

波崎海洋研究施設で観測された断面変化の卓越周期の変動特性

栗山善昭*・伊東啓勝**

茨城県の波崎海洋研究施設において 15 年間にわたりほぼ毎日取得された断面データを経験的複素固有関数法 (CEOF 解析) を用いて解析した。本解析領域における断面変化としては沿岸砂州の移動が卓越しており, CEOF 解析のモード 1 の複素時間係数の位相は砂州頂部位置と強い相関があった。位相の変化率から求められる砂州の冲向き移動速度は, 1994 年以前は $0.8 \sim 1.3$ cycle/year (周期 $0.7 \sim 1.25$ 年) であったものの, 1994 年以降, 次第に遅くなり, 1996 年末には 0.1 cycle/year (周期 10 年) にまで低下した。その後, 移動速度は 1993 年以前の速度に次第に戻りつつある。この砂州の沖への移動速度は沖波のエネルギーフラックスと正の相関があった。

1. はじめに

沿岸砂州の動きに代表される大規模で 1 年以上の周期を持った地形変化は汀線近傍の地形変化や生態系に影響を与えと考えられ, 世界各地でその変化特性が調べられてきている。例えば, 茨城県の波崎海岸では 1 年周期の沿岸砂州の冲向き移動が (栗山, 2001; Kuriyama, 2002), アメリカ東海岸では 4 年周期 (Birkemeier, 1984; Lippmann ら, 1993), オランダでは 6~20 年周期 (Ruessink・Kroon, 1994; Wijnberg・Terwindt, 1995), ニュージーランドでは 2~5 年周期 (Shand・Bailey, 1999) の砂州の冲向き移動が観測されている。しかしながら, このような大規模な地形変化の卓越周期の変動, すなわち一定の周期で砂州は移動しているのか, あるいはその周期は変動しているのか, に関しては知見がほとんど得られていない。そこで, 本研究では, 波崎海洋研究施設で得られた断面データを基に, 大規模な断面変化に注目して, 断面変化の卓越周期の変動特性を検討した。

2. 現地データの概要

茨城県の波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設 (図-1) では, 長さ約 400 m の観測棧橋に沿って, 休日を除く 1 日 1 回, 5 m 間隔で断面を測定している。陸上部の断面はレベルとスタッフを用いて測量し, 海域部は棧橋上から重さ約 5 kg のレッドを降ろして測量する。本研究では, 1987 年 1 月~2001 年 12 月までに観測された断面データを使用した。図-2 は観測期間中の平均断面と標準偏差とを示したものである。岸沖方向距離 180 m~380 m の範囲では沿岸砂州が発生, 移動, 消滅するため標準偏差, すなわち地形変動量が大きくなっている。なお, 以下では, 観測棧橋上の位置を図-2 の座標を基に示す (例えば, 岸沖方向距離 190 m の観測地点名は P 190 m とする)。

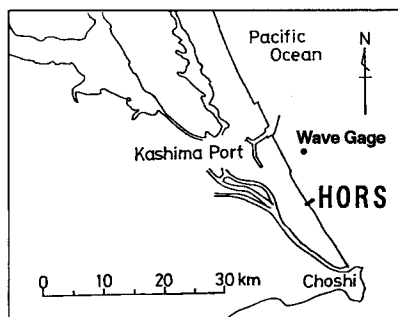


図-1 波崎海洋研究施設の位置

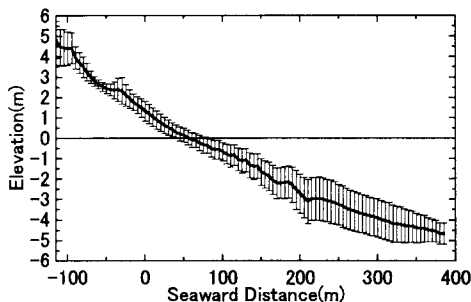


図-2 平均断面 (D.L.基準) と標準偏差 (太い実線は平均断面, 細い実線は標準偏差の 2 倍を示す。)

3. 断面の時間変動特性

まず, 平均断面からの変化量の時空間分布を図-3 に示す。P150 m 地点より沖の領域では, 解析期間前半の 1993 年以前では砂州あるいは深みが 1 年周期で沖へ移動していたのに対して, 1996 年以降では, 砂州が P200 m 地点から P300 m 地点にとどまっている期間が長くその周期が約 2 年弱になっている様子がうかがえる。

