北九十九里浜の汀線変化と 飯岡漁港周辺における海浜変形の実態

宇多 高明¹・三波 俊郎²・大谷 靖郎³・大木 康弘⁴

¹ 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

² 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

³ 正会員 一般財団法人土木研究センター河川・海岸研究部
(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

E-mail: kenkyu1@pwrc.or.jp

⁴ 一般財団法人土木研究センター河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

空中写真や深浅データなどを基に北九十九里浜の汀線変化と飯岡漁港周辺の海浜変形について調べた。深浅データの分析によれば、飯岡漁港の南防波堤建設後、屏風ヶ浦から供給された土砂が南防波堤周辺域に堆積し、1980～1990年には $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で土砂量が増加した。その後は、堆積域が満杯となって漂砂が下手側へと流出したため、堆積速度は $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ へと漸減傾向を示した。一方、南防波堤による波の遮蔽域内に入る下永井・横根海岸での1977～2014年の堆積速度は $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であり、上手側からの供給量とほぼ一致した。以上より、現況では屏風ヶ浦方面からの供給土砂が下永井・横根海岸に集中的に堆積し、下手側にはほとんど供給されていないことが明らかとなった。

Key Words : Kujukuri Beach, longshore sand transport, Iioka fishing port, wave-shelter zone

1. はじめに

九十九里浜は、北端の飯岡漁港から南端の太東漁港まで長さ60kmを有する砂浜海岸である。このうち飯岡漁港から片貝漁港までの30 km間は北九十九里浜と呼ばれる。北九十九里浜の北側には、比高20～50 mの海食崖（屏風ヶ浦）が約10kmにわたって延びているが、屏風ヶ浦では1970年代までに海食崖の崩落防止対策が行われた。その後、北九十九里浜は海食崖からの土砂供給を前提として成立していたがゆえに侵食傾向となり、同時に、1964年以降建設が進められた飯岡漁港の防波堤により西向きに沿った漂砂が阻止されたため、飯岡漁港の西側に位置する下永井・横根海岸から著しい侵食が始まり、侵食域は $270 \text{ m}/\text{yr}$ の速度で下手側へと広がり示した¹⁾。さらに北九十九里浜全体を俯瞰すると、下永井・横根海岸と片貝漁港の北側では汀線の著しい前進が起きている¹⁾²⁾。宇多ら³⁾は、これらの実態データに対しBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル）を適用し、夏季における南寄りの入射波と、冬季の北寄りの入射波をエネルギー的に合成した条件で北九十九里浜の地形変化の再現計算を行い、広域での地形変化をほぼ再現した。このように北九十九里浜の海浜変形の概括的状況は明らかにされつつ

あるが、沿岸漂砂の境界条件などの定量的評価は十分でなく、このことが海浜変形予測の信頼度の低下を招き、対策立案への障害となっている。本研究では、空中写真や深浅データなどの現地データを基に、とくに北九十九里浜の汀線変化と飯岡漁港周辺の海浜変形の実態を調べ、沿岸漂砂の境界条件について明らかにした。

2. 北九十九里浜全体の汀線変化

北九十九里浜の飯岡漁港から栗山川河口に至る区間の2014年撮影の空中写真と、海上保安庁の1984, 2000年の海底地形図の合成図を図-1に示す。飯岡漁港の東側には屏風ヶ浦の海食崖が広がるが、その沖は波食台の複雑な海底地形となっている。この波食台も飯岡漁港沖で終わり、それより西側では等深線が滑らかに伸びる。北九十九里浜の海岸線は飯岡漁港の西側でフック状となっているが、その沖の等深線は互いに平行ではなく、-5 m以浅の等深線は汀線とほぼ平行に伸びるものの、-8～-10 mの等深線は凹状、逆に-11 m以深の等深線は冲向きに突出している。沿岸漂砂により汀線と一体的な地形変化が生じる場合、その区域内の等深線は汀線とほぼ平行に伸びることを考

図-1 北九十九里浜の空中写真(2014年)と海底地形(海上保安庁, 1984, 2000年)

図-2 北九十九里浜の訂線変化(1961年基準)

