

季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズム

中道 誠* · 山田文彦** · 外村隆臣***
玉置昭夫**** · 小林信久*****

季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟地形の堆積・侵食メカニズムについて検討するため, 潮間帯干潟上で約 6 ヶ月間の水位・流速・濁度・塩分の連続観測を実施した。観測結果から底質輸送フラックスを推定し, 干潟の岸沖地盤高の時系列と直接比較して, 推定した岸沖方向のフラックス変動は季節的な干潟地形変動を表す指標として有効なことを確認した。そこで, フラックスの時系列変動を支配する外力要因について検討した。その結果, 平均潮位の季節昇降に伴って, 1 潮汐間の最大流速差に伴う Tidal asymmetry が変化し, 平均流速場の非対称性(流速の高次モーメント)を増大させることが干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズムの主要因であることが示唆された。

1. はじめに

内湾河口域の潮間帯干潟上で約 4 年間毎月一回程度の頻度で大潮時に継続している地盤高測量の結果より, 毎年 6~10 月に生じる約 40 cm の季節的な平均潮位の上昇・下降に伴って, 干潟地形はタイムラグもなく約 5 cm の堆積・侵食を繰り返すことが分かった(山田ら, 2003; Yamada・Kobayashi, 2004)。これは大潮等の海面上昇に伴う砂浜の地形変化を議論する際に用いられる平衡断面の概念(例えば, Bruun, 1962; Dean, 1991)と同様の結果と考えられる。しかし, いずれも経験的事実に基づいた結果であり, なぜ潮位が上昇すると地形は堆積傾向を示すのかという地形変動メカニズムの詳細は依然不明である。このメカニズムを解明することは中・長期的な内湾域の沿岸管理計画を策定する上で, 重要な検討課題の一つと位置づけられる。

Bassoullet ら(2000)は Macro-tidal 干潟(大潮平均潮位差 4 m 以上)上の地形変動メカニズムに関して, 水位・流速・濁度の現地観測結果から, 底質輸送フラックスが地形変動メカニズムを表す指標として有効であることを示した。しかし, 3 週間程度と観測期間が短く, また, 干潟地形の岸沖分布の時系列変動との関係も検討されていない。Andersen・Pejrup(2001)は Micro-tidal 干潟(大潮平均潮位差 2 m 以下)上の不定期ではあるが約 2 年半の観測で大潮を含む 600 潮汐の観測結果から底質輸送フラックスを推定し, 地形変動メカニズムについて検討している。しかし, Meso-tidal 干潟(大潮平均潮位差 2 m 以上 4 m 以下)上の地形変動メカニズムに関しては, 数ヶ月に渡る連続した現地観測に基づく検討例は非常に少ない。

本研究の目的は, 季節的な平均潮位の昇降に伴う Meso-tidal 干潟上の地形変動メカニズムについて, 現地観測を行い検討することである。そのため, 潮間帯干潟上で約 6 ヶ月間の水位・流速・濁度・塩分の連続観測を行い, 底質輸送フラックスの時系列を推定し, 干潟の岸沖地盤高の時系列と直接比較して, 季節的な干潟地形変動メカニズムを表す 1 つの指標としての底質輸送フラックスの有効性について検討した。また, 底質輸送フラックスの時系列に対する要因分析を行い, 干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズムの主要な外力変動について検討した。

2. 現地観測

観測は図-1 に示す有明海中央部に位置する熊本県白川河口域に広がる潮間帯干潟上で実施した。観測場所・方法の詳細は Yamada・Kobayashi(2003)に詳しいが, 対象海域での大潮平均潮位差は約 3.8 m (Meso-tidal)であり, 過去 4 年間に観測された平均有義波高は約 20 cm である。

対象領域には 6 本の観測ラインを設置しており, 左岸と右岸 K ライン(測線長: 1.5 km)は 2000 年 12 月から, 右岸 A~D ライン(測線長: A・C 約 1.5 km, B・D 約 2.5 km)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。また, 右岸 B ライン上の岸側の堤防から約 1 km の地点において, 2004 年 7 月より水位・流速・濁度・塩分の連続観測を実施している。

(1) 潮間帯上の干潟地形時空間分布の特徴

図-2 は 2004 年 8 月に計測した左岸と右岸 A~D, K ラインの地盤高の岸沖空間分布を重ねて示したものである。全断面に共通して, 沖側に向かって上に凸な形状を呈しているが, 白川の河道部近くに設置した断面の方がその勾配は緩やかで, 岸沖方向の地盤高は全体的に高くなる傾向が見られる。この潮間帯干潟上における地形の時系列変動は年周期変動が卓越することや, この年