図-4 は砂州の頂部位置に注目してその時系列を示したものである。図-3 と同様に, 1993 年以前はほぼ 1 年周期で砂州頂部が沖へ移動しているものの, 1996 年以降は沖への砂州の移動速度が遅くなっている。

図-3, 4 で示された地形変化の周期変動を詳細に検討

* 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部漂砂研究室長

** 正会員 修(工) (株)エコー 沿岸デザイン本部調査解析部主任

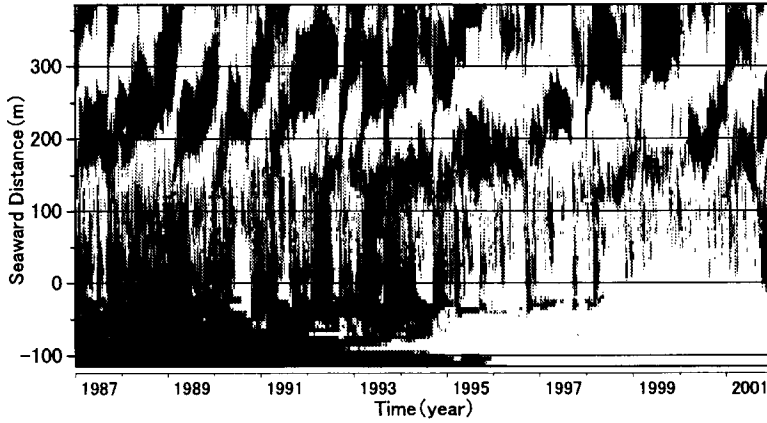


図-3 平均断面からの変化量の時空間分布 (白が平均断面よりも上方の領域を, グレーが平均断面よりも下方の領域を示す.)

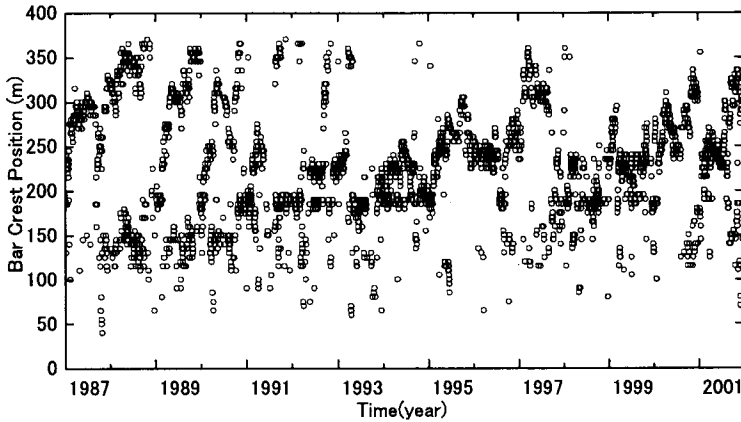


図-4 砂州頂部位置の経時変化

するために, P300 m 地点における地盤高さの変動に対して解析期間を7年とする STFT (Short Time Fourier Transform) を適用した. 図-5 はその結果の一部を示したもので, P300 m 地点では, 解析期間前半において周期1年の変動エネルギーが大きいものの, 次第に周期1.6年(周波数 $f=0.0017$ cycle/year) の変動エネルギーが大きくなっており, 図-3, 4 に見られた地形変化の卓越周期の違いがこの解析結果に明瞭に現れている.

次に, この地形変化の卓越周期の変動を図-3 に示されている平均断面からの変動量に対して経験的複素固有関数法 (CEOF 解析) を適用することにより検討した. CEOF 解析は経験的固有関数法 (EOF 解析) が拡張されたもので, 式 (1) で定義される複素地盤高さ $Z(x, y, t)$ を複素の時間係数と複素の固有関数との積 (式 (2)) に分解するものである (例えば, Liang・Seymour, 1991; 横木ら, 1998; 北野ら, 1999; Ruessink ら, 2000; Kuriyama・Lee, 2001; 内山・栗山, 2003).