慮すれば、飯岡漁港の西側隣接域での海底地形変化は主に-5 m以浅で起きていると推定される。本研究の検討対象区域は、図-1に示す飯岡漁港から栗山川河口までの区域とする。なお、図-1に示す番号は北九十九里浜に設置された1~12号ヘッドランド(HL)の位置を示す。次に、全域を対象として空中写真から訂線位置を読み取り、1961年を基準として1977~2014年の訂線変化について、1999年以前・以後に分けて訂線変化をまとめたのが図-2である。その際、訂線位置は写真撮影時の潮位と現地海浜の前浜勾配(標高0 mを境に陸側1/20, 海側1/35)を用いて平均潮位時の訂線位置に補正した。また、図には2014年現在の護岸位置で与えられる訂線の後退限界も示した。1977年までは横根海岸と旭海岸、および吉崎海岸と野手海岸北部で訂線後退が顕著であったが、下永井・横根海岸では1986年以降著しい訂線前進が始まった。一方、この時期には、後に侵食が激化する野手海岸南部や木戸海

岸の訂線は安定していた。1999~2014年では、下永井・横根海岸での堆砂は継続したが、矢指ヶ浦($X=5\sim6$ km)を除き、旭~野手海岸北部は護岸で固定されたため訂線変化は生じなくなった。同時に、新堀川河口以西では時間経過とともに侵食域が西側へと広がったことが分かる。

3. 飯岡漁港周辺の地形変化

屏風ヶ浦の侵食対策はほぼ全線で行われたことから、海食崖からの砂の供給量は大きく減少したと見られるものの、波食以外の要因(例えば、地震時の崩落や海食崖の風化など)による海食崖の崩落は続いていると考えられるため、絶対量の減少はあるものの下手側海岸への砂の供給は依然として続いているはずである。実際、宇多ら⁴⁾は空中写真による訂線変化解析を基に、飯岡漁港の南防波堤の東側区域の前浜面積の1985~2005年の変化割合に、宇多⁵⁾が推定した漂砂の移動高4.3 mを乗じることにより、南防波堤を回り込む漂砂量がほぼ $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ で与えられるとした。しかしこの推定値は海面下での土砂量変化を考慮していないことから過小評価の可能性が残されていた。そこで新たに深浅データを基に南防波堤先端を西側に回り込む沿岸漂砂を推定した。

(1) 深浅図の比較

飯岡漁港の南防波堤は1979~2000年に延ばされたことから、この時期を含む1979~2009年の海底地形変化を飯岡漁港周辺で取得された深浅データを用いて解析した。図-3には7時期の深浅図を示す。まず、1979年では南防波堤の基部から南側への突出長は480 mと短かった。この時期、防波堤先端の航路を横断して北西方向へと砂州が伸び、その先端は西防波堤の西側に形成されていた浅瀬へと伸び、南防波堤先端から北西方向へと浅瀬がほぼ連続的に繋がっていた(図-3(a))。この状況より、防波堤の突出長が短かった1979年には防波堤先端を西向きに沿って沿岸漂砂が連続的に流れることが可能であったと推定される。1980年には南防波堤が540 mまで伸ばされた結果、防波堤東側区域で-2, -3 mの等深線が前進した(図-3(b))。またこの時期、西防波堤の西側では-2, -3 mの等深線が南防波堤先端へと滑らかに突出し、南防波堤の東西で等深線が滑らかに繋がった。同じ状況は、南防波堤が610 mまで伸ばされた1982年の深浅図(図-3(c))でも見られることから、1982年までは西向きの沿岸漂砂は南防波堤により著しく阻止されずに西側へと流出していたと推定される。1986年も1982年とほぼ同じ状況が見られる(図-3(d))。以上のように、南防波堤の長さが約600 mと短かった1986年までは屏風ヶ浦の崩落により生産された土砂は西向き沿岸漂砂により運ばれ、南防波堤先端を回り

図-3 飯岡漁港の深浅図 (1979～2009年)

込んで下手側へと流出していたと推定できる。その後、1990年までには南防波堤が大きく延伸され830mとなった(図-3(e))。このため1990年からは南防波堤の上手側での堆砂量が急速に増大した。この変化は空中写真による汀線変化でみられた状況⁴⁾と同じである。一方、南防波堤の西側隣接区域では南防波堤の延伸と同時に3～5mの等深線が大きく前進し、北側で岸へと接近していた等深線が沖向きに離れる形状に変わった。同様な傾向は1993年も続き、南防波堤の東側では堆砂が進んで陸上部の1m～4mの等深線が互いにほぼ平行に伸びた(図-3(f))。また、南防波堤の先端付近では1990年と比べて4mの等深線が南東側に広がり、南防波堤西側の-5、-4mの等深線とほぼ滑らかに繋がった。陸域から-4mまでの等深線は防波堤と鋭角状に交差していることから、この範囲での沿岸漂砂は阻止されているが、-4m以深では防波堤先端沖を通過して西側へと通過可能な状態にある。同じ状況が2009年も続いた(図-3(g))。

