

石川海岸における沿岸砂州の長期・広域変動に関する基礎的研究

A Fundamental Study on the Long-Term and Large-Scale Evolution of Sandbars on Ishikawa Coast

由比政年¹

Masatoshi YUHI

Fundamental statistical analysis has been conducted on the long-term and large-scale evolutions of sandbars on Ishikawa Coast, Japan. The bar behavior is quantified in terms of bar crest position, crest/trough depth, bar height, and other parameters using a bathymetric data set with an alongshore extent of 21.5 km and sampled for more than 40 years. The correlations for couples of parameters as well as the characteristics of temporal and spatial variation have been examined. The results revealed that the bar behavior along the Ishikawa Coast is characterized by the presence of cyclic cross-shore migration of outer bars with approximately 10-year periods. Superimposed on periodical migration, the outer bar position has a clear onshore trend in longer time scale of decades under the influence of overall erosion of the study area.

1. はじめに

沿岸域における地形変化は、背後域の防災、沿岸生態系や食物連鎖、汚染物質の移流拡散等とも密接に関連する。このため、海浜地形の変動を長期的・広域的視点からモニタリングし、その特性を解明することは、沿岸域における環境基盤整備を計画するための基本要件の一つとなる。海浜地形の変動は多彩な構成要素と多様な時空間スケールを有し、きわめて複雑であるが、本研究では、外浜の海浜地形変動を特徴付ける基本要素として、沿岸砂州の長期・広域変動に着目する。

世界各地の砂浜海岸において、三日月砂州や多段砂州が存在することは良く知られている(Wright・Short, 1984)。砂州の発達過程や変動特性に関する研究は広く進められており(Komar, 1998)、その研究成果の1つとして、世界各地の海岸において、砂州が、1~20年程度の周期で沖向きの移動を繰り返していることが報告されている(たとえば, Kuriyama, 2002; Ruessinkら, 2003)。一方で、砂州の変動には、多様で複雑な要因が複合的に関与することから、依然として不明な点も多く残されている(Wijnberg・Kroon, 2002)。

冬期高波浪を受ける石川海岸においては、大規模な沿岸砂州が発達している(武藤ら, 1992; 二木ら, 2004; 由比ら2006など)。石川海岸においては、1960年代より国土交通省による現地測量が継続的に実施され、沿岸方向約21.5kmの範囲で、40年以上の期間に渡る観測データが蓄積されている。こうした長期・広域の観測データを有効活用して、基礎的な検討を進めていくことも、沿岸砂州の変動特性を解明していく上で必要である。こうした観点から、本研究では、石川海岸における、沿岸砂州の時空間変動に着目し、長期・広域に渡る現地観測データを活用した統計的解析を行う。

2. 対象領域

石川海岸は、日本海に面し、手取川を主要な土砂供給源とする海岸である(図-1 (a))。本研究では、根上、美川、松任、金沢の4工区からなる沿岸方向21.5kmの範囲を対象とした(図-1 (b))。沖合における波の主流向はNNWからWであり、年最大有義波高は5~8m程度に達する。通年の沿岸漂砂の卓越方向は西(南)向き(図-1 (b))で右から左)となる(田中ら, 1997)。代表的な粒径は0.2~0.5mm程度であり、汀線近傍ではレキも含まれる。

近年、石川海岸は、長期的な侵食傾向にある(田中ら, 1997)。これは、冬季高波浪の厳しい自然条件に加えて、土砂供給源である手取川流域の人為的改変(ダム建設、砂利採取、砂防事業など)の影響も関与した複合的要因によるものと考えられる(Yuhi, 2008)。急激な汀線の後

