潮間帯干潟上の岸沖方向の底質輸送特性とその輸送概念モデルの提案

Conceptual Model for Cross-shore Sediment Transport due to Tides and Waves over Intertidal Flat

山田文彦¹・坂西由弘²・白川雄一郎³・穴井広和³・外村隆臣⁴・小林信久⁵

Fumihiko YAMADA, Yoshihiro SAKANISHI, Yuichiro SHIRAKAWA,
Hirokazu ANAI, Takaomi HOKAMURA, and Nobuhisa KOBAYASHI

Conceptual model for geomorphology and sediment transport due to tides and waves over intertidal mudflat has been proposed based on the field measurements of water depth, flow velocity and suspended sediment concentration from July 2004 to January 2008. Suspended-load flux and bed-load ability are expressed relative to the ratio of significant wave height to water depth. The maintenance mechanism for typical convex-upward profile over intertidal mudflat can be explained by the bed-load superiority for suspended-load using the conceptual model.

1. はじめに

潮間帯干潟上の底質輸送（浮遊輸送と掃流輸送）は、種々の外力変動の影響を受け、その輸送メカニズムの詳細は未解明である。Green ら（1997）、Christie ら（1999）は浮遊輸送に対する波浪と潮汐およびそれらの相互作用の重要性を指摘したが、定量的な評価手法は示していない。山田ら（2007）、Yamada ら（2008）は、潮間帯上での平均的な浮遊輸送に対する波浪と潮汐の影響を分離して評価する潮汐位相平均手法を提案した。潮間帯で観測される濁度の主な発生要因は、平常時には潮汐による移流成分、高波浪時には局所的な巻き上げ成分であることを3年間の観測データより示したが、波浪と潮汐の相対的な重要度を支配するパラメータについては検討していない。

一方、掃流輸送に対しては現地での直接的な計測手法が確立されておらず、Bailard（1981）による流速の3次モーメントを用いた評価手法が広く用いられている。Russell・Huntley（1999）は、無次元化した流速の3次モーメントと局所水深を碎波水深で除した無次元水深との間には場所によらず普遍的な関係が存在することを示し、これを掃流輸送能力を表す“Shape function”として定義した。しかし、計測点は1点のみであり、掃流輸送能

力の岸沖分布については検討していない。また、現地では碎波点や碎波水深の明確な定義は困難であり、波浪と潮汐の相対的な重要度を支配するパラメータとして碎波水深を用いた無次元化は適切ではない。

近年、潮間帯上の Bar 地形の変動特性に及ぼす波浪・潮汐の影響度に関して、その相対的な重要度を支配するパラメータとして相対波高 $H_s/\bar{h}$ （ $\bar{h}$ は局所水深、 H_s はその場所の有義波高）が用いられている（Aagaard ら、2006；Masselink ら、2006）。Van Rijn（2007）も波・流れ共存場での掃流輸送に対して、相対波高をパラメータとして波と流れの相対的な重要度を検討した。しかし、潮間帯上での浮遊・掃流輸送能力と相対波高の関係およびその能力の岸沖分布に関する検討は行われていない。

そこで本研究では、浮遊フラックスと底面流速の3次モーメントを用いて浮遊・掃流輸送能力を算定し、それらと相対波高 $H_s/\bar{h}$ の関係について調べた。また、底質輸送に及ぼす波浪と潮汐の影響を岸沖方向3点で評価し、岸沖分布特性を検討することで、潮間帯上での岸沖方向の底質輸送の概念モデルについて考察した。

2. 現地観測

観測は図-1に示す熊本県白川河口域の潮間帯干潟上で実施した。対象領域には6本の観測ラインを設置しており、左岸 L ラインと右岸 R3ラインは2000年12月から、右岸 R3以外の4ラインは2004年5月から毎月干潟地盤高の現地観測を実施し、現在も継続中である。

水位・流速（水平2成分）・濁度・塩分の計測機器は R2ライン上の堤防から沖に約400m の A 点（中部潮間帯の上部）、約1,040m の B 点（中部潮間帯の下部）および約1,520m の C 点（下部潮間帯）の3ヶ所に設置した。観測は B 点では2004年7月から開始し、約1400潮汐分の時