* 学生会員 修(工) 熊本大学大学院 自然科学研究科
** 正会員 博(工) 熊本大学助教授 大学院自然科学研究科
*** 正会員 熊本大学工学部 環境システム工学科
**** 博(理) 長崎大学教授 海洋資源教育研究センター
***** Ph.D. ラウエア大学教授 応用海岸研究センター

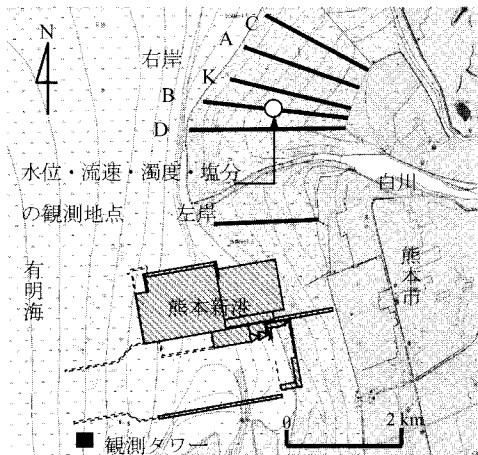


図-1 現地観測場所（白川河口域）

周期変動が白川河口域の潮間帯干潟全体でも存在することが明らかとなった（例えば、Nakamichi ら, 2005）。

Yamada・Kobayashi (2003) はこの干潟地形の年周期変動の主な外力要因として、平均潮位、河川流量および有義波高の時系列との相関性を示したが、今回の検討では、両者間のタイムラグを考慮しない場合にもっとも相関性が高い（相関係数約0.7）平均潮位の年周期変動との関係に着目し検討を行った。

（2）水位・流速・濁度・塩分の現地観測

水位・流速・濁度・塩分の観測地点の選定理由は、この地点の地盤高がほぼ小潮平均海面（-0.77 m T.P.）と一致し、これまでの観測結果より、この付近を境に沖側に向かって地盤高の標準偏差が増大する傾向が見られたためである。また、同干潟上の二枚貝の生息調査結果から、浮遊状態で流れによって移動する二枚貝の稚貝の定着数もこの付近でピークとなることが示されており、底質輸送特性や地盤高変動との関連性が示唆されるためである。

観測方法として、水位は底面に設置した水圧式波高計で計測した圧力から換算し、流速は底面上10 cm に設置した電磁流速波向計を用いて計測した（WaveHunter99, アイオーテック）。水位・流速はそれぞれ5 Hz 間隔で計測している。濁度は赤外後方散乱式濁度計（COMPACT-CLW, アレック電子）を底面上10 cm と30 cm の水深方向2点に設置し、塩分は小型メモリー水温塩分計（COMPACT-CT, アレック電子）を底面上30 cm の位置で固定し、それぞれ10分毎に1 Hz 間隔で20秒間計測した。観測した水位・流速データは最小自乗法を用いて平均流と波浪成分とに分離し、濁度は現地泥を用いた検定試験よりSS濃度に換算した。

図-3は2004年7月30日～8月5日（7日間）における大潮から中潮にかけて観測した(a)水深、(b)有義波高、(c)岸沖・沿岸方向の平均流速（+：岸・北向、

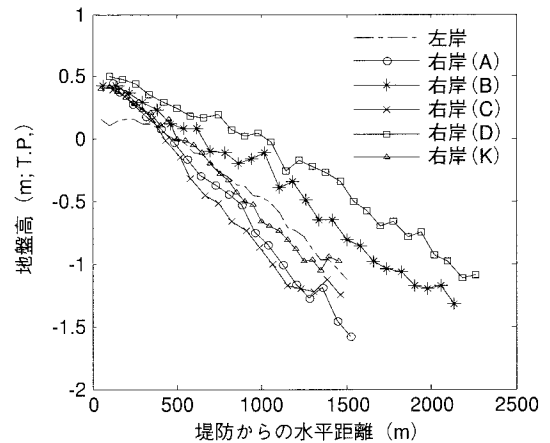


図-2 干潟地盤高の岸沖分布の計測結果（2004年8月）

-：沖・南向）、(d) SS 濃度、(e) Relative Tide Range (RTR) の時系列を示している。ここで、RTR は式(1)で定義される。

$$RTR = \frac{TR}{H_b} \quad (1)$$

（TR：潮位差， H_b ：碎波波高）

Masselink・Short (1993) は地形分類・地形変動における波浪と潮汐の相対的な重要性を表す無次元パラメータとして RTR を提案しており、この値が30以下となると、潮汐よりも波浪の影響が卓越する (Sipka・Anthony, 1999)。なお、図中の RTR は1潮汐毎に算出した値を示す。

