物部川河口部の閉塞要因と 河口砂州の形成・破壊に関する解析 ANALYSES FOR CAUSES OF RIVERMOUTH BLOCKADE AND FORMATION/DESTRACTION OF SAND BAR AT MONOBE RIVER

門田章宏¹・石本千春²・中野 晋³・鈴木幸一⁴ Akihiro KADOTA, Chiharu ISHIMOTO, Susumu NAKANO and Koichi SUZUKI

¹正会員 博(工) 愛媛大学大学院講師 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 松山市文京町3)
²正会員 修(工) 月島機械株式会社 水環境事業本部(〒104-0051 東京都中央区佃2-17-15)
³正会員 工博 徳島大学大学院准教授 ソシオテクノサイエンス研究部(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)
⁴フェロー会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 松山市文京町3)

Rivermouth blockade has been occurred for a long period at Monobe River of Shikoku-island in Japan. The rivermouth blockade causes serious environmental problems for river control and ecosystem such as spawn of sweetfish. In this study, amount of sediment discharge from upstream is analyzed by surveying the morphology data of Monobe River for 32 years (1973-2005) and by means of aerial photographs to find the causes of rivermouth blockade. In addition, numerical simulation by 3D k- ϵ turbulence model and sediment discharge formulas by Van Rijn and Sunamura are applied for simulating the bed variation of sand bar near rivermouth considering with the flood/normal discharges, flow depth, wave direction, wave height and period of ocean wave. The phenomena of formation and destruction of the sand bar are reasonably simulated for conditions of winter and summer seasons.

Key Words : Monobe River, Rivermouth Blockade, Sand Bar, 3D numerical simulation

1. はじめに

物部川(図-1)は、その源を高知県香美市の白髪山(標高1,770m)に発し、渓谷をほぼ南西に流れ、高知平野東部を貫流して土佐湾に注ぐ一級河川である.流域は、高知県中部に位置し、南国市、香南市、香美市の3市からなり、流域面積は508km²である.また、河床勾配は、上流域(永瀬ダムより上流)で約1/40、中流域(合同堰から下流)で約1/280の急流河川である.このため洪水の流出が早く、流出量も短時間で急激に増加する傾向にある.

物部川は、鮎漁が盛んな河川である.鮎は秋に河口付 近で産卵し、孵化した鮎の稚魚は海へ出て行く.また、 2~3月の春先か春より少し前に、海から川に遡上してく るという生活史を持っている.しかし、物部川河口部に は、大きな砂州が形成されており(写真-1)、この砂州は 閉塞したり、変形したりすることはあっても、平常時の 河川流出流によって破壊(フラッシュ)されることはない. これらは上流部における堰やダムによる河川流量低下、 それに伴う掃流力の減少、さらに高波による岸向きの漂





砂量の影響によると考えられている.このような物部川 河口の閉塞問題は、砂州を破壊するような大出水が発生 しない限り、人工的に手を加えなければ、この問題を解 決することはできない.現在この問題の解決策として、 河口が閉塞する毎に人工的に砂州を開削する工事が、年 平均で約16.4回(昭和60年~平成15年)と頻繁に行われて いる.9~10月や、2~3月の時期に河口が閉塞してしま うと鮎の稚魚が海の外へ出て行くことや川を遡上するこ



写真-1H7年3月20日の航空写真



とを阻害してしまう.また,河口閉塞による川と海の 分断は,他の魚介類の移動も阻害するなど河川環境上 問題となっている.8~9月は,台風等の影響で,閉塞 する回数は少なくはなるが,2~3月は,比較的多くな り(図-2),その都度,河口部砂州の開削を実施してい る.