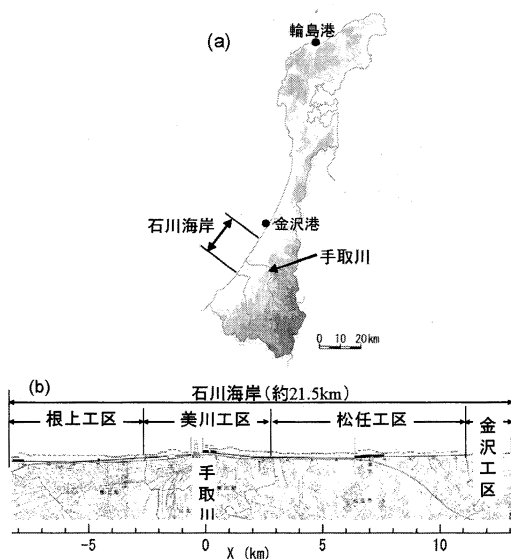


図-1 解析対象領域

退を受けて、1970年以降、侵食対策として、離岸堤や人工リーフなど多くの海岸構造物が建造された。この結果、現在では、汀線近傍の侵食は緩和されている。

石川海岸では、大規模な沿岸砂州が発達することが知られている（大森ら，1971）。対象領域全域において、砂州は多くの場合2段である。図-2は石川海岸における砂州の発達例（1998，2003年）を示したものであり、基点から500～700m程度の沖合に大規模な沿岸砂州が見られる。なお、図中の $X=0$ が土砂供給源である手取川河口に対応する。これらの沿岸砂州は、様々な時間スケールの変動を示す（武藤ら，1992；二木ら，2004；由比ら，2006，2007）。図-2 (a),(b)の比較からも、砂州位置や形状の経年変化が確認できる。図-3には、領域内の1測線を抜き出して、断面地形の経年変化を例示した。この図からも、多段砂州の存在と活発な移動が確認できる。なおこの例の内、図-3 (a)では、沖側砂州が比高を増しながら沖向きに移動し、図-3 (b)では、比高を減じつつ頂部位置が岸寄りに変化していることが見て取れる。

石川海岸における沿岸砂州の変動に関して、二木ら（2004）は、10～15年程度のサイクルの存在を指摘している。筆者らも（由比ら，2006，2007）、本研究の前段階として、松任および美川工区を対象とした検討を行い、10年前後の周期で沖側砂州の頂部位置が岸沖方向に変動していることを確認している。本報でも、10年程度の時間スケールを有する砂州の長期変動に着目する。また、既往の研究をベースに対象領域を沿岸方向に拡張し、地域による変動特性の違いを検討することとする。

3. 解析の手法

石川海岸では、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所により、1960年以降、超音波測深機による深淺測量が実施されている。測量の範囲は、沿岸方向に約21.5km（1968年までは根上工区を除く約15.7km）である。測量は年1回、主に秋季（9～11月初旬）に実施されている。本研究では、1960～2005年の深淺測量結果に基づいて海底地形変化の解析を行った。まず、沿岸方向21.5kmの範囲に200m間隔で設置された109本の測線データ（ただし、1990年以降、測線数は半減）を用いて、計5873個の砂州サンプルを抽出した。次に、砂州頂部高（ z_c ）、トラフ底部高（ z_t ）、比高（ $H=z_c-z_t$ ）、基点からの離岸距離（ y_c ）等、砂州位置・形状の時空間変動に関する基本特性（図-4）を検討した。岸沖方向の測量範囲は、基点から1～3km程度であり、この内、基点から1kmまでのデータを使用した。この際、初期の測量結果の一部には、空間解像度が十分でないものが含まれることを考慮し、地盤高データ（T.P.）をスプライン補間により再配置して解析を行った。解析にあたっては、測量誤差を考慮して、トラフ底部と砂州頂部の差（比高）が0.5mより大きいも

