由良川河口部の砂州の形成・発達過程に関する 現地観測とその数値解析

FIELD AND NUMERICAL STUDIES FOR FROMATION OF SAND BAR
AT THE YURA RIVER MOUTH

中村文則¹・朝倉実里²・神田佳一³・三輪 浩⁴・細山田 得三⁵
Fuminori NAKAMURA, Misato ASAKURA, Keiichi KANDA, Hiroshi MIWA
and Tokuzou HOSOYAMADA

¹正会員 博(工) 明石高専助教 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

²明石高専 建築・都市システム工学専攻 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

³正会員 工博 明石高専教授 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

⁴正会員 工博 舞鶴高専教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234)

⁵正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

The elucidation of the developing process of sand bar in the river mouth is important for river management. In this study, in order to clarify the developing process of sand bars in the Yura river mouth located in Fukuchiyama city in Japan, the field measurements of sand bar form were carried out. Numerical simulation were also carried out using a series of two-dimensional model of wave and bed material load. In those results, the numerical results for the developing process of sand bar agree well with the field measurement results, and the developing process of sand bar at the Yura river mouth was evaluated by results of numerical simulation and field measurements.

Key Words : Yura river, Sand bar, River mouth, Numerical simulation, Boussinesq equations, Sediment transport

1. はじめに

日本海沿岸では、冬期の季節風的作用により激しい波浪が来襲し、その影響を受け河口部に砂州が形成される。一方、夏期では、冬期に形成された砂州が出水によってフラッシュされ、砂州の形成・発達と消失が規則的に繰り返される。特に、冬期に形成・発達する河口砂州は、出水期に河川の流れを阻害し、その周辺および上流において水位上昇を引き起こす要因となる。一般的に、河口砂州は、大規模な出水時にフラッシュされるため、河口部の安全性は確保されるが、砂州が完全にフラッシュしないような河川では、河口部に発達した砂州を適切に管理・制御していくことが重要となる。

砂州を管理・制御するためには、その形成・発達過程および消失過程を解明することが有効な手段であり、いくつかの研究成果が報告されている。例えば、既往研究^{1), 2)}において、砂州のフラッシュによる地形変化およびそれともなう水位変動について定量的に再現できることが報告されており、砂州の消失過程について明らかに

されつつある。一方、砂州の形成・発達過程については、海域の波浪場と土砂移動のモデルを組み合わせた平面2次元の数値モデルを用いて砂州の形成・発達を再現する試みが行われ、その結果、ある一定の条件において砂州の形成・発達過程を再現できることが報告されている^{3), 4)}。しかしながら、数値解析で再現した砂州の形成・発達過程と現地観測による結果を詳細に比較した例は少ない。また、砂州の形成・発達は海域からの波浪および潮位等に影響を受ける現象であり、太平洋、日本海、瀬戸内海沿岸などの河口が面している海域によって、その形成・発達過程は異なる。そのため、それぞれの地域に応じた形成・発達過程の解明が必要であるが、研究成果が十分に報告されていないのが現状である。

本研究では、日本海沿岸の若狭湾内に位置する由良川河口部の砂州の形成・発達過程を明らかにするために、詳細な砂州形状と波浪の現地観測を行い、その結果について検討を行った。さらに、由良川河口部に形成・発達する砂州の再現計算を実施し、その形成・発達過程について検討を行った。

図-1 河口砂州形状の観測結果

2. 由良川の概要

由良川は流域面積1880km²の一級河川であり、その河口部が京都府北部の若狭湾内に位置するような河川である。河口部には、幅数百m程度の砂州が形成されており、その砂州の形状も毎年複雑に変化している。近年では、右岸側の砂州が大きく発達する傾向にあり、その影響を受けて左岸側で砂州が消失し、河岸が侵食され、問題となっている。

以上より、由良川河口部における砂州の形成・発達過程を把握し、砂州の適切な管理・制御を行っていくことが必要となるが、その発達・形成過程について明らかにされていないのが現状である。

