

支川合流の影響を受ける大堰湛水区間 における河川地形の経年変化解析

HISTORICAL CHANGES IN RIVER MORPHOLOGY
INFLUENCED BY BARRAGE AND CONFLUENCE

奥山貴也¹・道奥康治²・神田佳一³・米谷駿一¹

Takaya OKUYAMA, Kohji MICHIOKU, Keiichi KANDA and Shunichi KOMETANI

¹学生会員 学(工) 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 法政大学教授 デザイン工学部 (〒662-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

³正会員 工博 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科 (〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

The topic in this study is river morphological changes in the last two and half decades after a barrage construction. The major impacts imposed on morpho- and hydrodynamics in this reach are formation of the reservoir by the barrage and confluence of a major tributary, which have caused significant regime shifts such as formation of an island in front of the tributary confluence, main channel migration from the left to right bank around the confluence, vegetation overgrowth on emergent sandbars, erosion of the main channel and deposition on the floodplain, loss of spawning habitat for sweetfish, water depth decrease in the area of regatta course and other issues, etc. In order to examine the mechanism of the historical changes in river morphology, a numerical analysis on hydrodynamic and sedimentation processes was carried out by using an open source software, the "iRIC". Characteristic geomorphological features such as formation of an island at the tributary confluence and an emerged sandbar development at the left bank side are well reproduced by the present analysis. Influence of the two major impacts, i.e. reservoir formation and tributary confluence, was discussed by performing a response analysis under two scenarios that are in the absence of the reservoir and tributary.

Key Word: River geomorphology, sedimentation, 2D flow analysis, ecological regime shift

1. 序論

河川改修や流量制御は、しばしば流砂系や河川地形を介して不可逆的な河相変化をもたらし、河川環境にインパクトを与える。本研究では、加古川大堰の上流区間を対象にして、湛水開始(1987年)以降の河川地形変化を数値解析で再現し、河川の物理環境の形成機構と再生のための方策を考察した。当該区間は大堰の背水と左支川美嚢川(みのがわ)合流の影響を受け、合流部での砂州の肥大化、みお筋の右岸への偏向・固定化、水面利用域の浅水化、アユ産卵床の消失、樹林化などの諸課題が浮上している。本研究では、"iRIC-Nays2D"^{1), 2)}により河川地形の経年変化を再現し、河道整備や大堰運用などの人為インパクトが河川地形に及ぼす影響や河川環境を支配する物理要因を分析した。

これまで、井堰など横断工作物が河川地形に及ぼす影響に関しては、陸水環境の視点からも多くの研究がなさ

れてきた^{3), 4)}。河川地形・河床材料が生態系に及ぼす影響の検討⁵⁾やフラッシュ放流と置土を組み合わせた河川環境再生の取り組み⁶⁾がなされている。支川合流が河川地形に及ぼす影響に関しても、河床変動解析に基づく知見が積み重ねられている⁷⁾。

当該区間の環境再生目標を大堰建設前の原地形に設定することは非現実的であるため、本研究では、湛水環境を維持しながら自然環境と親水利用へのマイナス影響を最小化・緩和するための方策を目指す。そのため、環境修復・再生を促す流砂過程や地形形成に関する工学的知見を得ることを本研究の目的とする。河川管理者の協力を得て河床変動解析に要する水文諸量、河川横断測量、河床材料等を収集・整理し、大堰湛水後の河川地形を初期条件として出水イベントの流量・水位時系列を与え、1991~2012年の河床変動を解析した。横断測量が実施された年度を対象にして、河川地形の解析値と実測値とを比較し、本解析の再現性を確認した。次に、地形形成の支配的要因と考えられる大堰湛水や支川合流の個別影響

を感度解析によって明らかにした。

2. 対象区間と課題

研究対象は、図-1に示す一級水系加古川（流路延長：96km，流域面積：1,730km²）の河口距離12.0~18.0kmの区間である。当該区間の主な水理学的特徴としては、加古川大堰（12.0km）の湛水と左支川美囊川（流域面積：304km²）の合流（15.8km）が挙げられる。平常時の湛水区間上流端はおおよそ合流点付近である。

