

鹿島灘南端部の汀線変動の特徴

武若 聡¹・文 天悦²

¹正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 つくば市天王台)

E-mail: takewaka@kz.tsukuba.ac.jp

² 富士通株式会社 (〒211-8588 川崎市中原区上小田中4-1-1)

E-mail: 499810784@qq.com

鹿島灘南部(鹿島港-波崎漁港, 延長約17 km)の南端部の約4 kmの範囲の汀線変動をXバンドレーダにより6年間(2009年12月-2015年11月)にわたり観測した。Xバンドレーダの観測結果より平均画像を作成し, 汀線位置をおおよそ2日間隔で読み取った。対象域の南端には波崎漁港があり防波堤が沖合約1 kmまで延びている。また, 侵食対策として複数のヘッドランド, 突堤が設置されている。ヘッドランドと突堤を境界とする4区間毎に観測結果を分析した。各区間の平均的な汀線位置は観測期間中, 継続的に前進していた。各区間の汀線が延びる方向(汀線勾配)を求めた。漁港から離れた区画では, 入射波浪の季節的な変動に応じたサイクリックな汀線位置の前進・後退と汀線勾配の変動が見られた。一方, 漁港直近の区画の汀線変動は異なる様相を示し, いわゆる港湾の防波堤が砂を呼び込むという表現で説明される堆積過程が見られた。

Key Words : Kashimanada Coast, shoreline variation, wave cycle, X-band radar

1. はじめに

伴野ら¹⁾は, 鹿島港から波崎漁港までの鹿島灘南部(延長約17 km)の汀線が, 主に鹿島港を築港した際の浚渫土砂の浅海域への大量投棄(約5,000万 m^3)により, 過去50年間(1961年-2013年)に, 平均的に約70 m前進したことを航空写真の解析結果より報告している。この際, 数年から数十年スケールの汀線変動は沿岸漂砂のみで説明されるものではなく, 岸沖漂砂の寄与も十分に考慮する必要があることが指摘されている。

この海域の南端には波崎漁港があり, この付近の侵食対策として1基の突堤と5基のヘッドランド(1986年-2000年)が設置されたが, 現在ではこれらの周辺に相当量の土砂が堆積し続けている。本研究ではXバンドレーダを用い, この鹿島灘南部の波崎漁港近くの約4 kmの区間の汀線変動を観測した結果を紹介する。観測は2009年末から約6年間にわたり行われ, この間の汀線変動の詳細を伴野ら¹⁾が報告している堆積過程の一部として説明する。

2. 観測の概要

図-1に示す鹿島灘南部(鹿島港-波崎漁港, 延長約17 km)の南端部の波崎漁港周辺の汀線位置を2009年11月11日から2015年11月30日までの約6年間にわたりXバンドレーダにより観測した。レーダは海岸背後にある廃

棄物処理施設(広域波崎 RDF センター)の屋上に設置した。観測結果は図-1に示す港湾空港技術研究所の観測棧橋 HORS の基部に原点がある座標系を用い説明する。沿岸方向(南北方向)をx軸, 岸沖方向をy軸とする。

Xバンドレーダレーダで収集したレーダエコーデータを毎正時から17分間にわたり平均し, 毎時の平均画像(空間分解能約7.2 m)を作成した。図-1に示す矩形の破線内が有効なエコーデータが取得される範囲であり, 図-2にこの範囲の平均画像の一例を示す。同図より, 水際位置, バー, 砕波帯などの沿岸分布, ヘッドランド(長さ:約200 m), 突堤, 漁港の防波堤(先端部の位置:沖合約1 km)等を読み取れる。

