多段バーの安定機構に関する底質の サクシオン動態・密度・せん断強度の時空間変化

Spatiotemporal Variations of Suction Dynamics, Density, and Shear Strength Relating to Morphological Stability on Multiple Sand-bars

白水 元¹・佐々真志²・宮武 誠³・外村隆臣⁴・中條壮大⁵・山田文彦⁶

Hajime SHIROZU, Shinji SASSA, Makoto MIYATAKE, Takaomi HOKAMURA
Sota NAKAJO, and Fumihiko YAMADA

The morphology and suction dynamics of intertidal multiple sand bars is examined to provide insight into the factors controlling the bar characteristics. Field experiments over the intertidal sand waves show that the vane shear strength near sediment surface increases with suction behavior. Richards equation which expressed suction and ground water dynamics were used in numerical model. The laboratory experiment which imitates the ebb and flow upon sandy flats was used for validation of proposed model. In numerical experiment of tide-dominated conditions which mean quite small bedload effects, morphological changes show close relationships with suction dynamics due to suction-induced void state changes.

1. はじめに

近年の沿岸域の防災問題は、異常気象や地球温暖化による海面上昇、津波などの影響により、沿岸付近に生活する人々の安全を脅かす問題としてクローズアップされてきた。また、豊かな生態環境としての側面から、持続可能な沿岸環境についての議論も活発である。日本においては、その国土を海で囲まれており、これまであらゆる沿岸災害に直面したという経緯がある。さらに、漁業などの産業と密接に関わる沿岸生態系への関心も高く、干潟や砂浜などの海岸を保全し沿岸環境を管理することは重要な課題と捉えられている。このような沿岸環境に対する社会的な要求に応えるにあたり、計画の前段階として海浜地形の中・長期的な変化を予測し精度良く評価する必要がある。

海浜変形予測モデルはプロセスベースドモデルを中心にこれまでにも多くの研究がなされてきたが、潮間帯に広がる多段バー地形の安定性については十分に説明できない (Masselinkら, 2006, Sassa・Watabe, 2009)。これは、底質の間隙率やかさ密度の時空間変化とそれによる底質の力学特性の変化が未解明のためである。

Sassa・Watabe (2007) は、底質中のサクシオン (負の間隙水圧) の発達・消散の繰り返し (サクシオン動態) の結果、底質は弾塑性的に収縮し、せん断強度が増加す

ることを示した。サクシオン動態により底質移動のパラメータである移動限界せん断応力が増加すると考えられるが、その理論的・実験的検証は不足している (Turner・Nielsen, 1997)。そこで本研究では、研究の初段階として、サクシオン動態による底質密度増加効果について現地調査を実施するとともに、数値モデルを用いて底質のサクシオンの時空間変動と地形変化との関係について検討した。

2. 現地観測・調査

熊本県宇土市御奥来海岸は、有明海湾口部に近い宇土半島北部に位置し、一級河川の緑川河口部より約7.5km南西に在り、熊本県に存在する干潟の南端にあたる。底質は阿蘇火山起源の黒色の砂泥質堆積物からなる。御奥来海岸は潮間帯干潟であり、干潮時には沖合1 km程度まで多段バーが現れる。多段バーは岸側に対し凸形形状を示し、10列以上存在している。この多段バーの形状は周年変化も小さく、非常に安定的に存在している (山田ら, 2005, Yamada・Kobayashi, 2007)。

2010年6月14～15日の干潮時に御奥来海岸で地盤高、地下水位、表面土砂 (表面から-0.02m) の間隙水圧の測定、底質のサンプリングの調査、およびベーン試験を行った。図-1 a) は地盤高の岸沖分布と地下水面の分布を示したものである。クレストではトラフと比較すると地下水面が深い位置にあり、干潮時においても冠水の状態を保つ。したがって、サクシオンの発達はクレストで著しく、トラフではほとんど見受けられないことになるが、間隙水圧の分布を示す図-1 b) でもこのことが確認できる。なお、b)～d) 図では標高から平均断面を差し

1 正会員 修(工) 熊本大学大学院 自然科学研究科
2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤研究領域
3 正会員 博(工) 函館工業高専 准教授 社会基盤工学科
4 正会員 熊本大学工学部技術部
5 正会員 博(工) 熊本大学大学院 助教 自然科学研究科
6 正会員 博(工) 自然科学研究科 熊本大学大学院 教授

図-1 バーの分布と干潮時の地下水面、間隙水圧、相対密度およびベーンせん断強度の比較

引いた偏差でバー形状を示す。

粒度分析の結果、クレスト（凸部）では含泥率が10%以下となっており平均粒径は0.33 mmと大きくなるが、トラフ（凹部）では含泥率20%以上、平均粒径は0.2 mmであった。また、間隙構造に関する考察を行うため相対密度 D_r を用いて、その岸沖分布をプロットした（図-1 c）。一般的にその値が40%未満であると緩詰め、60%以上であると密詰めと判断される。地下水位変動の影響を受け、干出時にサクシオンが発達するクレストでは底質密度増加効果の影響が強く現れ、相対密度が平均66.6%と非常に密である。一方で干潮時も冠水した状態にあるトラフでは平均19.8%の緩詰めである。