本研究では、上述した物部川河口砂州の閉塞問題に 対する対策について立案することを目的とし、近年の 航空写真等の既存資料や、本研究で新たに収集した河 床横断面測量データや出水データに基づいた河道内の 洗掘土砂量の評価から、河口閉塞の要因を検討した. 次に、その要因を踏まえた上で、三次元k-ε乱流解析お よび河床変動解析により砂州の季節変化(冬の砂州形成 時と夏の大出水による砂州破壊時の変化)を捉え、様々 な砂州の維持管理手法を立案するための解析手法を確立 した.これらの手法・結果は、開削方法・位置や幅、そ の他の河川構造物設置等の検討に適用できるものと考え られる.

2. 航空写真からみた河口砂州破壊・閉塞状況

写真-2は、洪水が発生した平成2年9月20日と、その41 日後の10月31日の物部川河口砂州部周辺の航空写真であ る.この洪水は、基準地点の深渕(3.8km地点)において ピーク流量が1,648m³/s、ピーク水位がT.P.15mであり、 流量・水位ハイドログラフで表すと図-3の様になる.航 空写真の撮影時刻は確認できず、フラッシュされた時点 の洪水規模が確定できないが、この最大規模の洪水であ





図-3 H2年9月16-21日の流量・水位ハイドログラフ(深渕) る1度目の1000m³/sec以上の流量で破壊され,その後2度 の流量ピークを迎えた後の航空写真であると考えられる. 水の流れは,左岸側の澪筋に沿って左岸側の砂州にぶつ かり,またその砂州に沿って右側の砂州を破壊している 様な形状を示している.長時間洪水を受けたためか,右 側の砂州は大きく破壊されている.しかしながら,41日 後の10月31日には,右岸側の砂州は回復し始め,高知海 岸と一体になるかのように閉塞しかけている.以上の航 空写真より,洪水により砂州はフラッシュされるが,約 1ヶ月後には,その期間,特に大きな出水がなければ砂 州は回復し,閉塞も始まると考えられる.

3.洗堀土砂量の経年変化と河口部閉塞要因

河口閉塞の要因には、河川からの土砂供給と海からの 漂砂の影響の二つが考えられる.ここでは、河道内から



図-4 洗掘土砂量の経年変化

上流側にある合同堰(10.4km地点)から河口までの河道 内全域の河床変動量から,洗掘土砂量を評価すること で,どの程度河口閉塞に影響を与えているかについて 解析を行い,考察する.

洗掘土砂量の計算にあたっては、0.2km毎に設定し た距離標における河床横断面測量データより、河口部 (0.0km)から合同堰(10.4km)の区間を考える、ここでは、 昭和29年から平成17年の横断測量データを用いて計算 を行った. さらに、横断面を400個に分割した断面と 0.2kmの距離標間を1区間とし、この分割断面を台形に 近似することにより河床変動量を計算し、全区間の変 動量を合計することで洗掘土砂量を評価する. 図-1に 示したように合同堰下流には流出する主な支川が無く, この地点から河口までの評価した洗掘量を評価し、河 口までに至った土砂量として仮定し、河道からの閉塞 現象への影響を考える.ただし、昭和29年から昭和36年 の9.0kmから10.4km,昭和36年から昭和40年の9.6kmから 10.4km, 昭和40年から昭和43年の10.0kmから10.4kmは、 河床横断面測量データがなく計算できないため、変動し ていないものとして計算する.

図-4に示す年別の洗掘土砂量の結果を見ると、統合堰 (昭和38年着工,昭和41年竣工)完成後も洗掘土砂量は多 く,合同堰(昭和43年着工,昭和48年竣工)完成後は少な くなる. また, その前後の年にピーク流量が3,000m³/s近 くの出水があると、全てがそうではないが洗掘土砂量も 多い. 昭和43年8月29日に砂利採取法が施行されるまで は、全国的に河砂利がコンクリートの骨材等に使用する ため大量に採取されていた.物部川の採取量については, 図-4に示す統合堰・合同堰竣工までの洗掘土砂量の総量 にほぼ相当するものと考えられる.よって、合同堰が竣 工されたため,洗掘土砂量が減少したとは言えない.ま た,昭和48年までの19年間で洗掘土砂量は約2.602.000m³ と算定されたのに対し、昭和48年から平成17年までの32 年間で洗掘土砂量は約32.000m³と算定された.計算区間 や年数を考慮すると、近年は、あまり河床が変化してな く,ほぼ安定状態であると考えられる.統合堰,合同堰 の竣工により、平水時での堰下流への流量が実質ゼロに



図-5 洗掘土砂量とダム堆砂量との比較

近くなっており、竣工以前ほど流水に掃流力がないのに 対し、依然として海側からの漂砂量の影響が強いこと等 が、現在頻発している河口閉塞の要因として考えられる.

