天竜川河口テラスの高頻度なモニタリングに基づく地形変化の解析

Analysis of Topographic Changes in Terrace of the Tenryu River Mouth Using Fishing-derived Bathymetry

岡辺拓巳¹・加藤 茂²・高岡 翔³

Takumi OKABE, Shigeru KATO and Kakeru TAKAOKA

This study presents bathymetric changes and its characteristics due to high waves and fluvial floods are examined for river mouth terrace in a wave-dominated estuary of the Tenryu river, a sediment-rich river on the Pacific coast (Enshu-nada) of central Japan. Frequent continuous nearshore bathymetric data of the river mouth terrace and vicinity are obtained from records of whitebait fishing activity by small vessels. Dominant feature of 5-year bathymetric trend are exhibited by concentrated erosion (approximately 3 m vertically) within the front of river mouth and the frontal lobe of terrace migration. Wave-induced retrogradation and flood-induced progradation of the terrace front during meteorological event are examined by transect analysis of the lobe.

1. はじめに

河口域の地形変化は幅広い時間スケールで生じている。土砂管理の観点から見ると、特に海域への土砂供給源となる河川では、出水や高波浪といった気象イベントに起因する土砂移動を把握することが重要となる。土砂供給を伴う河川出水や波浪といった地形変化要因と河口テラスの関係については、例えば真野ら（1995）など多くの研究がなされてきたが、年1回程度の深浅測量結果を基にすると、長期的なスケールの地形変化を対象とせざるを得ない。宇多ら（2012）は3年間に8回行われた河口域での深浅測量データを用いた土砂量変化を検討しており、充実した地形情報の重要性を示している。しかしながら、このような浅海域での高頻度な深浅測量はコストの面からも継続的な実施が難しく、河口テラスの変化特性の把握を困難にしていると考えられる。

本研究では、小型漁船の操業ログを活用した海底地形計測手法で得られる高頻度な河口域の地形情報を基に、近年の天竜川河口テラスの変化特性を把握するとともに、河川出水や波浪との関連について検討した。

2. 調査対象エリアと海底地形データの概要

(1) 解析対象エリア

本研究は図-1に示す天竜川河口の外洋側に形成された河口テラスに着目し、沿岸（東西）方向6 kmの範囲を対象とした。山岳地からの豊富な土砂供給を背景に、その河口を頂点として東西両岸に弧状の砂浜海岸を形成して

いる。河口砂州は右岸側から東向きに発達しており、それに伴ってテラスの頂点も河道の中心より東側に位置している。出水によるフラッシュ後も同方向からの砂州が再形成される傾向にある（宇多ら，1994）。

(2) 海底地形データ取得の概要

海底地形データは、遠州灘の浅海域で操業するシラス漁船の位置および水深を、それぞれプロットと魚群探知機からデータロガーへ収集し、回収したログ（操業ログ）を解析することで取得した。この操業ログに対して岡辺ら（2013）と同様の補正や座標変換を行い、平面直角座標系（第8系）におけるT.P.からの水深分布として扱う。2008年から2013年にかけて取得したものをデータベース化し、これらを解析対象とする時空間で抽出して内挿や平滑化を行うことで、地形データや断面図を算出した。

2008年から2012年までの天竜川の河川流量は、河口から約25 km上流に位置する鹿島観測所における日流量の観測値 Q を用いた。波浪情報について、2009年から2012年の諸量は浅海域波浪推算モデルSWANを用いて算出した。計算および算出値の確認については岡辺ら（2013）に詳しい。本研究では天竜川河口から約1 km沖（水深18

図-1 天竜川河口における解析対象領域

1 正会員	博(工)	豊橋技術科学大学大学院助教工学研究科
建築・都市システム学系
2 正会員	博(工)	豊橋技術科学大学大学院准教授工学研究
科建築・都市システム学系
3	修(工)	豊橋市上下水道局