3. 現地観測

(1) 観測方法

現地観測は、由良川河口部に形成・発達する砂州の形状変化と外力の関係を把握するために、両岸の砂州形状と河口部に来襲する波浪を対象に実施した。

砂州形状の観測は、2010年10月～2013年9月の3年間に約1ヶ月間隔で36回実施した。観測方法は、DGPS受信機(GIR1600 SOKKIA製)を用いて砂州の汀線部位置の座標

を記録し、そのデータを整理した。現地観測1回の測点数は90～140点程度であり、約10～20m間隔である。

波浪の観測は、2013年11月1日～2月17日の90日間実施した。観測方法は、多機能型海象観測装置DL-2(株ソニック)を水深12m位置(緯度35° 31' 30.1"，経度135° 17' 33.6")に設置し、水位変動、流速および波向の測定を行った。観測結果は、1時間間隔の有義波高および周期、波向に整理した。

(2) 観測結果および考察

a) 河口部砂州の形状変化

図-1は、由良川の河口部における1ヶ月単位の砂州形状の観測結果を整理したものである。図の上段(a), (c), (e)は冬期の10月～翌年4月、下段(b), (d), (f)は出水期および夏期の5～9月の結果である。図に示すように、観測期間内では、砂州は右岸側で大規模に発達しており、幅200～400m程度である。図(b)に示す夏期では、2011年5月30日および9月21日に出水が発生し、右岸側の砂州の面積が減少し、その後の図(c)に示す冬期に砂州の形状が変化している。図(d)の2012年の5～10月では、大規模な出水が発生していないため、砂州形状は変化していない。

図(e)に示す2012年11月～2013年4月の冬期には、砂州が大きく発達しており、3月には左岸側の砂州が新たに形成されている。由良川河口部では、1982～2001年頃まで両岸に大規模な砂州が形成しており、左岸側の砂州は2006年頃に消失し、今回の観測まで消失した状況であつ

図-2 波浪観測結果(由良川河口部：水深12m)

た。2001年以降では両岸に砂州が発達していたことから、この河口部では両岸に砂州が形成・発達しやすい傾向があると考えられる。ただし、その後、2013年9月15日に発生した出水により、左岸側の砂州がすべて消失し、右岸側の砂州も面積の半分が消失した。

砂州部の底質は、2006年の底質調査結果では、粒径0.45～0.85mmが9割程度を占めている状況であった。

b) 河口部の波浪状況

図-2は、冬期に由良川河口部に来襲した波浪の観測結果と若狭湾の外域に位置する福井港沖で観測された波浪を整理したものである。福井港沖の観測結果は、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)⁵⁾の結果である。

図に示すように、由良川河口部に来襲する波の波高は、福井港沖の観測結果と比較して、全体的に低い傾向がある。福井港沖の観測結果では、観測期間に波高5m以上の高波浪が数回観測されているが、由良川河口部では、大部分が波高2m以下であり、最大値でも波高3.5m程度であった。この結果から、由良川河口部では、若狭湾の外域と比較して来襲する波の波高は低く、波高1～4m程度の波で砂州が形成・発達していると考えられる。

波の周期は、由良川河口部と福井港沖で大きな差はないが、河口部では周期12s程度の比較的長周期の波が来襲する傾向が見られる。波向は、福井港沖の観測結果では、15～135°の間で変動しているが、由良川河口部では全体的に23°程度であり、由良川河口部の海岸線とほぼ垂直の波向であった。ただし、1月7日に波向が若干変化しているが、これは観測機器を点検のために再設置した日であり、その影響であると考えられる。

c) 砂州形状の変化と波浪の関係

図-3 砂州の面積変動と外力(波浪・潮位)の関係

図-3は、河口砂州の面積変動量、波高1.0m以上の波浪が河口部に来襲した時間、潮位の観測結果を整理したものである。上図は1ヶ月間に变化した砂州の面積の変動量を整理したものであり、中央の高波浪作用時間は、福井港沖の波浪観測結果から由良川河口部の波浪を推算し、波高1.0m以上となる時間を整理したものである。推算方法については、数値解析の部分に記述した。下図は若狭湾奥に位置する舞鶴観測点で観測された潮位である。