まず、観測した平均流速の時系列に着目すると、岸沖・沿岸方向とも上げ潮・下げ潮の継続時間やそれぞれの最大流速に明確な差が存在し、その傾向は沿岸流速に顕著に現われている。これは、潮汐と底面摩擦・沿岸地形との相互作用による Tidal Asymmetry (潮汐の非対称性；Dronkers, 1986；Friedrichs・Aubrey, 1988) と呼ばれ、複合潮 (M_4 潮等) の発生と関連した浅海域特有の現象である。

次に、SS 濃度の変動を見ると、水深方向2点の計測値はほぼ同じ変動をしており、上げ潮・下げ潮時の水深が浅く流速が最大となる時に SS 濃度のピークが生じている。また、通常有義波高が過去4年間の平均値 (20 cm) 以下である場合、満潮付近の SS 濃度はピーク値に比べ非常に低くなる。一方、波浪が平均値を超えるような場合 (8月1日)、満潮付近にかけて高い SS 濃度が持続した状態にある。相対的な潮汐・波浪の卓越状態を示す RTR の時系列と比較すると、全期間を通して、波浪による SS 濃度の変動が生じた場合のみ、しきい値30を下回った。したがって、RTR は波浪による底質の巻き上げや浮遊移動を良く表現するパラメータであると考えられる。

3. 底質輸送フラックスの有効性に関する検討

水位、流速、SS 濃度の観測結果を基に、底質輸送フラックスを式 (2) で推定した。

$$\phi(t) = \int_{-h}^{\eta} u(t) \cdot c(t) dz \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϕ は底質輸送フラックス (kg/m/s)、 η は水面変動 (m)、 h は静水深 (m)、 u は流速 (m/s)、 c は SS 濃度 (kg/m³)、 t は時間を表す。今回は、流速と SS 濃度の水深方向の分布に関して Bassoullet ら (2000) や Andersen・Pejrup (2001) を参考に、以下の 2 つの仮定を用いた。

- ① 流速分布は水深方向に一樣である。
- ② SS 濃度の分布は水深 20 cm までは底面上 10 cm で計測した値、水深 20 cm 以上は底面上 30 cm で計測した値を水深方向に一樣とする。

したがって、今回推定した底質輸送フラックスは実際の値を過大あるいは過小に評価することもあると考えられるが、ここではフラックスの推定値よりもその値の時間変化に着目し、実測した干潟地盤高の岸沖分布の時系列と直接比較することで、フラックスの有効性について検討した。

図-4(a)、(b) は 2004 年 7 月～12 月に観測した (a) 平均

潮位、(b) 左岸と右岸 K ラインの干潟地形変化 (無次元) の時系列である。過去 3 年間の傾向と同様、平均潮位が 40 cm 程度上昇すると、干潟地形は 5 cm 程度の堆積傾向を示している。図-4(c) は岸沖・沿岸方向における底質輸送フラックスの 1 潮汐間の積分値 (Φ) を時系列で表示したものである。今回の推定値は Bassoullet ら (2000) や Andersen・Pejrup (2001) の推定値とはほぼ同じオーダーであった。まず、岸沖方向の底質フラックス変動に着目すると、平均潮位が上昇し地形が堆積傾向にある期間 (7 月) はフラックスの値もほぼ正値を示し、岸向きの底質輸送が卓越しているのが分かる。また、8 月～9 月にかけて平均潮位がピークを向かえ、その後下降し地形が侵食傾向にある期間 (9 月以降) ではフラックスの値もほぼ負値を示し、沖向きの底質輸送が卓越している。

次に、沿岸方向の底質輸送フラックスであるが、岸沖方向と同程度以上の大きさを持ち、観測期間中は常に南向きの底質輸送が卓越している。この傾向は、図-2 で示した白川河道部に近づくほど地盤高が高くなるという干潟地形の沿岸分布と一致している。したがって、今回推定した岸沖・沿岸方向の底質輸送フラックスは実現象