図-4 1980年を基準とした地形変化量の分布

(2) 地形変化量

図-4には1980年を基準とした5時期の地形変化量の分布を示す。1982年までは南防波堤の先端を中心に堆積域が広がっており、防波堤先端部で最も著しい堆砂が起きた。堆砂域の分布より、西向きの沿岸漂砂が南防波堤先端を回り込んで流れたことが分かる。同様な特徴は1986年でも見られ、堆砂域が北西方向へと広がった。この時期もまた著しい堆砂は南防波堤を西側に回り込んだ西防波堤の先端部で見られ、堆積量は北西方向に距離とともに減少していた。1990年には南防波堤が830mまで大きく延伸されたため南防波堤の東側区域の堆砂量が一挙に増大した。同時に南防波堤先端から北西方向へと堆積域が広がりを示した。1990年までは南防波堤の西側区域では堆積域が岸向きに広がっていたが、1993年以降には延長された南防波堤先端を通して堆砂域が南西方向へと広がりを示した。2009年では南防波堤が970mとさらに延長されたため防波堤の東側での堆砂が一層進むとともに、防波堤の西側側面に沿って北向きに堆積域が広がっており、これより延長された南防波堤を回り込んで岸向きに砂が運ばれたことが分かる。

宇多ら⁴⁾は2009年以前の空中写真を基に南防波堤の東側隣接域での堆砂量の変化を求めたが、本研究では2014年までのデータを加えて同様な計算を行った。図-5には南防波堤の基部から防波堤先端までの沖向き長さと、

南防波堤の東側隣接部の前浜面積の変化から算定した堆積土砂量の変化を示す。ここに前浜面積の変化は各年の汀線変化より算定した。堆積量が単調増加した 1993～2004 年の堆積速度はほぼ $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と求められる。宇多ら⁴⁾は、同様な値として堆積速度を $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と見積もったが、計測に一部ミスがあったことから、正確には本研究の値に修正が必要である。一方、図-5 に示すように南防波堤の基部から防波堤先端までの距離は 1999 年頃まで単調に増加した後一定長となったが、堆砂量は防波堤の延伸停止からほぼ 5 年後の 2004 年以降にはほぼ一定値となり、その後堆積量は増加していないことが特徴である。これは南防波堤の東側区域が砂で満杯状態になった後、東側からの漂砂が南防波堤先端を回り込んで西側へ流出しているためと推定される。

図-4 に示した飯岡漁港周辺の深浅図において、1980～2009 年の南防波堤の東側と西側の堆積域(図-4(e)の緑枠内)における 1980 年を基準とした土砂量の変化を南防波堤の突出長とともに図-6 に示す。南防波堤は 1999 年以降には延伸されていないが、堆砂量は 1980～1990 年の 10 年間では $6.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ (堆積速度: $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$)、1990～2009 年の 19 年間では $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ (堆積速度: $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$) であり、1990 年以降の堆積速度は漸減傾向を示す。1990 年以降のデータが乏しいので、堆積速度の低減時期を確定することはできないが、1990 年以降での堆積速度は、図-5 に示した前浜面積から求めた堆積速度とほぼ一致している。このことは、飯岡漁港の南防波堤の延伸に伴い西向きの沿岸漂砂の大部分が捕捉されて堆積が顕著に進んだが、南防波堤周辺の堆積域が満杯状態に近づいた後には、西向きの沿岸漂砂は飯岡漁港の西側へと流出

図-5 南防波堤隅角部に形成された砂浜の土砂量変化と防波堤の突出長

図-6 1980年基準での飯岡漁港周辺の土砂量変化と南防波堤の突出長

していると考えられる。したがって、飯岡漁港付近の西向きの沿岸漂砂量は $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 程度と推定される。

