

千里浜海岸における海浜変動の基本特性に関する研究

Basic Characteristics of Shoreline Change and Bar Migration on Chirihama Beach, JAPAN

由比政年¹・煤田真也²・早川和宏³・川島弘靖⁴・浦 貴暁⁵・石田 啓⁶

Masatoshi YUHI, Shinya UMEDA, Kazuhiro HAYAKAWA
Hiroyasu KAWASHIMA, Takaaki URA and Hajime ISHIDA

Basic features of coastal evolution on Chirihama Beach, Japan, have been investigated using a set of field surveys. The results on the shoreline survey show long-term eroding trend during the last twenty years. The cross-shore profile survey records show that the seabed slope has been decreasing more recently. The typical profile configurations are characterized by the presence of multiple bars. An EOF analysis has been conducted on the periodic movements of these bars. The net offshore migrations of bars have been repeated with a return period of approximately 4 years. It is also shown that the transition from double bar to triple bar configuration accompanies the temporal retreat of shoreline. The alongshore variability of the behavior of multiple bar system has also been examined.

1. はじめに

国内外の多くの砂浜海岸は、重要な観光資源としての役割を担っている。砂浜での一般車両の走行が可能な「なぎさドライブウェイ」を有することで知られている石川県千里浜海岸もその代表的な1つであり(石田ら, 1984), 春季から秋季にかけて, 多くの観光客を魅了している。ドライブウェイを安全に維持・管理するためには, 砂浜幅の確保が必要であるが, 千里浜海岸では, 過去20年間で最大約50mもの汀線後退が報告されるなど, 浜幅の縮小が顕著である。貴重な観光資源を持続的に発展させていくためにも, 汀線変動を含めた海浜地形変動の基本特性を把握することは重要である。

千里浜海岸のもう1つの特徴として, 大規模な沿岸砂州の発達をあげることができる(石田ら, 1984; 加藤, 1984)。これらの沿岸砂州は, 高波浪時の碎波を促進することで, 自然の防波堤として機能し, 広大な砂浜を維持する上でも重要な役割を担っていると考えられる。近年の研究により, 著者らは, これらの砂州が, 数年の時間スケールで変動を繰り返すことを示し(早川ら, 2009; Hayakawa et al., 2009), その特性について検討を行ってきた。しかしながら, 砂州移動と汀線位置・土砂量変動との関連や, 平面的な変動モードなど, 未解明の点も多い。

こうした観点から, 本研究では, 千里浜海岸における海浜地形変化に関する基礎的研究の一環として, 過去20

年以上に渡る汀線測量結果および過去10年間の深淺測量結果をもとに, 汀線および等深線位置の変化, 沿岸砂州の形成・移動・消失過程と汀線・土砂量変動との関連, 平面的な変動特性に着目した統計的解析を行う。