図-5は、物部川河道内全体で発生した土砂生産量とし てのダム堆砂量と洗掘土砂量を比較し、その影響を示し たものである.ダム堆砂量データは、昭和29年から平成 15年までの、物部川上流にある三つのダム(永瀬ダム、 吉野ダム、杉田ダム)のものである.昭和35年以降、ダ ム堆砂量に差はあるものの、近年においても依然として ダム堆砂は多く、物部川流域からの土砂生産は多い.ま た、洗掘土砂量とダム堆砂量を比較すると、洗掘土砂量 よりもダム堆砂量の方がはるかに大きい.

近年,合同堰下流の洗掘土砂量は微量で,河床はほぼ 安定状態であり,ダムによって土砂供給が妨げられてい るにもかかわらず,河口閉塞が問題となっている.これ らの洗掘土砂量の評価によって,海側からの波と漂砂の 影響が非常に大きいことが分かった.**写真-2**で示したよ うに,大規模の出水でなければ河口は開くことはないこ と,また周辺環境への影響を考慮して,従来行われてき た開削手法を効率的に行う方法を行うことが良いと考え る.以下では,これらの有効な開削手法を考えるための 数値解析手法を提案する.



4. 河口砂州形成・破壊に関する河床変動解析

(1) 掃流砂量・岸沖漂砂量の基礎式

本研究では、上述した物部川河口砂州の破壊・閉塞の 要因を踏まえた上で、三次元乱流・河床変動解析により 砂州の季節変化(冬の砂州形成時と夏の大出水による砂 州破壊時の変化)を捉えるための解析手法を確立するこ とを目的とする.ここでは、解析条件の設定に周辺観測 所のデータを用いているが、詳細な観測が可能になれば 本解析手法で有効な開削手法の検討が可能であると考え られる.さらに、物部川河口砂州の周辺では、河口から 海域に向かって急勾配の海底形状を示しており、広幅河 川に通常用いられる平面二次元計算は適用できない.そ こで、本解析では、三次元k-ε乱流解析を用いて流れを 計算した後、流砂量・漂砂量式と河床変動の連続式から 河口砂州の変化を捉える.

これらの解析には、ノルウェー工科大学のOlsen教授 が開発した標準型k-εモデルによる解析コードSSIIM¹⁰に、 以下に示す掃流砂量式および岸沖漂砂量式を適用した. この解析コードは、取水ロ・水制周辺の河床変動解析や 橋脚周辺の局所洗掘現象の解析にも適している.従来、 幾つかの掃流砂の移動の場所的非平衡性を考慮した掃流 砂量に関する式が提案されているが、ここでは次式の Van Rijnの式¹⁰を用いて求める.



ここで、 q_b :流れ方向の単位幅流砂量(m²/s)、 d_{50} :底質の 有効粒径(m)、g:重力加速度(m/s²)、 ρ_s :底質の比重 (kg/m³)、 ρ :水の比重(kg/m³)、 τ_* :無次元有効掃流力、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、v:動粘性係数(m²/s)である.

