

汀線とバーの変動と沿岸方向移動

武若 聡¹・松本亮介²・笹倉慎也³・El Sayed Galal⁴

汀線形状とバー地形を X バンドレーダで連続的に観測し, これらの変動特性 (汀線とバーの平均存在位置, 形状の空間変動強度, 形状の沿岸方向移動) を解析し, 汀線とバー形状の沿岸方向移動について調べた. 静穏な状態が続くと海岸形状は複雑化し, 荒天時にはこれが一様化する, いわゆるビーチサイクルが確認された. 平均汀線位置は季節的に変化していたのに対して, 汀線形状は入射波浪の大小に応じて変動していた. 汀線とバー形状の沿岸方向移動を調べ, 汀線の波状形状が沿岸方向に移動していること, その移動方向が入射波浪の波下に向いていること, 高波浪により海岸地形が一様化すると移動状況が不鮮明になること, 高波浪により海岸地形が一様化しても沿岸方向移動が継続する場合があることなどを見出した.

1. 緒 言

汀線形状, バーの沿岸分布形状など海岸地形の特徴的な部分が沿岸方向に伝播する現象について, 各地における実態とその伝播速度に関する報告がある. 日本の海岸では, 侵食域・堆積域が沿岸方向に伝播し, その速度が 1~2 m/day (年平均値) のオーダーであることが報告されているが, この速さの成因が特定されるには至っていない (例えば, 宇多ら, 1994; 土屋, 1995, 1996; 宇多・板橋, 1997; 伊藤・伊藤, 1999). バーの沿岸方向移動については, 例えば, 鈴木・栗山 (2004) がその移動速度が 2~4 m/day 程度であることを報告している. 外国の海岸では, 例えば, Holman ら (2005) が 4 年間にわたるビデオ観測の結果を解析し, カスプ状地形と共に存在するリップチャンネルの位置, これらの沿岸方向移動, 移動速度が波浪の入射エネルギーと方向と関連性があることを報告している. このように, 海岸地形が沿岸方向に移動することは普遍的に見られる現象であるが, その移動メカニズムについては未知な点が多く残されている. 工学的な観点からは, 侵食域の沿岸方向伝播速度を知ることができれば, 侵食対策のスケジュール, 規模などをより合理的に定めることが期待できる.

本研究では, 鹿島灘の波崎海岸における汀線形状とバー地形を X バンドレーダで連続的に観測した結果を解析し, これらの変動特性 (汀線とバーの平均存在位置, 形状の空間変動強度, 形状の沿岸方向移動) を説明し, 汀線とバー形状の沿岸方向移動について議論する.

2. 観測の概要

(1) 観測サイト, データ収集

X バンドレーダ観測は, 茨城県波崎町 (2005 年 8 月

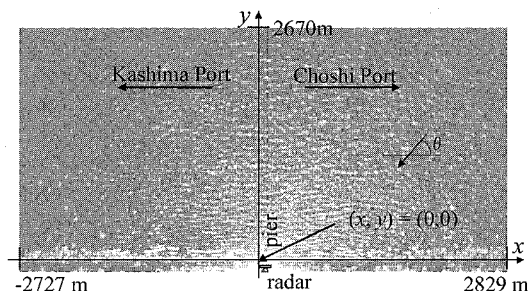


図-1 レーダ画像と座標系

より神栖市) にある港湾空港技術研究所の波崎観測栈橋 HORS で行った (松本・武若, 2005). この海岸の延長は約 17 km であり, 北端に鹿島海岸壁, 南端に銚子漁港と利根川河口がある. 観測栈橋は, 海岸の北端から約 4 km の地点にある. 後浜にある研究施設の屋上にレーダを設置した.

図-1 にレーダと栈橋の位置, 本論で用いる座標系を示す. 栈橋上に座標の原点, 沿岸方向に x 軸, 岸沖方向に y 軸をとった. エコーデータは 2 秒毎にレーダデータサンプリングボードを用いて PC に収録した. エコーデータは $1,024 \times 512$ ピクセル, 1 ピクセルあたり 256 階調の画像として記録した. 1 ピクセルは約 5.425 m に相当し, 輝度がレーダのエコー強度に対応している. 毎正時からの 17 分間のレーダエコー画像を平均化した平均画像を収集し, 汀線とバーの位置の沿岸方向分布を読み取った. レーダの観測範囲は沿岸方向 5.6 km, 岸沖方向 2.8 km である. 本論文では 2005 年 1 月から 12 月の間に収集したデータの解析結果を示す. 図-2 に汀線形状, バー形状が複雑な状況にある場合, 直線化した状況にある場合の平均画像を例示する.

