち，潮汐による地下水位変化と連動したサクシオンの動態は，繰返し干出するも実質飽和状態を保つ土砂の著しい弾塑性収縮を引き起こす．このようなサクシオン動態による土砂間隙状態の変化は，そこで作用するサクシオン動態の厳しさに強く依存して，土砂表面せん断強度の明瞭な変化をもたらす．

上述のことをより具体的に示すために，図-3に，盤州干潟の土砂環境分布に関する筆者らの現地観測・調査結果を提示している．当該干潟の土砂粒径は $D_{50} \cong 0.2\text{mm}$ と均質であるが，潮間帯下部のバートラフ地形に応じて，地下水位が顕著に変化していることがわかる（図-3(a)，(b)）．このような地下水位の空間変化は，干出時に土砂が飽和状態に保たれる条件（佐々ら，2007）下で，表層土砂のサクシオン発達性状に直接的に反映される（図-3(c)）．これにより，潮汐作用下で，バーは，トラフに比べて，より大きな地下水位変動すなわちより厳しいサクシオン動態を経験し密になった結果，著しく高い表面せん断強度を発揮する（図-3(d)）．

このようなサクシオン動態による繰返し弾塑性収縮をもたらすバートラフ堆積構造の顕著な差異は，高精度表面波探査と表層土砂の不攪乱サンプリング及び土砂物理試験の連携によっても確かめられている（Watabe and Sassa, 2008）．

