

石川海岸松任地区における沿岸砂州の長期変動特性

由比政年¹・山田文彦²・楳田真也³・石田 啓⁴

石川海岸周辺の広域流砂系に関する研究の一環として、松任地区における沿岸砂州の長期変動特性を解析した。対象領域全域において、砂州は多段であり、沖側砂州は、最大で 6 m 程度の比高を有している。これらの砂州は、10 年前後の周期で変動しており、観測期間中に約 4 周期の変動が確認された。沖側砂州の移動範囲は、1980 年代に一時的に縮小し、この要因の 1 つとして、離岸堤の建設など、人為的な影響が示唆された。岸側および沖側砂州の頂部位置の変動は逆位相に近く、両者間距離にも周期的な増減が見られた。また、砂州頂部の沖向き移動速度は、沖側砂州と岸側砂州で異なり、岸側砂州の移動速度は沖側砂州の 1/3 程度であった。

1. はじめに

沿岸域環境の基盤となる土砂の移動形態やその収支は、自然的・人為的な複合要因の影響下にあり、複雑な様相を呈する。とりわけ、10 年程度かそれ以上の期間に渡る長期時間スケール、および、砂防・河川・海岸といった広域空間スケールを有する現象については、その問題の複雑さや観測データの不足等により、未解明の点も多い。このような広域土砂動態を把握するためには、長期的・広域的視点から、海底地形変動をモニタリングし、その特性を一步步つて解明していくことが必要である。

冬季高波浪を受ける日本海沿岸では、活発な漂砂移動により大規模な沿岸砂州（バー）が発達する（大森ら、1971）。外浜の地形変動を特徴づける砂州の時空間変動特性と周辺海浜の変形過程との関連を解析し、工学的知見を蓄積することは、調和的な沿岸環境保全を実現する上できわめて重要である。このため、沿岸砂州に関する研究は、従来から、広く実施されてきた（Komar, 1998; Dean・Dalrymple, 2002）。近年では、長期にわたる観測データに基づいて、砂州の周期的な変動特性を解析した結果も報告されている（Wijnberg・Terwindt, 1995; Ruessink・Terwindt, 2000; Kuriyama, 2002; Ruessink ら, 2003）。これらの研究は、主に、比較的安定した、準平衡的な海浜を対象としたものである。

現在、多くの海岸は、自然的・人為的な要因により、長期的な侵食傾向にある。由比ら（2005）は、石川海岸の手取川河口付近において、長期的な海岸侵食に伴い、砂州の岸沖方向移動範囲が縮小傾向にあることを示した。このような侵食性海岸における沿岸砂州の変動特性を長期的視点から解析し、人為的なインパクトとの相関や、その前後での遷移応答過程を明らかにしていくことも、

沿岸域の持続的発展を考える上で重要である。こうした観点から、本研究では、石川海岸周辺の広域流砂系に関する研究（由比ら, 2004, 2005）の一環として、松任地区における沿岸砂州の長期変動特性について検討を行う。

2. 石川海岸松任地区の概要

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）。沖合における波の主方向は NNW から W であり、年最大有義波高は、5~8 m 程度に達する。通年の沿岸漂砂の卓越方向は西向き（図-1 で右から左）である（田中ら, 1997）。

冬季高波浪の厳しい自然条件に加え、高度成長期以降のダム建設や砂利採取等による河川土砂供給の変化（由比ら, 2004, 2005）、海浜部における砂利採取の影響（宇多ら, 2001）等、人為的影響も相まって、石川海岸は長期的侵食傾向にある。自然的・人為的な複合要因により、石川海岸の汀線は、1892 年から 1970 年の約 100 年間で 200 m 程度後退した（田中ら, 1997）。国土交通省金沢河川国道事務所資料によると、松任地区徳光地先においても、1947 年から 1969 年にかけて海浜幅が約 50 m 縮小している。こうした侵食対策として、1970 年以降、多くの海岸構造物が建造された。その結果、汀線近傍の侵食は緩和され、松任地区徳光地先においても 1969 年から 1989 年にかけて海浜幅が約 80 m 回復している。しかしながら、沖合では、現在でも依然として侵食が進行中である（二木ら, 2004）。