1 正 会 員	博(工)	熊本大学教授 大学院自然科学研究科
2 正 会 員	修(工)	鹿島建設(株) 土木設計本部
3 学生会員		熊本大学大学院 自然科学研究科
4 正 会 員		熊本大学工学部 技術部
5 非 会 員	Ph.D	デラウェア大学教授 応用海岸研究センター

系列を取得した。またA点では、2005年10月～2006年9月まで、C点においては2006年10月より同様の計測を実施し、それぞれ451潮汐、291潮汐分の時系列を取得した。計測手法の詳細は山田ら(2007)と同様である。

図-1 現地観測場所(白川河口域)

3. 掃流輸送による底質輸送特性

本研究では Russell・Huntley (1999) と同様に流速 u の3次モーメントを用いて掃流輸送能力を評価するが、岸沖方向3ヶ所の計測点の結果を直接比較するために、3ヶ所すべてのデータ内の最大値 $\langle u^3 \rangle_{\max}$ で除した無次元掃流輸送能力を用いる。ここで、 $\langle \rangle$ は時間平均を示す。また、波浪と潮汐の相対的な重要度を示す指標として相対波高 $H_s/\bar{h}$ を用い、相対波高に対する掃流輸送能力を岸沖方向に比較し、検討を行う。

図-2(a)は、B地点における全観測期間中の有義波高の発生確率及び累積確率を示す。図より、有義波高10cm未満のデータが全体の約8割を占め、潮位差(約3.9m)に比較して波高は十分に小さい。(b)図は、B地点の局所水深 $\bar{h}$ と同時刻同点での有義波高 H_s の関係を示したものである。潮間帯上の有義波高は $H_s/\bar{h} = 0.5$ を発達限界として分布し、さらに、全データの9割以上が $H_s/\bar{h} = 0.2$ よりも小さい範囲に存在する。また図は示していないが、この傾向は他の2地点(A, C点)でも同様である。つまり、対象干潟上の波浪変形に関しては、局所水深に規定された飽和状態が存在することを示している。外洋に面した砂浜海岸では、沿岸部での波浪の発達局所水深に規定された飽和状態 ($H_s/\bar{h} \leq 0.6$) が存在する事が知られている (Thornton・Guza, 1982)。干潟上において

図-2 潮間帯上の波浪変形特性 (B地点)

も同様に Le Hir ら (2000) が、波浪の飽和状態 ($H_s/\bar{h} \leq 0.2$) が存在する事を報告している。砂浜に比較して干潟上での波浪の発達が抑えられるメカニズムについて Le Hir ら (2000) は、底面摩擦の重要性を指摘したが、詳細は未解明である (例えば, Kim, 2003; Green・Coco, 2007)。

図-3の上段は、A・B地点における相対波高に対する無次元掃流輸送能力 $\langle u^3 \rangle / \langle u^3 \rangle_{\max}$ の発生確率を、また下段は、無次元掃流輸送能力の大きさと相対波高との関係を示したものである。C地点の結果は示していないが、3地点ともに無次元掃流輸送能力は相対波高が0.2以下の範囲に9割以上が分布している。これは、潮汐が卓越した平常的な外力変動下での掃流輸送能力に対応すると解釈できる。また、一見B地点のパラッキが大きいように感じられるが、これは観測期間や水没時間の相違により各地点の取得データ数が異なる事が主要因である。(データ数はA地点: 21,238個, B地点: 118,188個, C地点: 42,298個)。そこで、相対波高の区間0.025毎に平均化し、相対波高に対する無次元掃流輸送能力の平均値を求めた (図-4)。図より、平均化した無次元掃流輸送能力は、相対波高が0～0.2の範囲では非常に小さいが、0.2付近から徐々に増大する傾向を示す。この理由としては Masselink ら (2006) が示したように、掃流輸送に及ぼす外力の主要因が潮汐から波浪に移行するためと考えられる。