$$Z(x, y, z) = z(x, y, t) + i\bar{z}(x, y, t), \dots\dots\dots (1)$$

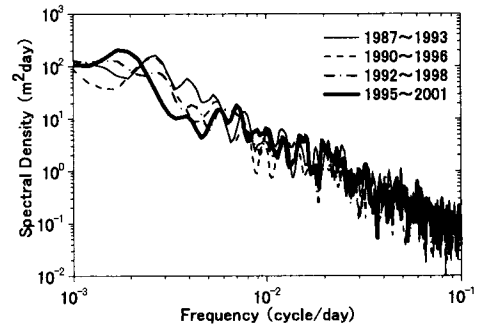


図-5 地盤高さ変動のスペクトル解析結果

$$Z(x, y, t) = \sum_n (C_{nr}(t) + iC_{ni}(t)) \cdot (e_{nr}(x, y) - ie_{ni}(x, y)), \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $\bar{z}(x, y, t)$ は地盤高さ $z(x, y, t)$ の Hilbert 変換値, $C_{nr}(t)$ と $C_{ni}(t)$ はそれぞれモード n の複素時間係数の実数部と虚数部, $e_{nr}(x, y)$ と $e_{ni}(x, y)$ はそれぞれモー

ド n の複素固有関数の実数部と虚数部である。

モード n で表される地盤高さの変動 $z_n(x, y, t)$ は固有関数の共役複素関数を用いて式 (3) で再合成される。

$$z_n(x, t) = \text{Re}\{(C_{nr}(t) + iC_{ni}(t)) \cdot (e_{nr}(x, y) - ie_{ni}(x, y))\}. \quad \dots\dots (3)$$

式 (3) は以下の式に変形することができる (例えば, Ruessink ら, 2001)。

$$\left. \begin{aligned} z_n(x, t) &= S_n(x) R_n(t) \cos\{\theta_n(x) - \phi_n(t)\}, \\ S_n(x) &= \sqrt{e_{nr}(x)^2 + e_{ni}(x)^2}, \\ R_n(t) &= \sqrt{C_{nr}(t)^2 + C_{ni}(t)^2}, \\ \theta_n(x) &= \arctan(e_{ni}(x)/e_{nr}(x)), \\ \phi_n(t) &= \arctan(C_{ni}(t)/C_{nr}(t)). \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで、複素時間係数の位相 $\phi_n(t)$ は各モードにおける地形変化の時間位相を表しており、 $\phi_n(t)$ の変化率が断面変化の速度となる。

図-6 は、CEOF 解析のモード 1 (寄与率 49%) における複素固有関数 e_{1r} , e_{1i} およびその振幅 $S_1(x)$ を示したものである。複素固有関数は P150 m 地点よりも沖側で大きくなっており、モード 1 が主として沿岸砂州の移動を表していること、および、その地形変化が本解析領域における卓越する地形変動であることがわかる。沿岸砂州の発達する P200 m 地点～P360 m 地点までの領域の各観測地点の地盤高さ変動におけるモード 1 の寄与率は 70% 以上であった。

図-7 はモード 1 の複素時間係数の位相 $\phi_1(t)$ を示したものである。複素時間係数の振幅 $R_1(t)$ が小さい場合には $\phi_1(t)$ に大きな誤差が含まれる可能性があるので、 $R_1(t)$ が 1.0 m 未満の場合の $\phi_1(t)$ は、 $R_1(t)$ が 1.0 m 以上の場合の $\phi_1(t)$ を用いて線形補間した値に置き換えた。

複素時間係数の位相 $\phi_1(t)$ の変動は図-4 に示される沿岸砂州の頂部位置の変動と似たような傾向を示している。そこで、 $\phi_1(t)$ と沿岸砂州の位置との関係を検討し、図-8 にその結果を示した。両者の相関は高く、 $\phi_1(t)$ は砂州頂部の位置を良く表している。すなわち、 $\phi_1(t)$ の変化率は砂州頂部の移動速度を表しており、負の $\phi_1(t)$ の変化率は沖向きの砂州移動を表していることになる。

続いて、 $\phi_1(t)$ の変化率 $d\phi_1/dt$ を検討した。 $\phi_1(t)$ の 1 日の変化量より求められる $d\phi_1/dt$ のスペクトル解析結果 (図-9) は、 $d\phi_1/dt$ の変動では 40 日 ($f=0.025$ cycle/day), 180 日 (6 ヶ月, $f=0.0055$ cycle/day) および 700 日 (1.9 年, $f=0.0014$ cycle/day) の周期の変動が卓越していることを示している。ここで、砂州の長周期変動を検討するために $d\phi_1/dt$ の 100 日以上 の長周期成分および 1000 日以上 の長周期成分を再合成して図-10 に示した。 $d\phi_1/dt$, すなわち沿岸砂州の移動速度は、6 ヶ月周