石川海岸では大規模な沿岸砂州が発達しており（大森ら, 1971; 武藤ら, 1992; 二木ら, 2004）、その海浜型は、Wright・Short (1984) の分類に従えば、long-shore bar trough, あるいは、rhythmic bar & beach (いずれも、大分類としては Intermediate) に相当する。この砂州は、時間的に様々なスケールの変動を示す。武藤ら (1992) は、冬季高波浪による砂州の移動について、現地観測に基づく検討を行い、形状変化や土砂移動の特性について論じている。一方、二木ら (2004) は、10~15

1 正会員 博(工) 金沢大学助教授大学院自然科学研究科
2 正会員 博(工) 熊本大学助教授大学院自然科学研究科
3 正会員 博(工) 金沢大学助手大学院自然科学研究科
4 フェロー 工博 金沢大学教授大学院自然科学研究科

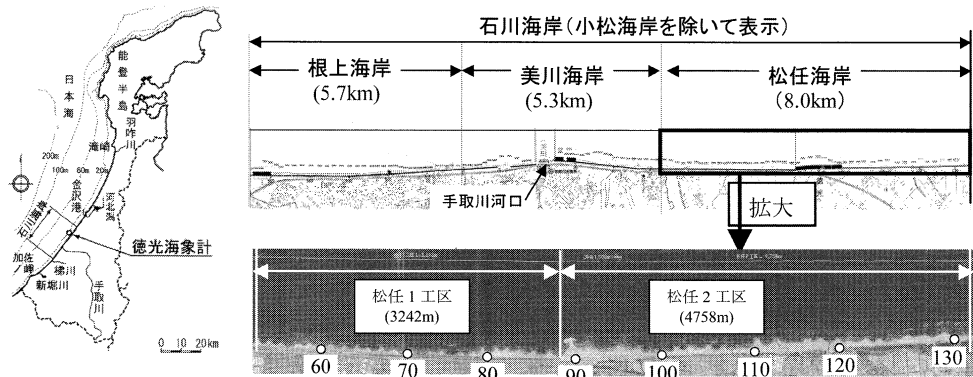


図-1 石川海岸と松任地区の概要

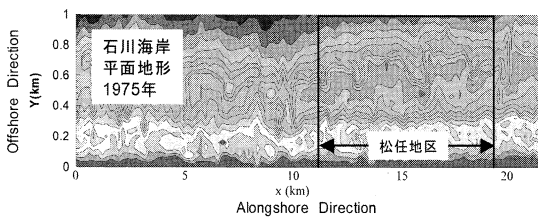


図-2 石川海岸における沿岸砂州の発達例

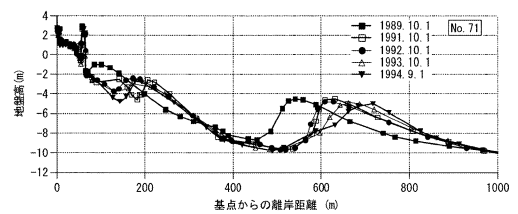


図-3 断面地形変化の例 (測線71)

年程度を1サイクルとした砂州の岸沖変動が存在することを指摘している。本研究では、こうした長期時間スケールにおける変動に着目する。

3. 解析結果および考察

本研究では、国土交通省金沢河川国道事務所において、40年以上の長期間実施されてきた深浅測量結果に基づいて海底地形変化の解析を行った。今回使用したデータは、1960年～2003年に取得されたものである。なお、測量は、年1回、主に秋季(10月初旬)に実施されている。まず、沿岸方向8.0km(図-1)の範囲に約400m間隔で設置された20本の測線データを用いて、計1,405個の砂州を抽出した。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。