図-1中に示す大堰完成前（1981年）の航空写真を見ると、砂礫砂州が移動・消長するセグメント2.1の河相が維持されていた。1981年当時から加古川大堰建設とこれにともなう河道改修を経て現在に至るまで、以下のような河川地形変化が特徴的に見られ、環境や親水利用への影響が現れている（図-2(b)）。

- 美囊川合流部のやや下流側15.6kmに砂州が形成され、成長後に固定化されている。1981年に右岸寄りにあった主流部は当該砂州よりも左岸寄りに移動し、固定化している。
- 砂州形成にともない滞筋蛇行のルートが変化し、14.4kmの左岸寄りに土砂が堆積して浅水部が形成された。これに対し、右岸側の深掘れが進行した（図-2(a)）。

3. 河床変動解析の概要

流れと河床変動の解析にはiRIC-Nays2Dを用いた。解析対象は、最下流の加古川大堰から美囊川合流と17km付近の湾曲部を含む18kmまでの区間とする。解析の初期地形としては、湛水開始直後の1991年に実施された横断測量データに基づく図-3の河床高を用いた。解析対象期間は1991~2012年である。本解析に先立ち、粗度係数、河床材料、本川・支川流量、美囊川の合流点条件、上流側の助走区間長、助走計算時間などの解析諸条件を決定するために予備解析を実施した。

マンニングの粗度係数に関しては、低水路で $n=0.028$ ，高水敷で $n=0.055$ とした。低水路と高水敷を区分する標高は、低水路満杯流量を平均年最大流量とみなして求めた。具体的には大島水位観測所開設の1985年以降の平均年最大流量に対して平面二次元流解析を実施し、各地点の水位標高「低水路-高水敷」を区分する閾値とみなして、解析メッシュの標高に応じて粗度係数を $n=0.028$ ，0.055のいずれかに設定した。

次に、混合粒径と一様代表粒径（60%）に対して河床変動解析を試行した。河床変動・流速の解析結果から粒径分布の影響はきわめて小さいことを確認し、本解析では一様代表粒径 $d_{60}=0.0442\text{m}$ を採用した。

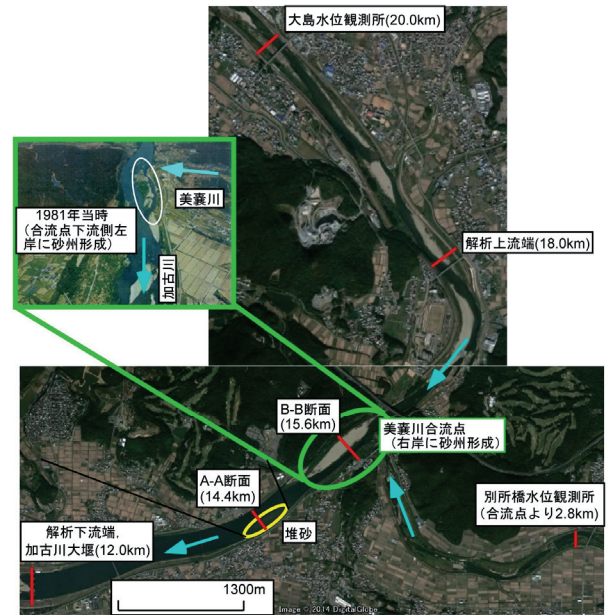
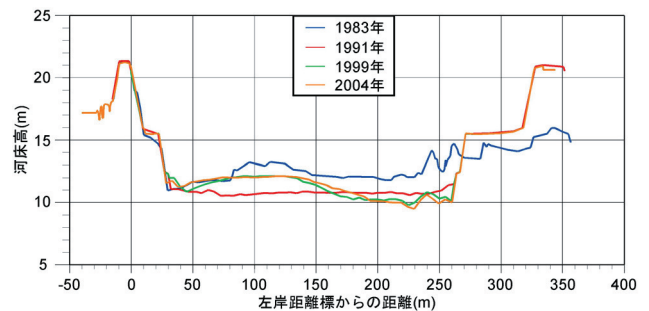
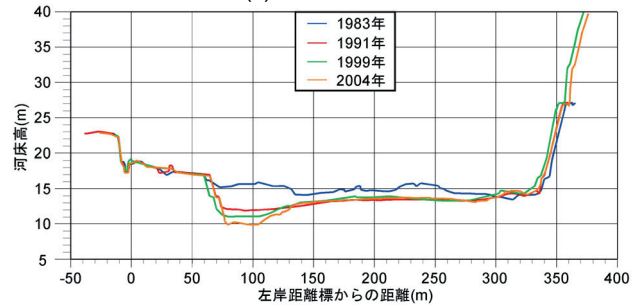