(2) 汀線, 前浜地形バー位置の推定

レーダ画像から汀線の位置, 前浜勾配を推定できることは既に確認している (松本・武若, 2005).

ここでは, 新たに平均画像からバーの存在と位置を推

1 正 会 員 工 博 筑波大学助教授 大学院システム情報工学研究科

2 正 会 員 修(工) 西日本旅客鉄道

3 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科

4 学生会員 工 修 筑波大学大学院システム情報工学研究科

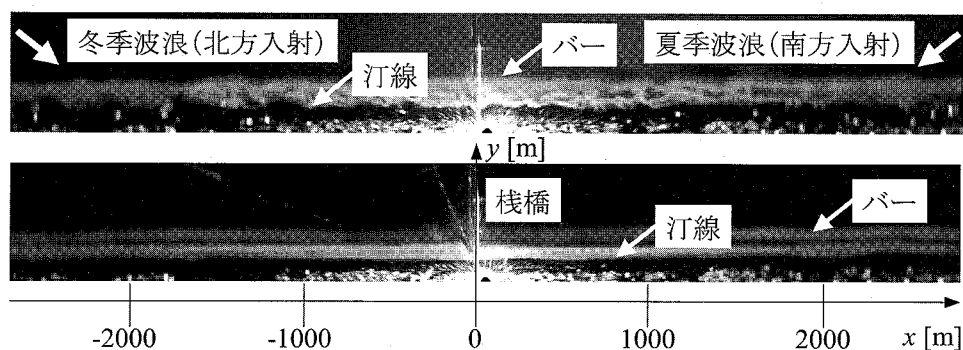


図-2 平均画像の例。上：静穏時（2005年 4月28日），下：荒天時（2005年 7月28日，台風 7 号通過後）

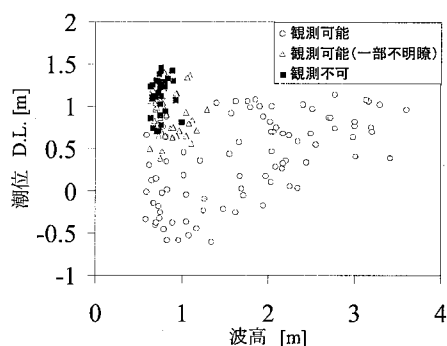


図-3 平均画像にバーを確認できる条件

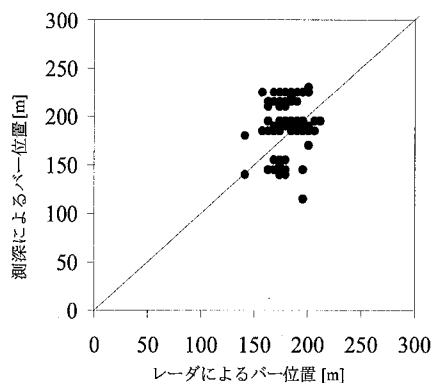


図-4 レーダ観測によるバー頂部位置の推定精度

定することについて確認した。まず、栈橋に沿って観測された日々の地形からバーの有無、バー頂部、トラフ部の位置を調べた。次に、平均画像を調べ、画像中のバーの有無を確認した。その結果、実際にはバーが存在していても、平均画像には捉えられない場合があることが判明した。潮位と栈橋先端で測られた波高を調べたところ、潮位が低い、あるいは、波高が大きいということが平均画像中にバーを確認できるための条件であった。その結果を図-3 にまとめる。