4. 下永井・横根海岸の地形変化

(1) 空中写真の比較

図-7 には、飯岡漁港、下永井・横根海岸の 1961～2014 年の空中写真を示す。この付近の海岸線形状は竜王崎境にフック状となっている。飯岡漁港では経年的に南防波堤が伸ばされてきたが、当地では西向きの沿岸漂砂が卓越しているため、下永井・横根海岸は防波堤による沿岸漂砂の阻止とともに波の遮蔽効果も受けることになった。まず、1961 年には屏風ヶ浦西側隣接部にごく小規模な掘り込み漁港が造られた以外、海岸線には規模の大きな施設はなく、ほぼ自然状態のままであった。1977 年までに飯岡漁港の南防波堤が伸ばされ、その東側隣接部で堆砂が始まった。このため西向きの沿岸漂砂が阻止され、下永井海岸で侵食が始まった。

1993 年には南防波堤が旧海岸線から 920 m まで伸ばされた。南防波堤の延伸と同時期に 1986 年までに 10 基造られた下永井・横根海岸の離岸堤の背後では堆砂量が増加した。その後、2004 年にも同様な地形変化が継続した。そこで、飯岡漁港の上手側で汀線への法線方向角を読み取ると N142°E となり、さらに、2014 年では N146°E であって、平均では N144°E となった。この値は飯岡漁港付近への卓越波向を近似的に与えると推察され、宇多ら⁴⁾が同様に安定汀線への法線方向として求めた N148°E よりわずかに小さいがほぼ一致している。

一般に、防波堤が伸ばされた場合、その背後に形成される波の遮蔽域では遮蔽域外から運び込まれた砂が堆積し、汀線が前進することが知られている。その場合、汀線前進域は、ほぼ防波堤先端から波の進行方向と 45°をなす方向に引いた直線の内側となる⁹⁾。これを考慮し、図-7(e)において南防波堤先端から上記平均方向角 N144°E と、これと 45°をなす N99°E 方向にそれぞれ実線、破線を引くと、下永井海岸と横根海岸は破線内に完全に含まれることから、これらの海岸では飯岡漁港の南防波堤による波の遮蔽効果を受けることが分かる。また、図-7(e)には平均方向角 N144°E と 45°をなす方向を示すが、この方向線は 2 号 HL (矢指ヶ浦) 付近において海岸線と交差しており、南防波堤による波の遮蔽効果が漁港の西 5 km 付近まで及んでいることが分かる。

(2) 下永井・横根海岸での堆砂量の変化

図-8 には 1961 年を基準とした竜王崎から 1 号 HL 間の汀線変化を 16 基の離岸堤(一印)とともに示す。1977 年までは下永井海岸で汀線が後退していたが、その後竜

図-7 下永井・横根海岸の空中写真 (1961～2014年)

王崎から目那川河口に至る3.5km区間全体で汀線が前進した。その際、個々の離岸堤背後で発達した舌状砂州はいずれも小規模であって、堆砂域は全体として下永井・横根海岸の境界付近でピークを持ち、西向きに汀線前進量が減少するという山なりの形状をなして堆砂が進んだことが特徴である。ここでとくに堆積が著しい下永井・横根海岸の $X = 0 \sim 4.2$ km 区間を対象に、1961年を基準とした海浜面積の変化量を求め、その経年変化を図-9に示す。なお図には各時期までに設置された離岸堤の総基数を併せて示す。海浜面積は1961～1977年では減少傾向を示していたが、その後増加傾向となり、2014年には1977年基準で海浜面積が $5.4 \times 10^5 \text{ m}^2$ だけ広がった (増加率: $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{yr}$)。ここで宇多⁹⁾が算定した下永井海

図-8 竜王崎～HL1号間の汀線変化 (1961年基準)

図-9 下永井・横根海岸 ($X = 0 \sim 4.2$ km) の海浜面積変化 (1961年基準)

岸における漂砂の移動高4.3mを1977年以降の海浜面積の増加割合に乗じて堆積土砂量の変化割合に変換すると、 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となった。下永井・横根海岸での堆砂は、1977～2014年に設置の進んだ離岸堤の設置基数と無関係に増加していることから、堆砂は離岸堤の設置によるものではなく、飯岡漁港の南防波堤の延伸に伴う波の遮蔽域内に、南防波堤先端を回り込んで運ばれた砂が堆積したことによると考えられる。

