

潮間帯に発達する Multiple Sand Bars の発生確率と季節変動特性

山田文彦* ・上原和朗** ・中道 誠***
外村隆臣**** ・由比政年***** ・小林信久*****

潮間帯に発達する Multiple Sand Bars の季節変動特性や発生確率を調べるために約 2 年間に渡って地盤高の岸沖分布を計測した。Multiple Sand Bars は小潮平均高潮面と小潮平均低潮面の間に発達し、Bar の岸沖方向の変動範囲は ± 5 m 程度、鉛直方向の変動範囲は ± 10 cm 程度である。観測断面に 2 次多項式を適用し、最小自乗法により平均断面を定義し、その残差として Multiple Sand Bars の岸沖分布を抽出した。Bar の高さと同様に沖に向かって増加し、平均海面付近で最大値をとり、その後減少する。それぞれの平均値は 30 cm と 40 m である。また、Bar の高さと同様に正規分布で近似が可能であり、入射波の影響を強く受ける砂漣と Multiple Sand Bars との発生要因が異なる事を示唆した。

1. はじめに

湖沼・湾・海岸等の緩やかな海浜上では、汀線にはほぼ平行な Sand Bar 列 (Multiple Sand Bars) が発達することが良く知られている (例えば Komar, 1998)。Lau・Travis (1973) は入射波が Multiple Sand Bars 上で複数回の碎波を繰り返し、エネルギーの大部分を逸散させることで、沿岸部の安定性に大きく寄与していることを示した。しかし、今後予想される長期的な海面上昇に伴う Multiple Sand Bars の応答性などについて現地観測に基づく検討例は非常に少ない。

Saylor・Hands (1970) はミシガン湖に発達する Multiple Sand Bars に関して 2 年間の観測を行い、平均潮面が 1 m 上昇すると Sand Bars は約 30 m 岸側に移動することを示した。また、それに伴って碎波点も岸側に移動し、入射波がエネルギーを十分に減衰させないままに汀線部に到達するため、汀線付近の地形の侵食傾向が増加することを報告している。しかし、Multiple Sand Bars の発生メカニズムについては検討していない。

Komar (1998) は Multiple Sand Bars の発生メカニズムとして、1) 複数回の碎波変形、2) 入射波と反射波の干渉による定常波、3) 長周期波成分の定常波などの影響を示した。Hale・McCann (1982) はカナダ・クレイグ湾での潮間帯干潟上で観測を行い、14 個の Multiple Sand Bars は高波浪の影響で発達するものの、その形状と位置は安定していることを示したが、年スケールの長期観測は行っておらず、Multiple Sand Bars の発生メカニズムや季節変動特性については依然として不明な点が多い。

そこで本研究は、Multiple Sand Bars の発生メカニズムや季節変動特性の解明のために必要な基礎的知見を得るために、内湾潮間帯に発達する Multiple Sand Bars の現地調査を約 2 年間実施し、その地形的特徴や季節変動特性および発生確率 (頻度分布) などについて検討を行った。

2. 現地観測とデータ解析手法

(1) 観測場所

観測場所である御興来海岸は有明海湾口部に近い宇土半島北岸に位置し、一級河川である緑川河口より約 7.5 km 南西に在り、熊本県に分布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。

図-1 に示すように、御興来海岸の潮間帯 (約 1 km) には 10 数列の Multiple Sand Bars が発達しており、このような特徴的な地形の分布は有明海においてもこの宇土半島北岸に限られる。

(2) 潮汐・波浪特性の概要

潮汐・波浪の観測値として、御興来海岸より北へ 12 km 離れた熊本新港観測タワーのデータを使用した。対象海域の潮汐は 1 日 2 回潮であり、大潮平均潮位差は

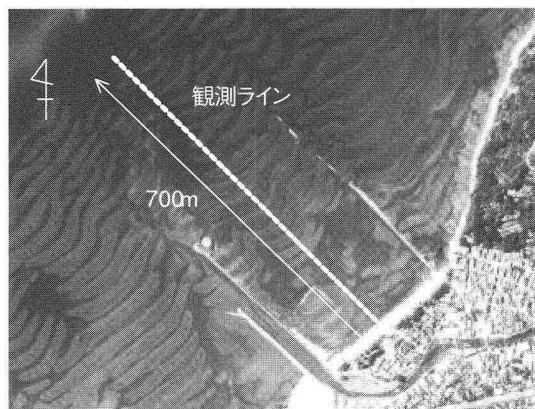


図-1 御興来海岸の Multiple Sand Bars

* 正会員	博(工)	熊本大学助教授	大学院自然科学研究科
** 学生会員		熊本大学大学院	自然科学研究科
*** 学生会員	修(工)	熊本大学大学院	自然科学研究科
**** 正会員		熊本大学	工学部 技術部
***** 正会員	博(工)	金沢大学助教授	大学院自然科学研究科
*****	Ph. D	デラウェア大学教授	
		応用海岸研究センター	