この平均画像から読み取った水際位置と銚子漁港で観測された潮位を用い, 平均海面の高さ付近(Tokyo Peil, T.P. ± 0.1 m)で定義した汀線位置を定めた。観測期間の6年間に取得された1067枚の平均画像より, 目視で汀線位置を読み取り, 汀線データセットを作成した(データ間隔~2.1日)。汀線位置は棧橋基部を基準とするy軸座標系で表す。Xバンドレーダの平均画像の目視の読み取り結果と潮位観測の結果を用いることにより, 汀線位置をおおよそ10 m以内の誤差で定められることは観測棧橋HORSの周辺で行った検証で確認されている²⁾。

以降では, 対象域を図-2に示すヘッドランド, 突堤を区切りとする四つの区画1~4に分けて汀線変動特性の解析結果を説明する。

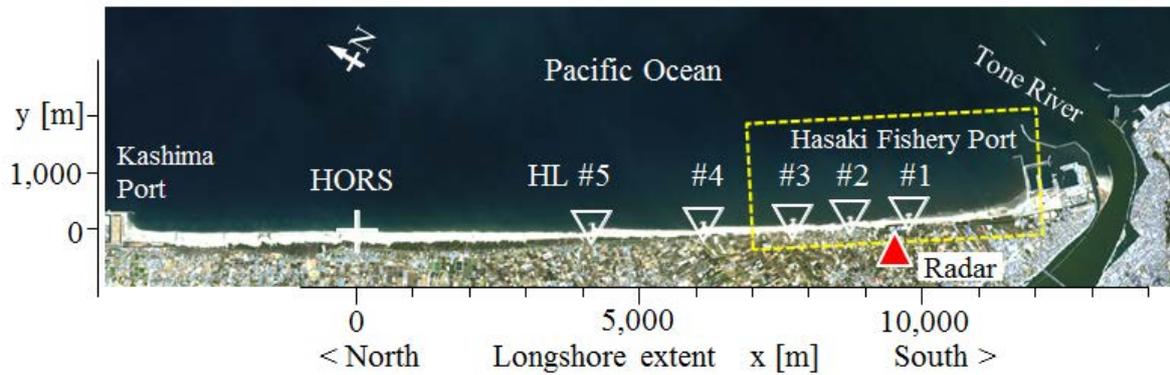


図-1 鹿島灘南部と観測領域. ▲ = レーダ設置位置. 矩形 (黄色破線) = レーダ観測範囲. HORS = 港湾空港技術研究所観測栈橋. HL = ヘッドランド.

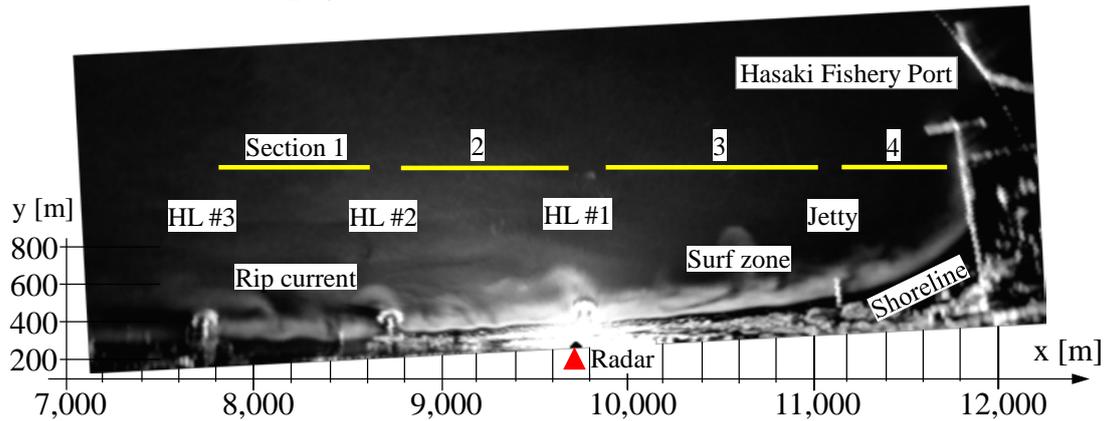


図-2 平均画像 (2010年1月30日5時) の一例と座標系. 平均画像より汀線位置, 砕波帯, 離岸流の発生等を判読できる. レーダ設置位置 ▲ (9720 m, 240 m). ヘッドランド #3, #2, #1, 突堤, 漁港防波堤を境とする四つの区画 (Section 1 - 4) を設けて汀線変動特性を解析する.