(3) 下永井・横根海岸の深浅図の比較

図-10には下永井・横根海岸の1986～1993年、1993～1995年、1995～2000年の3期間に区分した地形変化量の平面分布を示す。これらの図に示すように、竜王崎に離岸堤が伸ばされた直後の1993年にはその背後で著しい堆砂が生じたが、1995年には離岸堤背後の堆積域が北側へ移動し、2000年には曲率の大きな海岸線に沿って西側へと砂が拡散しながら運ばれた。一方、さらに西側の1号HL付近では著しい侵食は起きておらず、沿岸漂砂の逆流により下永井・横根海岸の離岸堤背後へと大量の砂が運び去られてはいない。これらのことから、下永井・横根海岸の離岸堤区間の堆積土砂は主に飯岡漁港方面から供給されたと考えられる。その場合、南防波堤が急速に伸ばされた1990年までは南防波堤周辺で $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で土砂が堆積したが、その後、南防波堤周辺で十分堆砂が起こると、飯岡漁港を越えて下手側へと砂が運ばれたと考えられる。このように考えれば、飯岡漁港の南防波堤周辺での堆砂速度と、下永井・横根海岸での堆積速度とがほぼ等しいことが理解される。

5. まとめ

深浅測量データの分析によれば、屏風ヶ浦から供給された土砂による飯岡漁港の南防波堤周辺域での堆積量は、1980～1990年には $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定された。この時期には、飯岡漁港の南防波堤が延伸され、沿岸漂砂の阻止効果による顕著な地形変化が生じたと考えられるので、上記の堆積割合は西向きの沿岸漂砂量を近似的に与えている。その後、堆積速度は $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ へと低減したが、これは堆積域が砂で満杯になったため下手側へと漂砂が流出したことによると推察される。一方で、南防波堤による波の遮蔽域内に入る下永井・横根海岸での1977～2014年の堆積速度は $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であり、飯岡漁港周辺での1980～1990年の堆積速度 $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ とほぼ等しいという結果が得られた。以上のことから、現況では屏風ヶ浦方面からの供給土砂が下永井・横根海岸に集中的に堆積し、下手側への供給がほとんどない状態にあることが分かった。なお、既往研究では、九十九里浜の土砂収支は汀線変化解析をもとに算出されているが、本論文では、飯岡漁港周辺の詳細な深浅測量データの解析を行うことにより、沿岸漂砂量の境界条件の定量的評価が可能になったことを付記する。

参考文献

- 1) 宇多高明: 急速に進む九十九里浜の侵食, 科学, Vol.82, No.11, pp.1229-1238, 2012.
- 2) 清水達也, 宇多高明, 熊田貴之, 中橋 正, 保田英明: 九十九里浜北部(飯岡漁港～片貝漁港)の長期的地形変化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp.I_642-I_647, 2012.
- 3) 宇多高明, 野志保仁, 熊田貴之, 水垣 浩, 宇野晃一: 九十九里浜北部(飯岡漁港～片貝漁港)の地形変化の再現と長期予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学),

図-10 飯岡漁港～矢指ヶ浦の地形変化量の分布

Vol.69, No.2, pp.I_531-I_535, 2013.

- 4) 宇多高明, 酒井和也, 清野聡子, 星上幸良: 飯岡漁港南防波堤の延伸に伴う漂砂上手側での砂浜形成と環境変化, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.1071-1076, 2010.
- 5) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, p.442, 1997.
- 6) 宇多高明, 石川仁憲: 「実務者のための養浜マニュアル」, (財) 土木研究センター, p.170, 2005.
- 7) 宇多高明, 大木康弘, 酒井和也, 李 裕群: 千葉県九十九里浜北部の野手海岸で進む侵食と津波対策, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp.I_624-I_629, 2014.

(2016.2.4 受付)

SHORELINE CHANGES ON NORTH KUJUKURI BEACH AND BEACH CHANGES AROUND IIOKA FISHING PORT

Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI, Yasuro OHTANI and Yasuhiro OOKI

Shoreline changes on north Kujukuri Beach and beach changes around Iioka fishing port were investigated using aerial photographs and bathymetric survey data. The sand transport rate turing around the tip of the Iioka fishing port breakwater from Byobugaura sea cliffs was estimated to be $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ between 1980 and 1990. It has reduced $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ between 1990 and 2009. The former value was in good agreement with the rate of the deposition of $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ on the Shimonagai and Yokone coasts located in the wave-shelter zone of the Iioka fishing port breakwater. Thus, all sand supply from the Byobugaura sea cliffs is assumed to deposit on the Shimonagai and Yokone coasts, resulting in the exhaustion of sand supply to downcoast.