図に示す通り、冬期に高波浪の作用時間が長く、砂州の面積が増加している傾向があり、出水期および夏期で面積が全体的に減少している。ただし、2012年1月9日～3月23日までの期間では、高波浪の作用時間は長い、砂州の面積は大きく変化していない傾向がある。これは、図-1(c)に示すように、冬期の波浪の作用により、砂州先端が河口側に押し込まれることで、砂州の形状だけが変化し、海面上にでている砂州の面積が変化していないためである。

砂州面積と測定時の潮位の変動量を比較したものが上段と下段の図である。現地観測では、砂州の汀線部を測定しているため、観測結果が測定時の潮位に影響を受けると考えられる。しかし、図に示すように、砂州の面積変動は、潮位の変動傾向と一致しておらず、測定時の潮位による砂州面積への影響は小さいといえる。

これらの結果より、由良川河口部の砂州は、冬期に砂州が形成・発達しており、夏期の出水によって消失・減少する傾向があることが示された。これは、日本海沿岸に位置する河口部の砂州形状の変動傾向と一致しており、既往研究⁴⁾で報告されているように、冬期に来襲する波浪が砂州の形成・発達に大きく影響しているためである。

そこで、波浪場と土砂移動モデルを組み合わせた数値モデルを構築し、砂州の形成・発達の再現計算を行い、その詳細な形成・発達過程について検討を行った。

4. 数値解析

(1) 計算モデルおよび基礎方程式

計算モデルは、波浪場および河床・海底の土砂移動モデルを組み合わせた平面2次元モデルである。海域の波浪および海浜流の計算モデルは、修正ブシネスク方程式モデルを使用した。基礎方程式は連続式と運動方程式であり、式(1)～(3)のようなものである。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 h}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 x, y は座標、 t は時間、 g は重力加速度、 η は水面変動量、 Q_x, Q_y はそれぞれ x, y 方向の線流量、 h は静水面からの水深、 D は水面変動を考慮した水深、 B は定数($=1/21$)である。

河床・海底の土砂移動モデルは、既往研究^{6), 7)}を参考に、波動現象と流れによる土砂移動を計算できる三次元海浜変形モデルを用いた。波と流れによって移動する土砂量の算定式を式(4)～(6)に示す。

$$q = q_w + q_c \quad (4)$$

$$q_w = A_w F_D (u_{*m}^2 - u_{*c}^2) u_b / g \quad (5)$$

$$q_c = A_c (u_{*m}^2 - u_{*c}^2) u_c / g \quad (6)$$

ここで、 q, q_w, q_c はそれぞれ土砂フラックスの総量、波による土砂フラックスおよび流れによる土砂フラックス、 u_{*m} は波・流れ共存場の最大底面摩擦速度、 u_{*c} は移動限界摩擦速度、 F_D は土砂の移動方向を示す係数、 u_b, u_c は波による底面軌道流速振幅、海浜流の断面平均流速である。 A_w, A_c は、式(7)および(8)で算出される係数である。

$$A_w = \frac{B_w \cdot w_0 \sqrt{0.5 f_w}}{(1 - \lambda) s' \sqrt{s' g D_s}} \quad (7)$$

$$A_c = \beta \cdot A_w \quad (8)$$

ここで、 w_0 は沈降速度、 f_w は摩擦係数、 s' は土砂の水中比、 λ は土砂の空隙率、 D_s は土砂の粒径であり、 β は定数である。

地形高の変化の算定は、地形勾配の影響を考慮した式(9)を用いて計算を行った。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 q_x, q_y は、 x 方向および y 方向の土砂フラックスの総量、 z_b は局所的な地盤高、 ε_s は定数である。