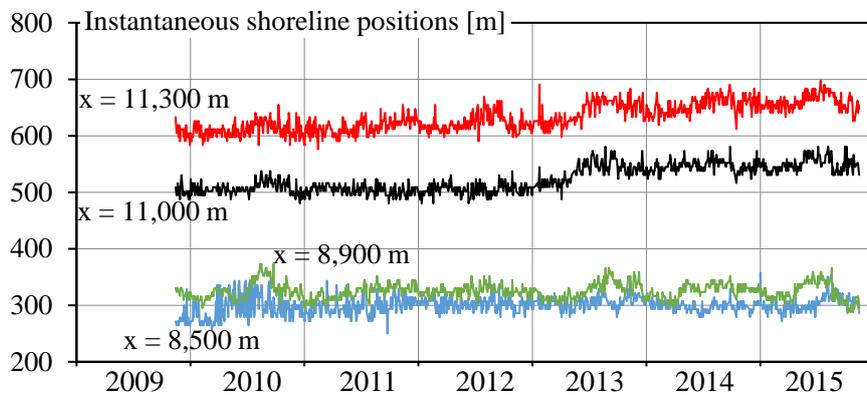


図-3 汀線位置の読み取り結果

3. 汀線変化

平均画像より読み取った汀線変動を区画毎に調べ (平均位置と汀線勾配), それぞれの特徴を波浪特性と合わせて説明する. この海域では, 夏季に南方からの入射, 冬季に北方からの入射波浪が多くなる. また, 高波浪は秋季から冬季に多く来襲し, 夏季は静穏となることが多い. これらの波浪特性と, いわゆる漁港防波堤の遮蔽の効果を合わせて各区画の汀線変動特性を説明する.

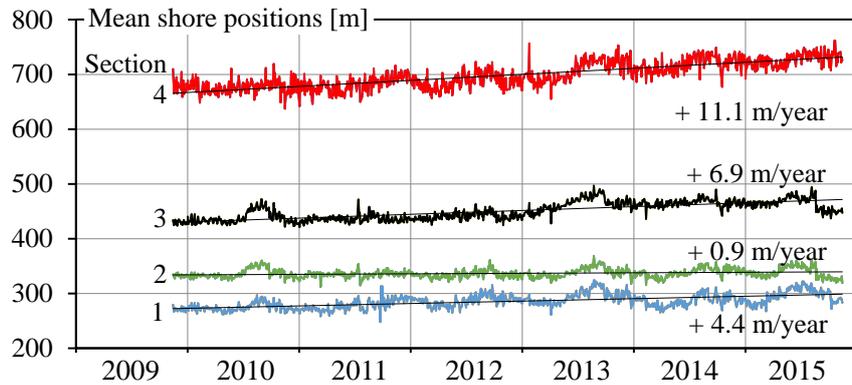
(1) 汀線位置の変動

平均画像より読み取った汀線変動の一例を図-3に示す.