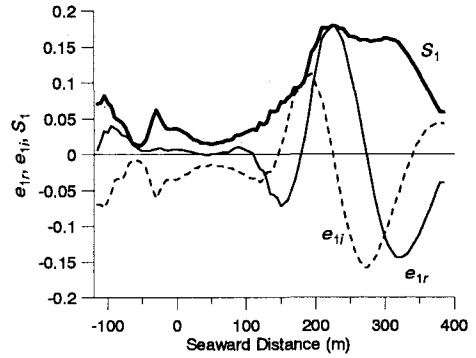


図-6 モード 1 の複素固有関数 e_{1r} , e_{1i} と振幅 S_1

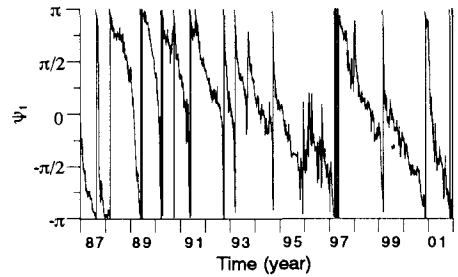


図-7 モード 1 の複素時間係数の位相 ϕ_1

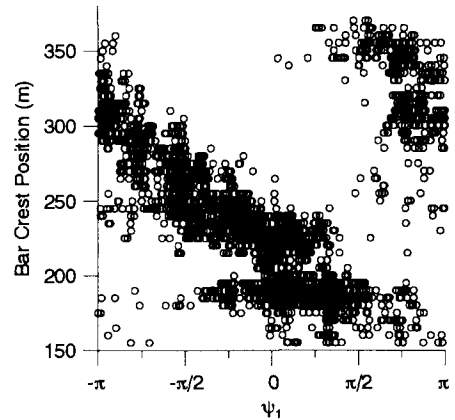
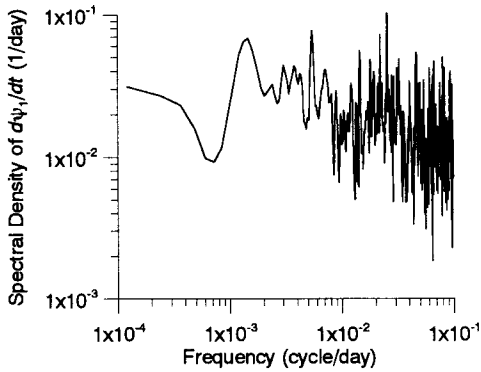
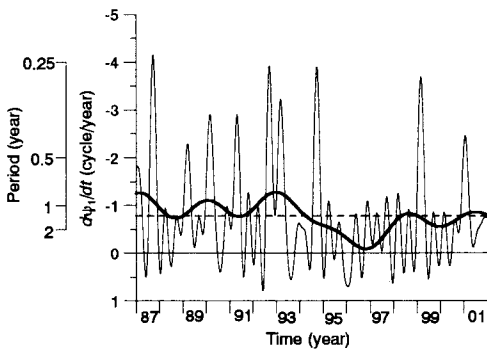


図-8 モード 1 の複素時間係数の位相 ϕ_1 と砂州頂部位置との関係

期で -4 cycle/year (沖向き移動) ～0.5 cycle/year (岸向き移動) の間で変動している。1000 日以上の変動では、砂州の移動速度は 1994 年以前は -1.3 ～ -0.8 cycle/year (沖向き移動, 周期 0.7 ～ 1.25 年) で変動していたものの、1994 年以降、次第に遅くなり、1996 年末には -0.1 cycle/year (沖向き移動, 周期 10 年) となった。その後、次第に移動速度が 1993 年以前の速度に戻りつつある。

図-9 $d\psi_1/dt$ のスペクトル解析結果図-10 $d\psi_1/dt$ の長周期成分 (細い実線は 100 日以上の長周期成分を, 太い実線は 1000 日以上の長周期成分を, 破線は全期間の平均を示す.)