図-3 無次元掃流輸送能力の発生確率と相対波高との関係

図-4 無次元掃流輸送能力の平均値の岸沖分布特性

そこで、掃流輸送能力に及ぼす波浪と潮汐（流れ）の寄与率を定量的に評価するため、観測された流速 u を(1)式のように3成分に分解できると仮定する。そうすると、流速の3次モーメント $\langle u^3 \rangle$ は、(2)式のように10項の線形和として表現できる (Russell・Huntley, 1999)。

$$u = \bar{u} + u_s + u_L \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \langle u^3 \rangle = & \bar{u}^3 + \langle u_s^3 \rangle + \langle u_L^3 \rangle + 3\langle u_s^2 \bar{u} \rangle + 3\langle u_L^2 \bar{u} \rangle + 6\langle u_s u_L \bar{u} \rangle + 3\langle u_s^2 u_L \rangle \\ & + 3\langle u_s u_L^2 \rangle + 3\langle u_s \bar{u}^2 \rangle + 3\langle u_L \bar{u}^2 \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}$ は平均流速（潮汐）成分、 u_s は短周期波成分、 u_L は長周期波成分を示す。実際の解析では、流速データを潮汐成分と波浪成分とに分離するため、水没時間内での観測データを約8.5分（データ長2⁰個）ごとに最小二乗法を用いて直線近似により潮汐成分を定義した。また、波浪成分は観測値から潮汐成分を差し引いた残差として定義した。波浪成分に対してスペクトル解析を適用し、周期1～20 secの成分を短周期波成分、周期20～400 secの成分を長周期波成分として分離した。

図-5は、B地点での掃流輸送能力を表す流速の3次モーメントに対して、有意な寄与率を示した式(2)右辺の各項を示している。検討の結果、右辺第2項の短周期波成分 $\langle u_s^3 \rangle$ 、第4項の短周期波と潮汐流の相関項 $3\langle u_s^2 \bar{u} \rangle$ 、および第8項の短周期波と長周期波の相関項 $3\langle u_s^2 u_L \rangle$ の3つの項の寄与が大きいことが分かった。また、A・C地点でも同様の結果であった。以上の結果は、潮間帯上での掃流輸送をモデル化する上で、波と流れの相関項および短周期波と長周期波の相関項を精度良く評価する必要があることを示すものである。

図-5 掃流輸送能力に及ぼす波浪、潮汐および相関項の寄与

4. 浮遊輸送による底質輸送特性

相対波高に対する掃流輸送能力と浮遊フラックスの空間分布特性を比較するため、浮遊フラックスの相対波高に対する分布および、相対波高の区間0.025毎に平均化した浮遊フラックスを検討した。

図-6は、A・B地点の相対波高に対する浮遊フラックスの発生確率（上段）及び浮遊フラックスの相対波高に対する分布（下段）を示している。両地点とも相対波高が0.2以下の範囲に9割以上のフラックスが分布しており、浮遊フラックスの変動は小さいことが確認できる。この傾向はC地点でも同様である。図-7は、掃流輸送特性と同様に、相対波高の区間毎に平均化した浮遊フラックスを示している。図より、A点では相対波高が0.2を超え、波浪の影響が強くなると、岸向きの浮遊輸送が卓越するのに対し、B・C地点では沖向きの輸送が卓越している。また、B・C地点を比較するとB地点の方がより沖向きの輸送傾向を示すことが分かった。

図-6 浮遊フラックスと相対波高の関係

図-7 浮遊フラックスの岸沖分布特性

次に、浮遊フラックスに対する移流成分と巻き上げ成分の相対的な重要性について検討する。Pritchard (2005)は、粘性底質の浮遊輸送における Settling lag, 移流成分、および巻き上げ成分の相対的な重要性について理論解析により考察を行ったが、現地観測結果との比較は行っていない。本研究では、移流拡散方程式(3)式に基づき以下のような手順で検討を行った。(3)式の左辺第1項は観測結果より直接求めることが出来る。右辺第1項の巻

き上げフラックスは、Kobayashi ら (2007) のモデル(5)式と観測値を組み合わせる評価する。このモデルは砂質を対象としているが、本干潟のような砂泥質にも適用できるものと仮定して使用する。右辺第2項の沈降フラックスは、濁度の観測値を用いて(6)式で算定する。沈降速度は Mehta (1989) を参考に決定した。これらの結果より、(3)式を変形した(7)式を用いて、移流拡散項を右辺の差分として推定する。