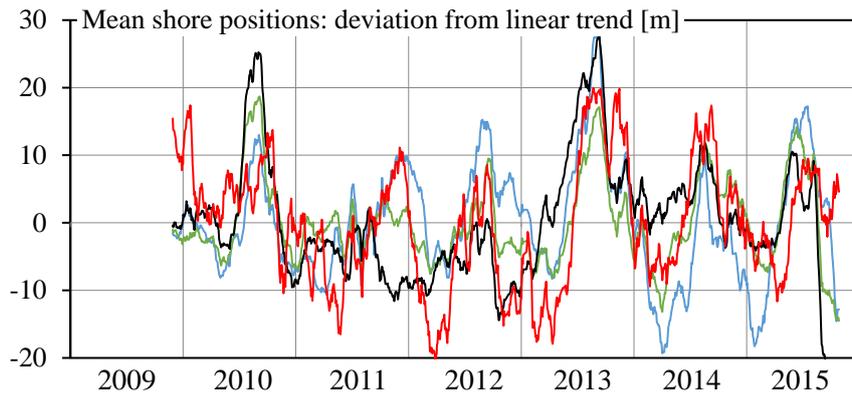
この読み取りは, ヘッドランド, 突堤, また, エコーが不明瞭となる位置を除き, 沿岸方向に約 7.2 m の間隔で行った.

各区画内の汀線位置を空間平均した「平均汀線位置の瞬時値」の経時変化とこれらの線形トレンドを図-4(a)に示す. 平均汀線位置は前進傾向 (堆積) にあり, 漁港に近づくほどその速さは大きくなる.

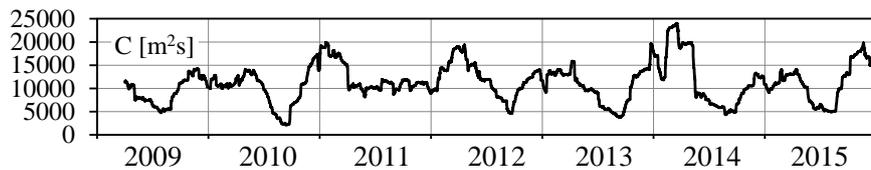
平均汀線位置の瞬時値より線形トレンドを差し引き, その後 30日間の移動平均フィルターで平滑化した「平均汀線位置の変動成分」の経時変化を図-4(b)に示す. この量は汀線の季節的な前進・後退を表すものである. 各区画における季節的な汀線変動のパターンは, 2011年



(a)



(b)



(c)

図-4 各区画の平均汀線位置と岸沖方向波浪エネルギーフラックスの累積値の経時変化
 (a) 瞬時値と線形トレンド. 図中の数字は汀線の平均的な前進 (堆積) 速度
 (b) 線形トレンドからの偏差 (30日移動平均)
 (c) 岸沖方向エネルギーフラックス90日累積値C

を除くと、基本的に夏季に前進、冬季に後退する。区画間で変動の大きさに顕著な差はない。以上の振幅と位相関係は、構造物の影響がほとんどないHORSで観られる汀線変動とほぼ同一である³⁾。

(2) 汀線勾配の変動

ある観測日に得られた一つの区画内の汀線分布に直線をあてはめ、その傾きを区画内の汀線勾配とした。図-5に汀線勾配を求めた例を示す。

各区画の「汀線勾配の瞬時値」の経時変化を図-6(a)に示す。前節に示した観測期間内の汀線の平均的な前進に応じて、各区画の汀線勾配は徐々に大きくなっている。

汀線勾配の瞬時値より線形トレンドを差し引き、その後30日間の移動平均フィルターで平滑化した「変動成分」の経時変化を図-6(b)に示す。この量の変動は、区

画内の砂の南北方向の移動、区画内の岸沖漂砂量の沿岸分布、あるいは、両者の相乗により生じると考えられる。鹿島灘のヘッドランド間では、夏季(南方入射)と冬季(北方入射)で卓越する入射波が異なるため、汀線分布がこれに応じてシーソーのように変化することが知られている⁴⁾。このことは、区画1,2の変動に現れており、夏季に勾配がおおむね負値となり、冬季に正値となる。一方、区画3,4では様相が異なる。例えば、区画4の汀線勾配はおおむね周期1年の変動とみなせるが、位相関係が区画1,2の変動とは異なる。これは、季節的な汀線変動をもたらす漂砂のメカニズムが異なることを示唆しており、次節にて検討する。