図-1 研究対象区間



(a) 14.4km地点



(b) 15.6km地点

図-2 横断面地形の経年変化

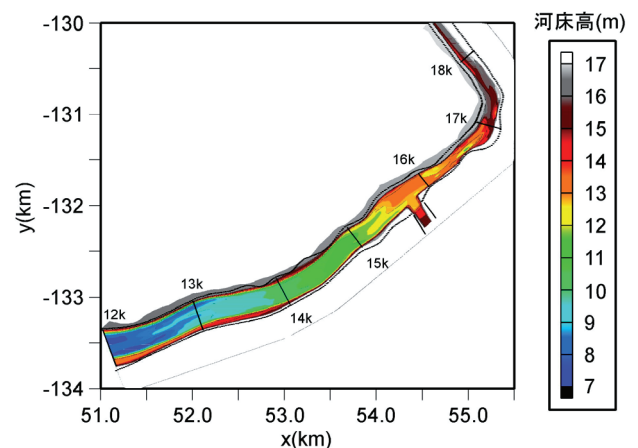


図-3 河川地形の初期条件（1991年実績）

本・支川の流量ハイドログラフは、図-1に示す大島と別所橋地点の水位観測所記録に基づいて与えた。大島地先における d_{60} の限界掃流力から移動限界相当の最深部での水深が3.1mと推算され、これ以上の水位をもたらした1991~2011年の期間における30回のイベント（本川ピーク流量： $Q_{max}=868\sim5,250\text{m}^3/\text{s}$ ）を抽出し、本・支川の流量時系列を与えた。また、解析開始時の流量実績値を2時間与えて本解析前の助走期間とした。

解析区間の上流端と同じ断面形状・河床材料の直線助走区間を解析区間の平均河床勾配で接続し、その区間における動的平衡状態の掃流砂量を土砂輸送の境界条件として与えた。加古川水系は日本一標高の低い分水嶺を有し、水系内に顕著な崩壊地がないために土砂生産量は非常に小さい。また、解析区間上流端の18.0km地点における横断地形変化は、下流側の断面に比べて非常に小さいことから、上流の助走区間における動的平衡状態の仮定は概ね妥当であると判断している。また、当該区間における交互砂州波長や安定な流況を確立するための最短区間を考慮して、助走区間長を600mとした。

左支川的美囊川にはかんがい用の井堰が連続的に設置されて流入土砂が少なく土砂供給はないと仮定した。また、合流直前に落差工が設置されている。合流点付近の美囊川の河床勾配は約1/500であり、何種類かの異なる河床勾配に対して予備解析を実施した結果、美囊川の河床勾配が加古川本川の河床地形に及ぼす影響は小さいこ

とを確認して1/500と仮定した。

4. 河川地形変化の再現

河川地形測量は1991年、1999年、2004年に実施された。1991年の河川地形を初期条件として与え、1999、2004年について解析結果と比較し、本解析の再現性を検証する。以下のように、二種類の河床変動解析を実施した。

(i) 中期解析：1991~1999年（Ⅰ期）、1999~2004年（Ⅱ期）、2004年~2012年（Ⅲ期）の三期間の個別解析。それぞれ、1991、1999、2004年の河川地形が初期条件として与えられた。

(ii) 長期解析：1991年の河川地形を初期条件とする2012年までの一貫解析。

いずれの解析についても、1999、2004年における河川地形を実績と比較する。

(1) 中期解析（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ期）

2004~2012年（Ⅲ期）の解析については、比較すべき2012年の実測値がないため、1991~1999年（Ⅰ期）と1999~2004年（Ⅱ期）の1999年と2004年について河床変動解析結果と実測値を比較する。図-4、5にⅠ、Ⅱ期の河床高コンター、図-6、7に14.4kmと15.6km地点の横断地形に関して解析結果と実測値との比較をそれぞれ示す。図-4、6を見ると1999年における14.4km地先の左岸側での堆