2. 対象領域および解析の手法

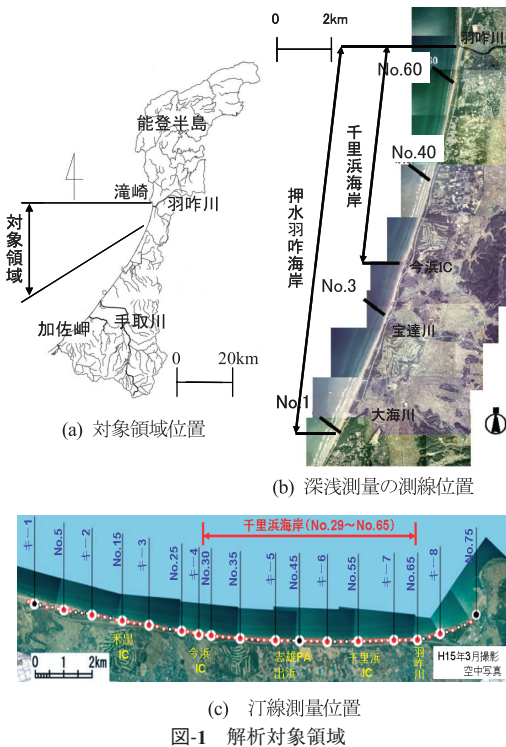
(1) 対象領域の概要

千里浜海岸は, 羽咋市と宝達志水町に跨る押水羽咋海岸のうち, 能登有料道路今浜ICから羽咋川に続く延長約8kmの砂浜海岸の総称である(図-1(a))。石川海岸徳光地点沖合(水深約15m: 図-1(a)参照)における観測結果によると, 夏期の波浪の多くは有義波高1m以下であり, 波向はNNW~NWにやや卓越する。冬期は有義波高1m以上の高波浪が頻繁に来襲し, 波向はNW~Wに卓越する。年最大有義波高は, 5~8m程度に達する。既往の深淺測量結果(石田ら, 1984)より, 海底地形の特徴を見ると, 水深5mを中心として砂州が2段, 3段に発達しており, 海底勾配は約1/80~1/200である。また, 図-1(b)は, 1975年に国土交通省により撮影された航空写真を合成したものであり, この写真からも大規模な沿岸砂州の発達が確認できる。対象領域周辺の汀線近傍における代表的な粒径は0.15mm前後であり, 大部分が細砂である。千里浜海岸においては, 侵食対策の一環として, 1984年以降, 年間5,000m³程度の養浜が実施されているが, 依然として汀線後退が進行中である。

(2) 解析の手法

本研究では, 石川県土木部河川課による汀線測量結果(1983~2006年, 春季・秋季の年2回実施, 沿岸方向範囲約15.5 km: 図-1(c)参照)に基づいて, 千里浜および周辺海岸における汀線位置の経年変化・季節変化の解析を行い, 長期的な侵食トレンドや中期的な周期変動特性

1 正会員 博(工) 金沢大学教授環境デザイン学系
2 正会員 博(工) 金沢大学講師環境デザイン学系
3 博(工) 石川県土木部
4 学生会員 金沢大学自然科学研究科博士前期課程
5 石川県土木部
6 フェロー 工博 金沢大学教授環境デザイン学系



について検討を実施した。合わせて、国土交通省金沢河川国道事務所による深淺測量結果（1998～2007年）を用いて、図-1 (b) 中の4測線における等深線位置や土砂量の変化、多段砂州の形成・移動・消失過程について比較検討を行い、平面的な変動特性についても検討を実施した。なお、深淺測量は、年に1回、主に秋季（9～11月）に実施されている。砂州変動に関しては、さらに、経験的固有関数法により変動の基本モードを抽出し、土砂量や汀線位置の中期変動との関連について解析を行った。

3. 汀線および等深線の変動特性

(1) 領域平均された汀線位置の変動特性

1983～2006年に石川県土木部河川課により実施された汀線測量結果に基づき、春季、秋季それぞれにおける汀線変動の特性を検討した。図-2は、千里浜海岸の測線（図-1 (c) 中のNo.29～65、沿岸方向範囲約7.2km）で平均化された汀線変動特性を示している。観測期間全体では、春季では0.67m/年、秋季では0.46 m/年の速度で汀線が後退しており、長期的トレンドとして、観測期間中に10-15m程度の浜幅の縮小が見られる。汀線後退は、特に、1980年台後半以降顕著である。春季・秋季の変動傾向は類似しているが、回帰直線の勾配の差が示すように、季節変動が徐々に大きくなる傾向がある。また、汀線変化には、長期的後退傾向に加え、10年前後の周期的変動が重畳しており、金沢港、輪島港、徳光観測所における波

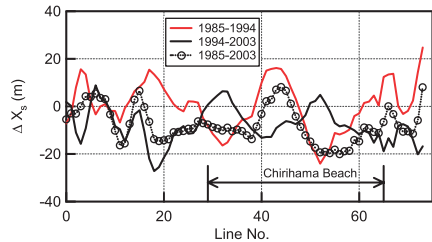
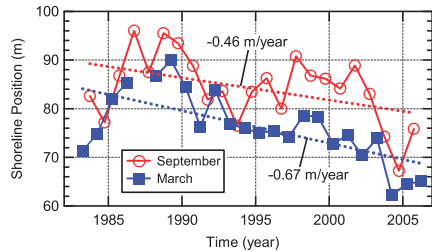


