# 汀線に現れる波状パターンの沿岸方向の動態

## Migration of Wavy Features Observed in Shoreline

武若 聡<sup>1</sup>・エルサイド ガラル<sup>2</sup>・趙 卓維<sup>3</sup>

# Satoshi TAKEWAKA, Galal ELSAYED and Zhuowei ZHAO

Wavy features in the shoreline and their migrations were observed with X-band radar. Hourly-averaged radar images were processed to observe longshore distributions of shoreline positions. Wavy features appear frequently at low energy states, and migrate to the downstream of longshore current. Low energy periods account for approximately 20% in the annual amounts of longshore energy flux. In June of 2006, almost periodic and regular migration was observed for 40 days. Cross-shore profiles observed at the pier and shoreline configurations observed with the radar are analyzed to understand behavior of the migration. Wave length, period and migration speed were approximately 140 m, 13.5 days and 10 m/day. A primitive model was applied showing amount of sediment flux fluctuation matches with known sediment formula.

# 1. はじめに

鹿島灘にある波崎海岸では、入射波浪が小さい時、汀 線に波状のパターンが形成され、これが沿岸流の下手方 向に移動することが年間を通じて見られる(Elsayed・ Takewaka, 2008).また、日本と世界の海岸で、汀線、 バーなどの浅海に形成される波状の地形が沿岸方向に伝 播することが報告されている(武若ら、2006; Elsayed・Takewaka, 2008).地形パターンの沿岸方向移 動は沿岸流によりもたらされていると考えられ、これの 成因を理解できれば沿岸漂砂量に関する情報を得られる ことが期待される.

これまでにXバンドレーダで鹿島灘の波崎海岸にある 観測桟橋周辺で汀線形状の変化を連続的に調べ,汀線に は,入射波浪が小さい時に数百メートル規模の波状の変 動が現れ,これが沿岸流の発達する向き,すなわち,波 の入射下手方向に伝播する;伝播速度は沿岸流速,波浪 エネルギーの沿岸方向成分に比例しており,波の入射角 が45°の時に大きくなる;荒天時にはこの波状のパター ンは消滅し,汀線形状は直線状となり,荒天後の静穏期 間に汀線形状は波状の形状へと遷移する;などの結果を 得ている.

年間を通じた沿岸漂砂量の変動における低波浪時間帯 の寄与は小さくない場合が報告されている(例えば,和 田ら,2010).ここでは,低波浪時の沿岸漂砂について 理解することを念頭におき,観測された波状パターンの 沿岸方向移動の動態を分析する.

## 2. 観測の概要

港湾空港技術研究所の波崎観測桟橋(図-1)は、南北 方向の延長約17 kmのほぼ直線状の海岸にある.この海 岸の北端に鹿島港岸壁,南端に波崎漁港,銚子漁港と利 根川河口がある.観測桟橋は、海岸の北端から約4 kmの 地点にある波崎海岸にある.後浜にある研究施設の屋上 にXバンドレーダを設置した.本論文では2005,2006年 に観測された桟橋沿いの断面測量結果とXバンドレーダ の平均画像を解析する.

図-1にレーダと桟橋の位置,本論で用いる座標系を示 す.桟橋上に座標の原点,沿岸方向にx軸,岸沖方向にy 軸をとった.レーダエコーデータは2秒毎に1024×1024





<sup>2</sup> 博(工) スエズ運河大学講師

<sup>3</sup> 学生会員 筑波大学システム情報工学研究科

表-1 Pの累積値(1996, 1999-2003, 2005-2007)

	$\Sigma P; P > 0$	$\Sigma P; P \leq 0$
累積值[kWh/m]	211×10 <sup>3</sup>	-479×10 <sup>3</sup>
累積値2割のH <sub>b</sub> [m]	3.3	2.3
全累積値5割のH <sub>b</sub> [m]	4.6	3.4





ピクセル,1ピクセルあたり256階調の画像としてパーソ ナルコンピュータに記録した.1ピクセルは約5.4 mに相 当し,輝度がレーダのエコー強度に対応する.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などを読み取 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(武若ら,2006).

本論文では、桟橋沿いに計測された海浜断面とXバン ドレーダで求めた汀線形状の変化を調べ、波状パターン の移動について説明する.