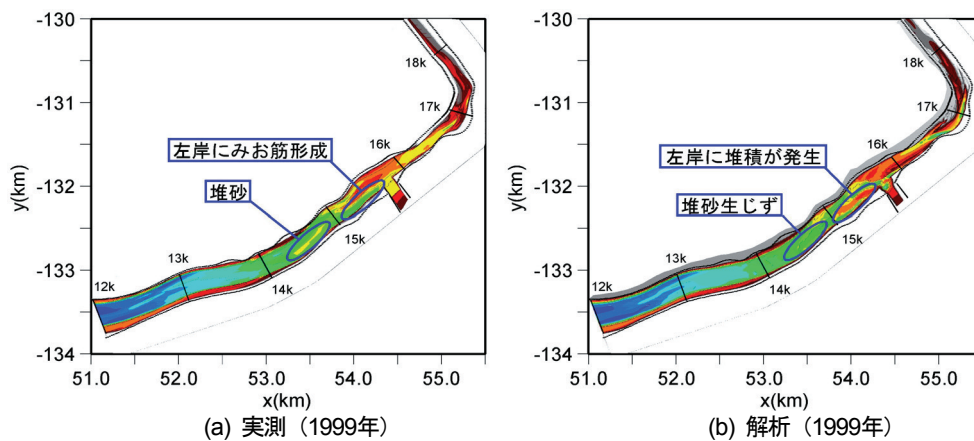


図-4 1991~1999年（Ⅰ期）の解析から得られた河床高と実測値との比較（1999年）

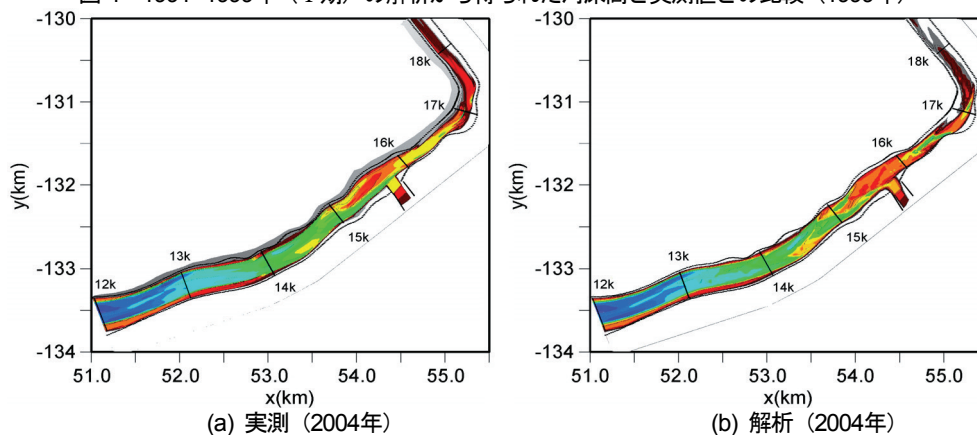


図-5 1999~2004年（Ⅱ期）の解析から得られた河床高と実測値との比較（2004年）

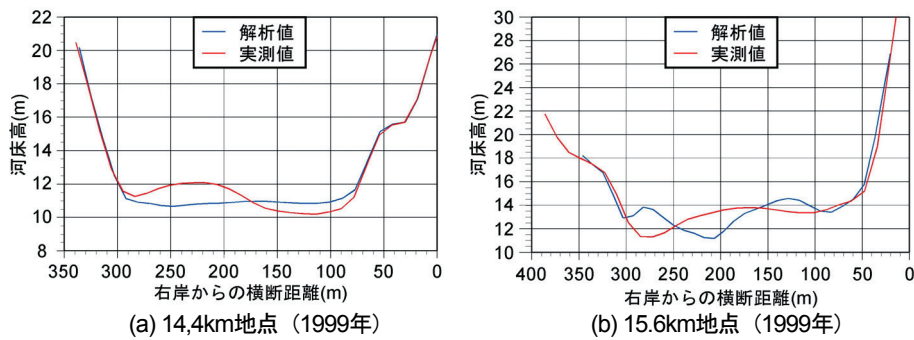


図-6 1991~1999年（Ⅰ期）の解析から得られた横断面地形の実測値との比較（1999年）

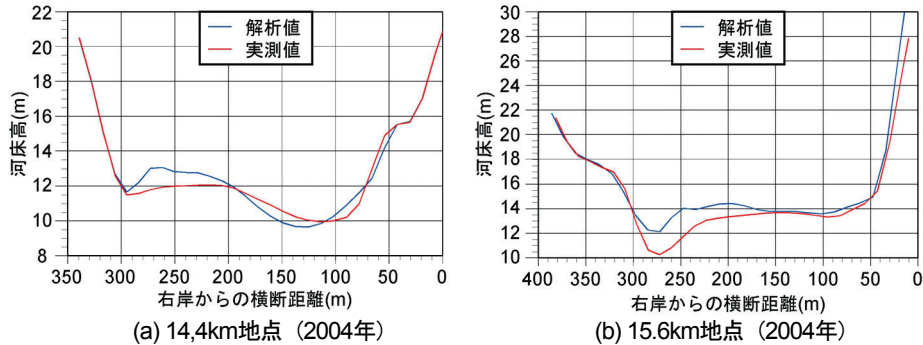


図-7 1999~2004年（Ⅱ期）の解析から得られた横断面地形の実測値との比較（2004年）

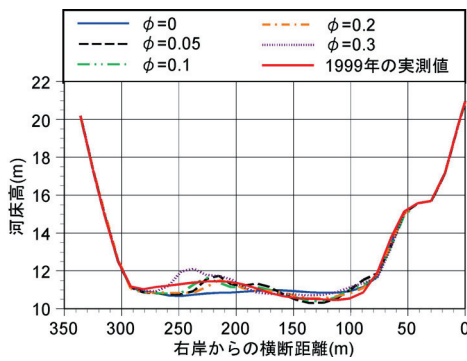


図-8 14.4kmの横断面地形（1999年）におよぼす初期擾乱 ϕ の影響