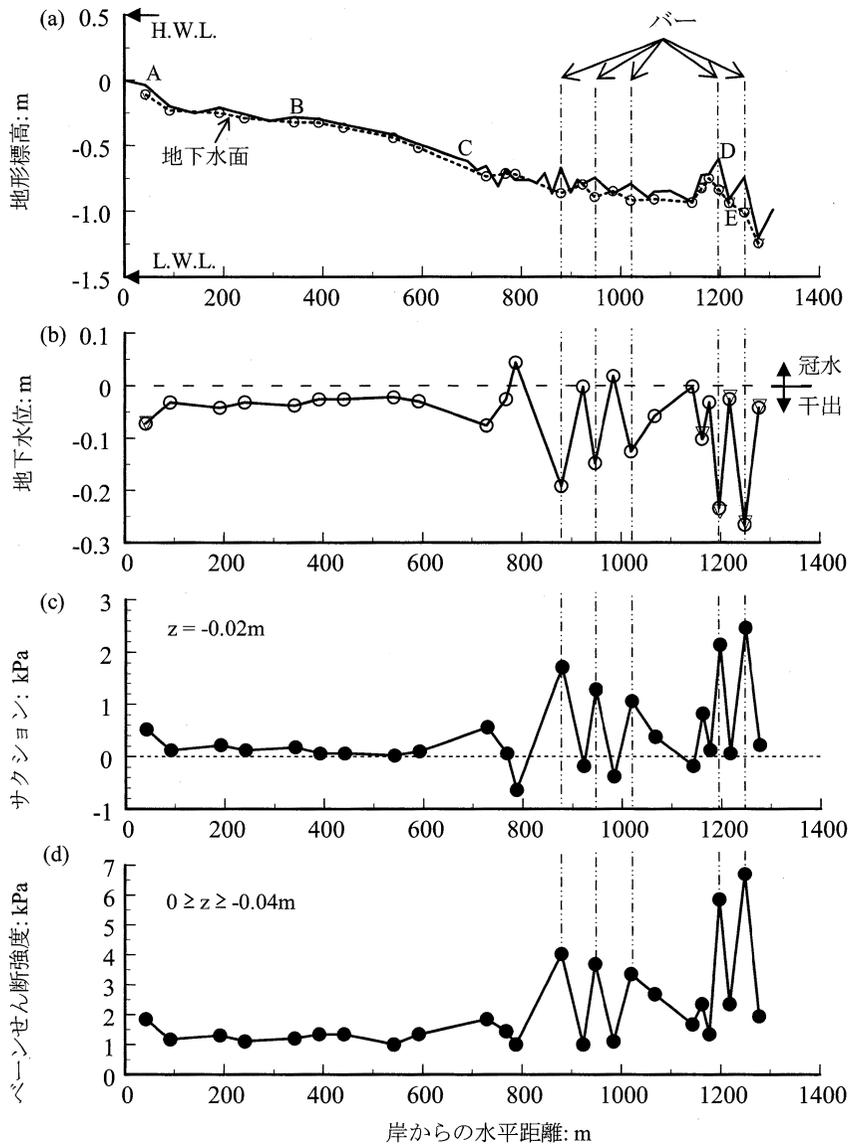


図-3 干潟バー地形、地下水位、サクシヨンならびに土砂表面せん断強度の間の密接な関係を示す盤州干潟における現地観測・調査結果。ここに、A～E地点は、土砂のサンプリング地点を表す。

結局、上述のサクシヨン動態効果は、土砂の表面せん断強度の分布とバートラフ地形の地盤高分布の間の密接な相関をもたらしている(図-3)。

## (2) 理論モデル化と解析

波・流れによる表面せん断応力が土砂の移動限界せん断応力を上回ると、土砂が動き出す。より厳しい条件下で、漂砂層厚ならびに漂砂量は増加し、その度合いは、漂砂層底面で常に成立する関係、すなわち、波・流れにより動員されたせん断応力が土砂のせん断強度に一致する関係によって規定される(Nielsen, 1992)。このことは、図-4に示すように、局所漂砂量が、せん断応力と土

砂のせん断強度の双方に依存する関数であることを表している。従来、波・流れによるせん断応力の時間的・空間的变化については、目覚ましい研究の進展があった一方、現行の漂砂モデルでは、土砂のせん断強度が時間的・空間的に固定されている(Hoefel and Elgar, 2003; Hsu and Hanes, 2004; Masselinkら, 2006; Ruessinkら, 2007)。しかし、本論文の前節は、潮間帯の土砂では、サクシヨン動態効果によって顕著な表面せん断強度の変化が現れることを明示した。

以下では、漂砂と地形動態に及ぼすサクシヨン動態効果に関する簡明な物理モデルについて記述する。

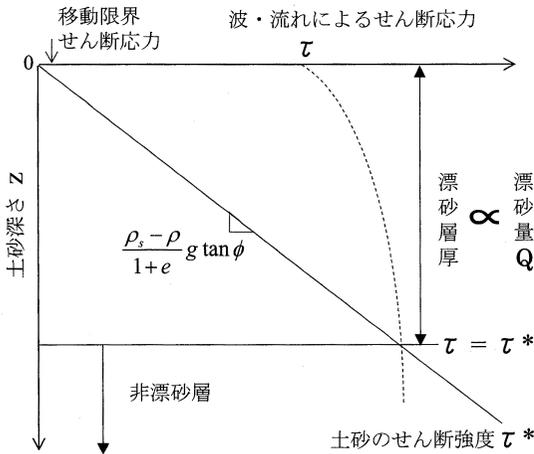


図-4 波・流れによるせん断応力と土砂のせん断強度の両者に依存する漂砂量. ここに、 $\rho$ は水密度、 $\rho_s$ は土粒子密度、 $e$ は土砂の間隙比、 $\phi$ は土砂の内部摩擦角を表す.

岸沖方向 $x$ の土砂の連続式は次式によって表すことができる.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-n} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 $z$ は地盤高、 $n$ は土砂の間隙率、 $Q$ は岸沖方向の局所漂砂量である. 漂砂方向は、上述の潮間帯の水理動態特性により、時間的・空間的に変動する. ここでは、 $Q$ の最もシンプルなかたちとして次式を仮定している.

$$Q = A \cdot \sin(\kappa x - \omega t) \quad (3)$$

ここに、 $\kappa = 2\pi/L$ 、 $\omega = 2\pi/T$ であり、 $L$ は $Q$ の岸沖変化の波長、 $T$ は $Q$ の時間変動の周期である.  $A$ は漂砂ポテンシャルを表し、既述のとおりせん断応力と土砂のせん断強度の両者に依存する. 上述のサクシオン動態効果によるせん断強度とバートラフ地盤高分布の密接な関係を考慮すると、

$$A = a|z| \quad (4)$$

と表現することができる. ここに、 $a$ は土砂上のせん断応力によって規定されるパラメタである.