3.86 m である。また、平均大潮満潮面 (MHWS) = 1.93 m, 平均小潮満潮面 (MHWN) = 0.77 m, 平均海面 (MSL) = 0.14 m, 平均小潮干潮面 (MLWN) = -0.77 m, 平均大潮干潮面 (MLWS) = -1.93 m である。有義波高については、観測タワーでのフェッチは内湾であるため 60 km 以内と短く、外洋に比較して波浪の発達程度は低い。観測期間中に台風や冬季の季節風の影響で 1.5 m 程度の有義波が数回観測されているが、平均有義波高は 0.2 m である。また、有義波周期は約 3.0 s でほぼ一定であった。しかし、御輿来海岸は観測タワーよりも湾口に近く、特に西南方向のフェッチは東シナ海におよび 1,000 km 程度となる。台風時には発達した高波浪が直接来襲するなど、熊本新港観測タワーでの波浪特性とは異なる局所性を有することも考えられ、今後は観測場所での波浪観測を行う必要がある。

(3) 観測方法と地形特性の概要

牧野 (1991) は、御輿来海岸の Multiple Sand Bars の分布には経年的変化は少ないと指摘しているが、過去 40 年間の航空写真を比較した結果、定性的であるがその分布には顕著な変化が確認できた。そこで、鉛直方向の変位も含めた定量的なデータを収集するため、H15 年 7 月より 1 回の頻度で現地観測を開始し、現在も継続中である。地盤高測量に関しては、トータルステーションを使用し、堤防から 700 m 沖合までを 10 m 間隔で定点測量する (図-1)。ただし、Multiple Sand Bars の発達が顕著な 150~510 m の区間は、Bar 地形の再現性を向上するために 2 m 間隔で観測している。なお、地盤高測量の方法は山田ら (2003), Yamada・Kobayashi (2004) に詳しい。

図-2 は平成 15 年 7 月 9 日に観測した地盤測量結果を示しており、岸沖方向の地形的特徴をまとめると以下の通りである。岸側境界 (0 m) には天端高 4.6 m の堤防が設置されており、堤防から約 30 m までは砂質の前浜が存在し、勾配は 1/10 である。潮汐低地は泥質 (平均粒径 0.12 mm, 含泥率 20% 以上) で構成されており、堤防から 150 m までは Sand Bar は見られない。また、前浜に比べると勾配が 1/500 と極めて緩く平坦となるため、満潮時の波浪に対し前浜は反射型海岸となる。

Sand Bar は堤防から 150 m より沖側で発達しており、平均勾配は 1/250 と干潟部より急勾配となっている。Bar の峰では含泥率が 10% 以下となり底質粒径は 0.33 mm と大きくなるが、Bar の谷では含泥率 20% 以上、底質粒径は 0.2 mm である。また、Sand Bar は小潮平均高潮面 (+0.77 m) と小潮平均低潮面 (-0.77 m) の間である Mid Tidal Zone (Wright ら, 1982) に発達している。

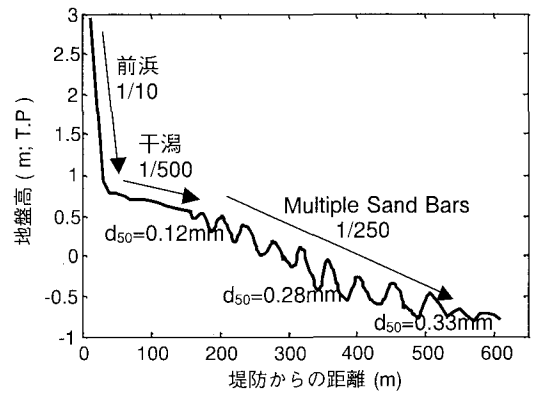


図-2 地盤高の岸沖分布の観測結果 (平成 15 年 7 月 9 日)

