波崎海岸のポケットビーチ化に伴う 海浜変形の実態

関寺 将司¹・小林 昭男²・宇多 高明³・野志 保仁⁴

¹日本大学理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²正会員 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:kobayashi.akio@nihon-u.ac.jp

³正会員 一般財団法人土木研究センター常務理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

E-mail:uda@pwrc.or.jp

⁴正会員 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:noshi.yasuhito@nihon-u.ac.jp

北端・南端を鹿島港の埋立地護岸と波崎漁港の防波堤により挟まれてポケットビーチ化の進んだ波崎海岸では、波崎漁港による波の遮蔽内では南向きの沿岸漂砂が卓越しているものの、汀線付近の現象に着目すると、海岸線の中央部以北では逆に北向きの沿岸漂砂が卓越していた。北部での卓越方向は、従来推定された沿岸漂砂の方向と逆向きであった。当海岸の汀線変化は、鹿島港以北での観測結果と同様、波向が季節的に変動する場におけるネットの沿岸漂砂の存在によって説明可能と考えられる。

Key Words : Hasaki coast, longshore sand transport, artificial headland, wave-shelter zone

1. まえがき

一方向の沿岸漂砂が卓越した砂浜海岸の一端に規模の大きな防波堤が伸ばされると、防波堤による波の遮蔽域が形成され、そこでは沿岸漂砂の方向が反転することはしばしば観察される。この場合、侵食対策の計画時に想定した沿岸漂砂の上手・下手が計画時と逆となり、対策が十分効果を発揮できない事態に至る。利根川河口の北側に広がる波崎海岸がその一例と考えられる。波崎海岸の北端に位置する鹿島港の南防波堤の先端水深は約20 mであり、鹿島灘における波による地形変化の限界水深（ほぼ8 m）より十分深いので北側からは砂の流入はない。一方、宇多ら¹⁾は波崎海岸の汀線部へと利根川から5.6万m³/yrの漂砂が運び込まれたとしたが、利根川からの土砂流出はあるとしても波崎漁港の防波堤（現況で先端水深12 m）を回り込んで北側海浜に砂が運び込まれることは物理的に困難と考えられる。この意味より、現状で波崎海岸はポケットビーチに近い条件となっている。この海岸の沿岸漂砂について、宇多ら¹⁾は鹿島港を境界として南向きに海浜土砂量を積分することにより沿岸漂砂量分布を算出し、波崎海岸では波の遮蔽域形成に伴い

南向きの沿岸漂砂が卓越するという結果を得た。しかしながら近年の衛星画像を基に波崎海岸の海岸線変化を再度調べたところ、波崎漁港の北側隣接部では実際に防波堤による波の遮蔽域形成に伴う南向きの沿岸漂砂が生じたことが確認されたものの、北端の鹿島港の埋立地近傍での汀線形状は南向きの沿岸漂砂が卓越する場合での姿と大きく異なり、北向きの沿岸漂砂が卓越していないと説明できない形状を有していた。本研究では、この疑問について現地データを基に考察し、ポケットビーチ化の進

図-1 波崎海岸の衛星画像（2012年3月29日）

図-2 波崎漁港の北側に隣接する区域Aの衛星画像

図-3 波崎海岸の風向（鹿島港：2004-2014年）

んだ波崎海岸では、波崎漁港による波の遮蔽内では南向きの沿岸漂砂が卓越しているものの、汀線付近の現象に着目すると、海岸線の中央部以北では逆に北向きの沿岸漂砂が卓越していることを示す。併せて、当海岸では鹿島港以北での観測結果³⁾と同様、観測された汀線変化が、波向の季節的変動場におけるネットの沿岸漂砂の存在によってのみ説明されることも示す。