干潟バー地形動態の解析を、上式(2)~(4)を用いて行った. 具体的には、年サイクルで移動限界を優に上回る波・流れ場におけるバーの動態を対象として、バーの初期地形：長さ40m、高さ0.25m、勾配1/500、および漂砂条件： $T=1$ 年、 $L=40$ m、 $n=0.45$ 、 $a=0.0075\text{m}^3/\text{day}$ の下で、式(3)、(4)を組んだ式(2)を差分法で解き、得られた地盤高分布を用いて式(2)~(4)を更新した. また、比較のために、式(4)において $A=a$ と設定し、サクシオン動態効果無しの場合の解析を合せて行った.

### (3) 結果と考察

上述の物理モデルによる解析結果を図-5に示す. サクシオン動態効果が無い場合(図-5(a))、すなわち、水理動態のみ影響下では、バー地形は、バー高さをほぼ保ちながらも侵食・堆積の繰返し作用を受けて大きく変動した. 一方、サクシオン動態効果有りの場合(図-5(b))には、バー地形の挙動は一変した. すなわち、侵食・堆積による地形変動は顕著に抑制され、バー高さは変動しつつも、バー位置は同じに留まった.

これらの結果は、漂砂・地形変動に及ぼすサクシオン動態効果を簡明に考慮することによって、土砂移動限界を優に上回るような波・流れ外力を受ける干潟バー地形の動的安定性をよく説明できることを実証している.

ここで、このような土砂内部の物理動態の効果は、地形勾配、岸沖距離ならびに土砂粒度等の様々な要因によって変化しうることを記しておく必要がある. その一例として、岸沖多段バー動態の解析結果を図-6に示す.

多段バーは、サクシオン動態の効果が生ずる外力に対して相対的に弱くなる沖側に向かって、次第に動的な挙動に遷移していることがわかる. 実際、沖側フロントでは、新たなバーの生成・移動・発達・減衰という一連

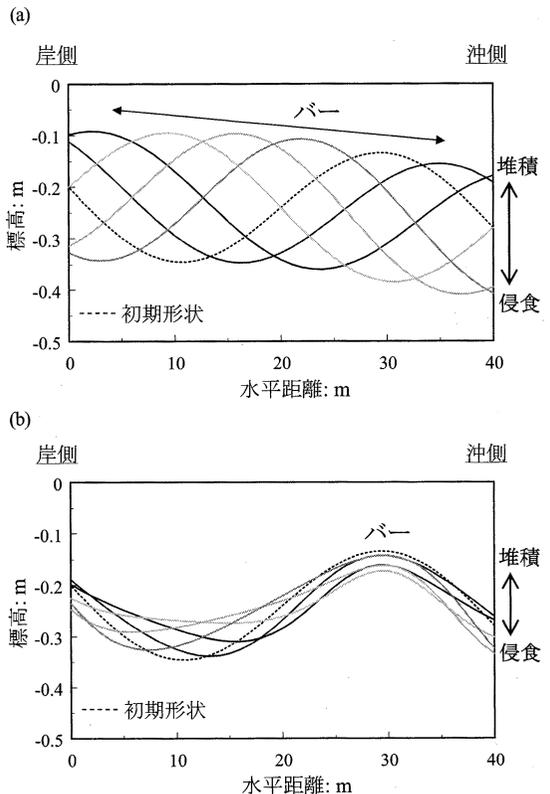


図-5 干潟バー地形動態の解析結果：(a)サクシオン動態効果無し；(b)サクシオン動態効果有り.