図-3 期間前半・後半・全体での汀線位置変化量（9月測量）

浪観測結果との比較から、波浪エネルギーの経年変動と対応することが確認された。トレンドからの偏差は秋季測量において顕著であり、最大で10m程度に達している。

(2) 汀線変動の時空間変化

汀線位置の変動特性は一樣ではなく、様々な時間的・空間的スケールの変化が共存する。約4年サイクルの砂州変動（早川ら、2009）の影響を除去するために時間方向に4年移動平均を取り、空間的な局所変動を平滑化するために隣接3測線間の移動平均を取って、汀線位置の時空間変化を検討した。移動平均後の解析期間前半（1985～1994年）・後半（1994年～2003年）および通期（1985～2003年）における汀線位置の変化量について、沿岸方向変化を解析した例を図-3に示す。なお、対象領域北端の滝港近傍は構造物建設の影響で強い堆積傾向を有するため、それ以外の領域について検討する。期間前半における汀線位置の変動量を見ると、汀線後退の顕著な箇所と堆積傾向の箇所が沿岸方向に交互に現れている。期間後半では、全体に侵食傾向となるが、ここでも侵食の顕著な箇所と緩やかな箇所が交互に現れる。期間後半で汀線後退が顕著となる地点は、期間前半で汀線が前進した箇所におよそ対応している。期間全体を通じて汀線後退の最も著しい箇所は測線51近傍であり、20m程度の汀線後退が見られる。測線43付近においては、通期変動量はプラスとなっているが、期間後半で侵食の進行が著しい。全体に、汀線後退の進行速度は時間的に一樣ではなく、場所によっては、期間の前半・後半で大きく変化する。

(3) 等深線位置および土砂量の変動

深淺測量結果に基づいて、海浜断面内での土砂量の変

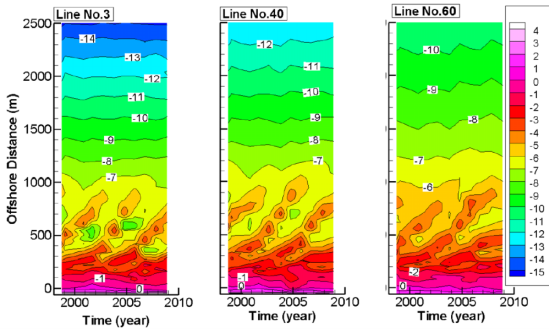


図-4 各測線における地盤高の経年変化

動を算出したところ、横ばいあるいは緩やかに増加する傾向が見られ、増加傾向は北側の測線ほど強まる結果となった。この結果は、汀線近傍と沖合では、地形変化の傾向が異なることを示唆しているため、各測線における等深線位置の経年変化を解析してみた(図-4)。測線位置が南側になるほど底面勾配が増加する点は既往の研究と整合する(石田ら, 1984; 加藤, 1984)。この傾向は、水深7m以上の領域で顕著である。千里浜海岸中央および北側に位置する測線40, 60に着目すると、汀線付近の等深線が後退傾向を示すのに対し、沖側等深線は緩やかに前進しており、断面勾配は減少傾向にある。今回使用した深浅測量データが10年程度と短いため、この傾向が、今後も継続するかどうか、また、その要因は何か等について、引き続き検討する必要がある。なお、こうした等深線変化のパターンは、宇多ら(2008)が、波向き変動場に対して示した等深線変動の側方境界付近での挙動に類似しており、今後の検討に値すると思われる。

4. 沿岸砂州の時空間変動特性

(1) 測量断面内における砂州の岸沖移動特性

千里浜海岸における断面地形とその経年変化は、多段砂州の存在とその活発な移動により特徴づけられる。図-5には、測線40を対象に、断面地形変化を例示した。上下図の比較により、約4年サイクルで周期変動が繰り返されていることが確認できる。砂州比高(砂州峯高とトラフ底部高の差)の最大値は、4m以上に達している。他の測線における変動も同様である。このような砂州の周期的沖向き移動は、オランダ(Ruessink & Kroon, 1994; Winberg & Terwindt, 1995)、ニュージーランド(Shand et al., 1999)、日本(Kuriyama, 2002)、米国など、世界各地(Shand et al., 1999など)で報告されている移動形態(Net Offshore Migration)と共通である。

近隣の石川海岸においても砂州の周期的変動が見られる。両者には、砂州移動の最終段階に特徴的な相違点が存在し、石川海岸においては砂州が岸向きに移動して減衰する(由比, 2008)のに対し、千里浜海岸では砂州は