次に、砂州頂部とトラフでの水深の関係、基点からの離岸距離(沖向きを正)や比高(砂州頂部高とトラフ底部高の差、図-4参照)の存在範囲など、個々の砂州形状に関する基本特性を検討した。さらに、沿岸砂州の時間的・空間的変動特性、人為的なインパクトの影響などについて検討を行った。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20cmより大きいもののみを砂州として抽出した。また、砂州頂部(あるいはトラフ底部)となる点の地盤高が2測点以上で一致(差が20cm以内)する場合には、離岸距

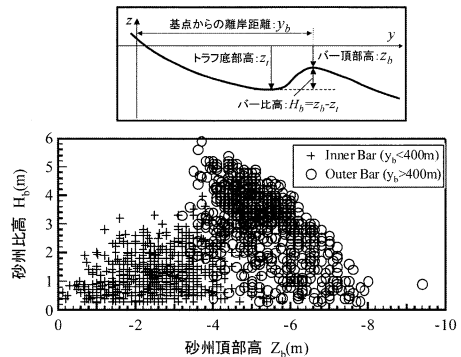


図-4 砂州比高と頂部高

離および地盤高として、該当測点間の平均値を取って対応した。

(1) 砂州断面形状の基本特性

対象領域とその周辺を含む石川海岸における沿岸砂州の発達例を図-2に示す。この例では、基点から600～800m程度の沖合に大規模な沿岸砂州が発達している。図-3では、対象領域内の1測線を抜き出して、断面地形の経年変化を例示した。この図からも複数の砂州の存在と活発な移動が確認できる。対象領域全域において、砂州は、多くの場合2段であり、最多で4段の場合が確認された。このうち、沖側砂州の頂部位置は、およそ離岸距離400～800mの範囲で移動している。

図-4には、朔望平均干潮位(T.P. + 0.01 m)を基

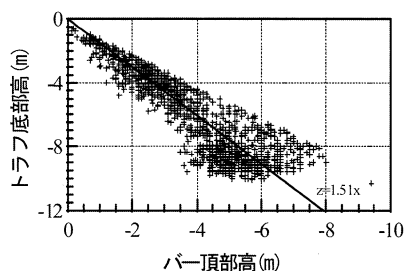


図-5 砂州頂部高とトラフ底部高

準とした砂州頂部高と比高との関係を示す。沖側砂州（砂州頂部の離岸距離 $y_b > 400$ m）の比高は、頂部水深 4 m 周辺（離岸距離約 600 m に相当）で、最大 6 m 程度の大規模なものとなっている。なお、砂州の比高は、最初、沖へ移動するにつれて大きくなり、ある距離で最大となった後に減少する。これは、既往の報告（たとえば、大森ら、1971）とも一致する。一方、岸側砂州については、頂部水深 2 m（離岸距離約 300 m）付近に比高の弱いピークが見られる。なお、各測線における比高の最大値は、およそ 4.5 m から 6.0 m の範囲で推移しており、今回の対象領域全域で大規模な砂州が発達していることを確認している。

次に、砂州頂部高とトラフ底部高の関係を図-5 に示す。両者間の回帰直線の勾配は 1.51 であり、米国西海岸に対して報告されている値（= 1.69）（Keulegan, 1945）よりやや小さく、大森ら（1971）が日本の沿岸に対する平均値として示した値（1.47）に近い結果となった。