2. 波崎海岸の現況と研究方法

研究対象地である波崎海岸の2012年3月29日の衛星画像を図-1に示す。波崎海岸は利根川河口に位置する波崎漁港から鹿島港まで長さ18 kmの砂浜海岸である。図に示すように、波崎海岸の砂浜幅は波崎漁港の北側隣接部と鹿島港の南側隣接部で広く、それらの中央部では狭い。いま、波崎漁港の北側隣接部に区域A、鹿島港の南側隣接部に区域B、これらの間に区域Cを定め、各区域の拡大画像を図-2, 4, 5に示す。まず区域Aについては波崎漁港の北防波堤の先端に伸ばされた横堤背後では浜幅が500 mと広い。浜幅は防波堤からの北向き距離とともに急激に狭まり、防波堤の北1 kmでの浜幅は175 mであり、両者の比は0.35となる。このように波崎漁港の北側隣接部では防波堤による波の遮蔽効果による典型的な汀線前進が起きている。また、区域Aでは浜幅が広く、また図-3の鹿島港での気象観測結果に示すように、当海岸ではNNE方向からの風が卓越しているため、図-2の矢印で示すように海岸線から内陸へ向かう飛砂が著しく、SSW方向への砂丘の発達が認められる。

区域Aと対照的な位置にある区域Bでも図-4に示すよ

図-4 鹿島港の南側に隣接する区域Bの衛星画像

図-5 波崎海岸中央部の5号HL周辺の衛星画像

うに浜幅が広いが、区域Aでは浜幅が広い場所が防波堤近傍に限られていたのに対し、区域Bでは浜幅の広い区域が沿岸方向に長く分布している。例えば、図-4に示す埋立地南端にある横堤背後での浜幅は477 mであるが、その南1 kmでの浜幅は250 m（両者の比0.52）となって浜幅が広い場所が沿岸方向に長く伸びている。この区域でも浜幅が広いため、図に矢印で示すように内陸への飛砂が著しく、海浜砂の飛砂損失が起り得る条件となっている。

一方、区域A, B間では侵食対策としてヘッドランド（HL）5基が造られており、区域Cはその中の5号HLを包含する区域である。図-5のようにHLの南側直近での浜幅157 mに対し、HL北側の浜幅は最小で43 mと狭く、背後地の侵食が懸念される状態となっている。同時に、HLの南側では浜幅が広い矢印で示すように内陸への飛砂が著しい。

以上のように、元々汀線が直線状であった波崎海岸では、その両端で防波堤や埋立地護岸が造られて波の遮蔽域が形成されたことにより海岸がポケットビーチ化し、波の遮蔽構造物周辺で汀線が前進して浜幅が広がった。また、この海岸の汀線付近では全体的に北向きの沿岸漂砂が卓越すると見られるため、鹿島港側や5号HLの南側で浜幅が広がった結果、堆砂の著しい場所では内陸への飛砂が助長され、海浜砂の損失が起きていると考えられる。このことから、本研究では、既往空中写真を基に汀線変化解析を行うとともに、内陸への飛砂の堆積状況や、海浜砂の粒度組成調査などを行った。具体的には、図-6に示すように鹿島港から波崎漁港に至る長さ18 km区間

図-6 汀線変化解析の基準座標と海浜砂採取測線 a, b の位置

図-7 波崎海岸における汀線形状の変化 (1947~2012年)

を対象として、1947年から2012年まで9時期の汀線形状を読み取った。その際、写真撮影時の潮位と平均前浜勾配 (1/20) をもとに潮位補正を行った。また、図-6に示す区域①②③において背後地への飛砂の堆積状況を調べた。さらに2014年12月22日には波崎漁港の北側隣接部と鹿島港の南側隣接部にそれぞれ測線a, bを設定し、これらの測線上で海浜縦断面を調べるとともに砂の採取を行い粒度分布を調べた。

3. 波崎海岸全域の汀線変化

図-7には、鹿島港から波崎漁港に至る波崎海岸全域の汀線形状を示す。波崎海岸は1947年当時、緩やかに湾曲した海岸線を有していたが、1974年以降、南端の波崎漁港の付け根で大きく汀線が前進するとともに、鹿島港の南側隣接部でも汀線の前進が始まった。1990~2002年では両端部での汀線前進が顕著となり、端部での汀線曲率が増加した。同様な変化がその後も続き、2012年までに