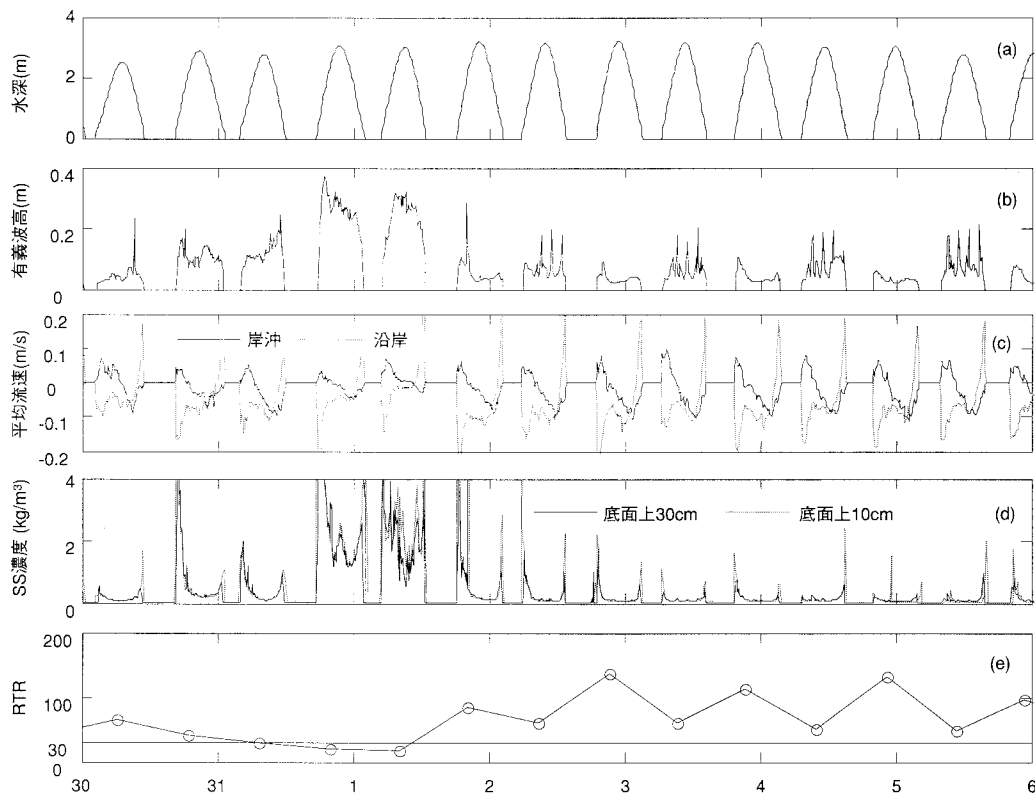


図-3 (a) 水深、(b) 有義波高、(c) 岸沖・沿岸方向の平均流速、(d) SS 濃度、(e) RTR の時系列 (実測値、2004 年 7 月 30 日～8 月 5 日)