(4) データ解析手法

Multiple Sand Bars の形状の特徴や統計的性質などを調べるために、Masselink・Anthony (2001) を参考にして、以下の方法でその岸沖分布形状を抽出した。まず、地盤高の岸沖分布の観測値に (1) 式に示す 2 次多項式を適用し、最小自乗法で平均断面を定義する。

$$z(t, x) = -a(t)x^2 - b(t)x + c(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 z は地盤高、 x は堤防から沖方向への水平距離、 t は時間を示し、パラメータ a , b , c は時間のみに依存すると仮定する。各パラメータの物理的意味は山田ら (2003) に詳しい。なお、今回の解析では Multiple Sand Bars の存在が顕著で、かつ全観測で欠測のない区間として $x = 150 \sim 420$ m の区間を解析対象とした。

次に、観測値と平均断面との残差として Multiple Sand Bars の岸沖分布を抽出する。その岸沖分布にゼロダウン・クロス法を適用し、相隣り合うゼロダウン・クロス点間の Trough (岸側) と Crest (沖側) の組合せ

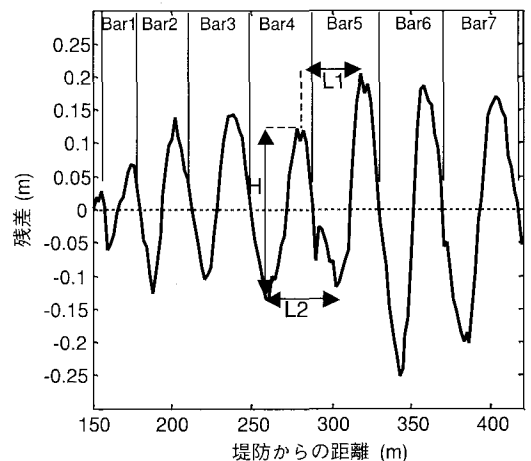


図-3 抽出した Multiple Sand Bars の形状 (平成 15 年 7 月 9 日)

を1つの Bar として定義し、岸側より順番に番号を付ける。そして、図-3 に示すように、平均断面の定義方法に左右されない代表諸元として、Crest 間水平距離 ($L1$)、Trough 間水平距離 ($L2$)、Bar 高 (Crest-Trough 間高低差: H) をそれぞれの Bar について算出した。

3. Multiple Sand Bars の季節変動特性

図-4 は平成15年7月～平成17年4月までに観測した23断面の観測結果を重ねたものである。約2年の観測期間中に複数の台風が通過したため Multiple Sand Bars の位置には変化がみられるものの、年間を通じて Multiple Sand Bars は消滅することなく常に小潮平均高潮面 (+0.77 m) と小潮平均低潮面 (-0.77 m) の間に安定に存在している。全観測期間を通じて Bar の峰と谷の岸沖方向の変動範囲は ± 5 m 程度、Bar 高さの鉛直方向の変動範囲は ± 10 cm 程度である。

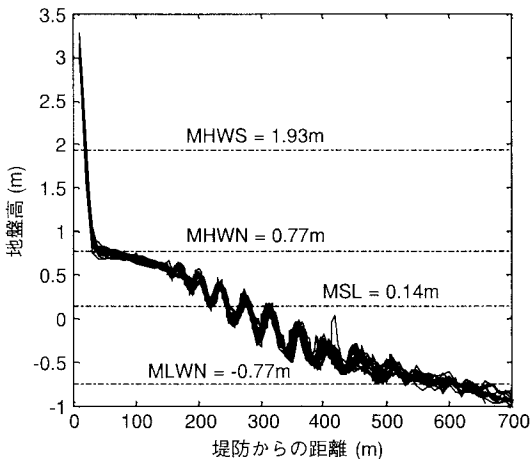


図-4 全観測断面：平成15年7月～平成17年4月

(1) 平均断面の特性

各観測で得られた平均断面の特性を調べるために、最小自乗法近似で得られた3つのパラメータについて検討した。表-1 は全観測における3つのパラメータの最大値・最小値・平均値を示している。各観測での平均断面を比較したところ、その標準偏差は4 cm 程度であることから、全観測期間を通じて共通の平均断面が設定できるものと判断した。そのため、次節以降の解析では、表-1 中の各パラメータの平均値を用いて平均断面を再定義し、Multiple Sand Bars の形状を抽出した。

ところで、パラメータ a は岸沖断面の曲率を表すパラメータであるが、御興東海岸での平均値は負値であり、下に凸な形状を呈している。一方、Nakamichi ら (2005) は御興東海岸から北に約15 km 離れた白川河口