図-8 1984年基準での汀線変化

波崎漁港の北側隣接部の $X = 15.7 \sim 17.8$ kmと、鹿島港の南側の $X = 2.4 \sim 8.6$ km間で汀線が大きく前進した。これに対し、両者に挟まれた $X = 12.0 \sim 15.7$ kmでは1947年と比べて汀線が後退傾向にある。

図-8は、図-7に示した汀線形状より1984年基準で算出した汀線変化量を示す。図には1~5号ヘッドランドの位置をHL1~HL5で示す。南端に位置する波崎漁港では、防波堤建設に伴いその北側に波の遮蔽域が形成されたため、遮蔽域には砂が堆積し1997年までに汀線が最大195 m前進した。このような防波堤近傍での堆砂と対照的に、2号HLより北側では汀線の後退が著しく、とくに2, 3号HL付近では1990年までに最大82 mもの汀線後退が起きた。その場合、汀線の後退は2号HLの北側で集中的に起きており、北向きに徐々に減少した後、 $X = 8.8$ kmでは汀線後退量はほぼ0となり、その北側の鹿島港に至る7 km区間では逆に汀線が前進傾向を有していた。2012年までの汀線変化では、2011年までに波崎漁港の沖防波堤の先端部が180 m伸ばされたため波の遮蔽域が広がり、これに合わせて防波堤北側の汀線が最大320 mまで前進した。1997年までの汀線変化では2号HL以南の汀線はほぼ安定であったのに対し、2号HLの北側直近で最大の後退量を示した後、汀線後退量は北向きに徐々に減少していたが、2012年までの汀線変化では2号HLの北4.6 kmに位置する5号HLの両側での汀線後退量が大きくなった。5号HLの北側・南側の最大汀線後退量はそれぞれ90 mと70 mに達した。同時に1号HL以南の波の遮蔽域でも堆砂が進んだ。さらに、 $X = 8.8$ km以北での汀線前進域も狭まり、1997年までは前進傾向にあった鹿島港との隣接部でも汀線後退が目立つようになった。ほぼ同様な結果は宇多ら¹⁾でも得られているが、その原因は不明なものの、前浜増加面積が過大な値となっていた。

図-9 空中写真による5号HL周辺の海岸の変遷(1984~2012年)

4. 5号HL周辺での汀線変化の詳細

図-8では5号HL付近で顕著な汀線後退が見られたことから、5号HL周辺の海浜状況の変化を詳細に調べた。図-9は、5号HLの建設が始まる前の1984年より2012年までの5号HL周辺の海浜状況の変遷を示す。1984年当時、平均浜幅90 mで直線状の海岸線であり、砕波状況から沖合には2段のバーが発達していた。1990年に長さ200 mの突堤が伸ばされると、突堤の南側ではdry beachが広がる一方、突堤の北側では汀線の後退が始まった。突堤を挟んだ上記汀線変化は1997年も継続したが、1990, 1997年とも突堤の先端は砕波帯内に含まれており、とくに1997年では突堤の先端部が砕波帯に含まれていることから、当時突堤は北向きの沿岸漂砂を阻止しつつも沿岸漂砂の一部が突堤先端を回り込んでいたと推定できる。2002年では突堤先端にヘッド部が完成した。ヘッド部の完成によりHLの両側では波の遮蔽効果が高まって汀線曲率が増加した。2012年ではHLによる北向き沿岸漂砂阻止の影響が顕著に現れ、HLの北側の前浜が著しく狭まった。図-8(e)より突堤両側での汀線変化状況から判断すれば、少