(3) 季節的な汀線変動特性

各区画の平均汀線位置と汀線勾配の変動成分の相関関

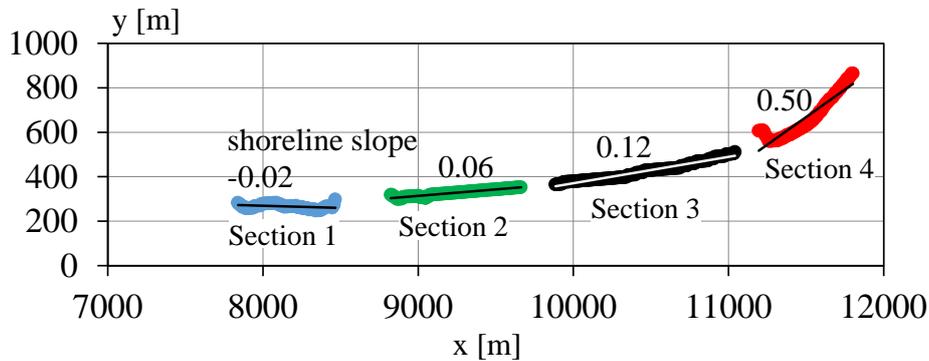


図-5 汀線の分布と汀線勾配 (2010年1月29日)