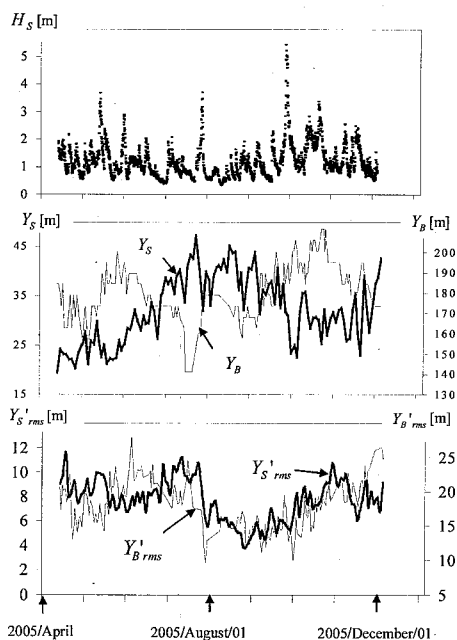


図-5 有義波高（上段），平均汀線位置・平均バー位置（中段），汀線変動強度・バー変動強度（下段）の経時変化

平均画像中にバーが確認できた場合のバー頂部位置の推定精度を調べた（図-4）。図中の横軸に平均画像から読み取ったバー頂部位置，縦軸に地形測量結果から求めたバー頂部位置を示す。レーダ観測により，バー頂部のおおよその位置が推定できることを確認した。

(3) 海 象

観測期間中に，3 回の台風通過を含む，複数回の高波浪（有義波高 > 3 m）の来襲があった。図-5 に，鹿島港（NOWPHAS（ナウファス），設置水深 24 m，港湾空港技術研究所海象情報研究室，参照 2005-05-06）で観測された，2005 年 4 月から 12 月の間の有義波高 H_s を示す。栈橋でフロートを用い観測された沿岸流の向きと鹿島港で観測された波向の関係を調べたところ，流れ

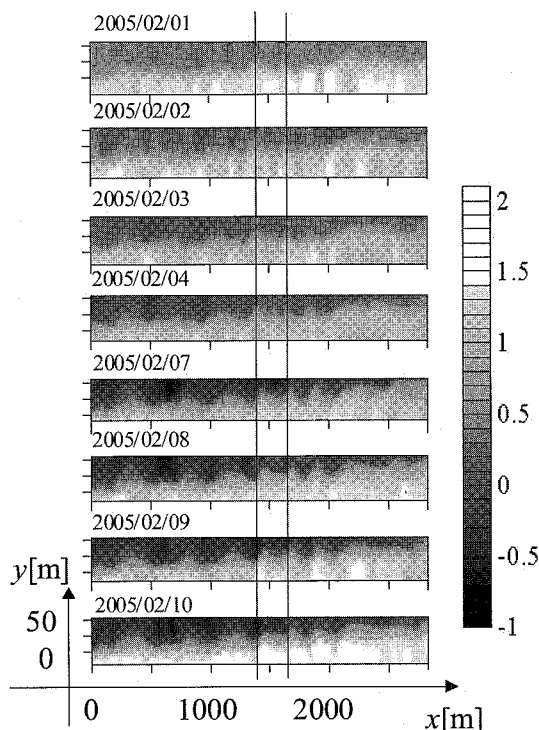


図-6 前浜地形の変化 (2005年2月1日～10日) 汀線付近の波状地形の沿岸方向移動波状パターン (波長～350m) がおよそ 16m/day の速さで +x 方向に移動している。地形標高 (D.L.) をグレースケールで表示。

の向きはほぼ鹿島港で観測された有義波の波下方向になっていた。

3. 汀線とバーの平均位置と形状の変化

平均画像から汀線 (D.L.=0.8m で定義) とバー位置を読み取り、平均位置、変動強度を定義して観測期間中の変化を調べた。以下にそれぞれの定義を示す。

$$\text{汀線平均位置 } \bar{Y}_s(t) = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} Y_s(t, x) dx \quad \cdots (1)$$

汀線変動強度

$$Y_s'_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} (Y_s(t, x) - \bar{Y}_s(t))^2 dx} \quad \cdots (2)$$

$$\text{バー平均位置 } \bar{Y}_B(t) = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} Y_B(t, x) dx \quad \cdots (3)$$

バー変動強度

$$Y_B'_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} (Y_B(t, x) - \bar{Y}_B(t))^2 dx} \quad \cdots (4)$$

ここで、 $Y_s(t, x)$ は毎時の汀線位置分布、 $Y_B(t, x)$ は毎時のバー位置分布、 t は時間、 x は沿岸方向座標、 x_0 と

x_1 は観測範囲の始点と終点である。

(1) 汀線位置と形状変動の変化

図-5 に $\bar{Y}_s$ と $Y_s'_{rms}$ の経時変化を示す。 $\bar{Y}_s$ は、入射波高が小さい夏季 (6～9 月) に沖側に移動し、入射波高が大きくなる時期 (10 月以降) に岸側に移動する季節的な変化があるように見える。入射波高が増加すると汀線の形状が単調化する、といういわゆるビーチサイクル (例えば、Wright・Short, 1984) がみられた。すなわち、入射波浪が増加すると、 $Y_s'_{rms}$ は直ちに定着して小さくなる (海岸地形が一様化する) 傾向にあった。これには季節的な依存性はみられなかった。