4. 沿岸砂州の移動速度と外力との関係

次に, 沿岸砂州の移動速度の変動の原因を検討するために, 沖波のエネルギーフラックス (式 (5)) と砂州の移動速度との関係を検討した。

$$E_f = \frac{1}{16} \rho g (H_{1/3})_0^2 C_{g0}, \dots\dots\dots (5)$$

ここで, E_f は沖波のエネルギーフラックス, $(H_{1/3})_0$ は 1 日平均の沖波有義波高, C_{g0} は沖波の群速度である。1 日平均の沖波有義波高および群速度は鹿島港沖の水深約 23 m の地点 (図-1) で観測された 2 時間毎の沖波有義波高・周期を算術平均して得られた値を基に求めた。また, 長期欠測期間 (1993 年 2 月 7 日～3 月 3 日) の沖波波高・周期は, 橋本ら (1999) の波浪推算方法によって求めた。

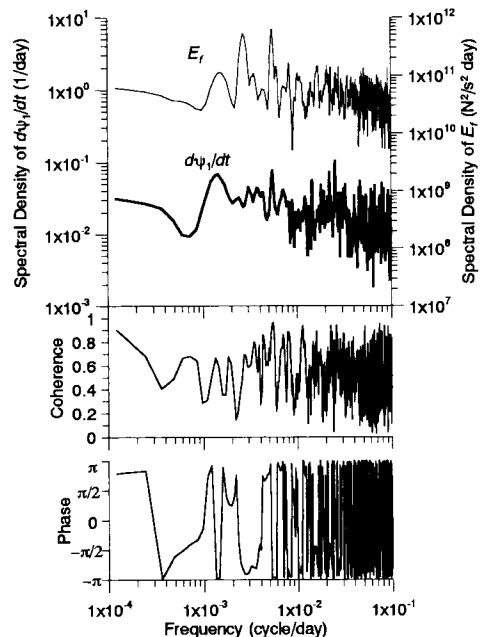
図-11 は, $d\psi_1/dt$ と E_f のクロススペクトルの結果を示したものである。沖波のエネルギーフラックスは 180 日 (6 ヶ月, $f=0.0055$ cycle/day), 370 日 (1 年, $f=0.0027$ cycle/day), 630 日 (1.7 年, $f=0.0016$ cycle/day) 周期の変動が卓越しており, $d\psi_1/dt$ と E_f のコヒーレンスは 180 日周期で最も高く, それ以外の周期でも比較的

高い値となっている。位相に関しては, いずれの周期でもほぼ逆位相となっており, 沖波が大きいたときに $d\psi_1/dt$ の負の値が大きくなる, すなわち, 砂州の沖向き移動速度が大きくなっている。

図-12 は, 図-10 と同様に E_f の 100 日以上の長周期成分および 1000 日以上の長周期成分を示したものである。図-11 のクロススペクトルの結果からも明らかなように, 沖向き移動速度は沖波エネルギーフラックスと相関があり, 1000 日以上 of 長周期成分を見ると, 1994 年～1997 年にかけての砂州の沖向き移動速度の減少ならびに 1997 年以降の砂州の沖向き移動速度の増加 (図-10) は沖波エネルギーフラックスの減少・増加 (図-12) にある程度対応している。100 日以上の変動を見ると, 1993 年以前においては沖波の 6 ヶ月周期に対応して, 沖波のエネルギーフラックスが大きいたときに砂州の沖向き移動速度が大きくなっている。しかし, 1994 年以降では砂州の沖向き移動速度は必ずしも沖波のエネルギーフラックスの変動に対応しておらず, これが, 1994 年から 1997 年にかけての砂州の沖向き移動速度の減少の原因の一つになっていると考えられる。

5. 結 論

波崎海洋研究施設において 15 年間にわたりほぼ毎日取得された断面データを経験的複素固有関数法 (CEOF 解析) などを用いて解析したところ, 以下のことが明らかとなった。

図-11 $d\psi_1/dt$ と E_f のクロススペクトル解析結果

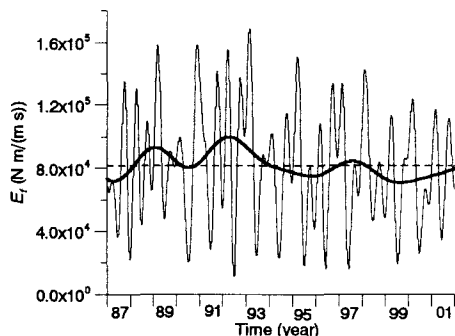


図-12 E_f の長周期成分(細い実線は 100 日以上の長周期成分を, 太い実線は 1000 日以上の長周期成分を, 破線は全期間の平均を示す。)