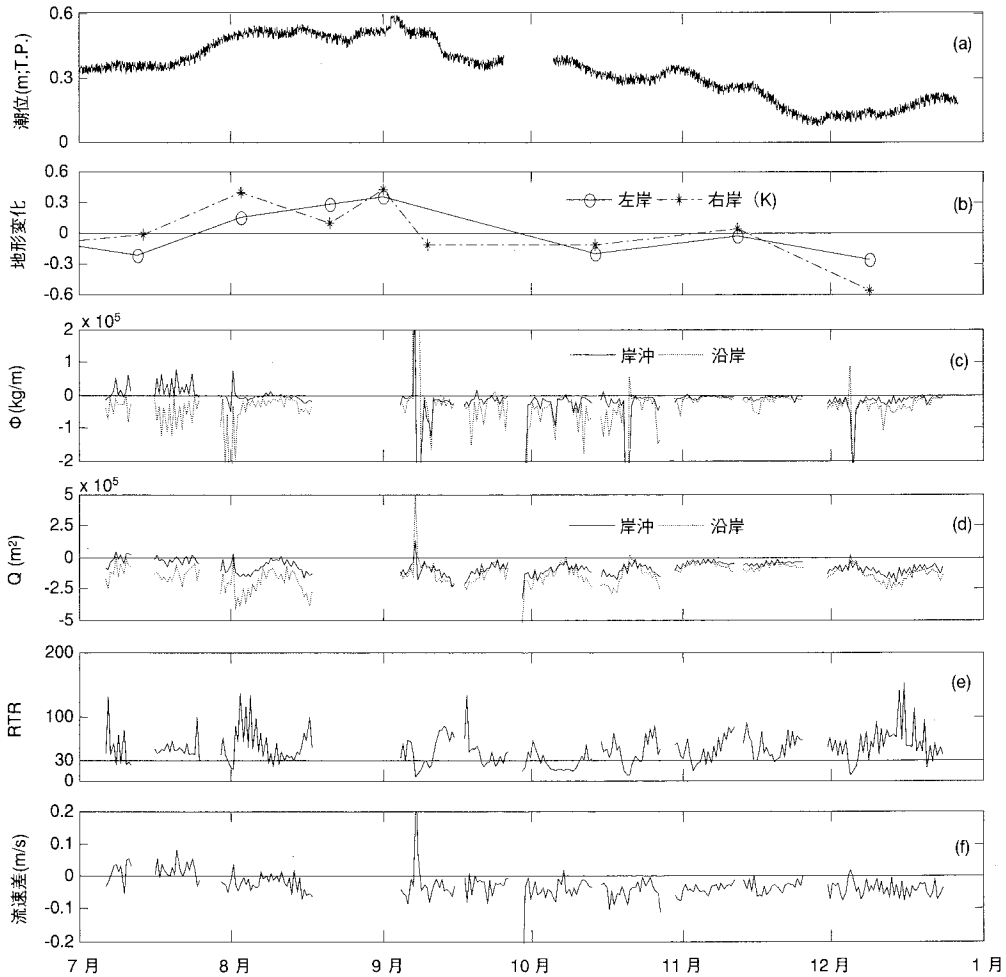


図-4 (a) 平均潮位, (b) 干潟地形変化 (無次元), (c) 1潮汐間で積分した底質輸送フラックス, (d) 1潮汐間で積分した流体の体積フラックス, (e) RTR, (f) Tidal Asymmetry (最大流速差) の時系列 (2004年7月～12月)

を良く表現し、特に、岸沖方向の底質輸送フラックスの時系列は、月単位のスケールで比較すると、タイムラグもなく観測した干潟岸沖断面の堆積・侵食の傾向と良く一致しており、季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟地形変動を表す1つの指標として有効であることを確認した。

次に、底質輸送フラックスの時系列変動を支配する要因について検討を行った。

4. フラックス時系列変動の要因分析

図-4(d)は岸沖・沿岸方向の1潮汐間で積分した流体の体積フラックス (Q) の時系列であり、1潮汐間における流体運動の収支を表す。ここで、流体の質量フラックス (q) は(3)式より10分ごとに算出し、それを1潮汐間で積分した。

$$q(t) = \int_{-h}^{\eta} u(t) dz \dots\dots\dots (3)$$

図より、体積フラックスは7月以降岸沖・沿岸方向ともほぼ負値で変動しており、収支はバランスしていないことが分かる。この理由として、浅海域では上げ潮と下げ潮で平均流の流速や流向が異なる Tidal Asymmetry が影響していると考えられ、7月を境として Tidal Asymmetry の時空間変動特性が変化することを示唆している。よって今後、調和分解を行い倍潮や複合潮の時間変動などを調べる必要があるが、本論文の範疇を超えるため、別の機会に譲ることとしたい。

次に、1潮汐間で積分した流体の質量フラックスの時系列を底質輸送フラックスの時系列 (図-4(c)) と比較すると、沿岸方向は両者とも南向きの輸送が卓越する。

これに対して、岸沖方向では、岸向きの底質輸送フラックスが卓越する7月に流体の質量フラックスはバランスしているものの、9月以降はともに、冲向きの輸送が卓越している。特に、7～8月に見られる流体と底質の

輸送パターンが異なることは、一般的に潮間帯干潟上で見られる Settling lag-Scour lag (Straaten・Kuenen, 1958) によるものと考えられる。ここでは、まず岸沖方向の底質輸送フラックスの時系列変動を支配する要因について検討するため、水位、流速、SS 濃度、RTR などの時系列と比較した。

図-4(e)は2004年7月～12月の RTR の時系列を示している。現地データの解析から、RTR の時系列は SS 濃度の時系列と高い相関性は確認されたが、岸沖方向の底質輸送フラックスの時系列と比較すると、明確な相関性は見られない (相関係数0.1)。したがって、粒径の細かいシルトなどの浮遊移動は季節的な干潟地形変動の主要因ではない可能性が示唆される。そこで、岸沖方向の底質輸送フラックスの時系列変動と相関性の高い外力変動について検討した。