表-1 2次多項式近似の適用結果

	パラメータ		
	$a \times 10^6 (1/m)$	$b \times 10^3$	$c \times 10(m)$
最大	0.99	6.36	1.35
最小	-5.58	3.36	0.89
平均	-0.93	4.41	1.69

域に広がる潮間帯干潟上での4年間の観測結果より、そこでの平均断面は上に凸であり、年間約2 cm 程度の堆積傾向を示すことを報告している。

Kirby (2000) は岸沖断面の曲率を用いて、干潟上の底質輸送に対する潮汐と波浪の影響度合いや長期的な堆積・侵食傾向を判別する方法を提案した。それによると、上に凸な形状の干潟上では波浪よりも潮汐の影響が強く、地形は長期的に堆積傾向を示すことになるが、白川河口域での観測結果はこの考えを支持する結果である。

一方、Kirby (2000) によれば、下に凸な形状の干潟上では潮汐よりも波浪の影響が強く、地形は長期的に侵食傾向を示す。そこで、観測期間中の御興東海岸の土量変化を調べるために、基準面の高さを -0.7 m とし、Multiple Sand Bars が顕著な $x = 150 \sim 420$ m の区間で観測結果を積分した面積を土量とみなし、その時間変動特性を検討した。

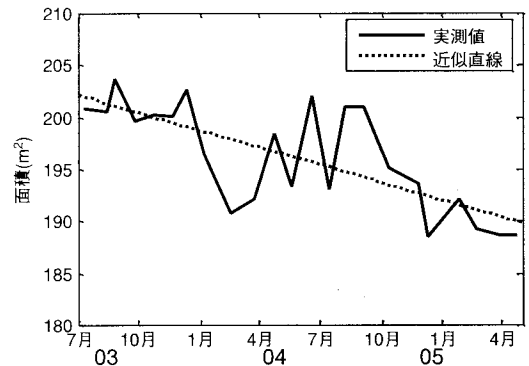


図-5 土量変化の時系列

図-5 は土量の時系列を示すが、大きく2つの特徴が存在することがわかる。一つ目は、土量の時系列には年間約 6.8 m^2 (鉛直距離で約2.5 cm) の侵食傾向(負のトレンド)が存在することである。この侵食傾向は積分を全測定範囲で行っても同様であった。よって平均断面の形状が下に凸であることと合わせ、Kirby (2000) の考えを支持する結果である。

二つ目は、夏場に堆積、冬場に侵食傾向を示す年周期の変動が存在することである。山田ら (2003) は白川河口域の潮間帯干潟にも同様の年周期変動が存在し、地盤高計測結果と外力変動の時系列を比較より、平均潮位の年周期変動との高い相関性(相関係数0.7)を報告して

おり、そのメカニズムについては中道ら (2005) が検討している。

(2) Multiple Sand Bars の時空間変動特性

図-6 は平成15年7月～平成17年4月までに観測した23断面の観測結果から前節で述べた共通の平均断面との残差として抽出した Multiple Sand Bars の時空間分布を示したものである。全体として各 Bar の Crest 部のピークは正弦波で近似した場合よりも1割程度岸側、Trough 部で1割程度沖側に位置し、平均断面から Crest および Trough のピークまでの鉛直距離はほぼ等しい。

King・Williams (1949) や Lau・Travis (1973) は Bar の高さと同隔は沖側に向かって増加することを報告している。そこで、図-3 の定義に従って Crest 間水平距離 ($L1$)、Trough 間水平距離 ($L2$)、Bar 高 (H) の時空間変動を調べたところ3つすべてが堤防から沖に向かって増加する傾向を示すが、岸から300 m (平均海面) 付近で最大値をとり、その後は減少することがわかった。なお、全観測データの平均値は $L1=41.1$ m, $L2=39.2$ m, $H=0.31$ m である。