一方、岸沖漂砂量に関しては、これまでに多くの漂砂



量算定式が提案されている. 漂砂量算定式の多くは, 限られた波浪条件下における実験あるいは近似理論か ら与えられたものであり,利用にあたっては適用限界 が付随することに留意しなければならない. すなわち, 多くの岸沖漂砂量式は底面付近の流速u_b あるいは底面 せん断力τ_bを外力とする考え方がほとんどであり,微 少振幅波理論を適用して測定が容易な波高から底面流速 を評価しているのが現状である. また,小規模の実験, あるいは現地で漂砂量の測定作業の可能な静穏時の漂砂 量データから得られたものが多いため,最も信頼性が高 い漂砂量式を判断することはかなり難しいと言える. そ こで,本研究では,使用するパラメータが多くなく,比 較的計算が容易な砂村の式を用いて,岸沖漂砂量を算定 する.

砂村(1984)²⁾は,波打ち帯を含む砕波帯内における正味 の漂砂量算定式をアーセル数 $U_r = gH_{1/3}T_{1/3}/h_b^2$ および, 底質移動を表すパラメータ $\Psi' = H_{1/3}^2/sh_bd_{50}$ を用いて以 下のように表している.

$$U_r \ge 230, \frac{q}{w_0 d_{50}} = 1 \times 10^{-4} U_r^{0.2} \Psi' (\Psi' - 0.13 U_r)$$
 (2)

$$U_r < 230, \frac{q}{w_0 d_{50}} = 0 \tag{3}$$

ここに、 $T_{1/3}$:有義波高(m)、 $H_{1/3}$:有義波周期(sec)、 h_b : 砕波帯の水深(砕波水深)(m)、 $s = (\rho_s / \rho) - 1$:底質の比重 である.また、 w_0 は底質の沈降速度(m/s)であり、以下 に示すRubeyの式を用いた.

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3}sgd_{50} + \frac{36v^2}{d_{50}^2} - \frac{6v}{d_{50}}}$$
(4)

出水時に起こる非定常性に関しては、流量の変化に応 答する水流の応答速度が河床の変動速度に比べ無限に大 きいものと考えられるため、微少時間(Δt)内で一定の 流量を与え、この微少時間内で流れは定常流として水深 および流速を計算する.こうして求められた流れの方向 に応じた平衡流砂量・岸沖漂砂量を計算し、計算格子間 の流砂量・漂砂量の差に基づき、二次元河床変動の連続 式により、 Δt 時間内の河床変動量 Δz を計算した.



(2) 解析条件

本研究では、図-6に示す海側からの漂砂の影響を主に 考慮するため、物部川河口から海域0.3km地点から上流 0.8km地点の水が流れていると思われる区間を解析対象 区間としている.また、解析メッシュは、流下方向(x方 向)に110個の要素、横断方向(y方向)には70個の要素、鉛 直方向(z方向)には7個の要素に区切り、合計で53,900個 の要素に区切っている.また、初期河床高(図-7)に関し ては、海域0.3kmから0.2km(河口から-0.3km~-0.2km)は 約10m毎に、河口から-0.2km~0kmは100m毎に、0km~ 0.4kmは50m毎に、0.4km~0.8kmは100m毎に測量された 平成17年に行った河床横断面測量結果を用いて与えた.

冬期の砂州形成時と夏期の大出水による砂州破壊時の 変化)の三次元乱流・河床変動解析において使用するパ ラメータは、平成14年1月1日から3月31日に計測された 戸原観測所の有義波高、有義波周期、流速、流向、波向 き、荻岬の潮位、深淵地点の流量である。冬の砂州形成 時は、図-8、図-9に示すように1月から3月のデータを一 日おきに平均して与えた。また、大出水による砂州破壊 時は、図-10、図-11に示すように深淵地点の流量が 500m³/s以上であった9月1日7時から9月2日17時のデータ を用いた。また、両パターンともに、図-7に示した初期 河床を使用し、海からの流れは、波ではなく一定流量が あるものとして仮定した。

上下流端における土砂の流入条件については、河川流 影響を極力小さくした状態を想定するため、上述のVan Rijinの式(1)より求めた掃流砂量の10分の1を土砂濃度と して与えた.一方、下流端では、上述の砂村(1984)の式 (2),(3)によって求めた岸沖漂砂量を砕波帯だと思われる



図-9H14年1月1日~3月31日の海からの流量と波の合成方角



図-11 H14年9月1日~9月2日の海からの流重と彼の合成方: 一帯に土砂濃度として流入土砂を与えた.