ベーン試験は現地で直接地盤のせん断強さを求める試験である。試験器は、ロッドの下端に4枚のブレードが十字状に配置されたもので、それぞれのブレードは全幅4 cm、高さ1 cmである。底質表層のせん断強度に着目するため、ベーンの上端が露出した状態で頂部にトルクを与えて回転させたときの地盤の抵抗を測定した。ベーンせん断強度の岸沖分布をプロットしたものが図-1 d)である。トラフでの値と比較すると、より強いサクシオン

図-2 干潮時間隙水圧とベーンせん断強度の相関関係

図-3 干潮時間隙水圧と相対密度の相関関係

動態を受けて底質が密になっているクレストではバーンせん断強度も強くなっている。

間隙水圧とバーンせん断強度の関係を調べると、サクシオンを強く受けるほど底質の表面せん断強度は高くなり、正の相関性 ($R^2=0.94$) が確認できる (図-2)。また、間隙水圧と相対密度の関係性についても調べると、サクシオンを強く受けるほど底質の相対密度も高くなり、正の相関性 ($R^2=0.84$) が確認できる (図-3)。これらの結果は、干出時経験するサクシオンの大きさに応じて線形にかさ密度と強度が変化することを示している。1 潮汐でのサクシオン動態は僅かなものであるが、これが周期的に起こり、底質密度増加効果を繰り返し受けることによってバーのクレストは波浪の擾乱に対して強い抵抗を示す間隙構造を獲得し、多段バーの平面形状の維持に貢献していると考えられる。このように、御興来海岸の多段バー地形の観測調査結果はSassa・Watabe (2007) の盤州干潟での観測結果とも良く対応し、サクシオン動態による底質密度増加効果が確認できる結果である。

3. 数値モデルによる検証

前章では、潮汐が卓越するような干潟でのサクシオン動態による土砂の間隙構造変化を確認することができたが、そのサクシオンの空間的な分布との対応や、経時変化は把握できない。そこでSassa・Watabe (2007) の干潟模型実験の再現計算を行い、潮汐作用による地下水位変動下の間隙水圧の挙動と間隙状態変化による地表面形状変化を時空間的に把握する。そして、潮汐が卓越する状況下でのサクシオン動態による底質密度増加効果が地形変化に与える影響について検討を行う。

(1) 数値モデルの構成

モデルの構成としては、非線形浅水方程式を用いた表層流動部とRichards方程式の地下流動部からなっており、冠水時は水深を底質上面境界での圧力水頭として受け渡し (越智ら, 2011; 宮武ら, 2013)。Sassa・Watabe (2007) が提案した間隙比の時間変化を考慮した鉛直2次元Richards方程式で検討を行う。表層流動部の基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial(h+e_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \nu_T \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial(h+e_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \nu_T \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h は水深、 U 、 V は x 、 y 方向の断面平均流速、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス、 e_b は基準面から地盤までの高さ、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数、 ν_T は渦動粘性係数を表す。

地下流動部の鉛直2次元のRichards方程式は潮汐作用下の干出・冠水の両期間中において、a) 干潟土砂は飽和状態を維持する、b) サクシオンによる土骨格の弾塑性変形は任意の地点において1次元 (鉛直方向) に発生する、c) 間隙水圧は正である間は土骨格の変形が生じないと仮定した上で問題を簡略化している (Sassa・Watabe, 2007)。その上で、繰り返し干出・冠水する土砂内部の間隙水の流動および弾塑性変形の連成過程に関する質量保存則を考慮し、

$$\frac{\partial p(x, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{A_s} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_w}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_w}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial z} + k_w \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A^{ep} = \frac{\lambda_s}{p + p_r} \exp \left[\left(\frac{e}{e_0} - 1 \right) \xi \right] \quad (\dot{p} < 0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$A^{ep} = \frac{\kappa_s}{p + p_r} \exp \left[\left(\frac{e}{e_0} - 1 \right) \xi \right] \quad (\dot{p} > 0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 λ_s は土の弾塑性圧縮係数、 κ_s は弾性圧縮係数、 p_r は参照サクシオン (負圧) で、 ξ は材料パラメータである。

間隙水圧の変化は間隙の状態変化をもたらす、

$$\dot{e} = -(1+e)A_s^{ep} \dot{p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