(2) 計算条件および境界条件

a) 計算ケース

計算は、2012年11月28日～2013年4月23日までの5ヶ月間における砂州の形成・発達過程の再現計算を実施した。現地では、この期間に河口砂州が右岸側で大きく発達しているとともに、左岸側では新たに形成されている。

図-4 計算地形(由良川河口部)

表-1 計算条件およびパラメータ

項目		設定値
計算全体	計算領域	x方向(沿岸距離) 4300m y方向(岸沖距離) 2500m
	計算格子数	x方向(沿岸距離) 430格子 y方向(岸沖距離) 250格子
	計算格子間隔	x方向(沿岸距離) 10m y方向(岸沖距離) 10m
	計算時間間隔	0.1~1.0sec
波浪計算	海底摩擦	n 0.01 m ² /s
	定数	B 1/21
	重力加速度	g 9.81 m/s ²
土砂移動計算	粒径数	n 5粒径
	粒径	D_s 0.075mm、0.106mm、0.250mm 0.425mm、0.850mm
	土砂密度	ρ_s 2650kg/m ³
	底質の空隙率	λ 0.4
	無次元定数 (波による土砂量)	B_w 0.07
	無次元定数 (流れによる土砂量)	β 10
	無次元定数	ε_s 0.5

図-5 由良川河口部と福井港の波高

b) 計算条件

計算地形は、図-4のような由良川河口部を中心とした沿岸方向4300m、岸沖方向に2000mの範囲であり、2012年11月に実施した測量結果を用いて、海域および河口域、砂州部を作成した。土砂移動モデルに設定する底質の粒径は、2006年に実施した底質調査で粒径0.85以下の成分が9割以上を占めていたため、粒径0.85mm以下の底質を対象に現地調査の粒径区分に合わせた5粒径を設定した。計算全体の流れは、波浪および海浜流の計算を定常な状況となるまで実施し、その結果を用いて4時間で移動する土砂量を算出し、地形変化量の計算を行い、それを5ヶ月間繰り返し行うものである。計算では、4時間で平均化した波浪条件を作成し、1回の波浪が4時間継続するとモデル化して計算を行っている。計算に設定したパラメータを表-1に示す。

c) 入力波浪の設定

造波条件は、沖側境界の水深12m地点において多方向不規則波を設定した。入力した波浪条件は、由良川河口部での波浪観測データがないため、福井港沖の波浪観測結果から推算した波高および周期とした。波高および周期の推算は、図-5に示すような波向別に整理した福井港

図-6 河口砂州の形成・発達過程の計算結果

沖と由良川河口部での波浪の関係をを用いて行った。計算では、推算して求めた由良川河口部の波高の時系列分布を入力して計算を行った。ただし、現地観測結果の状況から波高1m以下の波は、砂州の形成・発達に及ぼす影響が小さいと考えられるため、波高1m以上の波を対象とした。実際の計算では、波浪を255ケース実施し、1020時間に移動する土砂および地形変化の計算を行っている。波向は河口部の海岸線と垂直な23°を設定した。

(3) 計算結果および考察

図-6は、由良川河口部の2012年11月28日～2013年4月23日までの砂州の形成・発達過程を再現した計算結果を示したものである。図中の実線は計算結果、点線は観測結果である。図に示すように、2012年12月25日および2013年1月24日の計算結果は、砂州の先端部分で違いは見られるが、砂州の形状が観測結果とほぼ一致している。砂州の先端では、砂州上を波が遡上し、河口上流側に土砂を押し込むような現象が発生していると考えられるが、数値モデルではそのような遡上による土砂移動が十分に再現できていない。これは、今回使用している土砂移動モデルが波による土砂の押し込み効果が卓越するモデル