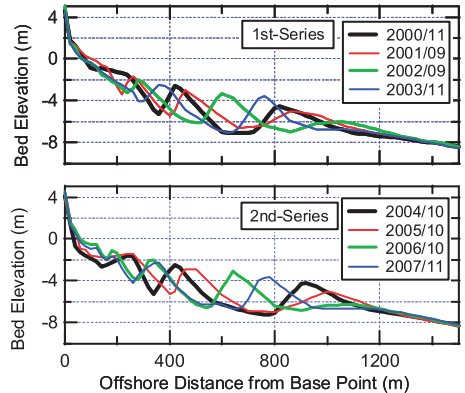


図-5 砂州の周期的移動の例(測線40)

沖向きに移動・消失していく。砂州の減衰・消失段階における、変動パターンのこのような相違は国外の報告例でも見受けられる(Shand, 1999)。

(2) 経験的固有関数法による解析

実数型の経験的固有関数法(EOF)(例えば, Winantら, 1975)を適用し、沿岸砂州の周期的変動に寄与する特徴的モードを抽出してみた。経験的固有関数法では、測量結果の地盤高を複数の固有モードの重ねあわせで表現する。ここで、変動に対する寄与率の大きい順に第1モード、第2モードと順位付けを行う。個々の固有モードは、時間の関数である時間係数と、空間の関数である固有関数の積の形に変数分離され、海底地形の時空間変動は以下のように表現される。

$$h_{ik} \approx \sum_{n=1}^N C_{nk}(t)e_{ni}(x) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h_{ik} は、 i 番目の測点における k 回目の深浅測量時の地盤高を表す。また、 e_{ni} は測点 i の位置における第 n モードの固有空間関数、 C_{nk} は k 回目の調査における第 n モードの時間係数である。岸沖方向における測量実施間隔は不均一であるため、線形補間を用いて、地盤高データ(T.P.)を等間隔(20m)に再配置した。以下では、朔望平均干潮位(T.P.+0.01m)を基準とした期間平均汀線位置を基準として離岸距離を表す。EOF解析の対象区間は、離岸距離-60m地点から沖合2500m地点の範囲であるが、以下では、水深変化が比較的明瞭に現れる1300m地点までの範囲を図示する。なお、EOF解析の適用に際して、測量地盤高から期間平均地盤高を差し引いた残差分を対象とすることが多いが、本研究では、土砂量変動と砂州移動のモードを分離することを意図して、地盤高データ自身に対して経験的固有関数法を適用した。

まず、地形変動の中核となる上位3モードについてその特徴を抽出するとともに、土砂量変動との関連を検討した。図-6から図-9は、測線40に対する実数型経験的固

有関数法の解析結果である。他の測線に対する解析結果も同様である。第1モードの時間係数 C_1 (比較のため -1倍して表示)は、沿岸岸砂の不均衡等に起因する海浜断面面積の変動 ΔS (1998年基準, 単位幅あたりの土砂量変化に相当)と良く対応している。この測線においては、前述のように、等深線が汀線付近で後退、沖側で前進傾向にあり、断面内土砂量としては僅かな増加傾向にある。 C_1 は、振動的に変化しつつ全体に減少 (図中では符号反転表示のため右上がり) しており、空間関数 e_1 (観測期間中の平均地形に対応する。図-8 (a) 参照) との積で考えると、この傾向と符合する。第2, 3モードの時間係数は、位相が互いに約1/4周期ずれた形となる (図-7)。空間係数についても同様 (図-8 (b)) であり、この組み合わせで砂州の周期変動に対応する。図-9は、第2, 3モードの重ね合わせを示す。砂州の沖向き移動が約4年のサイクルで繰り返されること、個々の砂州の形成・移動・消失の過程はおおよそ8年程度の期間に渡ることなどが良く再現されている。また、この砂州移動モードは、断面内における土砂の岸沖方向の分配には寄与するが、断面全体としての土砂量増減への影響は小さいことも確認された。

次に、砂州移動と汀線変動との関連について検討した。図-8の空間関数の分布より、第3モードは2段砂州の配置に、第2モードは3段砂州の配置にそれぞれ対応することが見て取れる。前述のように、両モードの時間係数は位相が1/4周期ずれた形となっているため、第2モードが卓越する (C_2 の値が大きくなる) 時点においては、第3モードの影響は小さく (C_3 が小さく) なる。この結果、図-5からもわかるように、たとえば、第3モードの卓越する2003年11月においては、砂州は2段配置となるのに