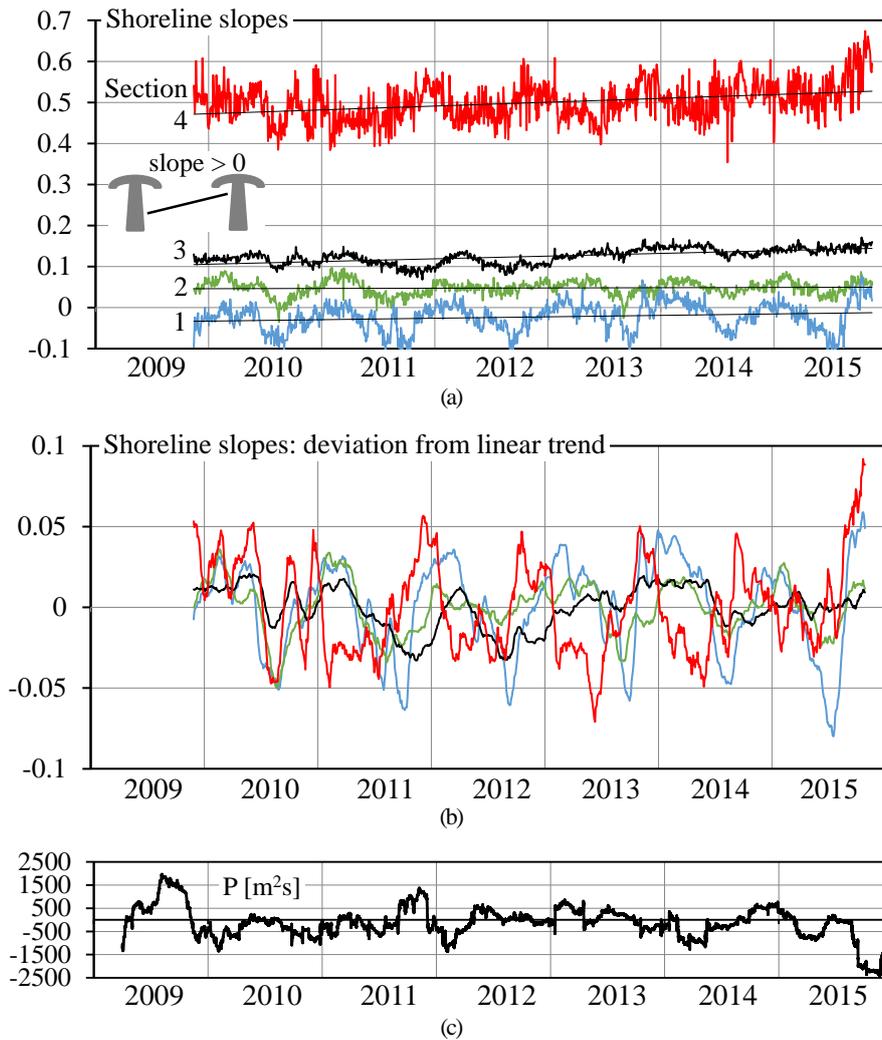


図-6 各区画の汀線勾配と沿岸方向波浪エネルギーフラックスの累積値の経時変化

(a) 瞬時値と線形トレンド, (b) 線形トレンドからの偏差 (30日移動平均), (c) 沿岸方向エネルギーフラックス90日累積値 P

係を調べた (図-7,8) .

区画 1, 2 では, 夏季に平均的な汀線位置が沖側に変位 (前進) し, その際に, 汀線勾配は負の方向に転じる. これは, 南方からの入射波により区画内の北側に土砂が偏ったと説明できる可能性が高い. 冬季は以上と逆パターンの砂移動が見られる. 汀線位置が後退する際に, 北方からの入射波により区画内の南側に土砂が偏ったと汀線勾配は正の方向に転じる. これらの説明は, ヘッドラ

ンドを超えての沿岸方向の漂砂が少ないこと, また, 岸沖漂砂の沿岸分布の不均一が無いことを仮定した説明であるが, その妥当性の検証は今後の課題である.

区画 3, 4 では区画 1, 2 と様相が異なる. 平均的な汀線位置は夏季に前進するが, この際, 汀線勾配は正值に転じる. これは, 沿岸方向の砂の移動によるものではなく, 漁港に近づくほど, 岸沖方向漂砂による堆積が多くなったことにより生じたと考えられる.

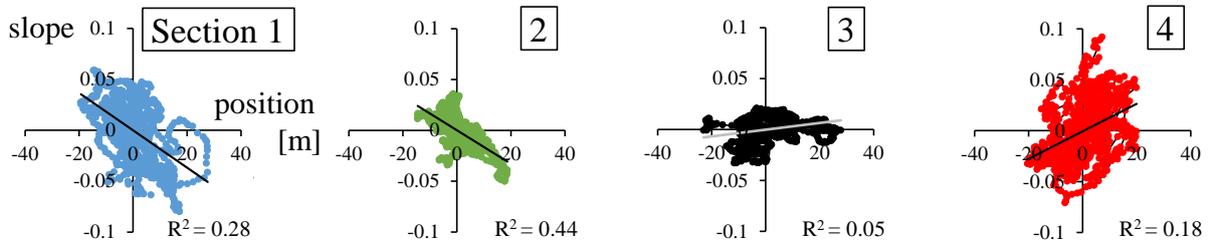


図-7 各区画の汀線位置の変動成分（横軸）と汀線勾配の変動成分（縦軸）の相関。図-4.6 に示した変動成分の相関関係を表示。図中の実線は線形フィッティングの結果。汀線変動のパターンが区画1・2と区画3・4で異なることが理解される。R²：決定係数。