図-2 対象領域で取得した漁船操業ログ、天竜川の日流量および河口沖合での有義波高の経時変化

表-1 対象エリアにおいて取得した操業ログ数の概要

漁期	総データ数	延べ操業日数 [day boat]	1日隻あたり データ数 [point/day/boat]
2008	1343224	381	3526
2009	1033865	404	2559
2010	1463043	469	3119
2011	931124	358	2601
2012	1341046	481	2788
2013	1202332	371	3241

m) における推算結果を用いた。2008年および2013年の波高および周期については、河口に隣接する竜洋海岸の約2 km沖合（およそ水深40 m）に設置された海象計による観測データを用いた。

図-2は上段より、対象エリア内で取得した操業ログの日合計値、天竜川の日流量および天竜川河口沖合での有義波高 $H_{1/3}$ について、2008年から2013年の経時変化を示したものである。これより、操業ログはシラス漁の休漁期となる1月中旬から3月下旬まで取得できないため、冬季のデータ数は0となっている。また、好漁となる場合が多い春先および秋頃に取得データ数も増加しており、年2回のピークが現れる傾向が見られる。日流量 Q については、2010年および2011年に出水が見られる。2011年は高波浪を伴う台風による出水の頻度が多く、4000 m^3/s 規模の出水が3回発生している。一方で2010年の出水は波高が小さく、大雨によるものであったことが特徴的である。有義波高については、2009年に来襲した台風0918号によって高波浪が生じているものの、2010年までは $H_{1/3}$ が5 mを越えることがほぼなかった。2011年以降、遠州灘沿岸へ上陸するなど、強い影響をもたらす進路や規模の台風が増加したことに伴い、 $H_{1/3} > 5 \text{ m}$ となるような高波浪の発生頻度も増えている。

表-1は対象エリア内で取得した操業ログについて、漁期（各年度の3月下旬から1月中旬までの約10ヶ月間）毎の総データ数、延べ操業日数およびそれらから算出した

1隻が1操業日あたりに記録する平均データ数を示したものである。6年間の平均的な漁期の総データ数は 1.2×10^6 点、延べ操業日数は411日となった。また、対象エリアでの曳網の有無や好不漁による操業時間の変化に依存するが、エリア内では1操業日あたり約2500～3500点のデータが取得できている。1秒に1点（1 Hz）の操業ログを記録している漁船が大部分であることから、操業日において平均的に1隻あたり40～50分間は対象エリアを航行していることとなる。

3. 天竜川河口テラスの変化

ここでは、まず2008年から2013年にかけての天竜川河口周辺を含めた海底の地形変化およびテラスでの土砂変化量を検討する。さらに、テラスの変化と地形変化外力となる波浪および河川出水との関連について、年および気象イベントの時間スケールで考察する。

(1) 天竜川河口域の地形変化

図-3は対象エリアにおける2013年の年平均的な等深線と、2008年からの水深変化量を示したものである。両年の地形データは、それぞれの漁期で記録された約10ヶ月間の全データを用い、krigingによる空間的な内挿補間と移動平均法によるノイズ除去を経て算出したものであり、およそ年間の平均的な海底地形として扱う。一般的に用いられる深浅測量成果は、短期間に取得した地形情報で構成されるスナップショット的なデータであるが、ここでは年間を代表する地形として、継続的に取得した地形情報の期間平均値である本手法を用いる。図より、河口前面は沿岸方向に約1 kmの範囲で-2 mを越える侵食域が広がっており、テラス頂部が陸側に後退したことがわかる。一方、その侵食域に隣接する東西側では堆積が生じており、特に東側の堆積域における5年間の水深変化量は大きい。西側の水深10 m以浅では、侵食域と堆積域が沿岸方向に交互に現れているが、対象エリア海域の全体の土砂量は、侵食領域の広さやその水深増加の大きさから減少したと考えられる。