ここで、地表鉛直変位の時間変化率は以下のように定義される。

$$\dot{H}(x, t) = \int_0^H \frac{\dot{e}}{1+e} dz \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、透水係数 k_w は間隙状態 e に依存し、砂質土について代表的なTaylorの式から

$$k_w = k_r \frac{e^3}{1+e} \quad \dots\dots\dots (9)$$

というような関係を用いる。ここで k_r は参照透水係数であり、このモデルでは飽和透水係数を参照している。

計算は等間隔の矩形格子 (2 cm) を用い、差分法を用

図-4 干潟模型実験概要

図-5 干潟模型実験と再現計算での地下水位比較

いている。時間ステップは1/1000 sである。Richards方程式のモデルで用いるパラメータについてはSassa・Watabe (2007) に従った。

(2) 実験の概要

再現する干潟模型実験は、新たに堆積した干潟土砂が1日2回の潮汐作用を受けることで生じる土砂挙動を把握するよう設計されている。水槽中に多孔質鋼版で仕切られた模型地盤が設けられ、両側を貯水タンクとしている(図-4)。用いる土の中央粒径 D_{50} は0.3mmで $D<0.075$ mmの細粒分を17%含む。地盤の初期間隙比は1.1である。模型地盤の片側を沖側とし、12時間周期の三角波状の水位・地下水位変動を入力した。これは初期地盤の表面を基準に、冠水高0.1mから地下-0.45mとなる0.55mの水位・地下水位変化で、6時間の引き潮と6時間の上げ潮の過程に対応する。

(3) 再現結果と考察

図-5は1周期12時間の地下水位変動の実験値・計算値を示したものである。破線でプロットした沖側入力水位に対し、実線で示した岸側水位の実験値はピークの位相遅れが確認される。鎖線で示す計算値でもこれがよく再現出来ている。地下水位の時間勾配についても計算値は実験値を精度よく再現しており、モデルは地下水動態を再現可能であることが確認できた。

図-6に地盤中の間隙水圧の時空間変化の計算結果を示す。図中の着色部分がサクションの発生領域である。時

図-6 1潮汐間の間隙水圧分布の時空間変動

図-7 1潮汐間の間隙水圧の累積値の空間分布

図-8 地表鉛直変位の実験値と計算値との比較

間経過に従って、表層付近からサクシジョンの発達する領域が岸沖方向に変動することが確認できる。入射境界側(沖)の地下水位が等しい2時間目と8時間目、および4時間目と8時間目を比較すると、地下水位の位相遅れに対応してサクシジョンの分布が変動しることが確認できる。このようなサクシジョンの時空間変動が底質変化や空隙構造にどのような影響を与えるか調べるために、1潮汐間の空隙水圧の累積値の空間分布を求めた結果を図-7に示す。図中の着色部分が1潮汐間でサクシジョンが残存する領域であり、色が濃くなるにつれて大きな値を示す。サクシジョンの残存領域は沖側に向かうほど、より深くまで存在し、空隙収縮は沖側でより強く生じることが分かり、これが底質の空隙構造や岸沖方向の地形変化に影響を与える。図-8は式(8)により算定したサクシジョンに伴う空隙構造の収縮を考慮した地形変化も計算結果と実測値を比較した結果である。沖側の鉛直変位の実験値(細い破線)は、岸側の実験値(細い実線)よりも変動が大きく、サクシジョン動態の影響が反映された結果を示すことが確認できる。さらに変位の大きさもより深層までサクシジョンによる空隙収縮の効果が現れる沖側が岸側よりも著しい。モデルによる計算においても、沖側の鉛直変位(太い鎖線)と岸側の鉛直変位(太い実線)は実験と同様に位相遅れや挙動を定量的にも再現している。

4. 結論

現地観測・調査では、日頃から繰り返し経験するサクシジョン動態の大きさに応じて底質のかさ密度・強度が変化していることを確認した。また数値モデルによる検証では、潮汐作用による地下水位変動下のサクシジョンの時空間変動を求め、これに応じた空隙の変化から地形変化を仮定すると、実験とよく対応する結果が得られた。

しかしながら、現状のモデルでは水頭を介して外部流

体と接続しており、浸透・流出についての考察は行っていない。さらに、swash zoneにおけるサクシジョン動態についてもその底質空隙変化に与える影響を考察する余地はあるが、より動的な外部流体と底質の相互作用が存在するため、今後は浸透・流出の過程についても検討を重ねる予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費の補助を受けて実施された。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 越智聖志・宮武 誠・木村克俊(2011): 段波の遡上に伴う前浜浸透流の流動特性, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 67, No.2, pp.I_111 - I_115.
- 宮武 誠・阿部翔太・木村克俊・越智聖志(2013): 底質粒径による飽和・不飽和浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学) 69, No.2, pp. I_076-I_080.
- 山田文彦・上原和朗・中道 誠・外村隆臣・由比政年・小林信久(2005): 潮間帯に発達するMultiple Sand Barsの発生確率と季節変動特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.496-500.
- Masselink, G., A. Kroon, and R. G. D. Davidson-Arnott (2006): Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings? A review, *Geomorphology*, 73, 33-49.
- Sassa, S., and Watabe, Y.(2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *J. Geophys. Res.*, 122, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.
- Sassa, S., and Watabe, Y. (2009): Persistent sand bars explained by geodynamic effects, *Geophysical research letters*, vol.36, L01404, doi: 10.1029/2008GL036230.
- Turner, I. L., Nielsen, P. (1997): Rapid water table fluctuations within the beach face: Implications for swash zone sediment mobility?, *Coastal Eng.*, 32, pp. 45-59.
- Yamada, F., and N. Kobayashi (2007): Intertidal multiple sand bars in a low-energy environment, *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, 133, pp. 343-351.