天竜川河口右岸の浜松五島海岸で進む集中的な侵食の実態

Rapid and Severe Erosion of Hamamatsu-goto Coast west of Tenryu River Mouth

三波俊郎¹・宇多高明²・石川仁憲³・大井戸志朗⁴・遠藤和正⁵・佐藤純一郎⁵

Toshiro SAN-NAMI, Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Shiro OIDO
Kazumasa ENDO and Jun-ichiro SATO

On the Hamamatsu-goto coast located west of the Tenryu River mouth, beach has been eroded severely in recent years, resulting in the exposure of the seawall protecting the sewage facility. Now urgent measures are required to prevent the damage to the seawall. In particular, large-scale offshore troughs have developed in this area, resulting in strong wave action to the seawall. Erosion around the Tenryu River mouth was investigated using aerial photographs, NMB and bottom sounding data along with the grain size analysis of seabed materials.

1. はじめに

遠州灘海岸は、天竜川からの流出土砂が堆積して形成された河口デルタの縁辺をなす海岸である。天竜川河口デルタは、天竜川からの土砂供給と、沿岸漂砂によって河口両翼へと運び去られる土砂量がほぼバランスしつつ長い年月をかけて形成されてきたが、1950年代以降、佐久間ダムを始めとするダム群が造られて河川流出土砂量が減少した結果、漂砂バランスが崩れ、河口部から汀線の後退が始まった(長島ら, 2005)。このため、近年では佐久間ダムの堆積土砂を下流に流す天竜川ダム再編事業が計画され、この中で河川流出土砂量の増加とそれが海岸にもたらす効果についての検討が行われた(宇多ら, 2008)。これらの検討においては、河川からの土砂供給が行われる河口部で近年起きてきた地形変化を正確に把握することが必要である。このため、宇多ら(2012)は、天竜川河口部を含む遠州灘海岸において、2008年以降実施された8回のNarrow-Multi Beam測量のデータを基に河口部を含む広域の地形変化について分析した。これによると、河口砂州は洪水によるフラッシュと波の作用により変動しているが、長期的に見ると侵食が進んできていることが示された。さらに近年では、天竜川河口右岸側の浜松五島海岸では急激に侵食が進み、河口右岸にある下水処理場を防護する堤防が露出するなど、防護上危険な状態となっている。とくに汀線沖に大規模なトラフが形成されており、その影響評価が課題となっている。本研究では、このような天竜川河口部で進む侵食の状況に

ついて実態論的に考察した。

2. 空中写真に見る河口地形の変遷

天竜川の河口地形の変遷については、1946年以降撮影された天竜川河口部の空中写真の比較により明らかにできる。当地区の空中写真は1946～2012年で12回撮影されているが、本報ではとくに近年の地形変化に注目することとし、1962, 1997, 2006, 2012年撮影の空中写真を選んで図-1に示す。1962年(図-1(a))では、海岸線には河口右岸(浜松五島海岸)に矢印aで示す旧海岸堤防があった以外、ほぼ自然海岸が残されており、河口沖に広い碎波帯があったことから河川流出土砂が豊富で、河口沖に広大なテラスが広がっていたことが分かる。また、河口右岸砂州は幅約250 mと広がった。その後、河口部では侵食が進んだ結果、1997年までには右岸側の浜松五

図-1 天竜川河口部周辺の空中写真

1	正会員	工博	海岸研究室(有)
2	正会員	工博	(一般財団)土木研究センター常務理事 なぎ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
3	正会員	工修	(一般財団)土木研究センター
4			静岡県浜松土木事務所企画検査課
5			静岡県交通基盤部河川海岸整備課

島海岸では6基、左岸側の竜洋海岸では5基の離岸堤が設置された(図-1 (b))。この時期、右岸河口砂州は浜松五島海岸の離岸堤の東端からほぼ直線状に東向きに長く伸びていた。しかし1962年当時の沖向きに突出した河口デルタとしての汀線形状は失われ、河口部汀線はやや凹状となった。2006年では、竜洋海岸の離岸堤の西(上手)側では砂が堆積して汀線が前進したのと対照的に、浜松五島海岸では離岸堤東端で汀線がフック状に後退し始めた(図-1 (c))。しかしこの時期でも右岸河口砂州は幅200 mとかなり広がった。2012年では、浜松五島海岸の離岸堤の東端から伸びた右岸河口砂州の規模が大きく縮小してフック状の汀線となった(図-1 (d))。1962年当時の河口部で大きく突出した汀線と、2012年の凹状汀線とはよい対比をなし、この間に河口部で侵食が進んだことが明らかである。なお、浜松五島海岸では、侵食対策として、図-1 (d) に示す測線Dの堤防前面において、2005年1月～3月に4.8万 m^3 、2009年12月～2010年2月に5.1万 m^3 の養浜が行われた。