- ① 本解析領域では EOF 解析のモード 1 で表される沿岸砂州の移動が卓越する地形変化であった。沿岸砂州の頂部の位置は, モード 1 の複素時間係数の位相 ϕ (式(4)) と強い相関があった。
- ② $d\phi/dt$ で表される沿岸砂州の移動速度の 100 日以上 の長周期成分に注目すると, 砂州の移動速度は 6 ヶ月周期で -4 cycle/year (沖向き移動) ~ 0.5 cycle/year (岸向き移動) の間で変動していた。1000 日以上の変動においては, 砂州の移動速度は 1994 年以前は $-1.3 \sim -0.8$ cycle/year (沖向き移動, 周期 0.7 $\sim$ 1.25 年) の間で変動していたものの, 1994 年以降, 次第に遅くなり, 1996 年末には -0.1 cycle/year (沖向き移動, 周期 10 年) となった。その後, 次第に移動速度が 1993 年以前の速度に戻りつつある。
- ③ 砂州の沖への移動速度は沖波のエネルギーフラックスと相関があり, 砂州の沖向き移動速度の 1994 年 $\sim$ 1997 年にかけての減少ならびに 1997 年以降の増加は, それぞれ沖波エネルギーフラックスの減少, 増加にある程度対応していた。

謝辞: 本研究で使用した沖波データは国土交通省鹿島港湾・空港整備事務所と当所海象情報研究室より提供されたものであり, 波浪推算データは当所橋本海洋水理研究室長より提供されたものである。また, 本研究で使用した断面データは, 波崎海洋研究施設に常駐した当所漂砂研究室のメンバーならびに(株)エコーの観測補助員によって取得されたものである。ここに記して謝意を表す

る。

参考文献

- 内山雄介・栗山善昭 (2003): 仙台湾蒲生干潟前面海浜地形の中期地形変動に関する複素主成分解析, 土木学会論文集, No. 747, pp. 135-153.
- 北野利一・中野 晋・岡 彰紀・間瀬 肇 (1999): 主成分解析による新たな地形変動分析法に関する理論的検討, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 626-630.
- 栗山善昭 (2001): 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性, 土木学会論文集, No. 677, pp. 115-128.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999): 第 3 世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻, 第 4 号, pp. 3-47.
- 横木裕宗・三村信男・佐藤圭輔 (1998): 主成分分析を用いた大洗港周辺の海浜地形解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 571-575.
- Birkemeier, W.A. (1984): Time scales of nearshore profile changes, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1507-1521.
- Kuriyama, Y. (2002): Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, Journal of Geophysical Research, Vol. 107 (C9), 3132, doi: 10.1029/2001JC000899.
- Kuriyama, Y., and Lee, J. H. (2001): Medium-term beach profile change on a bar-trough region at Hasaki, Japan, investigated with complex principal component analysis, Proc. Coastal Sediments '01, ASCE, pp. 959-968.
- Liang, G., and Seymour, R. (1991): Complex principal component analysis of wave-like sand motions, Proc. Coastal Sediments '91, ASCE, pp. 2175-2186.
- Lippmann, T.C., Holman, R.A. and Hathaway, K.K. (1993): Episodic, nonstationary behavior of a double bar system at Duck, North Carolina, U.S.A., 1986-1991, J. Coastal Res., Special Issue 15, pp. 49-75.
- Ruessink, B.G. and Kroon, A. (1994): The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965-1993, Marine Geology, 121, pp. 187-197.
- Ruessink, B. G., Van Enckevort, I. M. J., Kingston, K. S., and Davidson, M. A. (2000): Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour, Marine Geology, Vol. 169, pp. 161-183.
- Shand, R.D. and Bailey, D.G. (1999): A review of net offshore bar migration with photographic illustrations from Wanganui, New Zealand, J. Coastal Res., Vol. 15, No. 2, pp. 365-378.
- Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. (1995): Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigen function analysis, Marine Geology, 126, pp. 301-330.