$$\frac{\partial(\bar{h}\bar{c})}{\partial t} + A_c = P - Q \quad (3)$$

$$A_c = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{h}\bar{c}u - k_x \bar{h} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{h}\bar{c}v - k_y \bar{h} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$P = \rho_s \frac{e_B D_B + e_f D_f}{\rho(s-1)\bar{h}} P_s \quad (5)$$

$$Q = w_s \bar{c} \quad (6)$$

$$A_c = P - Q - \frac{\partial(\bar{h}\bar{c})}{\partial t} \quad (7)$$

ここで、 k_x 、 k_y は拡散係数、 w_s は沈降速度、 ρ は海水密度、および ρ_s は底質密度、 e_B 、 e_f は砕波・底面摩擦によるエネルギー効率係数、 D_B 、 D_f は砕波・底面摩擦によるエネルギー散逸である。

検討には2005年冬季の高波浪時のB地点における1潮汐分の観測データの時系列および位相平均で求めた平常時の時系列を用いた。B地点を計算対象に選定した理由は、ここが最も長期間の観測を行っているためである。観測値と Kobayashi ら (2007) のモデルとを比較し、砕波・底面摩擦によるエネルギー効率係数 e_B 、 e_f を調整した結果、1潮汐間の巻き上げ量を相対誤差25%以内で再現できることを確認した。

図-8 巻き上げ・移流拡散項の時間変化の推定結果 (B地点 平常時・高波浪時)

図-8に、平常時と高波浪時の巻き上げフラックス P 、および移流拡散項 A_c の時系列の比較結果を示す。上段の図より、巻き上げフラックスは、高波浪時に平常の数倍～数十倍に増大し、潮間帯干潟においても底質の巻き上げが増大する。下段の図は、移流拡散項の時間変化を示し、平常時より高波浪時の方が移流拡散項の絶対値は大きくなり、巻き上げフラックスと同様の傾向を示す。ここで重要な点は、平常時・高波浪時ともに移流拡散項が巻き上げフラックスよりもそれぞれ1オーダー程度大きな値を示すことである。この結果は、底質輸送プロセスのモデル化に際して、移流拡散項の評価がより重要となることを示しており、Pritchard (2005) の結果と一致する。

5. 底質輸送概念モデル

A～C地点において求めた無次元掃流輸送能力、浮遊フラックスは、観測点上の値であることから、実際の地形の特徴と比較するために、A～B間、B～C間でのそれぞれの勾配を差分として評価した。図-9は、掃流輸送能力および浮遊フラックスの岸沖方向の差分値と相対波高の関係を示す。ここで、区間中における底質輸送方向は正值が岸向き (B→A, C→B)、負値が沖向き (A→B, B→C) の輸送を表している。(a)図より、相対波高が0.2以上の波浪が卓越する場合、掃流輸送能力はA～B間では沖側のB地点へ、B～C間では岸側のB地点側に向かうが、相対波高が0.4付近からその傾向は逆転し、A～B間では岸側のA地点へ、B～C間では沖側のC地点側へ輸送される。(b)図より、相対波高が0.2以上の範囲においてA～B間、B～C間での浮遊フラックスは0.2以下の輸送に比べ1～2オーダー程大きくなり、波浪が卓越する場合、浮遊フラックスはA～B間では沖側のB地点側へ、B～C間では岸側のB地点側へ輸送される傾向を示す。

図-9 浮遊フラックスおよび無次元掃流輸送能力の岸沖方向差分と相対波高の関係

掃流輸送能力の差分値を基に、相対波高を0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.8の3つの区間に分類し、浮遊・掃流による底質輸送の概念モデルについて考察した。

図-10 底質輸送の概念モデル ($0 \leq H_s/\bar{h} \leq 0.2$)