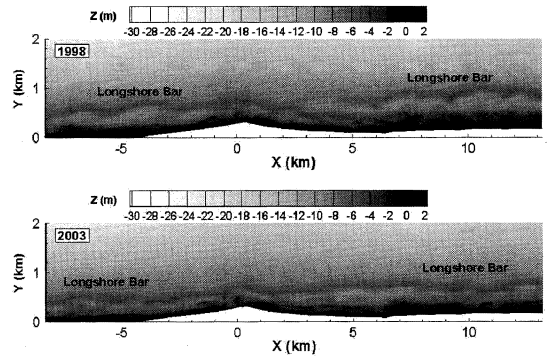


図-2 沿岸砂州の発達例（地盤高平面分布）

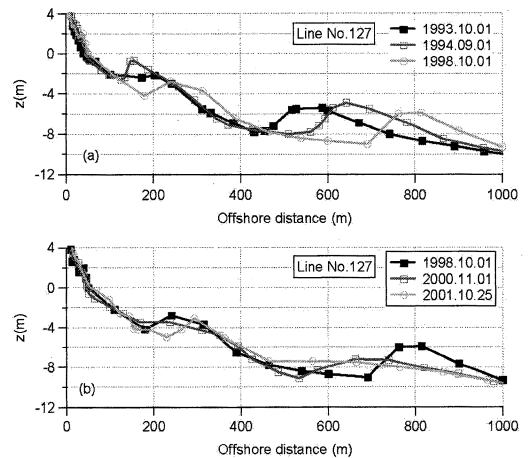


図-3 断面地形変化の例（測線127， $X=10.4$ km）

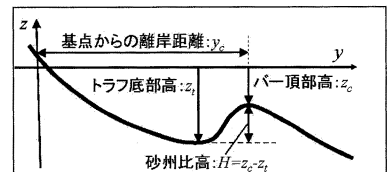


図-4 砂州諸元の定義

ののみをサンプルとして抽出した。また、峯部の離岸距離が100m未満のものおよび構造物前面の洗掘に類するものは除外した。これらの結果を基に、地域による特性の相違、周期的な変動特性やその変遷について解析した。

4. 沿岸砂州変動の特性

(I) 領域全体での基本特性

沖側から1段目、2段目と各測線の砂州を番号付け、領域全体を通じての基本特性を解析した。比高0.5m以上のサンプルのみを対象とした場合、砂州は最多の場合で4段となり、1段目：3518個、2段目：2019個、3段目：318個、4段目：18個のサンプルが得られた。以下で

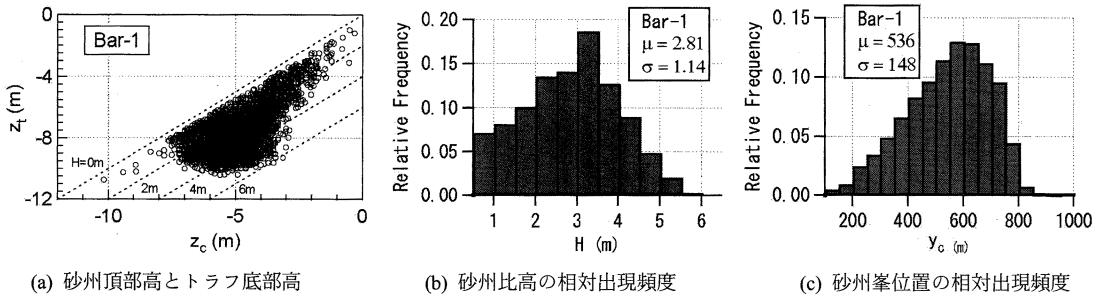


図-5 1段目砂州の特性

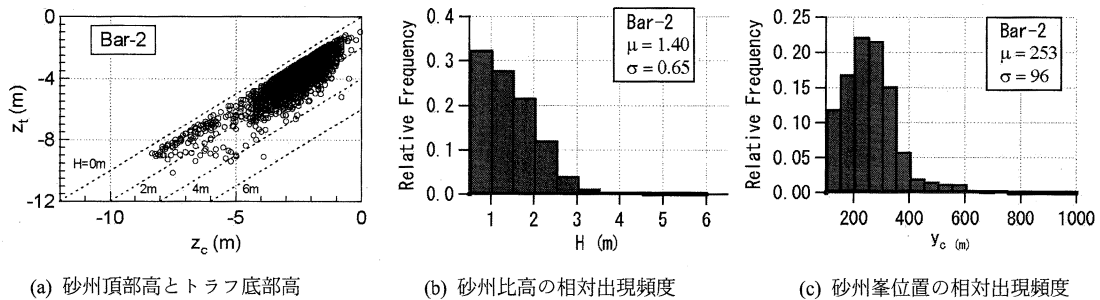


図-6 2段目砂州の特性

は、1段目のものをBar-1、2段目のものをBar-2として両者に対する解析結果を示すこととする。

図-5 (a)は、1段目のバーを対象に、平均干潮位を基準として砂州頂部高とトラフ底部高の関係を表示したものである。トラフ底部高の最小値は-10m程度であり、これは、石川海岸における、波浪による移動限界水深に対応する。一方、砂州頂部位置については、大部分が、水深2m～7.5mの範囲内に分布する。次に、両者の差で表される砂州比高の出現頻度分布を解析した(図-5 (b))。比高の平均値(μ)は2.8mであり、最大で6.2mとなった。ただし、比高が5mを超えることは稀(2%程度)である。出現頻度が最も高いのは、 $H=3\sim3.5$ mの階級であり、全体の18.6%がこの範囲に含まれる。図-5 (c)は、砂州峰と測量基点との離岸距離の相対頻度分布を示す。分布形は600m付近をピークとして、負の非対称分布となっている(歪度=-0.4)。なお、図中の σ は、標準偏差を表す。