なくとも5号HLの汀線付近では北向きの沿岸漂砂が卓越していたと考えられる。

図-10は、1984年基準での1990, 1997と2002, 2012年までの汀線変化を示す。5号HLは1984~1990年に建設が開始されたことから、HLの建設以前には北向きの沿岸漂砂が通過可能であった。このため5号HL付近ではHL建設前までに既に汀線が後退していたが、その後HLの建設により北向きの沿岸漂砂の阻止の影響が汀線変化に重なって現れた。1984年当時と比較したとき、HLの両側では全体的な汀線後退にHL設置による汀線変化が重なって起きた。このため1997年までの汀線変化では全体に侵食面積が大きく、それにHLによる汀線変化が重なっている。2002年までもHLの両側での汀線後退が続いた上、それにHLによる北向きの沿岸漂砂阻止の影響が重なったため、HLの北側では南側より広い区域で汀線が後退した。同様な傾向は2012年も続いた。HL北側において1984年当時と比べて50 m以上汀線が後退した区域はHLの北600 mにまで及んだ。

図-10 5号HL周辺の汀線変化(1990~2012年)

図-11 1984年基準の累積土砂量

5. 沿岸漂砂量分布

対象区域全体の汀線変化(図-8)より沿岸漂砂量分布の推定を行った。まず、鹿島港を境界として1984年汀線を基準とした各時期までの前浜面積の変化量を求め、これに漂砂の移動高 6.4 m^3 を乗じて土砂量変化に換算し沿岸方向分布を求めた。結果を図-11に示す。図-11において土砂量が南向きの距離とともに減少する場合は北向きの沿岸漂砂を示すので、図には沿岸漂砂の向きを模式的に示す。なお、当海岸では1984年時点で十分に波の作用を受けているため、季節的変動はあるとしても年間を通したネットの漂砂で考えれば、冲向きの砂移動はほとんどないと考えられる。

1990年までは $X = 10 \text{ km}$ 以北では北向き、 $X = 10 \text{ km}$ 以南

図-12 海浜と海岸林の海側境界の分布

では南向きと $X = 10 \text{ km}$ で漂砂の方向が分かれていた。これは $X = 10 \text{ km}$ 以北では規模の大きな波の遮蔽構造物がないたため自然状態での北向きの卓越漂砂により砂が運ばれたのに対し、 $X = 10 \text{ km}$ 以南では波崎漁港の防波堤による波の遮蔽域へ向かう沿岸漂砂が生じていたためと考えられる。ほぼ同様な変化が1997年も続いたが、2002年以降では $X = 10 \text{ km}$ 以北では土砂量の変化がほとんどなくなった。これは北端の鹿島港の埋立地で区切られた地域で北向きに移動してきた砂がほぼ満杯状態となったためと推察される。これに対し $X = 10 \text{ km}$ 以南では波崎漁港の近傍を除き1990、1997年と同様南向きの沿岸漂砂が卓越しており、波崎漁港の北側隣接部では依然として南向きの沿岸漂砂が起きていると考えられる。ここで、HLは全域で造られてはいないのでその影響は局所に留まり、影響は少ないと考えられる。一方、図-11において北向きに累積して求めた土砂量は北端の鹿島港の埋立て護岸で欠損が起きている。計算では汀線変化量に漂砂の移動高を乗じて求めており、その際の汀線変化の算出時には測定誤差が入りやすいことを考慮すると、図-11から直ちに対象区域で土砂量の欠損が起きたと断定はできないが、図-11(b)に示すように近年では土砂量の欠損傾向にある。これには図-2, 4, 5に示したように海岸線から背後地へと飛砂により運び去られる土砂も関与すると推察される。

6. 飛砂による堆砂域と海浜砂の粒度組成

研究対象区域ではNNE方向の卓越風による海岸から背後地への飛砂が著しい。そこで図-2, 4, 5に示す区域A, B, C付近を対象として、汀線、土堤頂部、および飛砂による堆砂域の陸側限界を読み取り図-12に示した。中央部の区域②では内陸への堆砂域の広がり小さいが、前浜の広がった区域①では土堤を越えて内陸へと広い区域で堆砂が広がり、海浜が広がった場所で飛砂が著しいことが分かる。