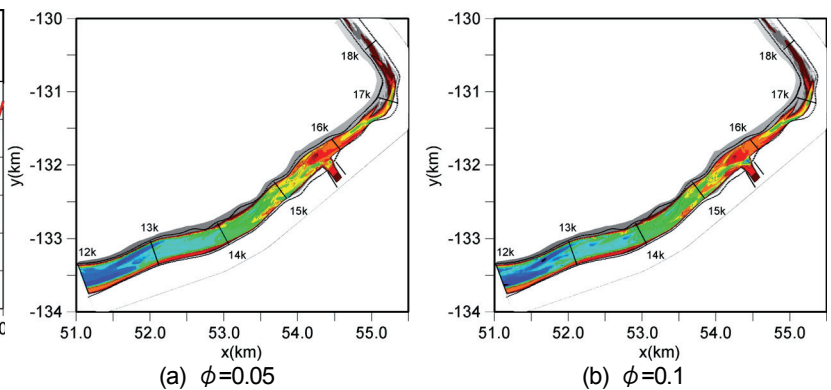


図-9 河床高（1999年）におよぼす初期擾乱 ϕ の効果

積や低水路の浸食傾向が十分に再現されていない。また、実際には、美囊川合流点から15.6km付近にかけて滞筋が形成されているのに対し、解析では逆に砂州が形成されている。以上のように、大堰湛水開始直後のⅠ期の河床変動の再現性は十分ではない。

これに対し、1999年の実測地形を初期条件として解析を再開したⅡ期の解析では、2004年の地形が比較的良好に再現されている（図-5, 7）。以上のことから、Ⅰ期における河床変化の再現性が中長期の河川地形解析の重要なポイントであることがわかる。

(2) 初期擾乱の設定

当該区間に見られる特徴的な河床変化は、14.4km地先左岸側の堆積と合流点から15.6kmにかけての滞筋・砂州の発達である。そこで、解析の再現性を向上させるために、以下のような改良を試みる。