(2) 砂州離岸距離の経年変化

図-6 は、各測量年で観測されたすべての砂州について頂部離岸距離をプロットし、砂州位置の経年変化を松任 1 工区、2 工区別に表示したものである。沖側の砂州は約 10 年前後の周期で変動しており、観測期間中に約 4 周期の変動が確認できる。この図において、1960 年代および 70 年代の変動は、その範囲や形態が良く類似している。しかしながら、この後、沖側砂州の移動範囲は、1980 年代に一時的に縮小し、その後再び回復する様子を示している。この 80 年代の乱れに関連した要因の 1 つとして、同時期に松任地区において、積極的に離岸堤群の建設が行われ、海浜土砂が離岸堤背後のトンボロ形成のために捕獲されて、土砂収支の局所的バランスが崩壊したことが考えられる。また、1970 年代～80 年代半ばにかけて、河川砂利採取やダム建設等の影響で石川海岸の海岸土砂量が急減したこと（由比ら、2005）等の、より広域的な人為インパクトの影響も考慮する必要がある。90 年代半ば以降、砂州の移動範囲は回復している。これより、沿岸砂州を含む海浜システムは、70 年代までの平衡状態から 80 年代の乱れと緩和過程を経

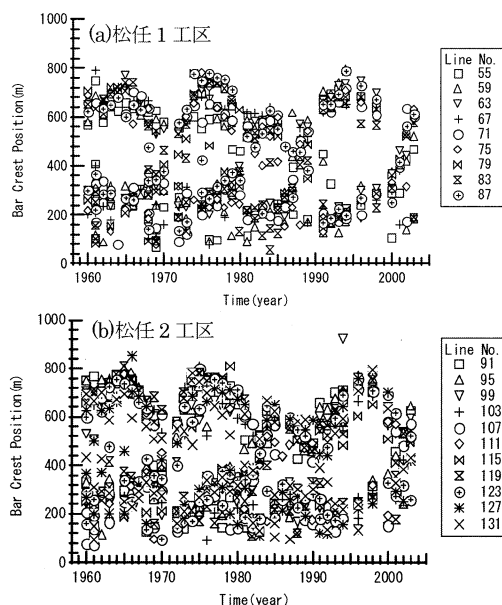


図-6 砂州離岸距離の経年変化（表示のない年は欠測）

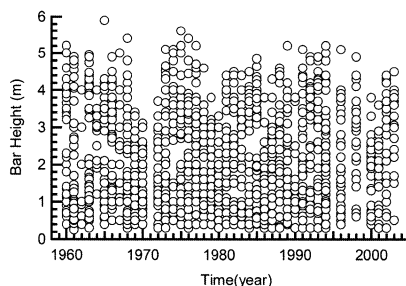


図-7 砂州比高の経年変化（表示のない年は欠測）

て、新しい平衡状態へと遷移したものと解釈できる。ただし、この点については、今後も長期的な検討を継続していく必要がある。なお、砂州の変動位相は、当初、1, 2 工区で同様であるが、80 年代半ば以降、両工区間で位相のずれが見られる。

図-7 は、全測線における砂州比高の経年変化を示したものである。前述したように、沿岸砂州は岸沖方向に周期的に変動し、その過程において、離岸距離 600 m 付近で最大の比高を取る。このことを反映して、砂州比高の経年変化も周期的となる。また、比高が極小となるのは、沖側の砂州が最も岸寄りに位置する時期と符合する。

図-8(a) は、領域内の 1 測線 (No. 63) を取り上げ、海底地盤高の 9 年移動平均により求められた長期地形変動と、砂州頂部位置の経年変化の関係を例示したものである。岸側および沖側砂州の変動は逆位相に近く、両者間距離にも周期的な増減が見られる。なお、この測線において、砂州の沖側移動範囲が縮小傾向にある期間には、