また、底質材料の諸条件については、河川域での河床 材料粒径を平成18年に行われた物部川河床材料調査結果 の0.4km地点データより20mmとし、マニングの粗度係数 を0.02とした.海域での底質材料粒径を平成5年~12年 に行われた仁淀川周辺の海域底質調査(物部川周辺の海 域調査データは岸距が不明のため仁淀川周辺のものを使 用)より0.3mmとした.

5. 解析結果および考察

冬季の砂州形成時における1.2ヶ月後の解析結果を図-12に示し、3ヶ月後の解析結果および砂州周辺の三次元 形状を図-13に示している.3ヶ月後には、河川からの流 量が少なく、岸向きの漂砂により河口部に土砂が供給さ れているため、3ヶ月後には土砂が堆積し、初期河床と 比較すると河口砂州が閉塞された状態になったことが分 かる. 堆積した土砂による河口部の高さ変化について見 てみると最大で約1.7mの堆積となった.一連の解析結果 を見た特徴として、河口部の土砂堆積が多く見られる日 とほとんど見られない日があった. その違いが顕著に見 られた解析開始(平成14年1月1日)の24日後から27日後の 解析結果を図-14に示す.解析開始24日後から25日後の 変化はほとんど見られないのに対し、26日後から27日後 の変化は大きい.本解析において、下流側の土砂供給は、 岸向きの漂砂量に依存する. したがって, 岸向きの漂砂 量と、岸向きの漂砂量に最も大きく関わる有義波高との 関係を見てみると、有義波高が大きい日に岸向きの漂砂



量が大きくなる.また,有義波高は,大潮,小潮時期に 大きくなる傾向があり,大潮,小潮時期に岸沖漂砂量が 大きくなっていることが分かる(図-15).

夏期の大出水による砂州破壊時における洪水開始11時 間後の解析結果を図-16に示し、23時間後の解析結果お よび砂州周辺の三次元形状を図-17に示している.図-16 では、河川流量が大きく、初期河床高と比較すると河口 砂州が大きく破壊されたのが分かる.特に右岸側の破壊 が顕著である.一方、図-17の23時間後の変化では、河 川流量が大きいにもかかわらず、台風21号による台風に



図-17夏期(砂州破壊時)の23時間後の砂州の変化 より、有義波高と有義波周期ともに非常に大きく、それ に伴い岸向きの漂砂量も多くなるため、河川からの流量 が少なくなった時、砂州の形成が早くなっていることが 分かる.

6. おわりに

本研究では、物部川河口閉塞問題に関して、現地測量 データに基づいた河道内の洗掘土砂量の評価から、河口 閉塞の要因を検討し、三次元乱流・河床変動解析により 砂州の季節変化(冬の砂州形成時と夏の大出水による砂 州破壊時の変化)を捉えた.

本研究の解析手法で、流量の少ない冬時期に砂州が形 成され、大きな出水が起きた場合に、砂州が破壊される といった傾向を巨視的に表すことはできた.現段階では、 自然環境維持の観点から従来通りの重機による開削法が 有効であり、これらの解析手法・結果を、開削法の検討、 特に、開削位置や開削幅の違いによる砂州形成や破壊の 違いに着目して、物部川河口砂州の維持管理の検討に適 用することが可能であると考えられる.

謝辞:本研究を遂行するにあたり、国土交通省四国地方 整備局高知河川国道事務所より資料収集ならびに現地作 業に関して多大なご協力を頂いた.記して謝意を表す.

参考文献

- Nils R. B. Olsen: A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, User's manual, Department of hydraulic and environmental engineering, The Norwegian university of science and technology, 2006.
- 本間仁・堀川清司:海岸環境工学 海岸過程の理論・観測・ 予測方法,東京大学出版会,pp170-181,1985.

(2007.9.30受付)