図-10は、流れ（潮汐）が卓越する ($0 \leq H_s \bar{h} \leq 0.2$) の場合の概念モデルを示している。図中の白矢印は浮遊フラックス、黒矢印は無次元掃流輸送能力の差分値を示しており、ベクトルの長さは、浮遊フラックス、無次元掃流輸送能力の差分値の大きさを模式的に示している。 $0 \leq H_s \bar{h} \leq 0.2$ の範囲には全体の9割以上のデータが存在することから、平常時の底質輸送では、A～C間の浮遊輸送は、浮遊フラックスは中部潮間帯のB点付近から発散する傾向を示し、逆に掃流輸送はB点付近に収束する傾向を示す。現段階では、浮遊と掃流による底質輸送量を直接比較することは出来ないが、干潟地形がB点付近を中心に上に凸な岸沖断面形状を維持していることから、平常時は掃流移動による底質輸送が地形の形成に寄与しているものと考えられる。また、流れ（潮汐）から波へと外力の卓越状態が推移した場合 ($0.2 \leq H_s \bar{h} \leq 0.4$) の底質輸送は、浮遊・掃流共に中部潮間帯に収束する傾向が見られる。 $0.4 < H_s \bar{h} \leq 0.48$ の波浪が非常に卓越した場合は、浮遊移動では、中部潮間帯のB点に収束し、掃流移動では、中部潮間帯のB点から発散する傾向を示した。

6. 結論

潮間帯干潟において、3年以上の現地観測の結果から、底質輸送プロセスに及ぼす潮汐・波浪の影響などについて検討した。その結果、潮間帯上の底質輸送特性において、相対波高 $H_s/\bar{h}=0.2$ 付近に波・流れの卓越性の閾値が存在し、相対波高の増大と共に底質輸送への波浪のインパクトも1オーダー程度増大することが分かった。また、底質輸送の概念モデルを提案し、白川河口干潟の干潟地形の上に凸な岸沖断面形状は、平常時の掃流移動に

よる中部潮間帯へ収束する底質輸送，特に掃流輸送によって維持されている可能性が示唆された。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費・水産基盤整備調査委託事業・鹿島学術振興財団研究助成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

- 山田文彦, 坂西由弘, 山口龍太, 蒲原さやか, 穴井広和, 小林信久, 玉置昭夫, 多田彰秀 (2007) : 潮汐位相平均を用いた潮間帯上の底質輸送フラックスの時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 626-630.
- Aagaard, T., Huges, M., Møller-Sørensen, R., and Andersen, S. (2006) : Hydrodynamics and sediment fluxes across an on-shore migrating intertidal bar, *J. of Coastal Research*, 22, pp. 247-259.
- Bailard, J. A. (1981) : An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, *Journal of Geophysical Research*, 86(C11), pp.10938-10954.
- Christie, M. C., K. R. Dyer, and P. Turner (1999) : Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, pp. 667-688.
- Green, M. O, K. P. Black and C. L. Amos (1997) : Control of estuarine sediment dynamics by interactions between currents and waves at several scales, *Marine Geology*, 144, pp. 97-116.
- Green, M. O. and Coco, G. (2007) : Sediment transport on an estuarine intertidal flat : measurements and conceptual model of waves, rainfall and exchanges with a tidal creek, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72, pp. 553-569.
- Kim, B. O. (2003) : Tidal modulation of storm waves on a macrotidal flat in the Yellow Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, pp. 411-420.
- Kobayashi, N., A. Agarwal, and B. D. Johnson (2007) : Longshore current and sediment transport on beaches, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 133(4), pp.296-304.
- Le Hir, P., W. Roberts, O. Cazaillet, M. Christie, P. Bassoullet and C. Bacher (2000) : Characterization of intertidal flat hydrodynamics, *Continental Shelf Research*, 20, pp. 1433-1459.
- Masselink, G., Kroon, A. and Davidson-Arnott, R. G. D. (2006) : Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal setting - A review, *Geomorphology*, 73, pp. 33-49.
- Mehta, A. J. (1989) : On estuarine cohesive sediment suspension behavior, *Journal of Geophysical Research*, vol.86, No.C11, pp.14303-14314.
- Pritchard, D. (2005) : Suspended sediment transport along an idealized tidal embayment : settling lag, residual transport and the interpretation of tidal signals, *Ocean Dynamics*, 55, pp. 124-136.
- Russell, P. E. and Huntley, D. A. (1999) : A cross-shore transport " shape function " for high energy beaches, *Journal of Coastal Research*, 15, pp.198-205.
- Thornton, E. B. and Guza, R.T. (1982) : Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach, *Journal of Geophysical Research*, 87 (C12), pp. 9,499-9,508.
- Yamada F., Kobayashi, N., Sakanishi, Y. and Tamaki, A. : Phase averaged suspended sediment fluxes on intertidal mudflat adjacent to river mouth, *Journal of Coastal Research*. (印刷中)