## 3. 沿岸方向エネルギーフラックス

鹿島灘では, 概ね夏季に南方から, 冬季に北方からの



波浪が卓越し,これに対応して波浪エネルギーフラック スの沿岸方向成分は,夏季に北方,冬季に南方に向く. ここでは,鹿島港で観測された2時間毎の波浪データ (桟橋より北方約5 km,設置水深24 m, NOWPHAS,港 湾空港技術研究所海象情報研究室,参照2010-05-05)を 用い,砕波位置における沿岸方向エネルギーフラックス の経時変化を調べた.沿岸方向エネルギーフラックスは, 当然のことながら,荒天時の時間帯に大きくなるが,こ れ以外の大半を占める時間帯の寄与もある.

鹿島港で1991年から2007年の間に取得された記録の 内,有義波高*H*,周期*T*,波向θが年間を通じて9割以上 の時間帯で取得された年(1996,1999-2003,2005-2007, 計9年)について解析を行った.屈折・浅水変形を行い, 波高水深比が0.78となる位置を砕波点とし,沿岸方向エ ネルギーフラックス*P*を求めた.

ここで、gは重力加速度、 $\rho$ は海水の密度、 $C_g$ は群速度、 添え字bは砕波点における値を意味する.波向 $\theta$ は北方 からの入射を正、海岸線に対して直角に入射する場合を 0°と定義し、波が北方から入射するとPは正となる.

図-2に2006年の $H_b$ ,  $\theta_b$ , Pとその累積値(通算の $\Sigma P$ と その正負別)の経時変化を示す.おおよそ,7割の時間 帯で南方からの入射( $\theta_b < 0$ )が観測された.2006年の2 時間毎のPを積算した時間累積値は負の値(-41×  $10^3$ kWh/m)となり,年間を通じた沿岸方向エネルギーフ ラックスは北方を向いていた.顕著な高波浪がなかった 4月から8月にかけてPの累積は徐々に進んでいる.1月



図-6 (a) 2006年6月15日から7月25日の平均断面地形と地 形変動強度.(b) 断面地形における各高さの岸沖位置 の変動.汀線位置に見られた変動は高さD.L.0~1mの 間の変動が相当する.沿岸方向の地形変動があった範 囲はおおよそ40<y<160mと考えられる</p>



図-7 桟橋で観測された海浜断面の平均断面地形からの変動 の時間変化.破線の部分は負の値.等値線間隔:0.1m

から3月,9月から12月に高波浪が来襲し,Pは間欠的に 大きな値を示す.

図-3は2006年の砕波波高別のPの累積値の分布,その 累積値を示す. P>0の時間帯の全累積値の2割はH<sub>b</sub><3.3 m,5割はH<sub>b</sub><4.6 mから成る.これに対して,P<0の時間 帯の全累積値の2割はH<sub>b</sub><2.5 m,5割はH<sub>b</sub><4.1 mから成り, 入射波高の小さい時間帯の寄与が相対的に大きくなる. なお,全エネルギーフラックスに占める沿岸方向成分は おおよそ1割である(鈴木・栗山, 2006).

9年間(1996, 1999-2003, 2005-2007)のエネルギーフ ラックスの正負別の累積値を調べた結果を表-1に示す. 基本的には2006年について得た結果と類似している.南 方からの波浪による累積値の大きさは北方からのに比し ておおよそ2倍となった.また,南方からの入射時に占 める砕波波高3m程度の寄与は約50%,北方については 20%であった.

## 4. 汀線に現れる波状形状の沿岸方向移動

これまでの研究で,波浪が穏やかな時に,汀線の波状 パターンが沿岸方向に移動することを報告している.こ の移動は沿岸方向のエネルギーフラックスによりもたら されていると考えられ,前章で示したように,波高が小 さい時間帯も沿岸方向エネルギーフラックスの累積に一 定の寄与がある.ここでは,波高が小さかった時に見ら れた汀線の変動について説明をする.

#### (1) 桟橋で観測された海浜断面の変化

桟橋で観測された海浜断面形(-115 m<y<385 m)から, 標高D.L. 0.7 mの地点を汀線として定め,その岸沖位置 の変化を2005年と2006年について調べた(図-4). 汀線 位置は,低波浪時に徐々に沖側に移動し,高波浪の来襲 時には急激に岸側に後退する.

2006年6月中旬から7月下旬にかけて,汀線位置が周 期約13.5日の規則的な岸沖方向の変動を40日間にわたり 示した(全振幅:約10 m).以降では,桟橋で観測され た海浜断面とレーダで取得された平均画像を用い,この 期間の地形変動について説明する.