その結果、図-4(f)に示すように、1 潮汐間の上げ潮時の岸向き最大流速と下げ潮時の沖向き最大流速の差 (Tidal asymmetry) の時系列との間に高い相関性が存在することが確認できた (相関係数0.7)。この流速差の変動は、平均潮位が上昇すると岸向き最大流速が沖向き最大流速よりも増大し、平均潮位が下降すると沖向き最大流速が岸向き最大流速よりも増大することを示しており、季節的な干潟地形変動における平均流速場の非対称性 (流速の高次モーメント) の重要性が明らかになった。砂浜海岸の底質輸送に関しても、流速の高次モーメントに基づいた底質輸送モデルが提案されており、掃流輸送には3次モーメントが、また浮遊輸送には4次のモーメントが支配的であることが示されている (Baillard, 1981)。

5. ま と め

季節的な平均潮位の上昇・下降に伴う干潟地形の堆積・侵食メカニズムについて検討することを目的として、潮間帯干潟上で約6ヶ月間の水位・流速・濁度・塩分の連続観測を実施した。観測結果から底質輸送フラックスを推定し、干潟地形の岸沖分布の時系列と直接比較することで、今回推定した岸沖方向の底質輸送フラックスの時系列は、季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟地形変動を表す1つの指標として有効であることを確認した。そこで、底質輸送フラックスの時系列変動を支配する外力要因について検討した。

その結果、1 潮汐間における上げ潮・下げ潮時の最大流速差 (Tidal asymmetry) の時系列と相関性が高いことがわかり、平均潮位の季節昇降に伴って平均流速場の非対称性 (流速の高次モーメント) が増大することが、

干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズムの主要因であることが示唆された。今後は、岸沖・沿岸方向の観測点数を増やし、現地観測を継続するとともに、河川からの流入土砂の影響を定量的に評価するために、潮間帯上での土砂収支や塩分フラックスに関しても検討する予定である。

謝辞: 海象観測データをご提供いただきました国土交通省熊本港湾空港工事事務所に感謝いたします。また、本研究は文部科学省科学研究費・ニッセイ財団・鹿島学術振興財団および笹川科学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, 小林信久, 柿木哲哉 (2003): 地形パラメータを用いた干潟断面の季節変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 551-555.
- Andersen, T. J. and M. Pejrup (2001): Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea, *Marine Geology*, 173, pp. 69-85.
- Baillard, J. A. (1981): An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach, *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 10938-10954.
- Bassoullet, P., P. L. Hir, D. Gouleau and S. Robert (2000): Sediment transport over an intertidal mudflat: Field investigations and estimation of fluxes within the Baie de Marennes-Oleron (France), *Cont. Shelf Res.*, 20, pp. 1635-1653.
- Brunn, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, *J. Wtrwy. Harbors Div., ASCE*, 88, pp. 117-130.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profile: Characteristics and applications, *J. Coast. Res.*, 7 (1), pp. 53-84.
- Dronkers, J. (1986): Tidal asymmetries and estuarine morphology, *Netherlands J. Sea Res.*, 20, pp. 117-131.
- Friedrichs, C. T. and D. G. Aubrey (1988): Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, pp. 521-545.
- Masselink, G. and A. D. Short (1993): The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model, *J. Coast. Res.*, 3, pp. 785-800.
- Nakamichi, M., M. Tsuchida, T. Nishi, T. Hokamura and F. Yamada (2005): Relative Importance of Tides and Waves for Sediment Transport on the Intertidal Mudflats, *Proc. of International Polar and Offshore Engineering Conference*, (in press)
- Sipka, V. and E. J. Anthony (1999): Morphology and hydrodynamics of a macrotidal ridge and runnel beach under low wave conditions, *J. Rech. Oceanogr.*, 24, pp. 24-31.
- Straaten, L. M. J. U. van and Ph. H. Kuenen (1958): Tidal action as a cause of clay accumulation, *J. Sediment. Petrol.*, 28, pp. 406-413.
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2003): Parameterization of mudflat profile changes caused by seasonal tide level variations, *Res. Rep. No. CACR-03-02, Ctr. for Appl. Coast. Res. Univ. of Delaware, Del.*, 192p.
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2004): Annual tide level and mudflat profile, *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 130, pp. 119-126.