(2) バー位置と形状変動の変化

図-5 に $\bar{Y}_B$ と $Y_B'_{rms}$ の経時変化を示す。 $\bar{Y}_B$ は夏季に岸側に移動する傾向にあった。 $Y_B'_{rms}$ は $Y_s'_{rms}$ と同様、入射波浪が大きくなると小さくなった。観測地点に台風が最接近した日 (2005 年 7 月 26 日、台風 7 号) を境にバーは沖方向に移動し、変動強度は急減少した。以上は、栗山・李 (2000) が報告している、数年間にわたるバー変動の特徴の一部を捉えたものと考えられる。

栈橋に沿って測られた断面地形を調べたところ、観測期間中のバーの高さはほぼ一定であった。前節の結果と合わせて考えると、観測域の碎波帯の海浜地形は入射波が小さい期間に勾配が大きくなり (汀線とバーの平均的な間隔が狭まる)、入射波が大きくなる時期に小さくなる傾向にある。

4. 汀線とバー形状の沿岸方向移動

汀線形状の日々の変化を調べたところ、汀線付近に観られる波状の地形 (波長のオーダー: 数 100 m) が沿岸方向に移動していることを確認した。図-6 に平均画像と潮位 (銚子漁港、気象庁観測) の情報から作成した前浜地形を例示する。同図には、波状のパターン (波長～350 m) がおよそ 16 m/day の速さで +x 方向に移動していることが捉えられている。このような移動が、年間を通じて生じていることを確認した。

平均画像から汀線付近の沿岸方向の輝度分布を取り出し、それを経時的にスタックした画像を作成した (図-7 右)。この際、輝度を取り出す位置は各時間の潮位の情報を利用して変動させた。画像の上から下への縦方向が時間経過、横方向が沿岸方向である。同画像には、鹿島港で観測された有義波高 H_s 、有義波向 θ をあわせて示した。

図-7 中に現れる斜めのパターンは、汀線形状の沿岸方向移動に対応している。このパターンは、主に冬季 (1 月, 2 月, 12 月) に右下方に延びており、汀線形状の移動は +x 方向にあることを意味する。一方、冬季以外の夏季を中心に、このパターンは左下方に延びており、