図-6 (a),(b),(c)は、2段目の砂州を対象に同様の検討を実施した結果である。2段目砂州の多くは、トラフ底部水深が6m未満、砂州頂部水深5m未満となっている。比高は1m未満のものが最も多く、出現頻度は比高の増大とともに単調に減少する。比高の平均値は1.4mであり、最大で5.2mとなった。ただし、比高が2.5mを超えることは稀(2%程度)である。砂州峰の離岸距離に関する相対出現頻度の分布形状は、250m付近をピークとした正の非対称分布となっており(歪度=1.13)、400m未満のものが大半(93.4%)を占めている。

(2) 空間的変動特性

続いて、沿岸砂州の位置や規模(比高)が、沿岸方向にどのような変動を示すかについて検討を行った。図-7は、沖側から1、2段目の砂州に対する、観測期間中の平均峯線・谷線位置を表している。なお、図-7および後述の図-8では、隣接する3測線の移動平均を取り、測線間隔スケール(沿岸方向200mピッチ)の細かな変動を平滑化した結果を示している。また、図-7は、沿岸方向に対して、岸沖方向を拡大した表示となっている。図中には、基点位置を繋いだベースライン(巨視的な汀線形状に対応)を含めた。ベースライン形状は、手取川河口部が突出し、緩やかに弓なりに変化する形となるが、1段目、2段目の砂州峯線位置も、基本的にこの傾向に従う。ただし、1段目砂州について、手取川左岸側($X<0$)では、3～4km前後の空間波長を持つ周期的な変化が見られる。一方、河口右岸側での砂州峯線は、より直線的となる。砂州峯線と谷線は、ほぼ平行した配置となっており、両者の平均間隔は、1段目が114.7m、2段目が51.5mである。平均比高と峯谷平均間隔の比を取って砂州背面側の代表勾配を試算すると、1段目が0.024、2段目は0.027となる。1、2段目の砂州峯間の距離を砂州波長として定義すると、この値は、河口付近で小さく、河口から離れるにつれて増加した後、振動的な変化を示す。この時の波長は、右岸側(300～350m)の方が、左岸側(200～300m)より20%程度大きい。なお、砂州谷間の距離は峯間距離より20%程度小さくなるが、変動の傾向は同様である。

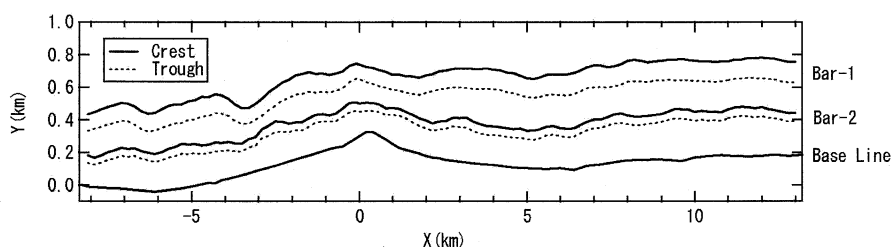


図-7 観測期間中における砂州峯線・谷線の平均位置

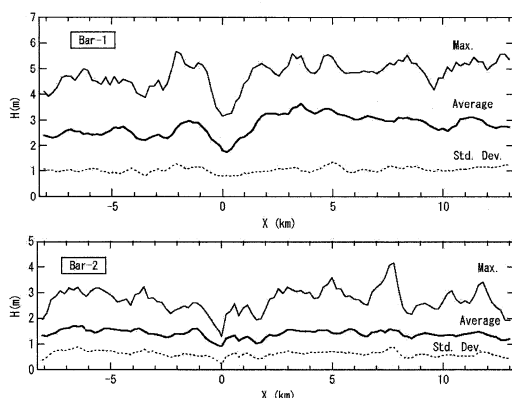


図-8 砂州比高の空間変化

図-8は、砂州比高の期間平均値、最大値および標準偏差の空間分布を示す。1段目の砂州比高は、手取川河口近傍で小さく、河口からの距離が離れるにつれて増大し、一定値の前後で推移するようになる。この値は、右岸側(3~3.5m程度)の方が左岸側(2.5m程度)より大きい。この傾向は、比高最大値についても共通である。比高変動の標準偏差は、約1m程度であり、全域ではば一定の値となっている。2段目砂州の比高平均値に関しては、空間的な変動は小さく、1.5m程度で推移する。標準偏差に関しても変動は小さい。