一般に河床変動には、流砂系の力学原理に支配される決定論的過程と地形変動をもたらす確率論的擾乱が関わる。前者は、モデル方程式系で記述され、後者は、当該

区間の気象・水文擾乱の他に河床地形の不陸などの不規則要因が関与していると考えられる。そこで、14.4km断面における解析メッシュ（流下方向のメッシュ長： $\Delta x \approx 20\text{m}$ ）の河床高に1991年時点での初期擾乱を次式のように加え、1991-1999年（Ⅰ期）の河川地形変化を再度解析した。

$$z' = z_0 + (z_1 - z_0)\phi \quad (1)$$

ここで、 z' : 初期擾乱を加えた1991年の河床高、 z_0 : 1991年の河床高実測値、 z_1 : 1999年の河床高実測値、 $\phi=0 \sim 1.0$: 初期擾乱率、である。

図-8に、1999年の14.4kmにおける横断面地形（解析値）におよぼす ϕ の影響を示す。 $\phi=0$ （初期擾乱なし）は、図-6(b)の再掲である。また、図-9は $\phi=0.05, 0.1$ の場合の河床高分布（1999年）であり、前出の図-4(a)が図-9の比較対象である実測値、図-4(b)が初期擾乱なし（ $\phi=0$ ）の解析値である。 $\phi=0.3$ では14.4km左岸の堆積が過大に評価され、 $\phi=0.05$ 程度の微小擾乱が良好な再現性を発揮するようである。