図-3 漁船操業ログから算出した2013年の等深線および2008～2013年までの水深変化量の平面分布

図-4 河口前面の土砂変化量の経時変化

図-5 2009～2012年までのテラスの岸沖断面と標準偏差

次に河口前面部に着目し、テラスの土砂変化量を検討する。図-4は2008年を基準とした2013年までの河口前面の土砂変化量の経時変化を示している。解析領域は図-3中のA-1に示す範囲であり、河口を中心として沿岸方向に2 km、岸側と陸側はそれぞれ水深5 mと15 mを境界とした。地形データは前述した年平均地形を各年毎に算出して用いた。また、地形の差分を計算する際には、地形データの精度を考慮して ± 0.5 m以上の水深変化のみを対象としている。これより、河口前面では5年間に 80×10^4 m³の土砂が減少しており、その速度は2010年から2012年にかけて約 20×10^4 m³/yrである。2009年までの1年間で約 40×10^4 m³の侵食が生じた後、2010年にかけて 10×10^4 m³が堆積したこともわかる。図-2に示したように、2009年以前は高波浪の来襲も少なく、河川出水に伴う土砂供給が少なかったため、岸向きや沿岸方向への漂砂によって河口前面は侵食傾向となったことが推察される。また、2010年の波浪も静穏であったが、低気圧や前線に伴った複数回の出水による海域への土砂供給が堆積傾向へ転じた要因と考えられる。解析領域は異なるが、宇多ら(2012)も2010年後半に発生した複数回の洪水による天竜川河口域での急激な土砂量増加をナローマルチビーム深浅測量の結果から指摘しており、このことは図-4で示した土砂量変化の傾向とも調和的である。

次に河口テラス前面の断面を解析することで、その地

形変化の特徴を捉える。図-5は2009年から2012年までに取得した河口テラスの岸沖断面と、その水深および岸沖方向の標準偏差を示したものである。海底断面はテラス頂点付近を通過する岸沖測線として図-3中に示したCS-Aでの縦断地形を用いた。この地形は空間的に点在する操業ログをCS-Aに沿った東西幅60 mの範囲で抽出し、岸沖方向に局所重み付け回帰関数を使用するQuadratic Loess平滑化を用いてスムージングやノイズ除去を行うことで算出したものである。操業ログは波浪が静穏な1～数週間程度の期間でまとめることで、1つの断面用データセットとして扱った。図より、漁船の操業ログで取得できた地形は水深およそ4 m以深に形成された河口テラスの前面部分である。断面は水深約11 mで浅で岸沖方向に変動しており、その幅は浅くなるにつれて200 mを越えて大きくなっている。その傾向に対応し、図中下段に示した水深の標準偏差も岸側で増加しており、テラス頂部にかけて地形が変化しやすいことがわかる。一方、水深約11 m以深では標準偏差が0.2～0.4 m程度で安定しており、この水深が河口テラスの沖側斜面の下端となっていることに加え、対象期間における地形変化の限界水深と考えられる。遠州灘での移動限界水深 h_c には10 mが用いられる場合が多く(例えば、佐藤ら, 2004)、この結果は既往研究による移動限界水深とほぼ一致している。図中の岸沖方向の標準偏差は水深12 m以深で増大している。テラ

(a) 沖波エネルギーフラックス

(b) 河川流量

図-6 波浪および河川流量とテラス斜面の年間移動速度の関係

図-7 河川流量とテラス断面での水深の標準偏差の関係

ス斜面の勾配と比較して、下端より沖側では1/100程度と緩やかな地形であり、水深方向の変化は水平方向に大きく現れるため、これは取得した断面の水深方向の精度と地形勾配の関係に起因したものと考えられる。