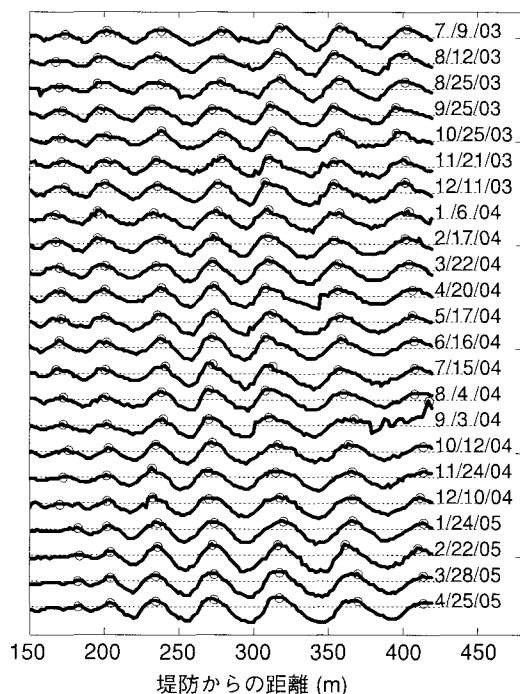


図-6 Multiple Sand Bars の時空間変動

4. Multiple Sand Bars の発生確率

約2年間の観測で図-6に示すように Crest 間水平距離 ($L1$)、Trough 間水平距離 ($L2$)、Bar 高 (H) に対して111個のデータが取得できたので、それらを用いて

頻度分布を作成し、それぞれの標準偏差・ひずみ度 (β_1 : 3次モーメント)・尖り度 (β_2 : 4次モーメント) および発生確率について検討した (図-7)。

Bar 高 (H) の標準偏差は0.08 m, $\beta_1 = -0.12$, $\beta_2 = 2.57$, Crest 間水平距離 ($L1$) の標準偏差は6.02 m, $\beta_1 = -0.12$, $\beta_2 = 2.19$, Trough 間水平距離 ($L2$) の標準偏差は5.84 m, $\beta_1 = -0.28$, $\beta_2 = 3.71$ であり、ともに正規分布で十分近似できることがわかった。これら結果は入射波の発生確率であるレーリ分布や Hanes ら (2000) の砂漣の発生確率とは異なっており、入射波との関連性が強い砂漣と Multiple Sand Bars とはその発生要因が異なる事を示唆している。

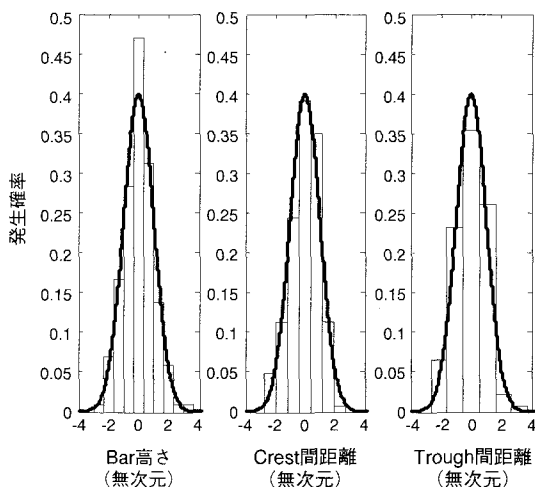


図-7 Multiple Sand Bars の発生確率

図-8 は Multiple Sand Bars の発生位置と潮位との関係と比較したものである。(a)図は Crest 標高の頻度分布であり、Mid Tidal Zone に一様に分布しているわけではなく、Crest 標高は平均海面と平均小潮満潮面の間に多く分布している。(b)図は Crest 標高と Bar 高さの関係を示しており、(a)図とは異なり平均海面付近の Bar 高が最も大きく、平均小潮満潮面と平均小潮干潮面に向かって小さくなる傾向を示す。(c)図は熊本新港観測タワーでの満潮・干潮位の実測潮位の頻度分布、(d)図は潮位の移動平均速度を絶対値で表示したものである。King・Williams (1949) は Multiple Sand Bars が発生しやすい場所として、憩流により潮位が比較的安定した平均大潮満潮面、平均小潮満潮面、平均小潮干潮面、平均大潮干潮面付近であることを示した。しかし、今回の観測結果は潮位の移動平均速度が大きい、つまり潮位が不安定な場所で Multiple Sand Bars は発生しやすいことを示している。これは King・Williams (1949) の考えとは異なるが、同様の結果はイギリス・フランスの潮間帯