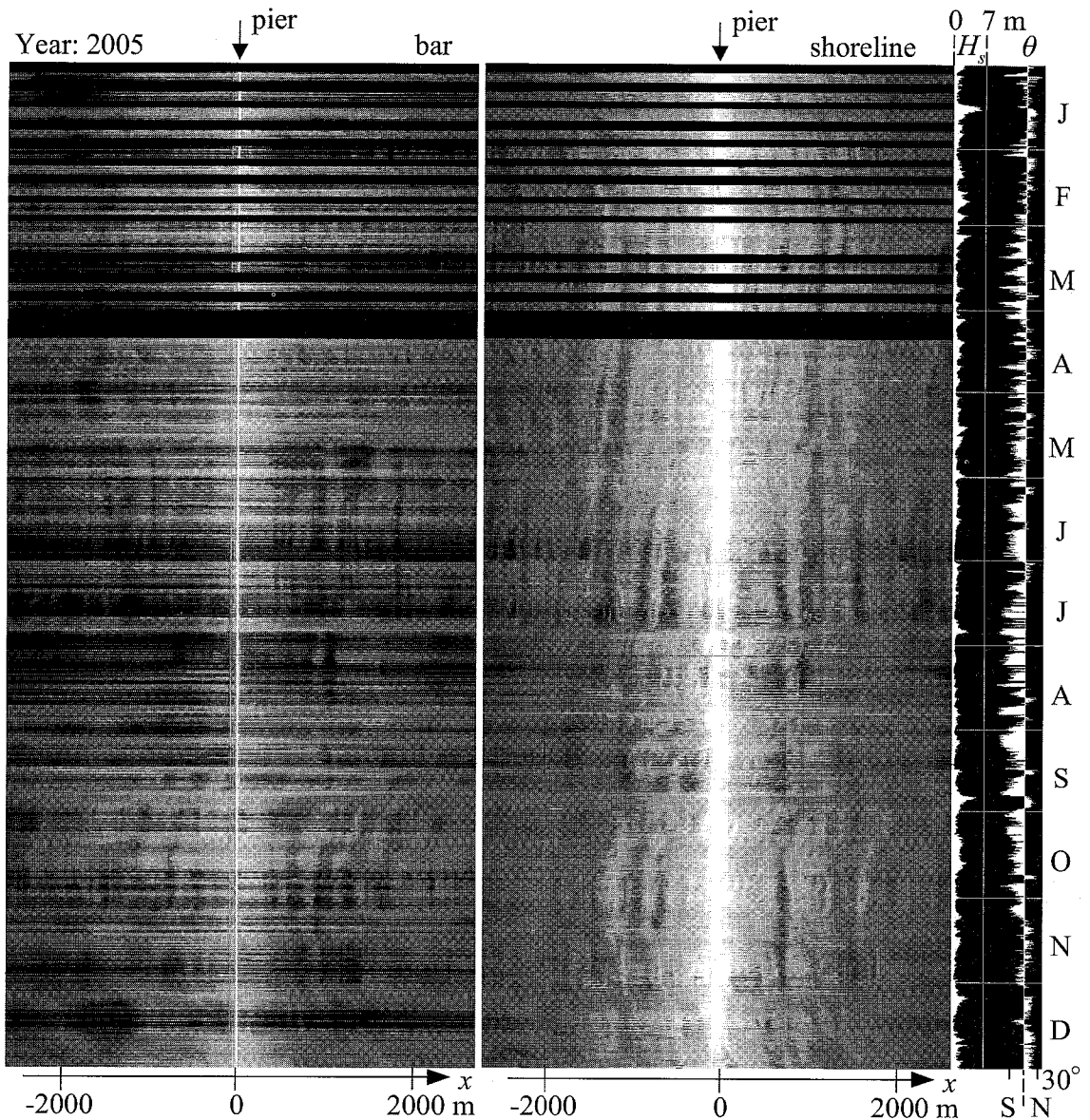
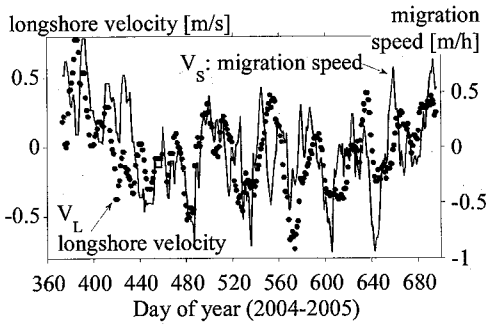


図-7 汀線輝度データ、バー輝度データの沿岸分布の時間変化(2005年) 左:バー付近の輝度データを抽出したもの、右:汀線付近の輝度データを抽出したもの。図右段:有義波高 H_s (フルスケール = 7m) と入射波角 θ (N:北方からの入射, S:南方からの入射, 図-2 参照。波向の表示が中心位置にある時は直角入射。表示の長さが入射角に相当。)

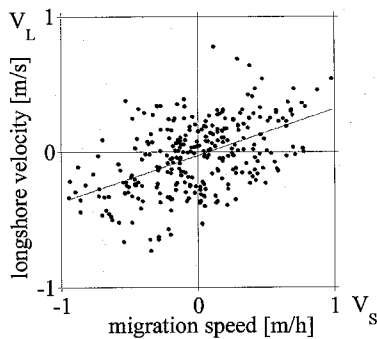
汀線形状の移動は $-x$ 方向にあった。このことは、栗山ら (2005) が報告している、栈橋で観測された沿岸流速の季節的な変動傾向に一致する。同図より、汀線の波状形状が沿岸方向に移動していること、その移動方向が入射波浪の波下に向いていること、高波浪により海岸地形が一様化すると移動状況が不鮮明になること (例えば、7 月末)、高波浪により海岸地形が一様化しても沿岸方向移動が継続する場合があること (例えば、5 月末) 等

が読み取れる。

汀線形状の日平均移動速度 V_s を図-7 から読み取り、栈橋 ($y=115$ m) で観測された沿岸流速 (V_L)ⁿ との関係調べたところ、 $n=1$ の時に最も高い相関関係が認められた (図-8)。Holman ら (2005) はリップチャンネルの移動を追跡しており、その移動速度に推定した沿岸流速との相関があることを報告している。本研究で求めた V_s は最大で 25 m/day 程度となり、これまでに報告