3. 汀線変化

1962～2012年の天竜川河口部の汀線変化を定量的に調べるために、1962年を基準とする1997、2006、2012年までの汀線変化を調べた。結果を図-2に示す。1962年には河口右岸砂州の汀線が沖向きに大きく張り出していたが、汀線は時間経過とともに後退し、2006年までに最大270 mも後退したことが分かる。しかし、2006年から2012年では、浜松五島海岸の離岸堤の東端付近での汀線後退量は小さくなった。これと比較すると竜洋海岸での汀線変化は相対的に小さい。

次に浜松五島海岸の離岸堤東端部での汀線変化を時間的に密に調べると図-3となる。図-3では、図-1 (d) に示すように海岸線に沿って滑らかに引いた線(点線)を定め、この線から汀線までの沖向き距離を読み取った。離岸堤東端から東側に伸びる汀線は2006年までに後退しフック状となっていたが、詳細に調べると、離岸堤の東側隣接部での汀線変化は左岸側の開口部付近の汀線変化と比べると変動量は小さいものの、離岸堤東端から東側500 m区間では2006年以降も汀線は後退傾向にある。天竜川から大量の土砂が供給される条件下では、上記のように浜松五島海岸の離岸堤端部を中心として汀線が後退することはないから、これより河川からの供給土砂量が大きく減少したことが分かる。また、侵食が進んで離岸堤群東端を境に東向きにフック状汀線が形成された原因は次のように考えられる。

まず、図-1に示したように、天竜川河口の開口部は左岸側に固定されている。このため右岸河口砂州の東部では洪水のたびに砂州フラッシュが起こり、河口砂州を構

図-2 河口部の汀線変化 (1962～2012年)

図-3 基準線から汀線間での沖向き距離の変化

図-4 測線A～D上の汀線位置の経年変化

成する砂礫が強い沖向き流れにより沖合へと運び去られる。沖合へ運ばれた砂礫は、沖向き流速が低減する場所に堆積し砂州が形成されるが、この砂州を構成する砂礫は洪水後の波の作用により河口砂州へと再び運ばれるものの、沖合から河口左岸側へと運ばれた土砂は結果的に河口開口部を横断することになり、右岸河口砂州の土砂の絶対量の減少を招くという考えである。

次に、図-1 (d) および図-2に示すように、河口両側に測線A～Dを定め、これらの測線上での汀線の時間的変化を示したのが図-4である。河口左岸の測線A、Bでは100 m近い変動を有するものの、1962年と2012年の比較では後退量はそれぞれ57 m、18 mと比較的小さい。左岸側の測線と比べ、右岸側の測線C、Dでは変動を示しつつ大きく後退し、1962年から2012年での汀線後退量はそれぞれ280 m、250 mに達した。開口部が左岸寄りであるために、河口からの供給土砂は左岸側海浜へは直接的に供給されるが、逆に右岸側では慢性的な土砂不足が生じていると考えられる。一方、左岸側の測線A、Bでの変化に対し、右岸側の測線C、Dの変化には逆モードの変動も認められる。これは、波向変動またはフラッシュ位

図-5 天竜川河口部右岸の拡大空中写真

置の変動に伴って河口部の汀線全体がシーソーモードで変動しており、この変化が長期的な河口部テラス全体の後退に重なっているためと推察される。

右岸砂州汀線の経年的な後退は、砂州上の植生帯の縮小を招いている。図-5は、右岸砂州の後退が著しくなった1997年以降3時期の河口右岸の拡大空中写真を示す。図-5 (b) (c)には1997年における砂州を囲む汀線（黒線）と植生帯の海側外縁線（青線）を示す。また、同一測線上で読み取った前浜幅も示すが、前浜幅は180 m (1997年), 220 m (2006年), 230 m (2012年)と増加傾向を示している。このような汀線の後退のため植生帯の海側が砂に埋まり、植生帯の狭小化を招いている。前浜地形の変化に伴い河口砂州の環境もまた変化しつつあることが理解される。

4. Narrow-Multi Beam測量データによる地形変化分析

(1) 観測期間中の波浪と流量

天竜川河口周辺部の海底地形変化については、国交省浜松河川国道事務所が2005～2010年に取得したNMB測量データの分析に基づき、洪水による砂州フラッシュと波による砂州の再形成、および静穏波作用下での岸向き漂砂による沖合のバーの消失過程などが明らかにされた(宇多ら, 2012)。ここでは、新たに2011年の8月と12月に測定されたNMB測量データの分析を行った。まず、図-6 (a) は、観測期間中の竜洋観測所における波浪の経時変化を示す。8月測量前の2011年7月19日には台風6号 ($H_{1/3}=8.3$ m, $T_{1/3}=14.8$ s) が襲来し、その後12月測量までには台風12号, 15号および低気圧に伴う高波浪が合わせて3回来襲し、いずれも $H_{1/3}$ が6 mを越える高波浪が