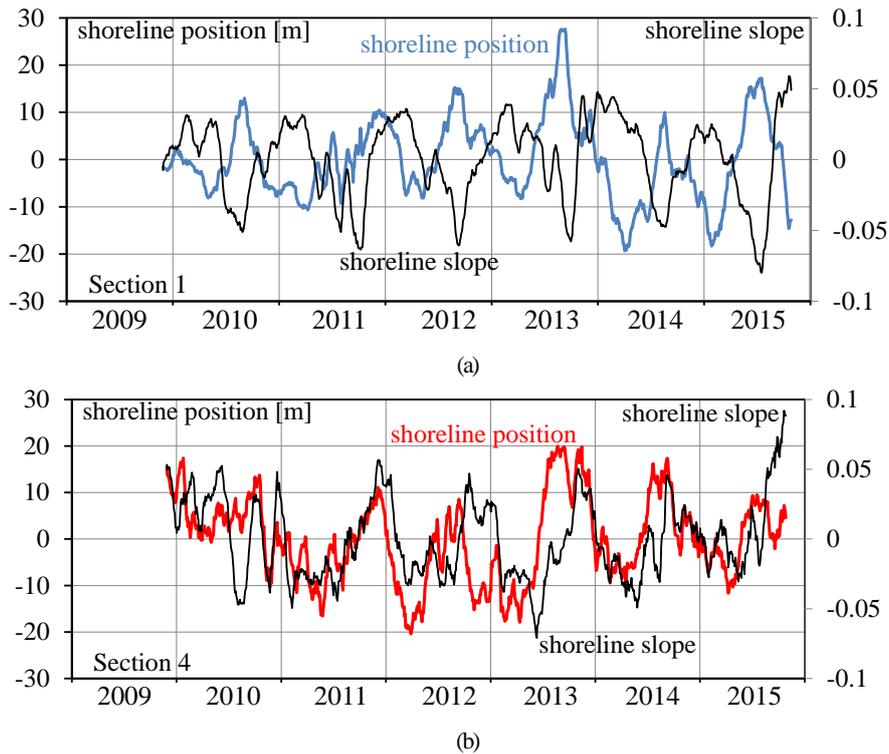


図-8 汀線位置と勾配の経時変化。(a)区画1, (b)区画4。

区画1, 2と区画3, 4で汀線変動パターンの様相が異なることは、伴野ら¹⁾のEOFによる解析結果にも現れている。寄与率82%の第1モードは本研究での対象域の全体的な堆積を代表している。次の寄与率が9%の第2モードの空間関数が区画1と4で逆の分布パターンとなっており、これらの区間の砂移動のメカニズムに違いがあることが示されている。

(3) 波浪場の変動特性

鹿島港のNOWPHAS観測値 ($x = -6,000$ m, H : 有義波高, T : 有義周期, θ : 波向, $\theta = 0$ でHORS付近に直角入射, $\theta > 0$ は北方からの入射) より、岸沖方向 ($\sim H^2 T \cos \theta$)、沿岸方向 ($\sim H^2 T \sin \theta$, 正= x 正方向(南向), 負=北向)の波浪エネルギーフラックスを評価した。それぞれの90日間累積値 C, P を図-4(c)と図-6(c)に示す。 C は秋季、冬季に大きくなり、夏季に相対的に小さくなる季節的な

表-1 C, P と各区画の汀線位置・勾配の変動成分の相関
 C : 岸沖方向エネルギーフラックス相当量の90日間累積値
 P : 沿岸方向エネルギーフラックス相当量の90日間累積値

	Section	C	P
Shoreline position	1	-0.65	0.20
	2	-0.05	0.24
	3	0.18	0.27
	4	0.11	0.08
Shoreline slope	1	0.26	-0.06
	2	0.08	-0.09
	3	0.34	0.19
	4	-0.11	-0.03

変動を示す。一方、鹿島灘では、一般的に夏季に南方からの入射、冬季に北方からの波浪入射が卓越するとされており、 P は波向の季節的な変化に応じて定まると期待されるが、 C に比してその季節変化は明瞭でない。

2011年は夏季の汀線位置前進が相対的に小さかったが、

これはこの年の夏季期間に C が大きかったことによると理解できる。区画 1, 2 の汀線勾配の変動は P と正の相関関係にあるとみなせる期間がいくつかある。すなわち、 P が北方からの入射波浪により正值となる時に、土砂が南方に偏り汀線勾配が正となると説明できる。

表-1 に C, P と各区画の汀線位置・勾配の変動成分の全観測期間にわたる相関を調べた結果を示す。相関係数は全般的に小さい。前節の説明は、特徴的な変化を示す期間を抽出した上での説明であることに注意が必要である。