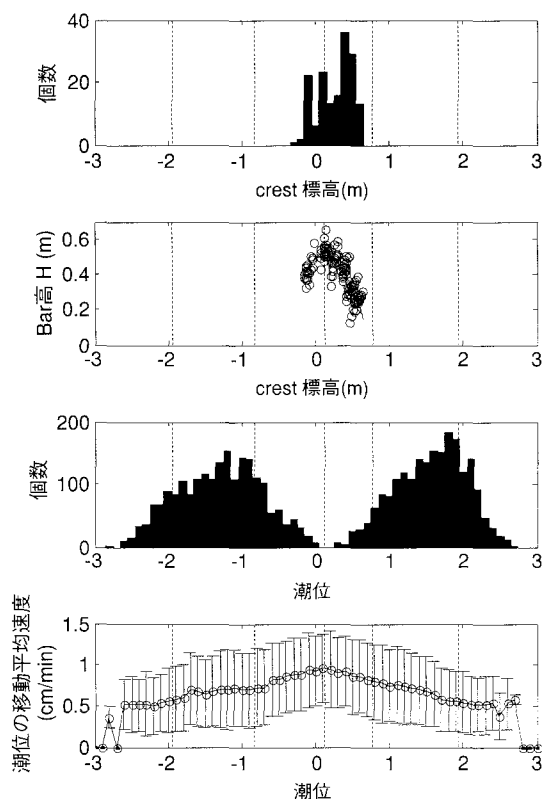


図-8 Multiple Sand Bars の発生位置と潮位の関係
 (a) Crest 標高の頻度分布, (b) Crest 標高と Bar 高さ関係,
 (c) 実測潮位の頻度分布, (d) 潮位の移動平均速度

干潟でも得られている (Masselink・Anthony, 2001)。

5. 結 論

Multiple Sand Bars の発生メカニズムや季節変動特性の解明のために必要な基礎的知見を得るために、内湾潮間帯に発達する Multiple Sand Bars の現地調査を約 2 年間実施し、Sand Bar 形状の時空間分布を抽出するデータ解析手法を検討するとともに、その地形的特徴や季節変動特性および発生確率などについて検討を行った。

その結果、御興来海岸の岸沖方向の土量変化には侵食傾向 (年間約 2.5 cm) と年周期変動が見られるが、全観測期間を通じて共通の平均断面の存在を仮定できるため、外力変動に対して Multiple Sand Bars が時空間で変動することで応答している可能性が示唆された。

また、Multiple Sand Bars の発生確率は正規分布で十分近似できることから、入射波浪以外の外力が発生メカニズムの主要因であると考えられる。潮位や潮位の移動平均速度との関係を調べたところ、潮位の変化率が大き

い平均海面付近に高低差の大きい Bar が発生しやすいことやその存在範囲は小潮平均満潮面と小潮平均干潮面の間に発達することがわかった。しかし、Multiple Sand Bars の発生・発達メカニズムについては依然として不明な点も多く、今後も現地での流体運動の実測を行うとともに数値計算を含めた詳細な検討が必要である。

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および鹿児島学術振興財団による研究助成の一部であり、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 牧野泰彦(1991): 宇土半島戸口浦海岸 (有明海) の潮間帯堆積物, 堆積学研究会報, 35号, pp. 3-8.
- 中道 誠, 山田文彦, 外村隆臣, 玉置昭夫, 小林信久(2005): 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, 海岸工学論文集, 第52巻 (投稿中)
- 山田文彦, 小林信久, 柿本哲哉(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.
- Hale, P. B. and S. B. MacCann(1982): Rhythmic topography in a mesotidal, low-wave-energy environment, J. of Sedimentary Petrology, 52, pp. 415-429.
- Hanes, D., V. Alymov and Y. S. Chang (2001): Wave-formed sand ripples at Duck, North Carolina, J. of Geophysical Research., 106, pp. 22575-22592.
- King, C. A. M. and W. W. Williams(1949): The formation and movement of sand bar by wave action, Geographical Journal, 113, pp. 70-85.
- Kirby, R.(2000): Practical implications of tidal flat shape, Cont. Shelf Res., 20, 1061-1077.
- Komar, P. A.(1998): Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, Prentice-Hall Inc, 544 p.
- Lau, J. and B. Travis(1973): Slowly varying stokes waves and submarine longshore bars, J.of Geophysical .Research, 78, pp. 4489-4497.
- Masselink, G. and E. J. Anthony (2001): Location and height of intertidal bars on macrotidal ridge and runnel beaches, Earth Surface Process and Landforms, 26, pp. 759-774.
- 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 15th International Polar and Offshore Engineering Conference, (in press)
- Saylor, J. H. and E. B. Hands(1970): Properties of longshore bars in the Great Lakes, Proc. of 12th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, New York, pp. 839-853.
- Yamada, F. and N. Kobayashi(2004): Annual variations of tide level and mudflat profile, J. of Waterway, Port, Coastal and Offshore Engineering, ASCE, pp. 119-126.
- Wright, L. D., Nielsen, P., Short, A. D., and Green, M. O.(1982): Morphodynamics of a macrotidal beach, Marine Geology, 50, pp. 97-128.