以降、 $\phi=0.05$ の初期擾乱を14.4km断面と15.6km断面の

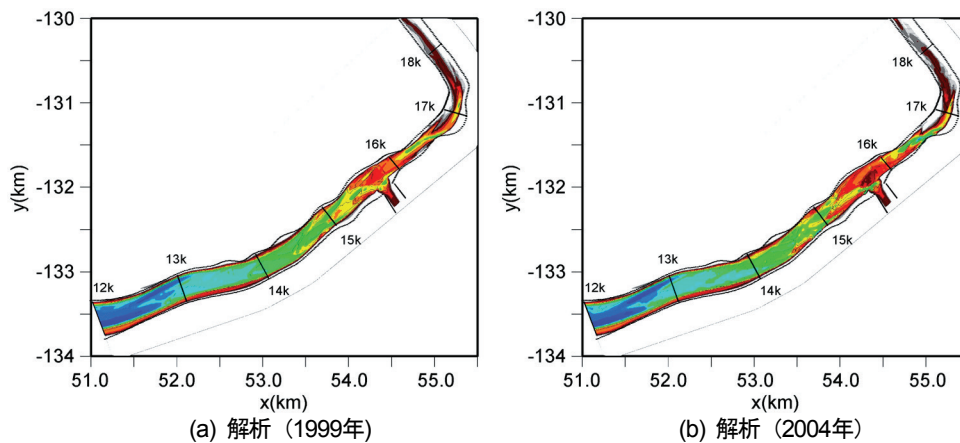


図-10 長期解析から得られた河床高分布

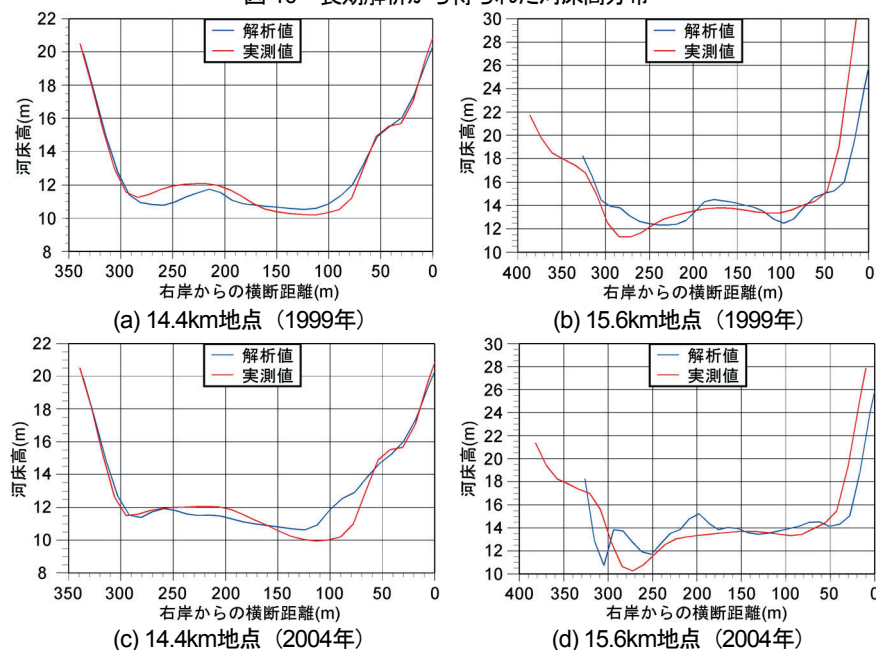


図-11 長期解析から得られた横断面地形の実測値との比較

流下方向1メッシュに与えて1991～2012年の長期解析を実施した。

(3) 長期解析 (1991～2012年)

図-10,11に長期解析 (1991～2012年) で得られた1999年と2004年の時間断面における河床高分布と横断面地形をそれぞれ示す (図-10に対応する実測値は図-4(a), 5(a)に前出)。1999年の解析結果を見ると、初期擾乱を加えることにより、14.4km, 15.6km断面ともに初期擾乱を加えない中期解析結果よりも再現性が向上している。また、2004年に関しては、1999年の実測値を初期条件とした中期解析よりも当然のことながら実測値との差は大きい。14.4km付近の堆積と15.6km付近の砂州の固定化・肥大化は再現され、当該区間の河床地形変化を長期解析で再現することは可能と判断される。

5. 大堰湛水と支川合流が河床地形に及ぼす影響

河川地形の経年変化に及ぼす大堰湛水と支川合流の影

響を個別に評価するために、それぞれの影響を仮想的に排除した感度解析を実施した。前者については、下流端水位を河床勾配相当の水面勾配となるように設定し、大堰による湛水の影響を排除した。後者については、支川的美囊川から合流する流量をゼロと仮定して影響を排除した。いずれの感度解析についても、前述のように1991～2012年一貫の長期解析を実施した。

図-12に大堰の湛水がない場合の2012年における河床高分布を示す。大堰湛水がない場合には、1981年当時の写真で確認されていたような交互砂州と滞筋の蛇行が明瞭にあらわれていることがわかる。また、レガッタなどの親水利用で障害となっている14.4km付近の堆積は、大堰湛水がない場合にも交互砂州の一角を構成しており、大堰建設の有無に関わらず堆積環境にあることがわかる。同様に、13.6km付近の右岸側にも砂州が形成され、大堰湛水がなかったとすれば、この領域にも堆積が進むと推定される。

図-13には支川合流の影響を排除した場合の河床高分布を示す。この場合には、合流点付近の右岸にみお筋が形成されており、実測値とは逆の傾向を示している。ま

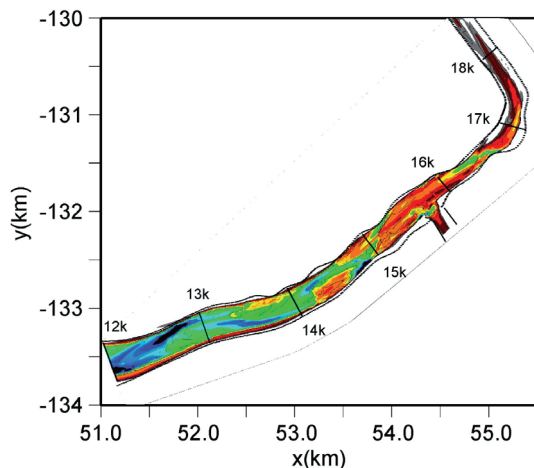


図-12 大堰湛水がない場合の河床高分布 (2012年)