以上のように、マクロ的な観点より説明可能な地形変動がいくつかある。一方で、漁港付近の堆積が進んでいる領域については、防波堤の波浪の遮蔽効果、屈折、碎波の浅水変形パターンの変化等の詳細分析を行い、岸沖方向と沿岸方向の漂砂がもたらす地形変動を理解する必要である。特に、鹿島港の波浪観測値で汀線の向きが大きく異なる対象地の波浪特性を代表させることは難しく、局所の波浪を詳細に分析する必要がある。

4. 結言

漁港の防波堤、複数のヘッドランド・突堤がある鹿島灘南端部で観測された 6 年間の汀線変動の詳細を分析した。観測域内の汀線位置は伴野らの報告¹⁾と整合するように前進トレンドにあり、特に漁港直近の領域では 10 m/年の大きさの前進が見られた。夏季に堆積が進むことが明らかになった。

漁港から離れた区画1では、入射波浪の季節的な変動に応じたサイクリックな汀線位置の前進・後退と汀線勾配の変動が見られた。これに対して、漁港直近の区画の汀線変動は異なる様相を示した。漁港防波堤は南方から

の波浪を遮蔽しており、区画 4 における長期的な汀線前進 (~11 m/年)、いわゆる砂を呼び込まれるという表現で説明される堆積過程が見られた。漁港近傍の堆積は主に夏季に進行し、冬季の北方からの波浪により生じると期待される南向きの沿岸漂砂の寄与は小さいと考えられる。

謝辞： Xバンドレーダ観測は港湾空港技術研究所・沿岸土砂管理研究グループにより実施され、著者らは観測結果の提供を受けた。特に、中村聡志上席研究官、伴野雅之研究官、柳嶋慎一専門研究員には観測の維持とデータ収集に際し多大な労力を頂いている。この研究は文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology)」と科学研究費の支援の下に行われている。以上、ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 伴野雅之, 栗山善昭, 武若聡: 波崎海岸において過去 50 年間に生じた二つの大規模汀線前進, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, pp. I_661-I_666, 2016.
- 2) Takewaka S.: Measurement of shoreline positions and intertidal foreshore slopes with X-band radar system, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 47, pp.91-107, 2005.
- 3) 武若聡, Elasyed M. Galal: 波崎海岸で観測された 10 年間の汀線分布の変動特性土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, pp. I_673-I_668, 2015.
- 4) 住谷迪夫, 園部武正, 宇多高明, 伊藤隆, 猿田正則, 横田喜一郎, 鹿島灘沿岸におけるヘッドランドの建設による海浜の安定化, 海岸工学講演会論文集, Vol. 35, pp. 437-441, 1988.

(2017.3.15 受付)

STUDY ON SHORELINE VARIABILITIES OBSERVED AT THE SOUTHERN END OF KASHIMANADA COAST

Satoshi TAKEWAKA and Tianyue WEN

Variation of shoreline position at the southern end of 17 km-long Kashima Coast, with Kashima Port at the north end and Hasaki Fishery Port at the southern end, has been observed with a X-band radar for 6 years. The radar captures hourly distribution of shoreline position approximately over 4 km. At the southern end, there is a 1 km long breakwater of the fishery port, which shelters southern incident waves. Further, the sandy beach is protected by headlands and a jetty from erosion. Shoreline positions of approximately every 2 days have been digitized from the radar images. Mean shoreline positions and shoreline inclinations of 4 sections bordered with headlands and jetty have been analyzed. Mean shoreline positions of all sections migrated seawards continuously during the observation period. At the farthest section from the fishery port, shoreline inclination showed a seasonal variation accordant with the wave incidence direction: sand between headlands is transported to the downwave resulting periodic changes in shoreline inclination. On the other hand, shoreline inclination close to the fishery port varied in a different manner due to sheltering effect of breakwater.