図-6 波浪および時刻水位の変化 (2011年)

作用した。これらのうち、2011年9月に襲来した台風15号時の波浪は $H_{1/3}=11.7$ m ($T_{1/3}=15.7$ s) と既往最大であった。図-6 (b) は、観測期間中における掛塚地点の時刻水位を示すが、台風6, 12, 15号来襲時には警戒水位 (2.6 m) を超える規模の洪水が発生した。

(2) 深浅図の分析

図-7は、2010年12月, 2011年8月および2011年12月の深浅図を示す。2010年12月には天竜川河口沖で水深8 mまで緩やかに突出した河口テラスが形成されていたが、2011年8月までには波の作用により扁平となり、同時に右岸河口砂州が大きくフラッシュされた。2011年12月でも扁平となった河口テラスはそのままの形態を保っているが、8月にフラッシュされた右岸河口砂州の開口部は砂で埋まった。一方、浜松五島海岸の離岸堤群沖では、2010年12月において離岸堤東端を中心に-7 mの深みがあったが、2011年8月には-9 mの細長い深み（トラフ）が離岸堤群の約1/2を覆うまで発達し、それに続く深みは河口中心付近まで伸びた。2011年12月にも浜松五島海岸の離岸堤の東端を中心として最大水深10 mの深みが形成され、深みが離岸堤群全体を覆っている。このように浜松五島海岸の離岸堤の東端沖には規模の大きなトラフが形成されているが、これらのトラフの発達は2011年に度々高波浪が作用したことに起因している。一方、既往研究によれば、高波浪に伴って発達したトラフも、通常波浪作用時の岸向き漂砂によりバーの比高が減少することが明らかにされている(宇多ら, 2012)。とくに2011年12月時の大規模なトラフは、2011年9月に襲来したT15号時の $H_{1/3}=11.7$ m ($T_{1/3}=15.7$ s) の高波浪に起因していると考えられる。

規模の大きなトラフの形成は、河口左岸側の竜洋海岸

図-7 NMB測量による深浅図

の離岸堤群の西端沖でも見られる。2010年12月には離岸堤群の西端沖に-6 mの深みが細長く伸びていたのみであったが、2011年8月には水深8 mのトラフが形成され、この深みは離岸堤群全体を覆うまで発達した。さらに2011年12月には、離岸堤群で最大水深9 mのトラフの発達が見られた。このように河口左岸の竜洋海岸でも、離岸堤群の西端を中心として大規模なトラフの発達が見られたことは、トラフの発達が高波浪起源であったことを強く示唆する。

図-8は、初回の2010年12月または2011年8月を基準とした水深変化量の平面分布を示す。水深変化から見ると、河口開口部沖を除くとトラフの沖にはバーが連続的に発達し、砂の堆積は-10 m付近まで及んでいる。2010年12月から2011年12月まで全調査期間では(図-8(c))、天竜川河口沖テラスの消失に伴う侵食と、浜松五島海岸、および竜洋海岸の離岸堤群沖での帯状の侵食域の形成が目立っている。図-8に示す水深変化によれば、高波浪によるバー・トラフの発達だけでなく、長期的意味での河口部堆積土砂量の減少も認められる。そこで、図-8に破線で示すように、浜松五島海岸を対象として-12 m以浅の区域における2006年7月を基準として算出した土砂変化量を図-9に示す。土砂量は経年的に減少傾向を示しており、2010年には5.1万 m^3 の養浜と洪水により土砂量が一時的に15万 m^3 増加したものの、2006年7月から2011年12月までに40万 m^3 の土砂量の減少が起きた。

図-8 2010年12月~2011年12月の水深変化

図-9 浜松五島海岸の-12 m以浅における土砂量変化

(3) 縦断形変化と底質粒度組成

対象区域では沿岸方向に250 m間隔の測線上で縦断測量と底質調査(2006年実施)が行われた。これらから図-7(c)に示す右岸側の3測線(No. 140, 144, 150)を選択して縦断形変化、粒度組成、中央粒径 d_{50} の水深方向分布を調べた(図-10)。右岸砂州中央付近を通るNo. 140では、主に水深10 m以浅で大きな地形変化が見られるものの、2010年までは汀線位置や陸上の砂州の規模はほぼ同程度の大きさを維持していた。しかし2011年では-5 m付近でトラフの形成が進んだ。粒度組成としては、1~3 mの水深帯は礫で構成され、 d_{50} も10 mmと粗粒土砂が堆積していたが、-4 m以深では中砂と細砂の含有率が高まり、-4 mでは中砂と細砂の含有率が79, 17%と、両方で96%に達する。これに対し-4 m以深では水深の増加とともに中砂の含有率が減少し、これと逆に細砂の含有率が増加している。離岸堤群の東端を通るNo. 144では、2010年に離岸堤沖側のトラフを埋める変化が起きたが、