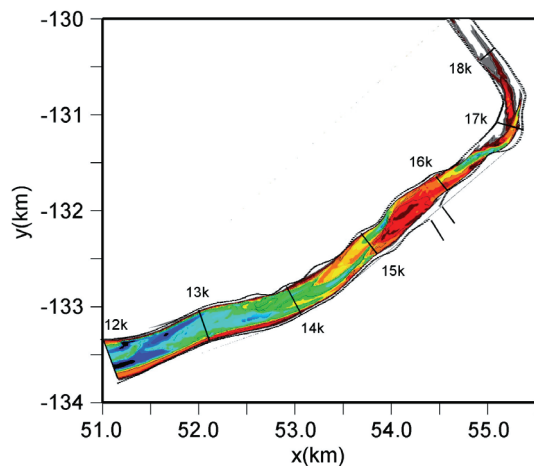


図-13 支川合流がない場合の河床高分布 (2012年)

た、大堰湛水がない場合と同様に交互砂州は形成されるものの、砂州波長はより大きい。支川を排除した場合の感度解析では大堰の湛水を考慮しており、背水によって流速が低減するため、湛水がない場合に比べ零筋の深掘れは顕著ではないことなどが原因と考えられる。

6. 結論と今後の展望

本研究では、支川合流の影響を受ける加古川大堰湛水区間を対象として、iRIC-Nays2Dを用いた河川地形の中長期的変化を解析した。当該区間における良好な自然環境を再生するためには、河川に与えられたインパクトと流れ・地形のレスポンスとの関係を定量的に評価する必要がある。インパクト因子の全組み合わせに対する河川地形の感度解析を実施することは困難であるため、本研究では、最も支配的なインパクトとして、①大堰の湛水効果と②支川合流に着目し、〔①湛水、②合流〕を個別に仮想的に排除した河床変動解析を実施した。

まず、解析対象期間を三つに分けた中期解析と、全期間一貫の長期解析を実施し、実測値との比較から解析の

再現性を検証した。その結果、河床が大きく変動する大堰湛水開始後の1991~1999年（Ⅰ期）においては、河床地形の初期条件が解析結果に大きな影響を与えることが判明した。大堰湛水のように大きなインパクトが加わる場合には、初期条件の与え方が重要である。本研究では、1999年の実測値を参考にして地形の初期擾乱を解析メッシュの一部に与え再現精度が向上することを確認したが、実測値不在の将来予測の場合には、初期擾乱の与え方が残された課題である。

次に、〔①湛水、②合流〕それぞれのインパクトが河川の流れと土砂動態におよぼす影響を定量的に評価した。その結果、二つの因子が砂州形成や蛇行特性に及ぼす個別の影響を明らかにし、現在の河川地形の形成要因を考察した。

今後、このような解析ツールを用いて、捨石水制工、堆積土砂の撤去・再配置、大堰操作方法などの様々な維持管理シナリオに対する河川地形の経年変化を予測し、維持管理の枠組みの中で河川環境の再生戦略を提示することを目指したい。

謝辞：本研究は、国土交通省姫路河川国道事務所関係者のご協力、ならびに平成23-25年(2013)度科学研究費基盤研究(B)（代表：道奥康治，課題番号：23360212）の助成の下で実施された。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，土木学会水工学論文集，第47巻，pp. 643-648, 2003.
- 2) Jang, C. and Shimizu, Y.: Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 7, pp. 565-575, 2005.
- 3) 忠津哲也・鈴木研司・内田龍彦・福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗堀深の造田について，河川技術論文集，第15巻，pp. 249-254, 2009.
- 4) 知花武佳・山下貴美子・工藤美紀男・柳澤亘：横断工作物が河川地形に及ぼす影響とそこに見られる治水・環境両面の特性，河川技術論文集，第15巻，pp. 231-236, 2009.
- 5) 角哲也・中島佳奈・竹門康弘・鈴木崇正：アユの産卵に適した河床携帯に関する研究，京都大学防災研究所年報，第54号B，pp. 719-725, 2011.
- 6) 角哲也・藤田正治：下流河川への土砂還元の現状と課題，河川技術論文集，第15巻，pp. 459-464, 2009.
- 7) 升屋繁和・清水康行・舛甚甲介：河川合流点における非定常乱流モデルを用いた河床変動計算，応用力学論文集，Vol. 9，pp. 1007-1014, 2006.

(2014. 4. 3受付)