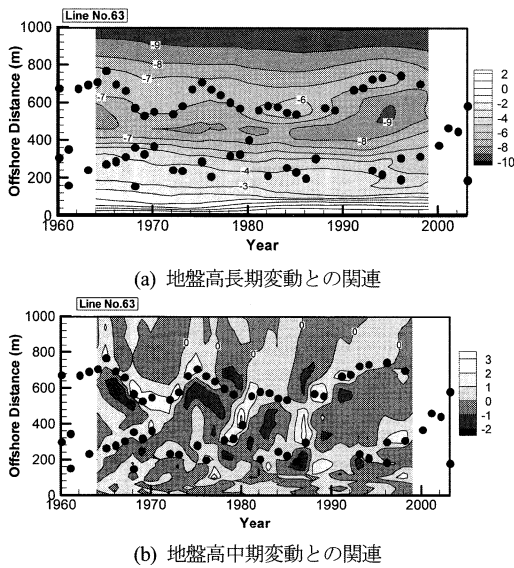


図-8 砂州頂部位置（黒丸）と地盤高変動（測線 No.63）

離岸堤の建設により、汀線近傍が堆積傾向にあり、逆に、沖側 7 m の等深線が岸寄りに移動した時期と符合している。他の測線でも、同様の傾向が確認されている。

図-8(b)は、元データと移動平均の差の形で抽出された中期・短期変動と砂州位置との関係を示す。砂州頂部の沖向き移動速度は、沖側砂州と岸側砂州で異なり、岸側砂州の移動速度は沖側砂州の 1/3 程度となっている。

(3) 経験的固有関数法による解析結果

ここでは、実数型の経験的固有関数法 (EOF) 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（例えば、Winant ら, 1975 ; Kuriyama, 2002 ; Ruessink ら, 2002 等）。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 (20 m) に再配置し、基点からの離岸距離 400 m 地点から沖合 1000 m (水深約 10 m) の区間を対象に解析を行った。

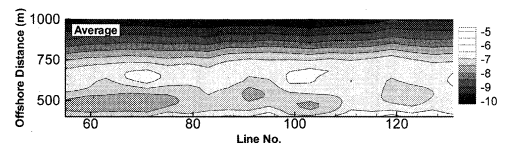


図-9 期間平均地形

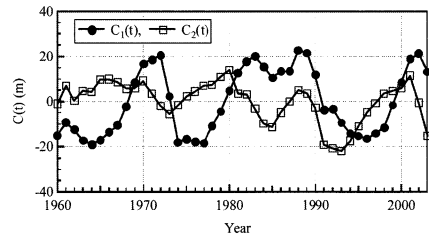
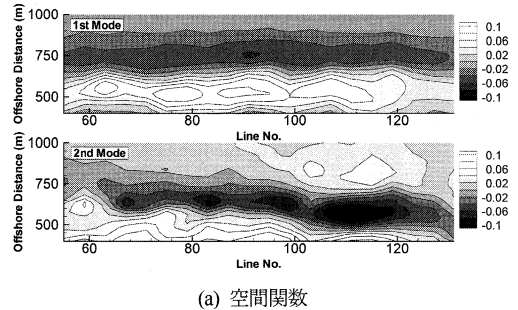


図-10 経験的固有関数法による解析結果

岸側の解析境界を 400 m 地点としたのは、離岸堤の建設により地形が急変した領域を除外し、沖側砂州の変動を効果的に抽出するためである。欠測年についても、前後のデータから線形補間を行った。以下では、こうして等間隔に再配置された地盤高データと期間平均地形 (図-9) との差を取った後に EOF を適用した結果を示す。

経験的固有関数法により求められた固有関数を図-10 に示す。図中には、上位 2 モードまでを表示している。第 1、第 2 モードの寄与率は、それぞれ、34.7、13.2% であり、この 2 つのモードで全変動の約 1/2 を表している。第 1、第 2 モードの時間係数は、位相が約 1/4 周期ずれた形となり、この組み合わせで砂州の周期変動に対応する。この時間係数の変化においても、周期的な変動と 80 年代の乱れが明確に捉えられている。図-11 は、平均地形と第 1、第 2 モードを重ね合わせて、砂州変動の特徴的なモードを約 1 周期分示したものである。この図でも、砂州の移動過程が明瞭な形で捉えられている。