(3) 時間的変動特性

次に、砂州峯位置および比高の時間変動について検討した。図-9は、図-7に示した平均位置から、沖側の砂州峯位置がどのように変動するかを示したものであり、色の薄い部分が沖向き、濃い部分が岸向きへの変位を表す。白抜き部分は、欠測あるいは比高0.5m以上の砂州が確認できなかった場合である。領域全体において、沖側砂州は岸沖方向に周期的移動を繰り返している。この変動周期は10年前後であり、観測期間中に約4周期の変動が確認できる。1960年代の変動は観測域全体で類似の様相を呈しているが、1970年代には、河口右岸側5kmの範囲で変動が小さくなっている。続いて、1980年代には、全域で沖向きの変動が縮減している。1990年前後から部

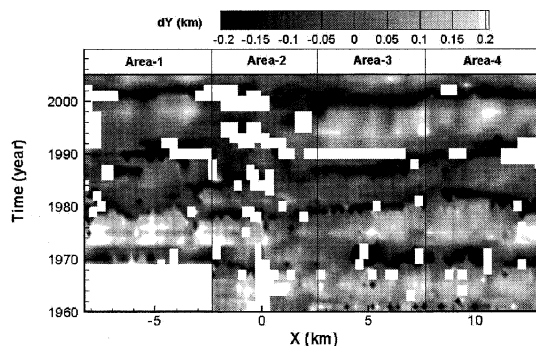


図-9 1段目砂州頂部位置の変動(沖向きを正)

分的に変動規模の回復が見られるが、1990年代では、河口周辺から左岸側の変動が依然として小さい。2000年代から5周期目の沖向き移動が見られる。

図-9中の変動傾向に基づいて、対象領域を4つに区分し、各領域について1段目砂州の平均移動量を算出して経年変化を解析した(図-10)。この図からも、峯位置変動の特徴が明確に見て取れる。期間全体における長期的な特徴として、砂州位置は、周期的変動を繰り返しながら全体に岸向きに移動しており、石川海岸の侵食の影響が見受けられる。変動の位相は、1960-70年代にかけて全領域で同調しているが、1980-90年代にかけて乱れ、2000年以降再び同調する傾向にある。1980年代には、Area-2, 3, 4の順に1, 2年の遅れを伴って岸沖移動が見られるが、変動振幅(沖向き移動)の減少が著しい。1990年代に入り、Area-3, 4の順で砂州の移動範囲が回復し、Area-1も(少し遅れて規模も若干小さいが)回復傾向にある。一方、河口周辺のArea-2においては、1980-90年代の乱れが顕著であり、2000年以降ようやく回復の兆しが見られる。この乱れの原因として、海岸構造物の建造など多様な要素が考えられるが、河口から離れたArea-4では、1980年代においても位相変化が規則的であること、また、変動の乱れは河口周辺のArea-2で最も顕著かつ長期間に渡っていることから、河川からの土砂流入条件の変化が関与していることが示唆される。

図-11は、Area-4の領域で平均した、砂州頂部位置変動(図-10から再掲)と砂州比高変動を対比させたもの

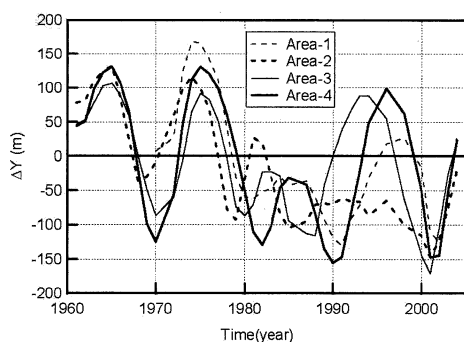
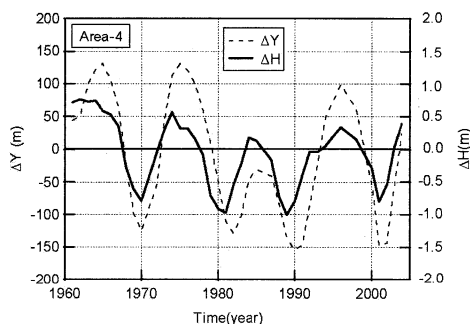
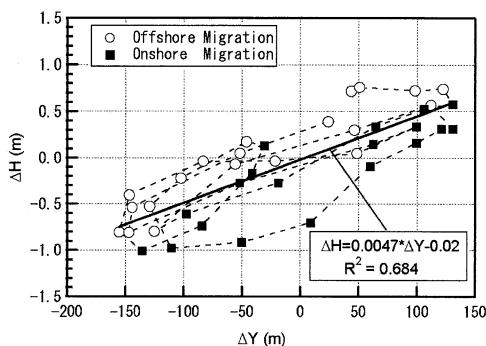