(2) テラスの変化と波浪および河川出水の関係

ここでは、河口テラスの沖側への発達や陸側への後退について、波浪および河川出水との関連を分析する。河口テラスについては、2009年から2012年までのCS-A断面におけるテラス斜面の岸沖移動量に着目する。前述した年間7～10本の取得断面地形における水深8 mおよび10 mの岸沖位置に対して、年間の移動トレンドを直線近似で求め、その両者の平均移動速度を代表値とした。また、有義波高 $H_{1/3}$ が3 mを越える期間を荒天時と定義し、その間の全沖波エネルギーフラックスを時間積分した値 E_f 、さらにその間の日流量の最大値 Q_{max} を用いた。

図-6は各年の E_f および Q_{max} とテラス斜面の岸沖方向の移動速度の関係を示したものである。なお、ここでの E_f および Q_{max} はその年の漁期中に発生した荒天時の値の総和である。また、正の速度はテラス斜面が岸向きに移動したことを示している。図より、2009年のテラス斜面はほぼ移動せず、翌2010年に沖向きにやや発達した傾向であることがわかる。2011年以降は早い移動速度で斜面が陸側に移動しており、テラス前面が急激に後退している。特に2011年の移動速度は大きく、テラス前面の年間の後退量に換算すると100 mに及んでいる。沖波エネルギーフラックス E_f との関係(図-6 (a))については、漁期の総エネルギーとテラス前面の移動トレンドは関連があるようにも見える。特に高波浪が頻繁に来襲した2011年は斜面の後退速度が大きい。しかしながら、2009年と2012年は E_f に大きな差はないものの、移動トレンドは異なっている。 Q_{max} との関係(図-6 (b))については両者に明確な関連性は見られないが、波浪が小さかった2010年は出水量が多く、これがテラス斜面の前進に寄与したことが考えられる。また、2011年は E_f が大きい一方で出水量も多く、テラスへの土砂供給が増加したとも考えられるが、結果的には最も後退が進んだ年となった。2009年および2012年は Q_{max} についてもほぼ同量であることから、

沿岸漂砂や波向、出水と流出土砂量の関係など、テラス前面の挙動を決定する別の要因を検討する必要がある。単に波浪エネルギーと出水量のみで河口テラスの前進や後退を定量的に評価する方法には課題が残った。

4. 河川出水中の地形変化の評価

台風などの気象イベントによって生じた高波浪と降雨が過ぎ去った後、海域での波高の減少と、出水がピーク流量から平水位に戻るまでの時間にはラグが生じる。波高と比較して河川流量の減少速度は遅いことから、河口域の地形は波浪が静穏になった後でも出水の影響を受けることになる。対象沿岸でのシラス漁は波高の減少とともに操業を再開するため、出水の影響のみで生じているテラスの地形変化の情報が河口域を航行した際の操業ログに含まれている可能性がある。ここでは、操業ログにおける水深の散らばりの空間的な分布から、出水によって生じる地形変化を評価できるか検討した。

まず、数日から2週間程度の短期間での操業ログの水深変化と、河川流量の関係を検討する。図-7は出水を伴う比較的波高の小さい荒天による休漁の前後4～15日間を対象とし、その期間平均の日流量と、操業ログより算出したCS-Aにおける水深の標準偏差の関係を示したものである。標準偏差についてはテラス斜面勾配の違いを考慮し、水深11 m以浅(図中●印)およびそれ以深(+印)で区分して求めた。規模の大きい出水頻度の多かった2010年と2011年を対象とした。これより、両水深帯の水深ログのばらつきと、流量の間に明確な相関は見られない。この原因の一つとして、短期間で取得できる操業ログの少なさが挙げられる。天竜川河口は漁港から遠方に位置しており、操業ログの空間密度が低くなりがちである。この時間スケールでテラスの地形ダイナミクスを把握するには、ロガーを搭載した漁船を増加させて地形情報の時空間密度を高めることが必要である。

この結果を踏まえ、大きな出水イベントに加え前後の平水時を含めて解析期間を延長するとともに、空間的な水深ログの標準偏差の分布から、出水が海底地形に与える影響を検討する。図-8は、2010年6～7月にかけての降