4. おわりに

本研究では、石川海岸周辺の広域流砂系に関する研究の一環として、松任地区における沿岸砂州の長期変動特性について検討を行った。その主要な成果は以下のよう

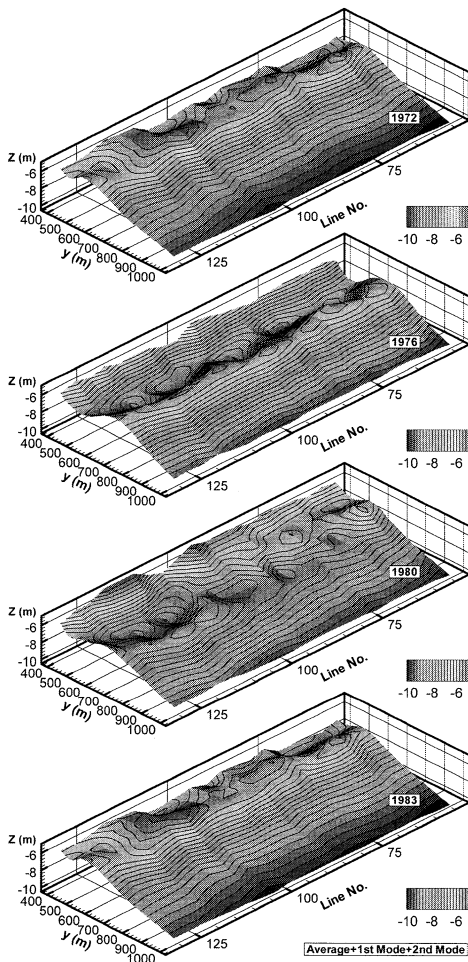


図-11 第1, 第2モードで表される変動例
(期間平均地形との重ね合わせ)

にまとめられる。

- (1) 44年間の測量データを20測線について解析し、計1405個の砂州を抽出した。領域全域で、砂州は一般に多段であり、沖側砂州は、最大で5~6m程度の比高を持つ大規模な形へと発達することが確認された。
- (2) 対象領域内の沿岸砂州は、10年前後の周期で移動し、観測期間中に約4周期の変動が確認された。沖側砂州の移動範囲は、1980年代に一時的に縮小した。この要因の1つとして、離岸堤の建設や海岸土砂量の急減など、人為的インパクトの影響が示唆された。
- (3) 岸側・沖側砂州の頂部位置の変動は逆位相に近く、両者間距離にも周期的な増減が見られた。砂州頂部の沖向き移動速度は、沖側・岸側砂州で異なり、岸側砂州の移動速度は沖側砂州の1/3程度であった。

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。本稿を準備するにあたり、桑原美里さん（当時金沢大学学部学生）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

- 宇多高明・弘田英人・三波俊郎(2001)：郷土史に基づく南部石川海岸の侵食原因調査，海洋開発論文集，第17巻，pp. 571-576。
- 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，445p。
- 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・中谷 健・石田 啓・山内正彦・二俣 秀・高橋 至(2004)：手取川河口域周辺の海底地形変化に対する河川土砂供給の影響に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp. 576-580。
- 由比政年・山田文彦・石田 啓(2005)：手取川河口周辺における海底地形の長期変動に対する河川土砂管理の影響，海岸工学論文集，第52巻，pp. 616-620。
- Dean, R. G., and R. A. Dalrymple(2002)：Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge Univ. Press, 475p.
- Keulegan, G. H.(1945)：Depths of offshore bars, Engineering Notes No. 8, Beach Erosion Board, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Komar, P. A.(1998)：Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, Prentice-Hall Inc., 544p.
- 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 J.H.J. Terwindt(2000)：The behavior of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model, Marine Geology, Vol.163, pp. 289-302.
- 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.
- 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.
- Wright, L. D. and A. D. Short(1984)：Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis, Marine Geology, Vol. 56, pp. 93-118.