図-7 砂州周辺の波高および波向の計算結果

であるのに対して、遡上による土砂の移動は砂州上の流れによって土砂が移動するためであると考えられる。

2013年4月23日の計算結果では、観測結果と比較して海域側で砂州が過剰に堆積している傾向が見られる。これは、数値解析モデルでは、波高が2mを超えるような比較的激しい波浪条件の場合に、砂州が過剰に発達する傾向にあることが原因である。今回設定した波浪条件では、波高2m以上の波が来襲する回数は、計算開始から1月24日まで期間で6回に対して、砂州が過剰に堆積している2013年1月24日～4月23日までの期間で26回であった。高波浪時に砂州が過剰に発達する理由は詳細に把握できていないため、波が遡上する場合の土砂移動の再現性と合わせて今後の課題とした。

また、2013年4月23日の観測結果では、左岸側に砂州が形成されているが、計算結果は砂州の形成が見られない。現地観測の左岸側砂州の発達位置は、上流側からの河川流と海域からの波が重なり合うような箇所であり、その両者の相互的な作用を考慮した計算を実施する必要がある。ただし、今回の解析では、冬期の由良川の月平均流量が30～90m³/s程度であり、砂州形状の変動に大きく影響を与えないものと仮定し、河川流量を無視した条件で計算を行った。そのため、左岸側の砂州形成が再現できなかったと考えられる。この点については、今後、河川流の影響を考慮した計算を実施し、その影響を確認することを予定している。

以上より、計算モデルにより2013年1月24日までの2ヶ月間の砂州の形成・発達過程はほぼ再現できていたことから、この期間において、砂州の形成・発達過程の外力となる砂州周辺の波浪状況について確認を行った。

図-7は、2012年12月26日に来襲した波の波高分布とその波向を示したものである。境界位置での入射波浪は波高2.4m、周期9.4sであり、波向は計算領域にほぼ垂直に入射する条件である。図に示すように、砂州の海域側では、左岸側から斜めに右岸側へ向う波向が卓越していることがわかる。このような海域から砂州に向う波により、

砂州の海域側に堆積している土砂が、右岸側砂州の海域側に押し込まれ、砂州が形成・発達していると考えられる。また、12月26日以外の計算結果でも、波向の計算結果はほぼ同様の傾向が見られた。

5. 結論

由良川河口部の砂州の形成・発達過程に関する検討を行った。その結果、由良川の河口砂州は、冬期の波浪によって形成・発達し、夏期の出水によって一部が消失していることが確認された。本計算手法で、冬期の2ヶ月程度の砂州の発達過程を再現でき、その結果から右岸側砂州の形成・発達は、砂州の海域側に堆積した土砂が波によって右岸側に押し込まれることによって生じていることが明らかになった。

ただし、今回の解析では、左岸側砂州が再現することができず、その形成・発達過程を明らかにすることはできなかった。そのため、今後、この点について検討していく予定である。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野(河川)(研究代表者 神田佳一、2011～2013年度)の補助を受けて実施され、国土交通省福知山河川国道事務所から貴重な資料の提供を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐川拓也、大谷靖朗、市川真吾、武内慶了、山下武宣：河口砂州フラッシュの再現計算と要因分析、水工学論文集、第51巻、pp.955-960、2007
- 2) 細山田得三、田安正茂、Pujiraharjo Alwafi、佐藤啓明：砂州による洪水流下能力の低下と治水上の危険性評価に関する研究—阿賀野川河口部を対象として—、水工学論文集、第51巻、pp.967-972、2007
- 3) 川村育男、田中 仁：鳴瀬川河口部における砂州地形変化機構、水工学論文集、第51巻、pp.625-630、2007
- 4) 細山田得三、張瑞瑾、星野雄亮：河口砂州の生成に及ぼす河川水と海岸波動の影響に関する基礎的数値実験、海岸工学論文集、第52巻、pp.561-565、2005
- 5) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)、<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 6) 渡辺 晃、丸山康樹、清水隆夫、榊山 勉：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル、海岸工学講演会論文集、第31巻、pp.406-410、1984
- 7) 清水琢三、山田晶子、渡辺 晃：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数、海岸工学論文集、第43巻、pp.571-575、1996

(2014. 9. 30受付)