図-10 縦断面形と粒度組成の水深方向分布

2011年では再び水深10mの深いトラフが形成された。しかし離岸堤より陸側では沖合と比べて地形変化は小さく、地形変化は離岸堤沖で集中的に起きている(図-10(b))。No. 144から西へ1km離れたNo. 150では、No. 144と同様、離岸堤沖でのバー・トラフの形成が著しく、また離岸堤沖では中砂、細砂で構成されているのに対し、離岸堤の陸側では礫が主要成分である(図-10(c))。2007、2011年の縦断面を比較すると、2011年では-5m以深でバー・トラフの形成が進んでいるが、この付近に堆積していた土砂は中砂と細砂で構成されており、バー・トラフの発達域の海底面は中砂細砂で覆われていることが分かる。

5. 考察

天竜川河口では、1962年以降河口が左岸側に固定され、河口からの供給土砂は東向きに流れ易い状態となった。また、河口右岸砂州の汀線は、浜松五島海岸の離岸堤東端部から連続的に伸びているのに対し、西側では離岸堤群が沖向きに大きく突出しているため、汀線付近に堆積した粒径の大きな砂礫は西向き移動が阻止されている。粒径の大きな砂礫分は汀線付近を中心にはほぼ3m以浅に堆積しているから、設置水深が4m程度の離岸堤によりその移動が顕著に抑制される。

一方、図-7に示したNMB測量データの比較によれば、近年河口両側に設置された離岸堤群沖では規模の大きな

トラフの形成が進んでおり、とくに浜松五島海岸の離岸堤群の東端付近でのトラフの規模が大きい。このトラフは、離岸堤に沿って発達した上、離岸堤の東端を回り込んで右岸河口砂州沖へと入り込んでいる。このように深みは東向きに広がっているが、図-7によればその先端は河口テラスにより制約されているように見える。浜松五島海岸での検査対象区域での2006年7月から2011年12月までの土砂減少量は40万 m^3 に達し、当該地区のみでも約7.3万 m^3/yr の減少速度を有している。さらにこの深み付近に堆積している砂は、図-11に示したように中砂・細砂である。これらを総合的に考慮すると、浜松五島海岸の離岸堤沖から河口へと入り込んだ深みは、直接的には近年の高波浪の作用に起因するものであるが、これとともに中砂・細砂分が離岸堤沖を通過して西向きの沿岸漂砂によって西側へと運び去られたことがネットの土砂量の減少に繋がっていると推察される。佐久間ダムにより下流へと流れる土砂が阻止されているが、中砂・細砂成分の絶対量の不足により河口部の水深の増加が進んできていると推察される。しかも中砂・細砂の移動は、先端水深が4m程度の離岸堤では制御できず、離岸堤群の沖合を流れていることから、徐々にではあるが沖合の急深化を招いている。

一方、図-2, 3に示した河口部の汀線変化によれば、浜松五島海岸の離岸堤東端から東側区域での汀線変化は、開口部が左岸寄りに固定化された条件下での、右岸河口砂州東部での洪水時の砂州フラッシュに起因し、河口砂州を構成する砂礫が強い沖向き流れにより沖合へと運び去られた後、波の作用で流出した土砂の一部が右岸河口砂州へと戻ることができないことに起因すると考えられる。つまり、洪水流による強制的な土砂流出であり、ネットの土砂供給量が豊富であれば河口全体で堆積するが、土砂供給量が大きく減少した現在、この機構による河口砂州の絶対量の減少も課題と考えられる。

謝辞：本研究でのNMB測量データの解析では、国交省浜松河川国道事務所より提供された観測データを使用させていただいた。データの提供に関し国交省浜松河川国道事務所に対して深甚な謝意を表します。

参考文献

- 宇多高明・長島郁夫・古池 鋼・宮原志帆・石川仁憲 (2008)：天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響，海岸工学論文集，第55巻，pp. 656-660。
- 宇多高明・三波俊郎・石川仁憲・白石慎重・佐藤純一郎 (2012)：天竜川河口部地形の洪水・波浪応答に関する現地観測，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, p. I_631-I_635。
- 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一 (2005)：遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態，海岸工学論文集，第52巻，pp. 596-600。