図-10 エリア別の砂州頂部位置変動

図-11 Area-4における砂州頂部位置変動と
比高変動の対比図-12 Area-4における砂州頂部位置変動と
比高変化の相関関係

である。比高の変化傾向は、頂部位置変動と類似しており、周期的な変動を繰り返しながら長期的には減少傾向にある（近年若干回復）。位相的には、比高変動の位相が頂部位置変動より、わずかに先行する傾向にある。図-12は、両者の相関関係を表示したものである。全体に正の相関が見られるが、比高が最大（最小）となるのは、ほとんどの場合、頂部位置変動が最大（最小）となる直前となっている。また、頂部位置が同程度であっても、沖向きに移動している場合（白丸）の方が、岸向きの場合（黒四角）よりも比高が大きいこともわかる。

5. おわりに

本研究では、石川海岸における、沿岸砂州の長期・広域変動特性に対する統計的解析を行った。その結果、砂州の発達位置や規模に関する空間変動特性、および、10年前後の周期で繰り返される沖側砂州の岸沖移動特性等に関して、基本的特徴を把握することができた。今回の検討は現象論的な域に留まっているが、今後、他の観測事例との比較を進めるとともに、沖側砂州の周期変動と自然外力変動との関連、周辺の土砂量変化や構造物建設等の影響、多段砂州相互の干渉などに着眼して、さらなる検討を進めていきたい。

謝辞：本研究で使用した測量データは、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所より提供いただいた。また、本稿で使用したデータ整理にあたり、山根大史君・羽部雄介君（当時金沢大学学生）に協力していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 大森昌衛・茂木昭夫・星野通平（1971）：浅海地質学，東海大学出版会，445 p.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸真一・石川俊之・山本吉道・浅野剛（1997）：石川海岸における漂砂機構，海岸工学論文集，第44巻，pp. 661-665.
- 二木 渉・高橋 至・高木利光・有村盾一・高木 栄（2004）：石川海岸徳光地先の大型離岸堤の効果追跡調査，海岸工学論文集，第51巻，pp. 481-485.
- 武藤和宏・宇多高明・島 敏明・岡本俊策（1992）：高波浪によるバーの大規模変動の観測—石川海岸の離岸堤・人工リーフ沖の地形変化—，海岸工学論文集，第39巻，pp. 446-450.
- 由比政年・山田文彦・榎田真也・石田 啓（2006）：石川海岸松任地区における沿岸砂州の長期変動特性，海岸工学論文集，第53巻，pp. 566-570.
- 由比政年・早川和宏・榎田真也・石田 啓（2007）：侵食性海岸における沿岸砂州の長期変動特性およびその解析法に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp. 661-665.
- Komar, P. A. (1998): Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, Prentice-Hall Inc., 544 p.
- Kuriyama, Y. (2002): Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan. J. Geophysical Res., Vol. 107, No. C9, 3132, doi:10.1029/2001JC000899.
- Ruessink, B. G., K. M. Wijnberg, R. A. Holman, Y. Kuriyama, and I. M. J. van Enckevort (2003): Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior, J. Geophysical Research, Vol. 108, No. C8, 3249, doi:10.1029/2002JC001505.
- Winberg, K.M. and A. Kroon (2002): Barred beaches, Geomorphology, Vol. 48, pp. 103-120.
- Wright, L. D. and A. D. Short (1984): Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis, Marine Geology, Vol. 56, pp. 93-118.
- Yuhi, M. (2008): Impacts of anthropogenic modifications of river basin on surrounding coasts: A Case Study, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, in press.