対し、第2モードが卓越する2004年10月には、砂州は3段配置へと変化する。空間関数 e_2 の分布を見ると、 C_2 が極大となる時点では、200m付近に3段目の砂州が形成される。一方、それより岸側の e_2 が負となる領域では地盤高が低下し、汀線が後退する (たとえば、図-2や図-5において、2004年10月には汀線が後退している)。すなわち、砂州配置の変動は、断面内の土砂総量には影響を与えないが、岸沖方向の土砂量バランスを変化させ、汀線位置の中期的変動を誘起し得る。図-2の秋季の変動において、汀線が前進した後に3年間後退するという形が繰返し現れている。これは4年サイクルでの砂州変動の影響もその一因と推測される。以上の結果は、千里浜海岸のような大規模な砂州の発達と時間変化を特徴とする海岸においては、汀線位置の変動だけから (断面形の平行移動を仮定して) 土砂量の変動を推定することは困難であることを示しており、注意が必要である。

(3) 沿岸砂州の平面的な変動特性

次に、4測線の測量結果を比較して、沿岸砂州の平面

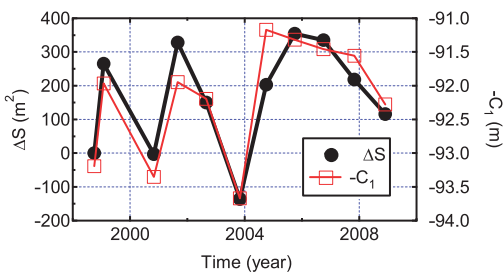


図-6 第1モード時間係数と海浜断面面積 (測線40)

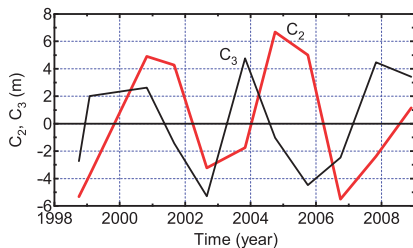
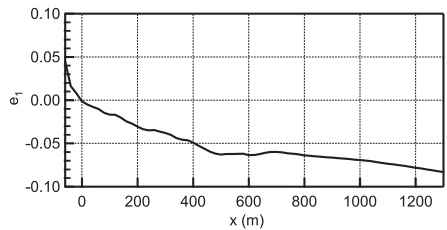
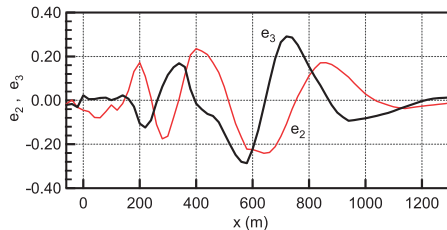


図-7 第2, 第3モードの時間係数 (測線40)



(a) 第1モード



(b) 第2, 3モード

図-8 空間係数 (測線40)

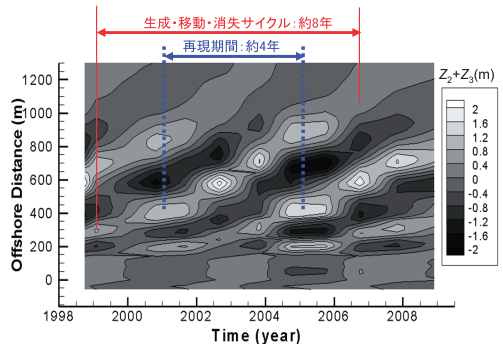


図-9 第2, 第3モードの重ね合わせ (測線40)

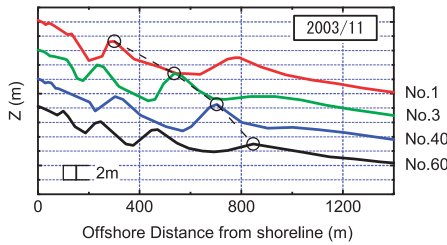


図-10 4測線の断面地形の比較例 (2003年)