図-2に示すように、この期間の砕波波高はおおむね2 m 以下、周期は8秒程度、入射は主に南方からあった。図-5 に桟橋で観測された沿岸流速と銚子漁港で観測された潮 位の変化を示す。対象の期間中、桟橋では北方に向かう 0.5 m/s程度の沿岸流が卓越していた。

この期間に観測桟橋で観測された海浜断面を平均した 平均断面形とこれからの偏差で定義した地形変動強度,海 浜断面の各高さの岸沖位置の時間変化を図-6に示す. 汀線 (y=40 m付近)からトラフ (y=150 m付近)にかけての地 形変動が大きく,この範囲では海浜の高さが周期的に変動 していた.図-7に期間中の平均断面(図-6(a))からの変 動分の時間変化を示す.やや不鮮明であるが,汀線からト ラフにかけて見られた周期的な変動の振幅はおおよそ0.3 m(図中の実線で囲まれた領域で示される正の変動のおお よその最大値),変動パターンは斜状に分布し,これが剛 体的に沿岸方向に移動していたことが読み取れる.

#### (2) レーダで観測された汀線形状の変化

この期間のレーダ画像(図-8)を調べたところ,汀線の 一部にある波状のパターンがおおむね北方に移動していた



図-8 平均画像(2006年6月15日,6月22日,6月29日). 岸沖方向を1.5倍に拡大して表示. 汀線位置が白くマークされている. 汀線の凹凸の一部,バーの切れ目の一部が北方(左方)に移動している



図-9 レーダ平均画像から読み取った各時間の水際位置を平 均的線からの変動成分として表示.横:沿岸方向. 縦:経時変化.波状のパターンが北方に移動している (移動速度約10m/day,桟橋近傍の波長約140m)

ことが確認された.また,バーもこれに連動するように北 方に移動していた.図-8に示すように汀線の凹凸の一部, バーの切れ目の一部が北方(左方)に移動している.

潮位がD.L. 0.6 mから0.7 mにある時に取得されたレー ダ画像から汀線位置を読み取り,観測期間中の汀線形状 の平均位置を定めた.毎時間の水際位置と平均汀線の差 を変動成分とし,これの沿岸分布と時間変化を示したも のが図-9である.大潮の期間に水際が陸側に,小潮の期 間水際が海側にシフトする.ある時間の水際位置眺める と,陸側と海側に変位している領域が交互に現れ,これ が沿岸の負方向に伝わっている.これが前に示した桟橋 で観測された周期的な変動に対応していると考えられ る.主観的な読み取りとなるが,沿岸方向の移動速度は おおむね10 m/day,桟橋付近を通過した変動の波長は約 140 mという値が得られた.

(3) 地形変動の沿岸方向の伝播

桟橋で観測された断面形の変化, レーダ画像で観測さ

れた汀線形状の変化の結果をあわせて考えると,沿岸方 向に伝播する地形変動について次の見解を得る: a)沿 岸方向に伝播していた地形変動はトラフより岸側の範囲 で生じていた. b)変動の振幅は約0.3 mであり,変動は 汀線に対して斜状に分布し,これが剛体的に沿岸方向に 移動し,同時に汀線に見られた波状の分布も移動してい た. c)変動の波長,周期,移動速度はおおよそ140 m, 13.5 days, 10 m/dayであった.

#### (4) 簡易モデルによる分析

地形の変動が沿岸方向の漂砂の変動によりもたらされ たとする簡易なモデルを考えた.基本場として一様勾配 斜面上の屈折の下で沿岸流が発達している状況を考え る.ここに沿岸方向に周期的な地形変動があり,沿岸流 速の変動成分uが生じ,さらに沿岸方向漂砂量qの変動 があるとする (q=Cu,漂砂量係数C[m]).uを連続条件 より定め,地形変動が一定の速さで伝わるとして,Cの オーダを見積もる.

海浜地形,沿岸流,沿岸漂砂が定常な基本場と変動す る成分からなると仮定し,地形の変動が沿岸流と沿岸漂 砂量の変動成分からもたらされていると考える.図-1と 同様に沿岸方向をx,岸沖方向をyとし,時間をtとする.

水深分布をD(x, y, t), 平均的な地形を $D_0(y)$ , 変動成 分をd(x, y, t) とすると

 $D(x, y, t) = D_0(y) - d(x, y, t)$  .....(2)

となる. 基本場D<sub>0</sub>(y) は図-6(a) の平均断面地形に,変 動成分d(x, y, t) は図-7に示した地形変動にそれぞれ対応 するものである.

水深平均沿岸流速分布U(x, y, t)も地形と同様,定常成分 $U_0(y)$ と変動成分u(x, y, t)から成ると考える.