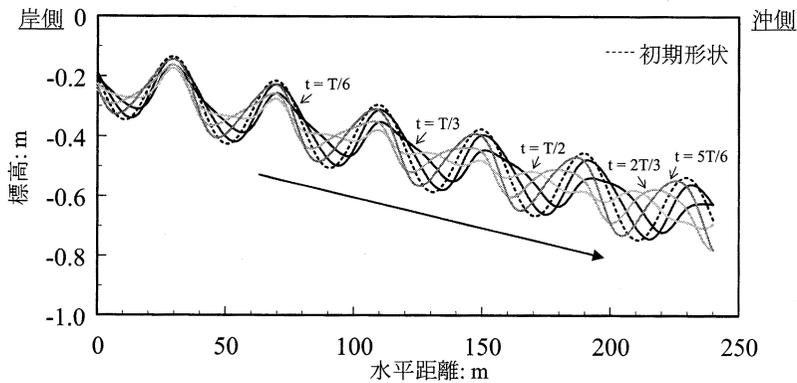


図-6 多段バー地形動態の解析結果：サクシオン動態効果有り。

の地形過程 ( $t=T/6, T/3, T/2, 2T/3, 5T/6$ ) を確認することができる。以上の解析結果は、上述の現場で経年的に観測されてきたバー地形動態の特徴ともよく整合するものである。

また、土砂粒度の粗さやバー高さの増大から、地下水位が保水性を満足する限界地下水位よりも深くなり土砂が不飽和になる場合 (佐々ら, 2007; 渡部ら, 2007) には、上述のようなサクシオン動態効果は相対的に弱まり、バー地形の動的変化が助長されると考えられる。

結局、以上の結果と考察は、潮間帯バーの動態予測には、土砂上に作用する水理動態とともに土砂内部の動態効果を適切に考慮することが本質的に重要となることを強く示している。

#### 4. まとめ

干潟バー地形の動的安定機構の解明を目的として、筆者らの近年の知見を踏まえて、潮間帯の土砂物理と地形場の関係を再整理し、これを考慮した理論モデル化/解析を行った。その結果、干出中に生じた土砂内部の物理過程が、冠水中のバーの不安定挙動を誘起するレベルの十分大きな水理外力の下で、バーの“粘り”を生む甚大な影響をもたらしていることを見出した。すなわち、従来、謎とされ未解明であった潮間帯バーの動的安定性が、土砂内部のサクシオン動態効果と漂砂・地形変化のフィードバックによって現れることを明らかにした。

本研究で得られた知見は、周期的な干出イベントを経験する河口・沿岸域のバー地形に共通して適用しうるものである。それゆえ、本知見は、専ら土砂上の水理動態に依存した現行の漂砂概念を変更するのみでなく、来襲する波・流れ外力に対して動的に安定することが強く要請される生物生息基盤のバリア地形デザインに有効に資

することが期待できる。

#### 参考文献

- 佐々真志・渡部要一・石井嘉一 (2007): 干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明, 海岸工学論文集, 54巻, pp.1151-1155.
- 古川恵太・藤野智亮・三好英一・桑江朝比呂・野村宗弘・萩本幸将・細川恭史 (2000): 干潟の地形変化に関する現地観測—盤洲干潟と西浦造成干潟—, 港湾技研資料, No. 965, pp.1-30.
- 渡部要一・佐々真志・河野研二 (2007): 岸沖・沿岸両方向に発達した干潟多段バー・トラフの堆積構造とその形成要因, 海岸工学論文集, 54巻, pp.1166-1170.
- Hoefel, F. and S. Elgar (2003): Wave-induced sediment transport and sandbar migration, *Science*, Vol.299, pp.1885-1887.
- Hsu, T.-J. and D. M. Hanes (2004): Effects of wave shape on sheet flow sediment transport, *Journal of Geophysical Research*, Vol.109, C05025, doi:10.1029/2003JC002075.
- Masselink, G., A. Kroon and R. G. D. Davidson-Arnott (2006): Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings? A review, *Geomorphology*, Vol.73, pp.33-49.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol.4, World Scientific, 324p.
- Ruessink, B. G., Y. Kuriyama, A. J. H. M. Reniers, J. A. Roelvink and D. J. R. Walstra (2007): Modeling cross-shore sandbar behavior on the time scale of weeks, *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, F03010, doi:10.1029/2006JF000730.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.
- Uchiyama, Y. (2007): Hydrodynamics and associated morphological variations on an estuarine intertidal sand-flat. *Journal of Coastal Research*, Vol.23, No.4, pp.1015-1027.
- Watabe, Y. and S. Sassa (2008): Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation. *Marine Geology*, Vol.252/3-4, pp.79-88, doi:10.1016/j.margeo.2008.03.007.
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2007): Intertidal multiple sand bars in a low-energy environment, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.133, No.5, pp.343-351.