次に、波崎漁港の北側隣接部と鹿島港の南側隣接部に

図-13 測線 a,b の縦断形と粒度組成

それぞれ配置した測線 a, b での海浜の粒度組成の測定結果を図-13に示す。波崎漁港近傍の測線 a では汀線付近から背後地の土堤まではほぼ 1/20 勾配の斜面であり、汀線近傍の④では細砂が 72% と多く含まれるが、②③では中砂が 95% とほとんど全部を占める。しかし陸側端の①では細砂が 88% を占める。鹿島港側の測線 b では、全体に平坦な海浜が形成されているが、バーム陸側の⑥⑦では粗砂・礫の割合が 50%, 90% と高い。これに対して陸側端の①では細砂が 24%, 中砂が 74% を占めている。このように波崎漁港および鹿島港隣接部とも土堤の基部には細砂中砂が堆積しており、飛砂により内陸への砂移動が起こり得る条件となっている。すなわち、2012 年までの約 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ の損失には飛砂による損失も可能性として考えられる。そこでこの損失が仮に飛砂損失に起因すると考え、浜幅が広い区域延長約 8 km と経過年数 28 年で除すと、飛砂量は $1.6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ となった。この値は、同じく飛砂の著しい神奈川県辻堂海岸の飛砂量の推定値 $5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ ⁴⁾ と同じオーダーであり、中砂細砂からなる海岸で十分に起こり得る量である。

7. まとめ

波崎海岸全体の汀線変化(図-8)によれば、波崎漁港の北側隣接部では堆砂が進んだが、汀線変化状況より、その砂は防波堤による波の遮蔽域形成に伴う南向きの沿岸漂砂によって北側から運び込まれたと判断された。一

方で、図-9, 10に示した5号HL周辺の汀線(変化)状況から判断すれば、少なくとも汀線付近では北向きの沿岸漂砂が卓越していると考えられる。二つの観察結果は、この海岸では単純な一方向の沿岸漂砂の卓越では説明できない海浜変形が起きていることを意味する。しかしながら、これと同様な現象は同じ鹿島灘に面した鹿島港の北側海岸でも観察されている²⁾。これを考慮すると、波崎海岸では、冬季と夏季の波の入射方向が海岸線への法線に対して左回り・右回りとなるとともに冬季の波浪が夏季より高いため、ネットのエネルギーフラックスはバランスするものの、汀線付近に注目するとネットでは北向きの沿岸漂砂が卓越するという原理に基づく海浜変形が起きていると推察される。その機構の解明については今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) 宇多高明, 勝山 均, 松浦健郎, 熊田貴之, 長山英樹, 大木康弘: 利根川からの土砂流入のある波崎漁港周辺の海浜変形の実態と予測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.586-590, 2007.
- 2) 宇多高明, 熊田貴之, 芹沢真澄, 長山英樹: 波向変動場で生じる漂砂大循環の発生メカニズム, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.506-510, 2008.
- 3) 宇多高明: 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p.442, 1997.
- 4) 宇多高明, 青島元次, 吉岡 敦, 三波俊郎, 石川仁憲: 湘南海岸における飛砂量の検討, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.1195-1200, 2008.

BEACH CHANGES ASSOCIATED WITH DEFORMATION OF HASAKI COAST TO POCKET BEACH

Masashi SEKIDERA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA and Yasuhito NOSHI

We investigated the beach changes in shoreline area of the Hasaki coast with the boundary conditions as a pocket beach bounded by both reclaimed land of Kashima Port and Hasaki fishing port breakwater. In this area, southward longshore sand transport was predominant in the wave-shelter zone of the fishing port breakwater, whereas northward longshore sand transport prevailed far from the fishing port, which was supposed to be southward in the previous study. Thus, the reversal of the direction of longshore sand transport occurred on the coast.