 $U(x, y, t) = U_0(y) + u(x, y, t)$  .....(3)

沿岸流の連続性をある岸沖位置で考え,岸沖方向の流

速成分は小さいとすると

を得,沿岸方向の流速変動と地形変動の関係は

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{U_0}{D_0} \frac{\partial d}{\partial x} \qquad (5)$$

となる.ここで,地形の不均一によりもたらされる岸沖 方向の流速は無視できると仮定している.

沿岸方向の漂砂フラックスも平均的な沿岸漂砂フラッ クスQ(y) と変動成分q(x, y, t) から成り、変動成分は沿 岸流速の変動成分に比例すると仮定する.

q = Cu .....(6)

ここでCは長さの次元を有する漂砂量係数である.

地形の変動*d*がqの収束発散によりもたらされるとす ると

を得、地形の変動が形を保ったまま一定の速さで伝わる とするとその大きさSは

$$S = C \frac{U_0}{D_0} \qquad (8)$$

となる.

前節で示した観測結果は $S \sim 10 \text{ m/}(24 \times 60 \times 60 \text{ s}) \sim 1.2 \times 10^4 \text{ m/s}, U_0 \sim 0.5 \text{ m/s}$ であり、代表的な水深として  $D_0=3 \text{ m}$ を与えるとC $\sim 7.7 \times 10^4 \text{ m}$ を得る.この漂砂量係 数の大きさは、例えばSoulsby Van-Rijinのモデル (Soulsby, 1977)が与える低エネルギー時の漂砂量の大 きさに匹敵する (図-10).

先に説明した観測結果では、汀線付近からトラフ付近 の範囲の地形が沿岸方向にほぼ同じ速さで移動している ことを示した.従って、上に説明したSはこの範囲で一 定値となる必要がある.例えば、沿岸流速と水深が比例 的な関係にあればSが一定になる可能性がある.

総沿岸漂砂量を*CU<sub>0</sub>D<sub>0</sub>*より見積もることが可能と考 え,これに式(8)を代入すると,総沿岸漂砂量が*SD<sub>0</sub><sup>2</sup>* に依存することが示唆される.本論での議論は力学的な 観点が欠けており,流れと地形の連続性のみを簡略化し て検討したものである.例えば,Ribasら(2003)が示し た方程式系の安定解析では,砕波帯内に発達する斜状の 地形パターンを検討し,地形と蛇行する流れの関係が示 されている.波状パターンの移動状況を通じて沿岸漂砂 量に関する情報を得ることについては,この種の検討を 加味することが必要である.

### 5. 結び

汀線に現れる波状のパターンの沿岸方向移動を、低波



図-10 Soulsby Van-Rijinモデルによる漂砂量(粒径: 0.25 mm)

浪時の沿岸漂砂について理解することを念頭におき,分析した.波崎海岸では,年間の沿岸方向エネルギーの累積値のおおよそ20%を砕波高3m以下の波が占めることを示した.桟橋で観測された断面地形を調べたところ,40日間にわたり汀線位置が規則的に変動する期間があった.桟橋で観測された海浜断面形状とレーダで観測された汀線線変動を解析し,汀線からトラフにかけて波長,周期,移動速度がおおよそ140m,13.5 days,10m/dayの規則的な沿岸方向に移動する地形変動があることを示した.さらに,この地形変動が沿岸流速の変動によりもたらされたと考え,漂砂量の変動が既存の漂砂量則に合致することを示した.

謝辞:レーダ観測,海浜地形・海象データの提供等で多 大なる支援を頂いた港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研 究チームのメンバー各位に深甚なる謝意を申し上げます. この研究の一部は科学研究費の補助により行われた.

#### 参考文献

- 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-skb/ks-jyo/kaisy/index.htm, 参照2010-05-05.
- 鈴木崇之・栗山善昭 (2006):波崎海岸における汀線位置の長 期変動特性,海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 621-625.
- 武若 聡・松本亮介・笹倉慎也・Elsayed Galal (2006): 汀線 とバーの変動と沿岸方向移動,海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 576-580.
- 和田麻美・田島芳満・佐藤愼司(2010):天竜川河口テラス地 形と沿岸域への土砂供給過程の長期変化,土木学会論文 集B2(海岸工学), Vol. 66,審査中.
- Elsayed, M. G., and S. Takewaka (2008): Longshore migration of shoreline mega-cusps observed with X-band radar, Coastal Engineering Journal, Vol. 50, pp. 247-276.
- Ribas, F., A. Falques and A. Montoto (2003): Nearshore oblique sand bars, Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. C4, JC000985.
- Soulsby, R. L. (1997): Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford, 272 p.