(a) 経時変化



(b) 散布図

図-8 汀線形状の沿岸方向移動速度 V_s と栈橋で観測された沿岸流速 V_L の関係。

のある侵食域の伝播速度 (1~2 m/day のオーダー) に比較して大きな値となっている。この差異は、侵食域の移動速度が年平均値として評価されている点にあると考えている。

汀線の沿岸方向移動を可視化したのと同じ方法で、バー形状の沿岸方向移動を調べるための処理を行った(図-7左)。汀線形状の移動と類似の関係が、やや不鮮明であるが、バー形状の沿岸方向移動について認められる。なお、先に説明したように、バーが存在していてもレーダで観測できない場合があることに注意が必要である。

図-7の両画像に現れるパターンを詳しく比較したところ、汀線形状とバー形状の移動がほぼ同期していることが確認された。従って、バーの移動速度 V_B は、 V_s と同様、 V_L と相関があることになる。また、 V_s と V_B がほぼ同期していることは、汀線からバーの間の領域における砂移動に何らかの組織的な構造があり、これにより、汀線とバーの沿岸方向移動が維持されていることを示唆する。

5. 結 言

汀線形状とバー地形を X バンドレーダで連続的に観

測し、これらの変動特性 (汀線とバーの平均存在位置、形状の空間変動強度、形状の沿岸方向移動) を解析した。静穏な状態が続くと海浜形状は複雑化し、荒天時にはこれが一様化される、いわゆるビーチサイクルが確認された。平均汀線位置は季節的に変化していたのに対して、汀線形状は入射波浪の大小に応じて変動していた。汀線とバー形状の沿岸方向移動を調べ、汀線の波状形状が沿岸方向に移動していること、その移動方向が入射波浪の波下に向いていること、高波浪により海岸地形が一様化すると移動状況が不鮮明になること、高波浪により海岸地形が一様化しても沿岸方向移動が継続する場合があることなどを示した。

波状の汀線形状、バー形状が沿岸方向に移動するメカニズムを説明する考え方は現在のところ示されていない。ここで観られた地形学的な変化を漂砂フラックスの分布と関連付けた議論を行うことにより、海岸における侵食域の拡大、その対策などを具体的に検討することが可能になると期待される。

謝辞：レーダ観測、海浜地形・海象データの提供等で多大なる支援いただいた (独法) 港湾空港技術研究所漂砂研究室のメンバー各位に深甚なる謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 伊藤政博・伊藤仁士(1999)：侵食・堆積域の伝播に対する構造物の阻止効果—遠州海岸を対象にして—, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 681-685.
- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本吉道・板橋直樹(1994)：静岡海岸の沿岸漂砂量およびその分布形の評価, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 536-540.
- 宇多高明・板橋直樹(1997)：静岡・清水海岸における侵食・堆積波の伝播, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 631-635.
- 栗山善昭・李在炯(2000)：複素主成分分析を用いた沿岸砂州の変動特性の解析, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 616-620.
- 栗山善昭・伊東啓勝・柳嶋慎一(2005)：長期現地観測データに基づく卓越沿岸流の岸沖分布の検討, 土木学会論文集, No. 803/II-73, pp. 145-153.
- 港湾空港技術研究所 海象情報研究室, 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) 波浪データ, <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-sk/kaisyo/index.htm>, 参照 2006-05-01.
- 鈴木高二朗・栗山善昭(2004)：住吉海岸におけるバーの長期変動について, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 521-525.
- 土屋義人(1995)：海岸侵食の波動性について (1) —静岡海岸の場合—, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 551-555.
- 土屋義人(1996)：海岸侵食の波動性について (2) —下新川海岸の場合—, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 586-590.
- 松本亮介・武若 聡(2005)：前浜地形の沿岸分布の連続観測とその変動特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 506-510.
- Holman R. A., G. Symonds, E. B. Thornton, R. Ranasinghe(2006)：Rip spacing and persistence on an embayed beach, J. Geophys. Res., Vol. 111, pp. C01006, doi:10.1029/2005JC002965.
- Wright, L.D. and Short A.D.(1984)：Morphodynamic variability of surf zones and beaches, Marine Geology, Vol. 56, pp. 93-118.