図-8 操業ログから算出した2010年5～8月の水深の標準偏差の平面分布

雨による出水（期間中，日流量は最大3600 m³/s，有義波高は3 m以下）を対象とし，前後の静穏期（5月および8月）も含めて算出した水深ログの標準偏差の平面分布である．図中には，魚群探知機の取得水深に見られるスパイクノイズなどの不良データに起因する大きな標準偏差が点在している．これを考慮しても，河口の西側（Y ≤ -64500）沿岸は東側と比較して標準偏差が小さいことが特徴的である．河口左岸側の開口部前面から西側にかけての岸寄りの浅海域では標準偏差が大きくなっている．水深およそ12 m以浅の領域が該当しており，大きな水深変動が記録されたことを示唆している．期間の長さを考えると波浪の影響も含まれてはいるものの，期間中の海象と出水の条件を考慮すると，河口付近では出水の影響も含んだ地形変化であると考えられる．これらのことより，定性的ではあるものの，継続的な河口地形のモニタリングで得られる水深変動を検討することで，スナップショットのような浅深測量では得られない出水中の河口地形への影響を示す情報が取得できる可能性がある．

5. おわりに

本研究では，遠州灘沿岸で操業する漁船の操業ログを基に，2008年以降の天竜川河口テラスの変化特性を把握した．また，出水中に生じているテラスの地形変化を示す情報として，河口域の操業ログの水深の標準偏差と出水の関連性を検討した．以下に得られた知見をまとめる．

- 1) 天竜川では，河口前面の侵食とテラスの後退が著しく，河口前面の沿岸方向2 km，水深5～15 mの範囲では，2008年から5年間で約80×10⁴ m³の土砂量が減少した．
- 2) 河口テラスの前面部では，その傾斜の下端となっている水深11 m以浅で地形変化が活発になる．この水深は，遠州灘沿岸での移動限界水深とほぼ一致している．
- 3) テラス前面の岸沖移動について，傾斜断面の年スケールの移動トレンドを，年間に発生した全荒天時の沖波エネルギーフラックスおよび河川流量の総和と比較した．出水イベントの卓越した2009年や，波高および出

水ともに大きかった2011年の特徴を捉えた．一方，年間の波と流量が同等であった2009年と2012年については，移動トレンドが異なったことから地形変化外力として別の要因を考える必要がある．

- 4) 出水中に生じている河口域の地形変動を，その時期に得られる操業ログ（水深）の標準偏差を用いて評価することを試みた．数日～2週間に得られる操業ログからは，地形情報の少なさが一因となり，テラス断面での標準偏差と河川出水量との明確な関係性は得られなかった．また，2010年の出水イベントを対象とし，時空間的に範囲を広げて算出した標準偏差の平面分布より，河口前面から東側沿岸の浅海域に特徴的な領域を確認し，その空間的な分布が定性的に地形変動の活発な領域と対応する可能性を示した．

謝辞：浜名漁業協同組合および遠州漁業共同組合にはシラス漁船の操業ログ取得にご協力頂きました．操業ログの一部および竜洋観測所での波浪観測データは静岡県からご提供頂きました．本研究の一部はJSPS科研費25420516による成果です．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本雅彦・大谷靖郎（1994）：天竜川河口砂州の伸長に伴う河岸侵食と海浜変形，海岸工学論文集，第41巻，pp.481-485．
- 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, pp. I_626-I_630．
- 岡辺拓巳・加藤 茂（2013）：高頻度海底地形モニタリングによるebb-tidal deltaでの沿岸漂砂量の推定，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 69, No. 2, pp. I_651-I_655．
- 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹也・芹沢真澄（2004）：天竜川－遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討，海岸工学論文集，第51巻，pp. 571-575．
- 真野 明・林 吉近・沢本正樹（1995）：阿武隈川河口テラスと砂州の干渉作用，海岸工学論文集，第42巻，pp. 576-580．