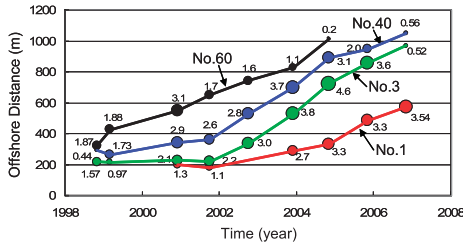


図-11 各測線における砂州頂部移動の比較例 (円の大きさは砂州比高に比例)

的な形状および変動特性を解析した。図-10は、同時点における4測線の断面地形の比較例である。なお、沿岸方向に連続する砂州の頂部位置を例示するために、後述の図-11に対応するものを丸印と破線で繋いで示した。この時点では、各測線において、3段から4段の砂州が確認されるが、いずれの段においても、南側に向かうにつれ、汀線から砂州頂部までの離岸距離が小さくなる。つまり、平面的に見ると、砂州は汀線に対して緩やかに湾曲する弓なりの形状を描いており、前述の海底勾配変化と対応する。図-10において測線1で最沖に位置する砂州は、測線3では減衰し、さらに北側の測線40及び60では消失している。逆に、測線60で沖から3番目に形成されている砂州は、測線40以南では発達が不十分である。図-10で印をつけた砂州に着目し、4測線における頂部位置の経年変化を解析した例を図-11に示す。図中の数値は砂州比高(砂州頂部高とトラフ底部高の差)を表す。北側の測線から南側に向けて砂州移動が伝播していく様子が見取れる。以上まとめると、沿岸砂州は、南側ほど汀線に近く、その移動に際しては、汀線に対して緩やかな弧状を保ったまま全体に沖向きに移動し、北側から順に消失していると考えられる。

5. おわりに

本研究では、千里浜海岸周辺の海浜変形に関する研究の一環として、汀線および沿岸砂州の変動特性について現地測量データに基づく検討を行った。過去20年以上に渡る汀線測量結果から、長期的な侵食傾向と中期的な変動が共存することが確認された。過去10年の深淺測量結

果からは、汀線近傍の等深線が後退する一方、沖合の等深線は前進し、海底勾配が緩勾配化する傾向が見られた。また、砂州の沖向き移動が約4年のサイクルで繰り返され、砂州の形成・移動・消失過程は8年程度の期間に渡ることが示された。沿岸方向については、砂州は南側に位置するほど汀線に近づき、北側から南側へと砂州の移動が伝播していくことが確認された。経験的固有関数法による解析結果は、海浜地形変動の基本モードの特徴を良く抽出しており、砂州変動モードは、土砂総量の変化には寄与しないが、岸沖方向の配分を変化させることで、中期的な汀線変動を誘起し得ることを示した。

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および石川県土木部河川課より提供いただいた。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金の補助を受けた。千里浜海岸研究会における、日本大学・鷲見浩一准教授、金沢大学・斎藤武久准教授との議論からは、有益な示唆をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一 (1984) : 渚ドライブウェーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.355-359.
 宇多高明・熊田貴之・芹沢真澄・長山英樹 (2008) : 波向変動場で生じる漂砂大循環の発生メカニズム, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.506-510.
 加藤一正 (1984) : 長周期波と多段砂州の成因について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.441-445.
 早川和宏・由比政年・石田 啓 (2009) : 石川県千里浜海岸における沿岸砂州の変動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.1197-1201.
 由比政年 (2008) : 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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.596-600.
 Hayakawa, K., M.Yuhi, and H.Ishida (2009) : Migration of multiple sandbars on the Chirihama Beach, JAPAN, Proceedings of Coastal Dynamics 2009, in CD-ROM, Paper No.140, pp.1-11.
 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., and A. Kroon (1994) : The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965-1993, Marine Geology, Vol. 121, pp.187-197.
 Shand, R. D., D. G. Bailey, and M. J. Shepherd (1999) : An Inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions, J. Coastal Res., Vol. 15, No.3, pp.750-765.
 Wijnberg, K.M. and J.H.J. Terwindt (1995) : Extracting decadal morphological behavior from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, Marine Geology, Vol.126, pp. 301-350.
 Winant, C. D., D. L. Inman, and C. E. Nordstrom (1975) : Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, J. Geophysical Res., Vol. 80, No. 15, pp.1979-1986.